

*République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique  
Université Abderrahmane MIRA de Bejaïa  
Faculté de Technologie  
Département de Génie  
Electrique*



## *Mémoire de fin d'études*

*En vue d'obtention du diplôme de Master :  
Filière : Energies Renouvelables  
Option : Energies Renouvelables en Electrotechnique*

### **Thème :**

Etude et commande d'une éolienne à base  
d'une machine synchrone à aimants  
permanents

#### **Présenté par :**

❖ Mr : GHEZZOU Massinissa

#### **Membres de jury:**

- ❖ Mr. B. Fella
- ❖ Mr.A.ACHOUR
- ❖ Mr .S.TARAFT

**Promoteur  
Président de jury  
Examineur**

***Promotion: 2020/2021***

# Remerciements

*Je remercie en premier lieu mon Dieu le tout puissant; de nous avoir donné le courage et la patience durant toutes les années d'études,*

*Je tiens à remercier très vivement mon promoteur Monsieur **B. Fella**, enseignant à l'université de Bejaïa, pour avoir suivi mon travail, pour la confiance et l'intérêt qu'il a témoigné tout au long de sa réalisation et pour sa disponibilité aussi.*

*A Mr **S. TARAFI** pour sa disponibilité ainsi que nous avoir fait bénéficier de sa compétence scientifique et pour son aide très bénéfique pendant la durée de ce travail.*

*Je remercie les membres de jury pour avoir examiné ce travail.*

*Je tiens aussi à remercier tous les membres de ma famille pour leurs soutiens et leurs encouragements.*

*Enfin, je remercie tous mes très chers amis.*

*Et toute personne ayant apporté un plus ; de près ou de loin.*

# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail :*

*Aux êtres les plus chers à mon cœur, **Ma mère** et **Mon père**, et à la mémoire de **Ma très chère grande -mère** qui restera toujours dans mon cœur ; m'ont beaucoup soutenu durant mon cursus d'étude et dans ma vie et à qui je serai éternellement reconnaissant,*

*A Mon cher frère **Racim**, et à Ma chère sœur **Anyas**,*

*A toute la famille **GHEZZOU ET FERKANE**,*

*A mon encadreur Monsieur **Fella Bouassam** pour sa disponibilité et ses nombreux conseils,*

*A Monsieur **TARAFI** pour sa disponibilité et son aide généreuse,*

*A mes meilleurs amis, **Baki, Toufik, IDIR, Sahib** et mes amis du cartier **FC 50**, et aussi *l'équipe du virage,**

*A **Kimou, Katouche, Roma, Sonia, zaza et lynia**,*

*A mes cousins **TAKFARINAS** et **MASSY**,*

*À mes amis qui sont à l'étranger: **Slimane, Zinedine, Samy et Yacine**, à tous mes amis, et à tous ceux qui m'ont encouragé et soutenu.*

*A mes chers amis et collègues avec qui j'ai passé des moments inoubliables, qui m'ont aidé et soutenu durant mon parcours.*

# *Liste des Symboles et Notations*

---

## *Liste des Symboles et Notations*

### *Symboles*

$C_p$  : Coefficient de puissance aérodynamique.

$\rho$  : Masse volumique de l'air.

$S$  : Surface active de l'éolienne.

$V_v$  : Vitesse du vent.

$\Omega$  : Vitesse angulaire de rotation.

$\lambda$  : Rapport de la vitesse périphérique en bout de pale et la vitesse du vent.

$E_c$  : Energie cinétique.

$R_t$  : Rayon de la surface balayée en m.

$\Omega_t$  : Vitesse de rotation avant multiplicateur en rad/s.

$T_t$  : Couple de la turbine éolienne.

$A$  : Valeur moyenne de la vitesse du vent.

$ak$  : Amplitude de l'harmonique de l'ordre  $K$ .

$wk$  : Pulsation de l'harmonique de l'ordre  $K$ .

$i$  : Rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent.

$J$  : L'inertie totale ramenée sur l'arbre de la génératrice.

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

$C_g$  : Couple issu du multiplicateur.

$C_f$  : Couple résistant dû aux frottements.

$f$  : Coefficient de frottement total du couplage mécanique.

$K_p$  : Coefficient proportionnel du régulateur.

$K_i$  : Le gain de l'intégrateur.

$\xi_n$  : facteur d'amortissement.

$\omega_n$  : pulsation propre.

$\psi_f$  : flux inducteur.

## *Liste des Symboles et Notations*

---

$L_d$  : Inductance statorique sur l'axe d.

$L_q$  : Inductance statorique sur l'axe q.

$i_d$  : courant statorique selon l'axe d.

$i_q$  : courant statorique selon l'axe q.

$P$  : nombre de paires de pôles.

$e_d$  : f.e.m de la machine sur l'axe d.

$e_q$  : f.e.m de la machine sur l'axe q.

$T_e$  : Constante de temps électrique.

$(\theta)$  : Transformation de Park.

$(\theta)^{-1}$  : Transformation inverse de Park.

$G_0$  : Gain statique.

$\omega_0$  : La fréquence angulaire (rad /s).

$i_a, i_b, i_c$  : Courants des phases statorique.

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

$S_1, S_2, S_3$ : Etat de commutation des interrupteurs du redresseur MLI.

$P$  : Nombre de paire de pole.

$i_{dc}$  : Courant redressée [A].

$V_{dc}$  : Tension redressé [V].

$V_{dref}, V_{qref}$  : Tensions de référence [V].

$i_{dref}, i_{qref}$  : Courants de référence [A].

$\Omega_{mec}$  : Vitesse de rotation de la machine [rad/s].

$\omega$  : Pulsation de fréquence rotorique [rad/s].

$K_i, K_p$  : Actions proportionnelle et intégrale.

$T_d$  : Constante de temps électrique relative à l'axe d.

$T_q$ : Constante de temps électrique relative à l'axe q.

MSAP : Machine synchrone à aimants permanents.

MPPT: Max Power Point Tracking.

# Listes des figures

---

## Listes des figures

### ➤ Chapitre 1

<b>Figure 1.1 : la naissance du vent.....</b>	<b>4</b>
<b>Figure 1.2 : Principaux organes du système de conversion éolienne.....</b>	<b>5</b>
<b>Figure 1.3 : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10 m du sol (m/s) en Algérie.....</b>	<b>6</b>
<b>Figure 1.4 : Différentes technologie d'éoliennes à axe vertical : a) Turbine Darrieus en H b) Turbine Darrieus, c) Turbine Savonius.....</b>	<b>7</b>
<b>Figure 1.5 : Différentes technologie d'éoliennes à axe horizontale : a) Eolienne multipale b) Eolienne horizontale bipale c) Eolienne horizontale tripale.....</b>	<b>8</b>
<b>Figure 1.6 : Principaux composants d'une éolienne.....</b>	<b>9</b>
<b>Figure 1.7 : éléments d'une nacelle.....</b>	<b>10</b>
<b>Figure 1.8 : Principe de la conversion de l'énergie éolienne.....</b>	<b>13</b>
<b>Figure 1.9 : vitesse de rotation de générateur (tr/min).....</b>	<b>14</b>
<b>Figure 1.10 : éolienne à vitesse fixe.....</b>	<b>15</b>
<b>Figure 1.11: Eoliennes fonctionnant à vitesse variable.....</b>	<b>16</b>
<b>Figure 1.12: Optimisation de l'énergie extraite grâce à la variation de la vitesse de l'éolienne</b>	
<b>Figure 1.13: Eolienne à vitesse fixe basé sur la machine asynchrone à cage.....</b>	<b>18</b>
<b>Figure 1.14: Eolienne à vitesse variable basé sur la machine asynchrone à cage.....</b>	<b>18</b>
<b>Figure 1.15 : Eolienne basée sur la machine asynchrone à double alimentation.....</b>	<b>19</b>

### ➤ Chapitre 2

<b>Figure. 2.1 : Colonne d'air animée d'une vitesse <math>V</math>.....</b>	<b>23</b>
<b>Figure 2.2 : Tube de courant autour d'une éolienne.....</b>	<b>24</b>
<b>Figure 2.3 : Différents parties mécaniques de l'éolienne.....</b>	<b>26</b>
<b>Figure 2.4 : Eléments caractéristiques d'une pale.....</b>	<b>26</b>
<b>Figure 2.5 : Flux d'air sur un profil de pale.....</b>	<b>27</b>
<b>Figure 2.6 : Entrées-sorties du modèle de la turbine.....</b>	<b>27</b>
<b>Figure 2.7 : structure du générateur éolien étudié.....</b>	<b>30</b>

## Listes des figures

---

<b>Figure 2.8</b> : Modélisation de l'arbre générateur.....	31
<b>Figure 2.9</b> : Structure de la génératrice synchrone dans le repère triphasé.....	32
<b>Figure 2.10</b> : Les enroulements de la génératrice synchrone suivant le système d'axe (dq).32	
<b>Figure 2.11</b> : Le schéma global de la chaine de conversion de l'énergie éolienne.....	35
<b>Figure 2.12</b> : Schéma électrique du bus continu.....	37
<b>➤ Chapitre 3</b>	
<b>Figure 3.1</b> : Diagramme de phase de la MSAP dans le référentiel (d,q) lié au champ tournant	
<b>Figure 3.2</b> : Principe de la commande vectorielle.....	42
<b>Figure 3.3</b> : Boucle de régulation du courant $i_d$ .....	43
<b>Figure 3.4</b> : Boucle de régulation du courant $i_q$ .....	44
<b>Figure 3.5</b> : Le schéma global d'un onduleur à MLI.....	45
<b>Figure 3.6</b> : profil de vent.....	47
<b>Figure 3.7</b> : couple résistant et électromagnétique.....	47
<b>Figure 3.8</b> : Vitesse de rotation de la MSAP et sa référence.....	48
<b>Figure 3.9</b> : vitesse mécanique.....	48
<b>Figure 3.10</b> :Puissance de la turbine estimée 2500 WATT.....	49
<b>Figure 3.11</b> : allures des courants ( $i_a, i_b, i_c$ ).....	50
<b>Figure 3.12</b> : allures des courants ( $I_d, i_q$ ).....	50
<b>Figure 3.13</b> : allures des tensions ( $v_a, v_b, v_c$ ).....	51
<b>Figure 3.14</b> : Courant mesurer $i_d$ et référence $i_{dref}$ .....	51
<b>Figure 3.15</b> : Courant mesurer $i_q$ et référence $i_{qref}$ .....	52

# Table des matières

<i>I. Introduction Générale.....</i>	<i>1</i>
<b>Chapitre I : Généralités sur l'énergie éolienne</b>	
<i>1. Introduction.....</i>	<i>3</i>
<i>1.1 Généralités sur l'énergie éolienne .....</i>	<i>3</i>
<i>1.2.1. Le vent .....</i>	<i>3</i>
<i>1.2.2 Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne.....</i>	<i>4</i>
<i>1.2.3 Définition de l'énergie éolienne.....</i>	<i>5</i>
<i>1.2.4 L'éolienne en Algérie.....</i>	<i>6</i>
<i>1.3 Présentation des différentes technologies des systèmes éoliens.....</i>	<i>6</i>
<i>1.3.1 Aérogénérateurs à Axe Vertical.....</i>	<i>7</i>
<i>1.3.2 Aérogénérateurs à Axe Horizontal.....</i>	<i>7</i>
<i>1.3.3 Architecture d'une éolienne à axe horizontal.....</i>	<i>8</i>
<i>1.3.4 Applications des éoliennes .....</i>	<i>11</i>
<i>1.4 Avantages et inconvénients de l'Energie Eolienne.....</i>	<i>11</i>
<i>1.5 Principe de fonctionnement d'une éolienne.....</i>	<i>13</i>
<i>1.6 Conversion en énergie mécanique.....</i>	<i>14</i>
<i>1.7 Contraintes mécaniques associées à la conversion de l'énergie éolienne.....</i>	<i>14</i>
<i>1.8 Modes d'exploitation de l'énergie éolienne.....</i>	<i>15</i>
<i>1.8.1. Les systèmes à vitesse fixe.....</i>	<i>15</i>
<i>1.8.2. Les systèmes à vitesse variable.....</i>	<i>16</i>
<i>1.9 Optimisation de l'énergie extraite.....</i>	<i>16</i>
<i>1.10 Différents systèmes utilisés pour l'exploitation de l'énergie éolienne.....</i>	<i>17</i>
<i>1.10.1 Génératrice asynchrone à cage.....</i>	<i>17</i>
<i>1.10.2 Machine asynchrone à double alimentation (MADA).....</i>	<i>18</i>
<i>1.10.3 Machines synchrones.....</i>	<i>19</i>

a) <i>Machine synchrone à rotor bobiné</i> .....	20
b) <i>Machine synchrone à aimants permanents (MSAP)</i> .....	20
<b>1.11 Conclusion</b> .....	<b>21</b>
 <b>Chapitre II : Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne</b>	
<b>II.1 Introduction</b> .....	<b>22</b>
<b>II.2 Modélisation du Système de Conversion d'Energie Eolienne</b> .....	<b>22</b>
<b>II.2.1 Modélisation du vent</b> .....	<b>22</b>
<b>II.2.2 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique</b> .....	<b>23</b>
<b>II.2.2.1 Loi de Betz</b> .....	<b>23</b>
<b>II.2.2.2 Coefficient de puissance <math>C_p</math></b> .....	<b>24</b>
<b>II.3 Modélisation de la partie mécanique d'une éolienne</b> .....	<b>25</b>
<b>II.3.1. Hypothèses simplificatrices Pour la modélisation mécanique de la turbine</b> .....	<b>25</b>
<b>II.3.2 Action du vent sur les pales</b> .....	<b>26</b>
<b>II.3.3 La turbine</b> .....	<b>27</b>
<b>II.3.4 Maximisation de la puissance (MPPT)</b> .....	<b>28</b>
a) <i>MPPT avec asservissement de vitesse</i> .....	28
b) <i>MPPT sans asservissement de vitesse</i> .....	29
<b>II.3.5 Arbre de transmission</b> .....	<b>30</b>
<b>II.4 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents</b> .....	<b>31</b>
<b>II.5 Modélisation d'interface d'électronique de puissance</b> .....	<b>34</b>
<b>II.5.1 Modélisation des convertisseurs statiques</b> .....	<b>34</b>
<b>II.5.2 Modélisation du redresseur</b> .....	<b>35</b>
<b>II.5.3 La commande M.L.I</b> .....	<b>35</b>
<b>II.5.4. Modèle du redresseur MLI</b> .....	<b>36</b>

II.5.5. Modélisation du bus continu .....	37
II.6 Conclusion.....	38
<b>Chapitre III : commande et simulation de la chaine de conversion</b>	
III.1 Introduction .....	39
III.2 Principe de la commande vectorielle de la MSAP .....	39
III.3 Commande vectorielle de la (MSAP) .....	40
III.4 Commande vectorielle de la (MSAP) alimentée en tension .....	41
III.5 Stratégie de la commande vectorielle de la MSAP .....	41
III. 6. Commande vectorielle avec découplage de la régulation des courants par f compensation.....	42
III.7. Calcul du régulateur PI .....	43
III.8 Régulation de la tension.....	44
III. 9 Avantages et inconvénients de la commande vectorielle .....	45
III.9.1 Avantages de la commande vectorielle .....	45
III.9.2 Inconvénients de la commande vectorielle .....	45
III.10 Modélisation de l'onduleur .....	45
III.11 Résultats de simulation et interprétations.....	46
IV .Conclusion.....	54
IV. Conclusion générale.....	55



### ***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 18e siècle, puis du pétrole au milieu du 20e siècle[1].

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] .

L'éolienne est basée sur le principe des moulins à vent. Le vent fait tourner les pales qui sont elles-mêmes couplées à un rotor et à une génératrice. Lorsque le vent est suffisamment fort, les pales tournent et entraînent la génératrice qui produit de l'électricité.

L'énergie éolienne est aujourd'hui l'énergie propre la moins coûteuse à produire, ce qui explique l'engouement fort pour cette technologie. Les recherches en cours pourraient lui laisser pendant encore de nombreuses années cette confortable avancée.

Dans ce travail, nous allons nous intéresser à l'étude d'une chaîne complète de conversion d'énergie éolienne basée sur une machine synchrone à aimants permanents[1].

Nous allons également étudier des stratégies de commande permettant l'optimisation de l'énergie extraite par la turbine ainsi que des contrôleurs permettant de commander la puissance électrique fournie au réseau.

Nous allons entamer ce travail avec un premier chapitre qui traitera des généralités sur l'énergie éolienne, à commencer par quelques statistiques sur la production mondiale et la production des pays considérés comme de grands producteurs, sans oublier de parler du cas Algérien. Puis nous allons parler des différents types d'éoliennes existant en abordant leurs différentes structures, leurs fonctionnements, leurs qualités et éventuellement leurs défauts. Ensuite, nous allons donner quelques notions théoriques sur les calculs de base qui permettent de contrôler le fonctionnement de notre système par la suite. Nous allons également citer quelques structures composant la turbine éolienne associée à sa génératrice et ces annexes. En fin, nous allons particulièrement nous intéresser à l'utilisation de la machine synchrone à aimants permanents qui est l'objet de notre étude, et à toute la structure associée.

Dans le chapitre deux, nous allons commencer par la modélisation du vent qui est la source principale d'énergie. Ce qui nous permettra d'identifier le profil du vent qui sera utilisé dans le reste du travail. Nous allons ensuite modéliser la turbine éolienne sur laquelle se base notre étude. Cette modélisation va permettre de commander la turbine de sorte à ce que le coefficient de puissance soit toujours optimal quelques soient les variations du vent.

## *Introduction générale*

---

Après avoir modélisé la turbine vient le tour de la génératrice à aimants permanents, Nous allons donner quelques généralités sur la machine synchrone et notamment la machine synchrone à aimants permanents. Nous allons ensuite donner des exemples sur des machines différentes du point de vue structurel. Puis nous allons passer aux équations mathématiques et aux calculs permettant de modéliser la machine de notre choix.

Le troisième chapitre est consacré à la modélisation de la génératrice et sa commande vectorielle, et on terminera ce chapitre par une interprétation des résultats de simulation obtenu lors de la simulation à l'aide de logiciel MATLAB/SIMULINK.

Enfin, ce mémoire se clôture par une conclusion générale suivi des perspectives envisagées à la lumière de ce mémoire.

## **I. Introduction**

Ces dernières années, l'intérêt d'utilisation d'énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne.

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 ou 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 [1].

L'objectif de ce premier chapitre et donc de présenter une définition sur l'énergie renouvelable avec les différents types. Ensuite nous décrivons les différents types d'aérogénérateurs, nous décrivons ensuite les avantages et les inconvénients et aussi leurs applications.

### **1.1 Généralités sur l'énergie éolienne**

#### ***1.1.1. Le vent***

Le vent naît sous l'effet des différences de températures et de pression. Le grand responsable de ce phénomène est le soleil (figure 1.1.A), Il chauffe les mers et les continents mais pas au même rythme (Figure.1.1.B). Une fois réchauffés, ces derniers chauffent à leur tour les masses d'air qui les surplombent. L'air augmente de volume lorsqu'il est chauffé (Figure.1.1.C), ce qui crée un déplacement des particules de l'air (Figure.1.1.D) et c'est en capturant leur énergie cinétique que les éoliennes se mettent à fonctionner[1].

La figure (1.1) résume la naissance du vent



Figure. 1.1. A : Réchauffement de la terre par le soleil.

Figure. 1.1. B : Réchauffement des mers.



Figure. 1.1. C : L'air Augmentation du volume d'air sous l'effet du réchauffement des mers.

Figure. 1.1. D : déplacement des particules de l'air.

### *Figure 1.1 : la naissance du vent*

#### *1.2.2 Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne*

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau. Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2 000 ans avant J. C environ [2].

Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone, avait conçu tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie utilisant la puissance du vent. La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J.-C. En Europe, les premiers moulins à vent ont fait leur apparition au début du Moyen Age. Utilisés tout d'abord pour moulinier les graines, d'où leur nom de " moulins ", ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés. Dès le XIV siècle, les moulins à vent sont visibles partout en Europe et deviennent la principale source d'énergie. Seulement en Hollande et Danemark, vers le milieu du XIXème siècle, le nombre des moulins est estimé respectivement à plus de 30000 et dans toute l'Europe à 200000. L'arrivée de la machine à vapeur, les moulins à vent commencent leur disparition progressive [3].

L'arrivée de l'électricité donne l'idée à **Poul** La Cour en 1891 d'associer à une turbine éolienne a une génératrice. Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pût être « redécouverte »

et de nouveau utilisée (dans les années 40 au Danemark 1300 éoliennes). Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux Etats-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées. Dans les années 60, fonctionnait dans le monde environ 1 million d'aérogénérateurs. La crise pétrolière de 1973 a relancé de nouveau la recherche et les réalisations éoliennes dans le monde [4].

### 1.2.3 Définition de l'énergie éolienne

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

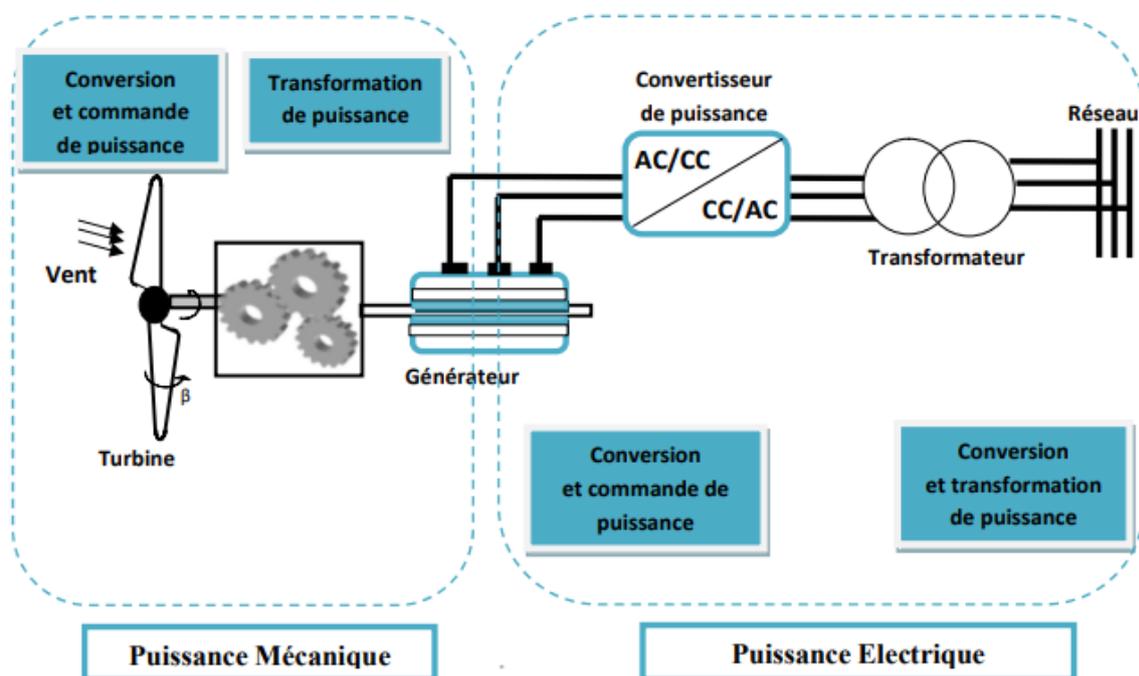


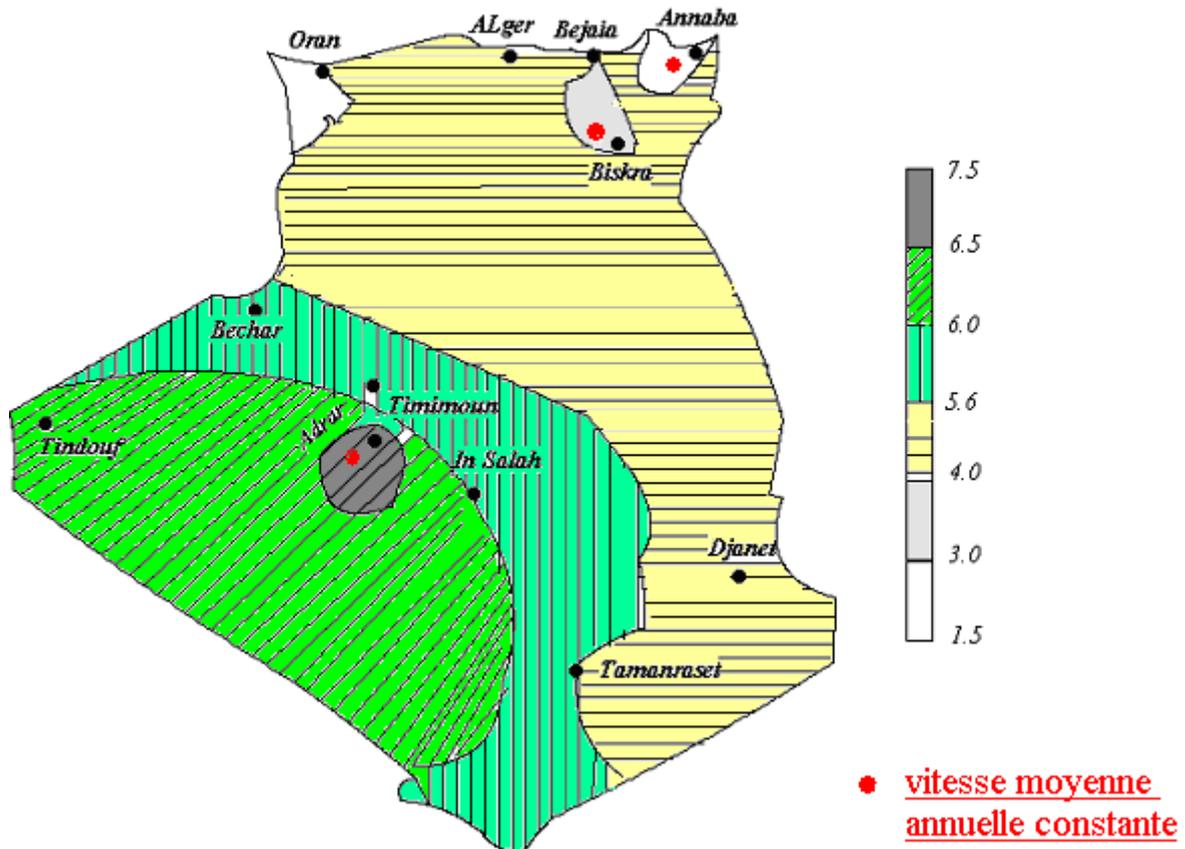
Figure 1.2 : Principaux organes du système de conversion éolienne

L'aérogénérateur est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique [5].

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [6].

### 1.2.4 L'éolienne en Algérie

L'Algérie présente un potentiel éolien considérable qui peut être exploité pour la production d'énergie électrique, surtout dans le sud où les vitesses de vents sont élevées et peuvent dépasser 4m/s (6m/s dans la région de Tindouf), et jusqu'à 7 m/s dans la région d'Adrar [7]



**Figure 1.3 :** Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10 m du sol (m/s) en Algérie

Les ressources énergétiques de l'Algérie ont déjà été estimées par le CDER depuis les années 90 à travers la production des atlas de la vitesse du vent et du potentiel énergétique éolien disponible en Algérie.

Ceci a permis l'identification de huit zones ventées susceptibles de recevoir des installations éoliennes[7].

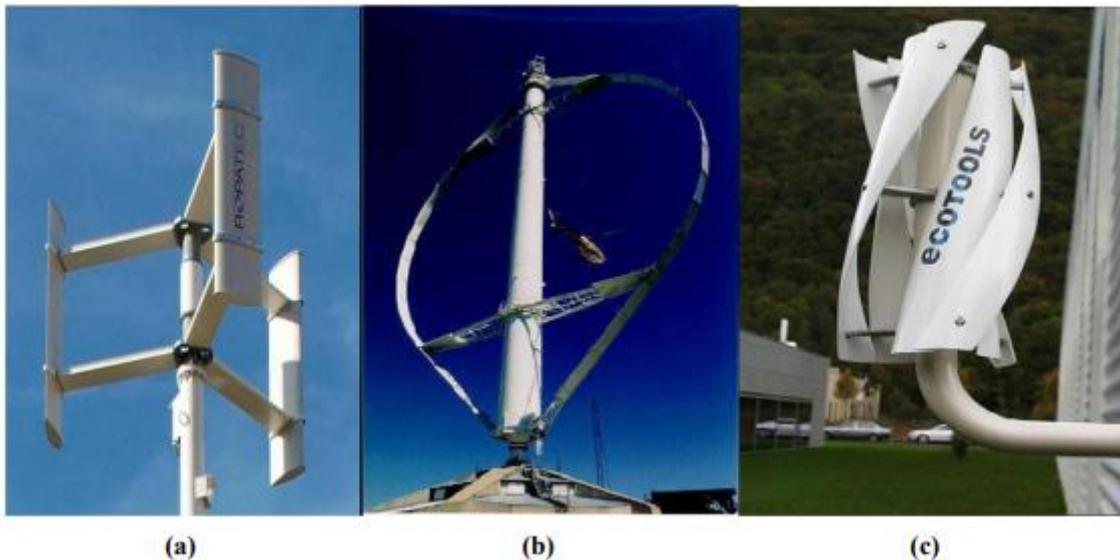
- deux zones sur le littoral.
- trois zones sur les hauts plateaux.
- et quatre zones en sites sahariens.

### 1.3 Présentation des différentes technologies des systèmes éoliens :

Du point de vue conception, les éoliennes peuvent être classées en deux catégories selon l'orientation de leur axe de rotation par rapport à la direction du vent. On distingue : les éoliennes à axe vertical, et les éoliennes à axe horizontal [8].

### 1.3.1 Aérogénérateurs à Axe Vertical

L'axe de rotation de ces turbines est vertical par rapport au sol et perpendiculaire à la direction du vent, elles sont les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique. Ce type de turbine peut recevoir le vent de n'importe quelle direction, ce qui rend inutile tout dispositif d'orientation. Le générateur et la boîte d'engrenages sont disposés au niveau du sol, ce qui est plus simple et donc économique [9].



**Figure 1. 4 :** Différentes technologie d'éoliennes à axe vertical : a) Turbine Darrieus en H b) Turbine Darrieus, c) Turbine Savonius

#### A. les avantages

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien [10].

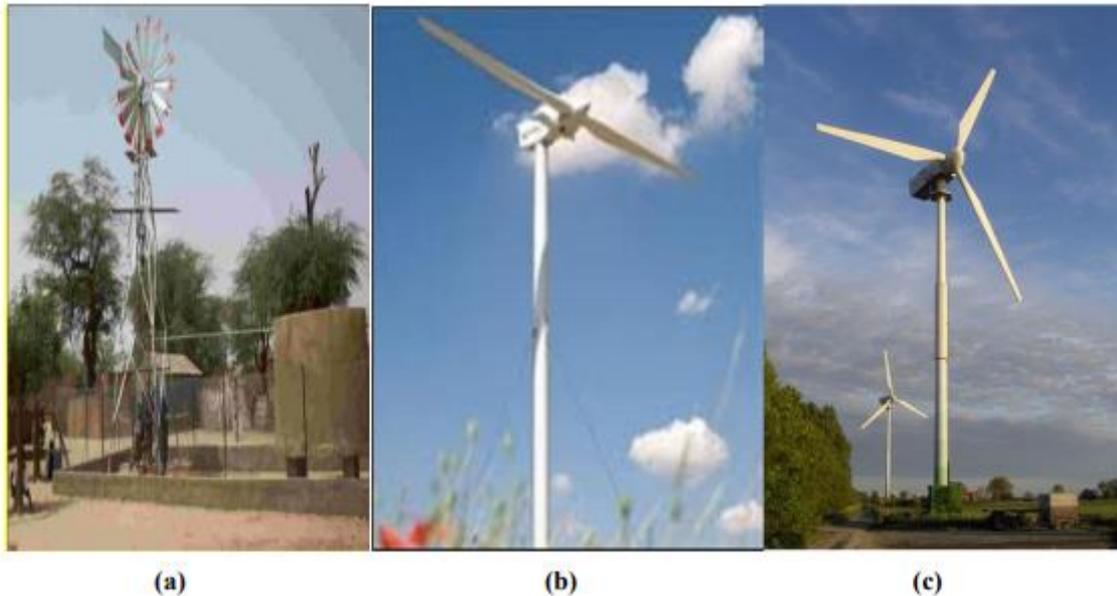
#### B.les inconvénients

- Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief
- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour [10].

### 1.3.2 Aérogénérateurs à Axe Horizontal

L'éolienne se compose de 3 pales (en général) portées par un rotor et installées au sommet d'un mât vertical qui doit être le plus haut possible pour bénéficier du maximum de l'énergie cinétique du vent et d'éviter les perturbations près du sol. Cet ensemble est fixé par une

nacelle qui regroupe les éléments mécaniques permettant de coupler la génératrice électrique à l'arbre de l'éolienne. Un moteur électrique permet d'orienter la partie supérieure afin qu'elle soit toujours face au vent. Les pales permettent de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique [9]



**Figure 1.5 :** Différentes technologies d'éoliennes à axe horizontale : a) Eolienne multipale b) Eolienne horizontale bipale c) Eolienne horizontale tripale

#### A. Les avantages

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage [10]

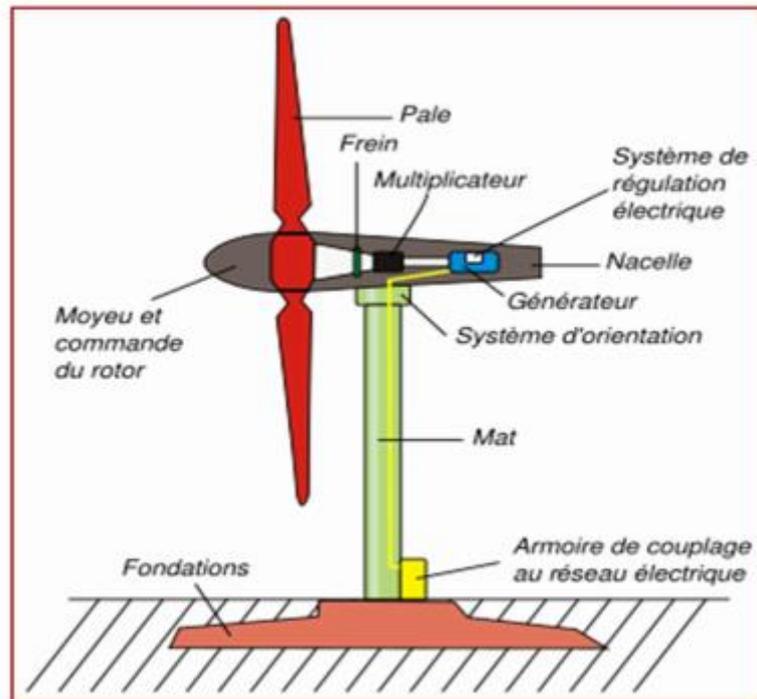
#### B. Les inconvénients

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

Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Cependant, les structures à axe vertical sont encore utilisées pour la production d'électricité dans les zones isolées. Elles sont de faible puissance destinées à des utilisations permanentes comme la charge des batteries par exemple [10].

### 1.3.3 Architecture d'une éolienne à axe horizontal :

On peut considérer trois composants essentiels dans une éolienne, le rotor, la nacelle et la tour [11].



*Figure 1.6 : Principaux composants d'une éolienne*

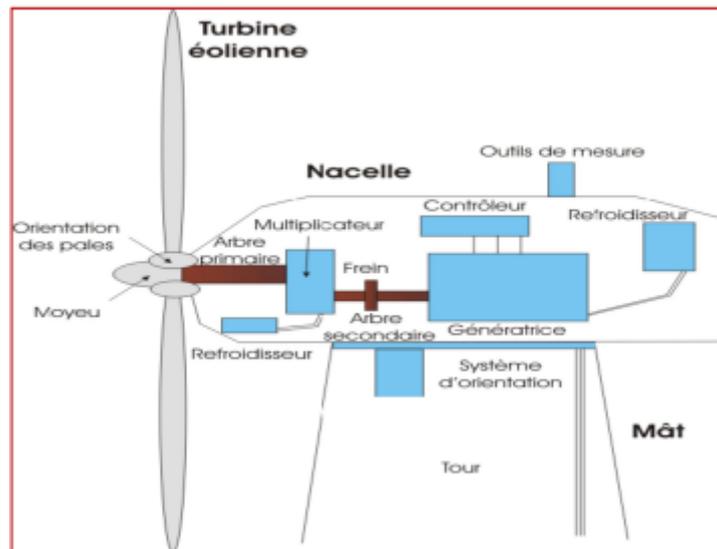
#### ❖ Rotor

C'est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le rotor est un ensemble constitué de pales et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu.

#### ❖ Nacelle

Son rôle est d'abriter l'installation de génération de l'énergie électrique ainsi que ses périphériques. Différentes configurations peuvent être rencontrées suivant le type de la machine.

La figure (1.7) présente une coupe d'une nacelle avec ses différents composants :



*Figure 1.7 : éléments d'une nacelle*

- le multiplicateur de vitesse : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique. En effet, la faible vitesse de rotation de l'éolienne ne permettrait pas de générer du courant électrique dans de bonnes conditions avec les générateurs de courant classiques.
- L'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance [12].
- La génératrice : Différents types de génératrices peuvent être rencontrés.
- Un contrôleur électronique chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble rotor, nacelle face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie et réduire les efforts instationnaires sur l'installation. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle. Enfin, le contrôleur assure également la gestion des différentes pannes éventuelles pouvant survenir
- Divers dispositifs de refroidissement (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau, ou d'huile
- Le dispositif d'orientation de la nacelle : Il permet la rotation de la nacelle à l'extrémité supérieure de la tour, autour de l'axe vertical. L'orientation est généralement assurée par des moteurs électriques, par l'intermédiaire d'une couronne dentée. De nombreuses éoliennes comportent un système de blocage mécanique de la position de la nacelle suivant une orientation donnée ; cela évite de solliciter constamment les moteurs et permet aussi de bloquer l'éolienne durant les opérations de maintenance [13]

**❖ Tour**

Son rôle est d'une part de supporter l'ensemble rotor, nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi le captage de l'énergie. Certains constructeurs proposent ainsi différentes hauteurs de tour pour un même ensemble (rotor, nacelle) de manière à s'adapter au mieux aux différents sites d'implantation [13]

**1.3.4 Applications des éoliennes :**

L'intérêt d'une éolienne se justifie par la possibilité qu'elle apporte de récupérer l'énergie cinétique présente dans le vent. Cette énergie est transformée en énergie mécanique de rotation (tenant compte bien entendu du rendement de la machine). Cette énergie mécanique peut être exploitée principalement de deux manières :

- Soit directement pour entraîner par exemple une pompe de relevage d'eau ;
- Soit pour entraîner une génératrice électrique. Dans le cas de production d'énergie électrique, on peut distinguer deux types de configuration :
  - L'énergie est stockée dans des accumulateurs en vue de son utilisation ultérieure ;
  - L'énergie est utilisée directement par injection sur un réseau de distribution.

On constate ainsi les applications électriques de l'énergie éolienne, à savoir d'une part la complémentarité avec les moyens traditionnels de production (centrales thermiques classiques ou nucléaires, barrages...) pour des régions disposant d'une infrastructure existante et d'autre part la possibilité de production sur des sites non raccordés à un réseau de distribution traditionnel. Il est particulièrement intéressant de souligner les possibilités offertes par l'énergie éolienne en ce qui concerne le désenclavement de régions peu urbanisées et ses applications dans les pays en voie de développement (alimentation d'unités de désalinisation, cogénération avec des groupes diesel, des panneaux photovoltaïques...)[14].

**1.4 Avantages et inconvénients de l'Energie Eolienne****A. Les avantages**

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

- ✚ La concentration du CO<sub>2</sub> est augmenté de 25% depuis l'ère préindustrielle et on augure qu'elle doublera pour 2050. Ceci a déjà provoqué une augmentation de la température de 0,3 à 0,6°C depuis 1900 et les scientifiques prévoient que la température moyenne augmentera de 1 à 3,5°C d'ici l'an 2100, ce qui constituerait le taux de réchauffement le plus grand des 10000 dernières années. Toutes les conséquences de ce réchauffement ne sont pas prévisibles, mais ils ont par exemple annoncé qu'il provoquera une augmentation de niveau de la mer de 15 à 95 cm d'ici l'an 2100.

L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas d'émission de CO<sub>2</sub> :

- ✚ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier ;
- ✚ L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie de risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs ;
- ✚ Les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires ;
- ✚ Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.

L'énergie éolienne a d'autre part des atouts économiques certains :

- ✚ C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi, les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut en plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales ;
- ✚ C'est l'énergie la moins chère des énergies renouvelables ;
- ✚ Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent en énergie dans ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement est faible par rapport à celui des centrales à énergies plus traditionnelles. Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà ;
- ✚ La période de haute productivité se situe en hiver (vent plus forts), ce qui correspond à la période de l'année où la demande est plus forte. Concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés [15].

### **B. Inconvénients**

- ✚ L'énergie change suivant la météo ; la nature du vent stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour les gérants des réseaux.
- ✚ 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.
- ✚ Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés.
- ✚ Le cas d'installations autonomes, il est nécessaire de recourir au stockage ou bien de doubler l'installation par un groupe électrogène Diesel, ce qui augmente le coût.
- ✚ Impact visuel : les éoliennes installées sur terre ont tendance à défigurer le paysage. 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 mauvais temps ou la nuit. Les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci, [16] [17].

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

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

- ❖ Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- ❖ Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique transmise en suite au réseau électrique.

Son principe de fonctionnement est donc relativement simple. Pour résumer, le vent va faire tourner les pales qui elles-mêmes vont faire tourner le générateur. A son tour le générateur va transformer l'énergie mécanique du vent en énergie électrique.

L'électricité est dirigée vers le réseau électrique ou vers des batteries de stockage

La figure (1.8), représente le principe de conversion de l'énergie éolienne.

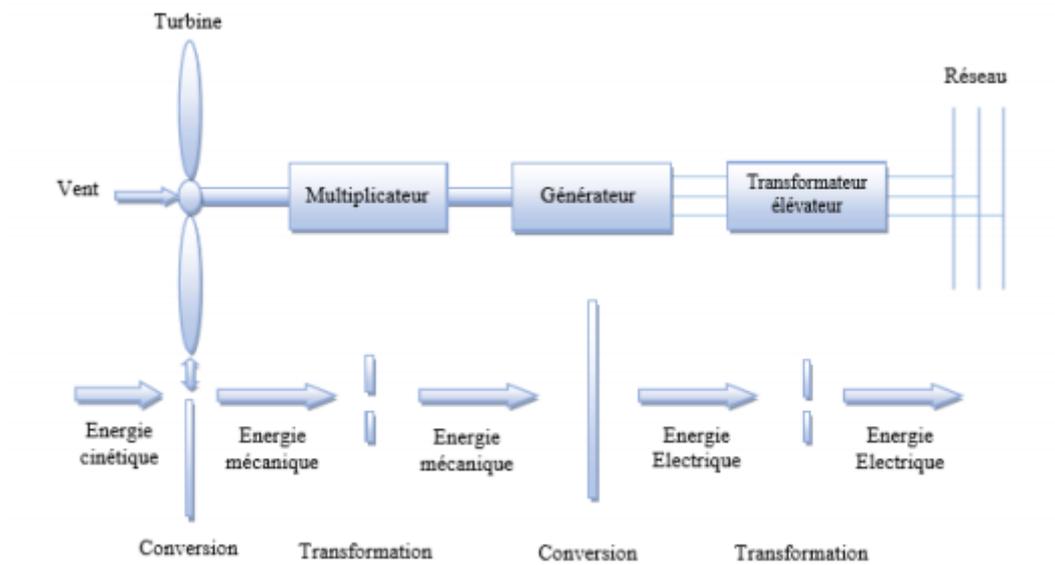


Figure 1.8 : Principe de la conversion de l'énergie éolienne

### 1.6 Conversion en énergie mécanique

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

$$P_m = \frac{1}{2} C_p (\lambda, \beta) \rho \cdot s \cdot V_v^3 \quad (1.6)$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega R}{V_v}$$

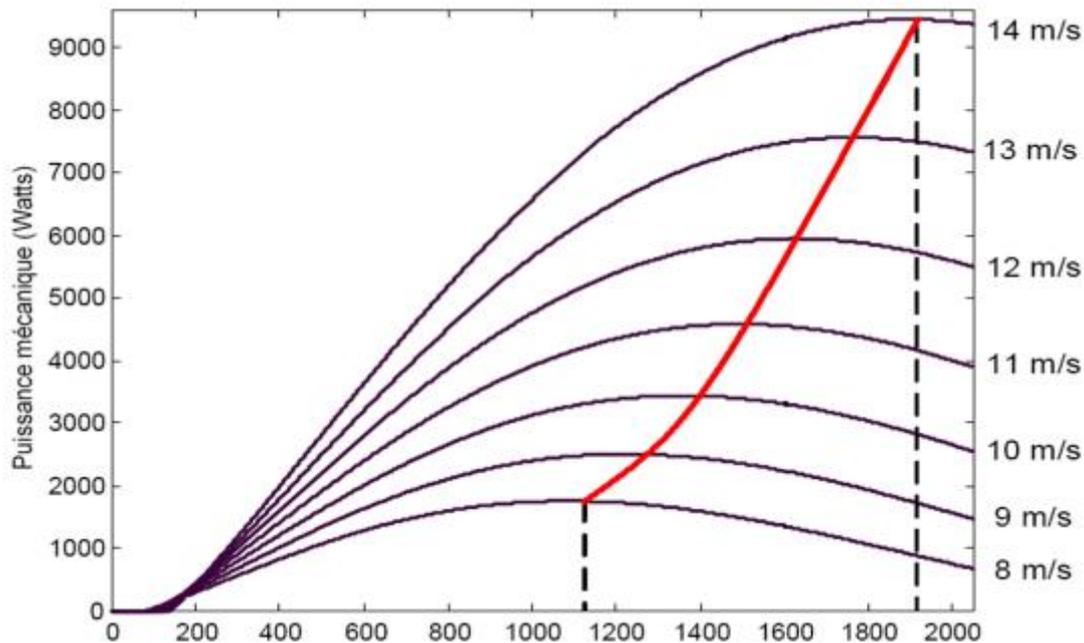
Appelée vitesse spécifique

Avec vitesse  $\Omega R$  linéaire au bout des pales

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

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \left( \frac{\Omega R}{V} \right) \rho_s V V^3 \quad (1.7)$$

Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent



*Figure 1.9 : puissance mécanique en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent*

### 1.7 Contraintes mécaniques associées à la conversion de l'énergie éolienne

L'expression du couple éolien donne le couple moyen présent sur l'arbre de la turbine correspondant au vent équivalent moyen. Il faut, pour mieux décrire le comportement, prendre en compte l'existence des couples pulsatoires, qui entraîneront des fluctuations de puissance, et qui sont générés par les irrégularités déterministes du champ de vitesses [19].

Ces phénomènes sont dus en particulier à l'effet de cisaillement, l'effet du passage d'une pale devant la tour (effet d'ombre), sans oublier d'ajouter également les effets des imperfections de construction (asymétrie).

Ces différentes contraintes peuvent être classées selon leur effet temporel sur le rotor et selon le caractère dynamique de la conversion.

#### ❖ *Les contraintes liées à l'effet temporel :*

- a. Les charges stationnaires, indépendantes du temps, lorsque le rotor tourne à une vitesse fixe : vitesse du vent constante, forces centrifuges.
- b. Les charges stationnaires dans le temps, mais pas dans l'espace, qui provoquent des contraintes cycliques sur le rotor telles que l'augmentation du vent avec la hauteur et l'interférence entre la tour et l'écoulement du vent

- c. Les forces de gravité dues au poids des pales qui entraînent aussi des fluctuations périodiques.
- d. Les contraintes non périodiques et stochastiques dues aux turbulences du vent.
- ❖ **Les contraintes liées au caractère dynamique de la conversion :**
  - a. Effet d'ombre ou effet de tour : L'effet de tour est produit du fait de la résistance de la turbine à l'écoulement du vent, perturbe en amont et en aval. Loin de l'influence de la tour, la vitesse de vent est supposée constante alors qu'elle augmente à l'approche de la tour et diminue ensuite.
  - b. Phénomène de cisaillement : Le phénomène de cisaillement du vent produit également des oscillations de couple provoquées par le gradient de vitesse du vent le long du secteur balayé par les pales [20].

## 1.8 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 les classer en deux catégories :

- a) Les systèmes à vitesse fixe.
- b) Les systèmes à vitesse variable.

### I.8.1. 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 du 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 centaines 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 se 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 I.10. La chaîne de conversion de l'énergie éolienne est composée de la turbine, le multiplicateur de vitesse et de la génératrice [20].

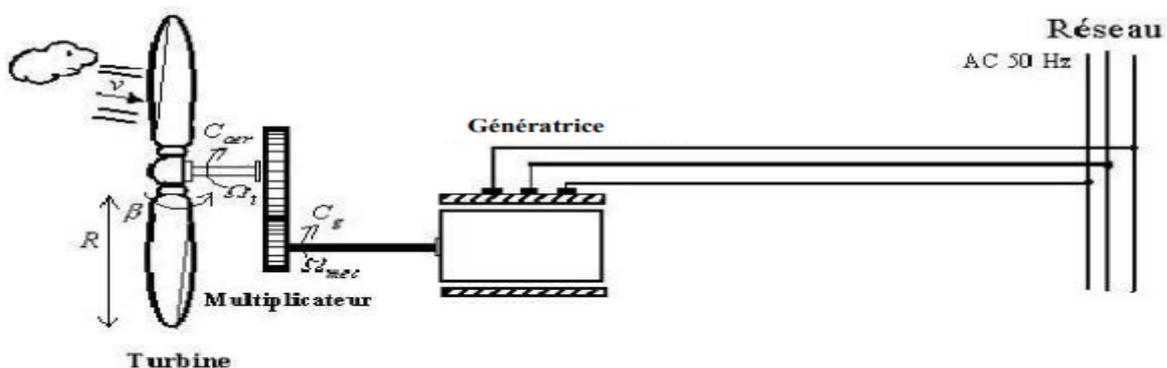


Figure I.10 : éolienne à vitesse fixe

I.8.2. Les systèmes à vitesse variable

Les deux structures existantes des éoliennes à vitesse variable sont présentées sur la figure I.11. La configuration de la figure I.11.a est basée sur une machine asynchrone à cage, pilotée au stator de manière à fonctionner à vitesse variable, par des convertisseurs statiques. La configuration de la figure I.11.b, est basée sur une machine asynchrone à double alimentation et à rotor bobiné. La vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance, situés au circuit rotorique [20].

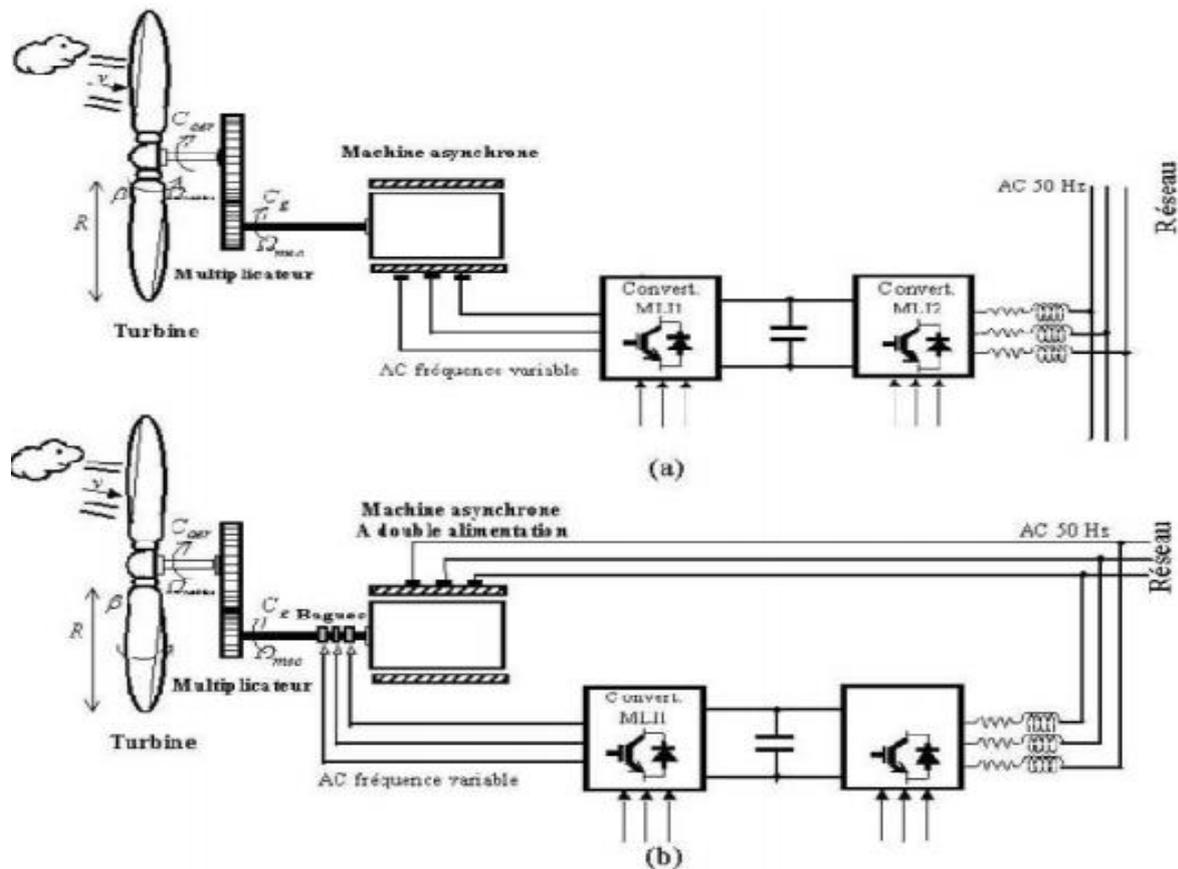
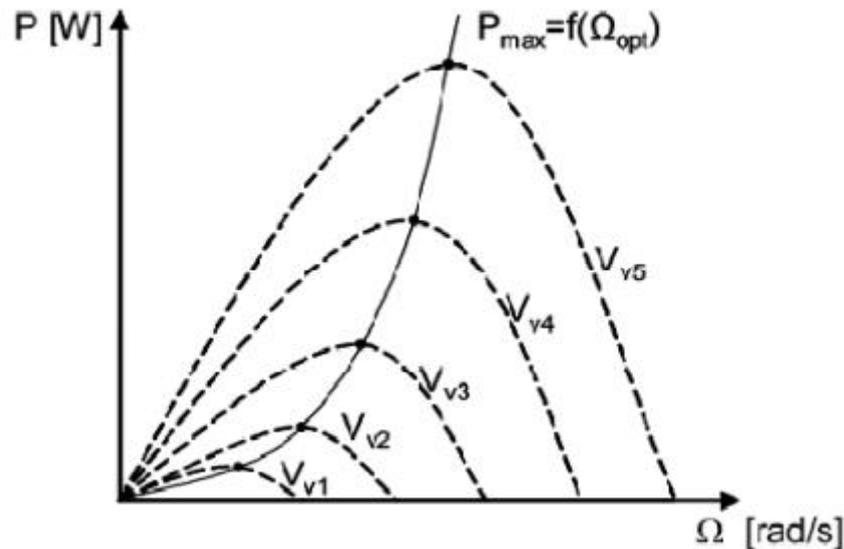


Figure 1.11: Eoliennes fonctionnant à vitesse variable

1.9 Optimisation de l'énergie extraite

Nous avons vu qu'il est indispensable de réguler la puissance éolienne et que les courbes caractéristiques des voilures éoliennes ne sont pas linéaires, surtout dans le cas des voilures de type Savonius dont la forme de cloche est très « pointue ». En ce qui concerne la puissance éolienne, elle résulte de la vitesse de rotation de l'arbre mécanique de l'éolienne et de la vitesse du vent (donc de la vitesse réduite) et de la caractéristique  $C_p (\lambda)$ .

Elle peut être optimisée dans le but de maximiser l'énergie captée par l'éolienne [21].



**Figure 1.12:** Optimisation de l'énergie extraite grâce à la variation de la vitesse de l'éolienne

De nombreuses études ont montré l'intérêt de la vitesse variable en éolien sur le plan énergétique, y compris dans le petit éolien où le surcoût entraîné par la vitesse variable (du fait de l'électronique de puissance et de réglage supplémentaire) est compensé par le surplus de production.

Mais c'est aussi et surtout sur le plan de la durée de vie des systèmes que se situe l'avantage de la vitesse variable. En effet, les chaînes à vitesse variable sont moins « raides » que les chaînes à vitesse fixe ou presque fixe rigidement couplées au réseau : cette liaison rigide se solde par de fortes oscillations de puissance engendrées par les turbulences. Ces variations sont à la longue nuisibles pour les éléments mécaniques : la vitesse variable, elle, permet de mieux lisser la production à travers l'énorme moment d'inertie que constitue la voilure.

## I.10 Différents systèmes utilisés pour l'exploitation de l'énergie éolienne

### I.10.1 Génératrice asynchrone à cage [22]

C'est dans les grandes puissances (au-delà de 100 kW) que l'on rencontre des systèmes reliés au réseau et produisant « au fil du vent ». Au départ faible coût et la standardisation des machines asynchrones ont conduit à une très large domination des génératrices asynchrones à cage directement couplées au réseau (sans interface électronique de puissance) jusqu'à des puissances dépassant le mégawatt. Les machines asynchrones à cage ne nécessitent qu'une installation assez sommaire. Elles sont souvent associées à une batterie de condensateurs de compensation de la puissance réactive, et un démarreur automatique progressif à gradateur ou à résistances permettant de limiter le régime transitoire d'appel de courant au moment de la connexion au réseau. Dans le cas des aérogénérateurs de dimension importante (puissance, rayon des pales), la vitesse de rotation est peu élevée, ce qui nécessite l'insertion d'un multiplicateur mécanique de vitesse comme le montre la figure.

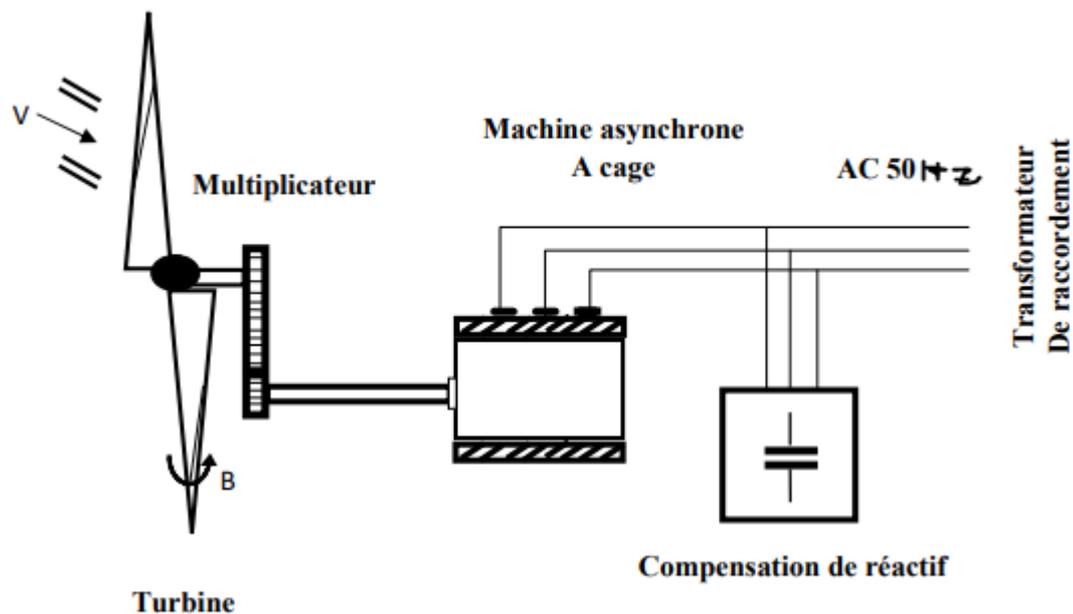


Figure 1.13: Eolienne à vitesse fixe basé sur la machine asynchrone à cage

Une autre structure consiste à utiliser un variateur de fréquence (figure 1.14), mais cette solution est globalement couteuse (variateur de fréquence dimensionné pour la puissance transitoire, et multiplicateur de vitesse) et donc très rarement exploitée.

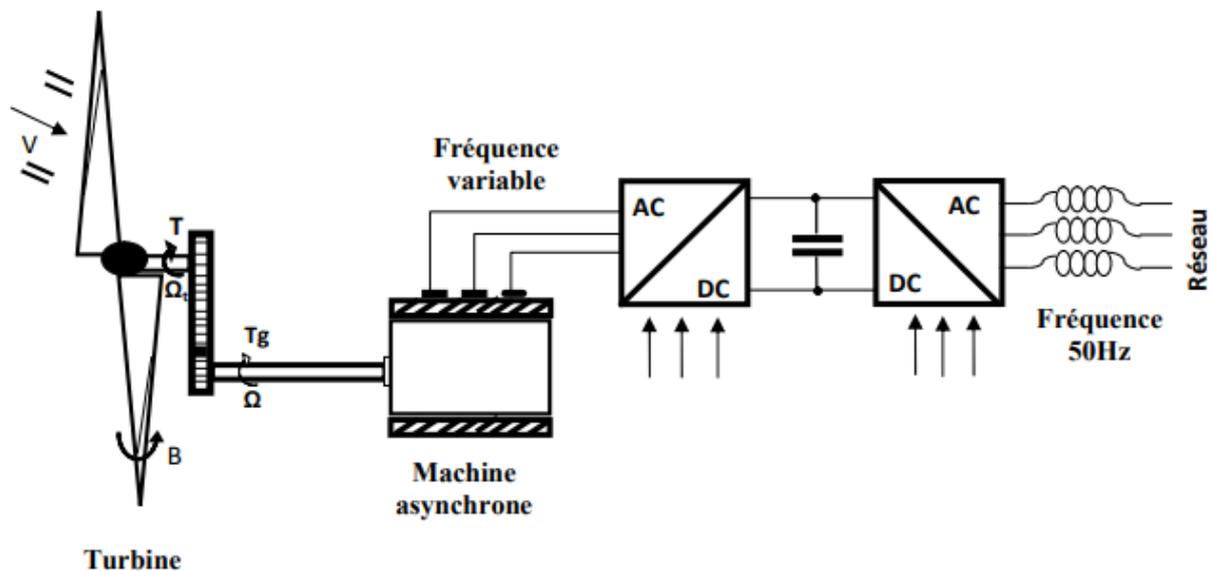


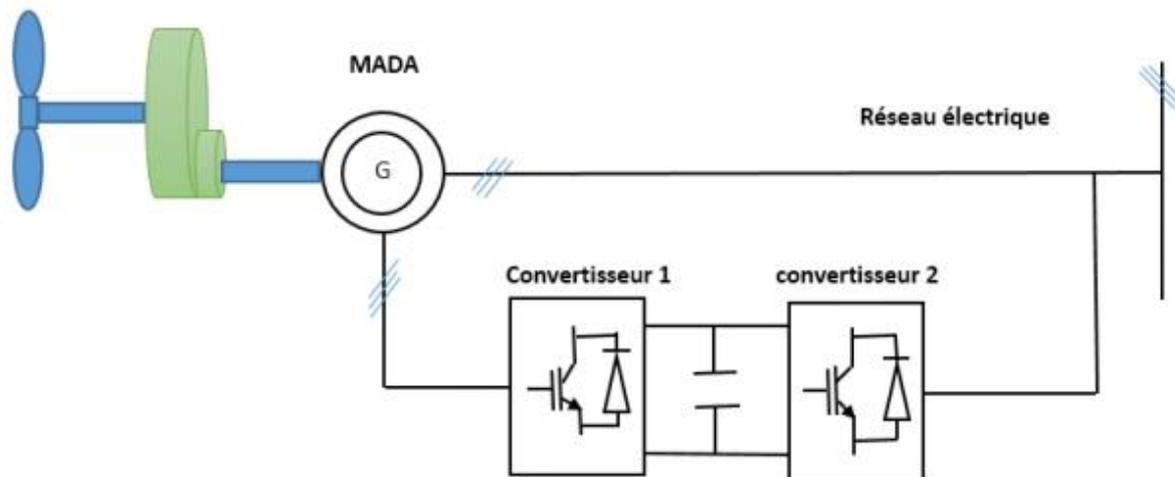
Figure 1.14: Eolienne à vitesse variable basé sur la machine asynchrone à cage[22]

### 1.10.2 Machine asynchrone à double alimentation (MADA)

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone), il est constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées, munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer des enroulements décalés de 120° dans l'espace. Son rotor n'est par contre plus une cage

d'écureuil, mais il est constitué de trois bobinages dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne.

Ce type de machines nécessite une seule source d'alimentation qui peut être alimentée les deux côtés de la machine et ceci constitue un avantage principal surtout dans les domaines d'application à vitesse variable, où le glissement de la machine à double alimentation peut être contrôlé par l'association des convertisseurs de puissance du côté statorique ou rotorique ou bien des deux à la fois. Ceci dépend essentiellement du facteur technico-économique de construction[2].



*Figure 1.15 : Eolienne basée sur la machine asynchrone à double alimentation*

### 1.10.3 Machines synchrones

Malgré toutes les caractéristiques et avantages des machines asynchrones, ces dernières présentent le défaut d'imposer la présence du multiplicateur de vitesse car elles possèdent un couple mécanique insuffisant pour un couplage mécanique directe aux pales. Par contre les machines synchrones sont connues pour fournir un couple important, à dimensions géométriques convenables. C'est pourquoi elles offrent l'avantage de se passer du multiplicateur de vitesse, notamment si le nombre de pôles est important

Dans une machine synchrone classique utilisée en alternateur le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Ainsi, si l'alternateur est connecté au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement un sous-multiple de la pulsation des courants statoriques

#### a) Machine synchrone à rotor bobiné

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

**b) Machine synchrone à aimants permanents (MSAP)**

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

Les éoliennes à base de MSAP présentent un bon rendement, un facteur de puissance élevé et un taux de défaillance minime par rapport aux autres machines, elles ne nécessitent presque aucun entretien puisqu'il n'y a que des hélices qui sont en mouvement. L'inconvénient unique de ces machines est la matière rare de l'aimant et son coût élevé.

**❖ Avantages de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP)**

- ✓ Couples massiques et volumiques importants.
- ✓ Très bon rendement.
- ✓ Puissances massiques élevées.
- ✓ Absence de contacts glissants.

**❖ Les inconvénients:**

- ✓ Coût élevé des aimants
- ✓ Interaction magnétique due au changement de structure.
- ✓ Influence des vibrations et des chocs sur la structure de la machine.

**1.11 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté l'historique sur les origines de l'énergie éolienne, ainsi que les différents types des générateurs utilisés dans ce domaine. Puis nous avons décrit le principe de conversion de l'énergie éolienne et les avantages de la MSAP par rapport aux autres machines utilisées dans les systèmes éoliens.

## II.1 Introduction :

Une 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.

Ce chapitre est consacré à modéliser mathématiquement les différents constituants de notre système (turbine, MSAP, convertisseur).

Les composants de la partie électrique sont modélisés dans la deuxième partie de ce chapitre où l'on trouve la modélisation de MSAP ainsi que les convertisseurs de puissance.

## II.2 Modélisation du Système de Conversion d'Énergie Éolienne :

L'aérogénérateur transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique de rotation, cette énergie mécanique est alors utilisée pour faire tourner un générateur électrique et produit de l'électricité. Pour l'emploi efficace de cette ressource (le vent) il est indispensable d'étudier les caractéristiques aérodynamiques de la turbine utilisée et le vent lui-même[23].

### II.2.1 Modélisation du vent :

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[24].

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 ;
- évaluer 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, ainsi que la période de l'an concernée 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

$$Vv(t) = A + \sum_{k=1}^i ak \sin(\omega kt)$$

Avec :

A: la valeur moyenne de la vitesse du vent  
ak : amplitude de l'harmonique de l'ordre k

$\omega_k$  : Pulsation de l'harmonique de l'ordre k

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

### II.2.2 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique[25] :

Soit une colonne d'air élémentaire de longueur dx, de section S, de masse volumique  $\rho$ , animée d'une vitesse V, (Fig. 2.1) s'écrit :

$$dEc = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot dx \cdot V^2$$

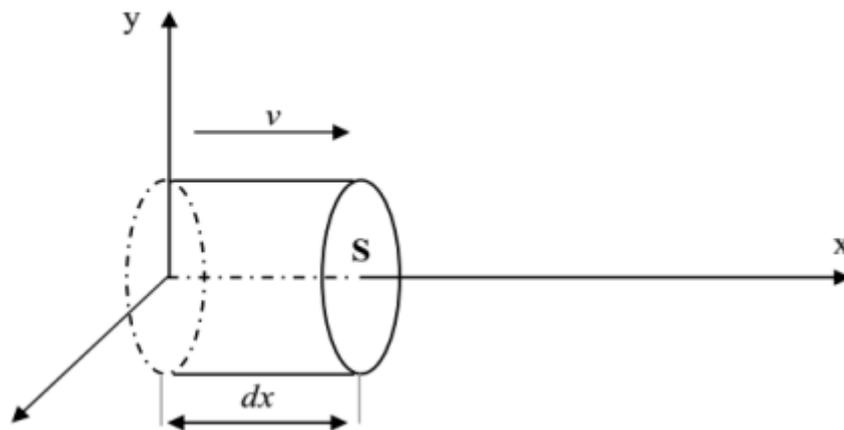


Figure. 2.1 : Colonne d'air animée d'une vitesse V.

La puissance de vent disponible  $P_v$  extraite du volume d'air en mouvement est la dérivée de l'énergie cinétique par rapport au temps[26].

En supposant  $dx=V \cdot dt$ , on déduit l'expression de  $P_v$ :

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

$\rho$ : masse volumique de l'air ( $Kg/m^3$ ).

V: vitesse instantanée du vent (m/s).

Ec: Énergie cinétique du vent en joules.

$S = \pi \cdot R^2$  : la surface du l'arbre de turbine en ( $m^2$ ).

#### II.2.2.1 Loi de Betz :

La formule de Betz montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par l'unité de temps (seconde)[27].

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure 2.2, sur lequel 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  $V_{12}$ [27].

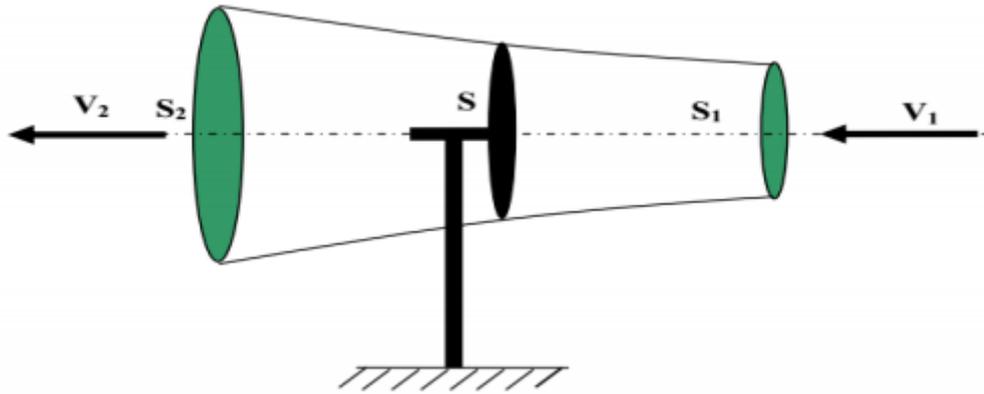


Figure 2.2 : Tube de courant autour d'une éolienne.

La masse d'air en mouvement traversant ce tube en une seconde est donnée par le produit de la densité d'air, la surface, et la vitesse moyenne[28].

$$m_o = \frac{\rho \cdot s \cdot (V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{II.2})$$

La puissance récupérable  $P_t$  est la puissance réelle extraite par le rotor des pales qui signifie la différence des puissances du vent en amont et en aval.

$$P_t = \frac{m_o \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{II.3})$$

Soit en remplaçant  $m_o$  par son expression dans (II. 3) :

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

La puissance totale théoriquement disponible sur la surface  $S$  est extraite sans diminution de vitesse de vent en mettant  $V_2 = 0$  dans l'expression (II.4)[29] :

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot V_1^3}{2} \quad (\text{II.5})$$

### II.2.2.2 Coefficient de puissance $C_p$ :

On définit le coefficient de puissance, le rapport entre la puissance extraite du vent (récupérable) et la puissance totale théoriquement disponible[30]

$$C_p = \frac{P_T}{P_V} = \frac{\left(1 + \frac{V_2}{V_1}\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right)}{2} \quad (\text{II.6})$$

Le coefficient de puissance présente un maximum de  $\frac{16}{27}$  soit 0,59. C'est cette limite théorique appelée 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 la vitesse relative est le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent [27].

$$\lambda = \frac{\Omega t.R}{V} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

R: Rayon de la surface balayée en m.

V: Vitesse de vent en m/s.

$\Omega t$  : Vitesse de rotation avant multiplicateur en rad/s.

Dans notre travail on utilise cette formule du coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  et l'angle de calage  $\beta$  [31].

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.5 - 0.167(\beta - 2)) \cdot \sin\left(\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)}\right) - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2). \quad (\text{II.8})$$

### II.3 Modélisation de la partie mécanique d'une éolienne :

#### II.3.1. Hypothèses simplificatrices Pour la modélisation mécanique de la turbine :

Considérons une turbine éolienne à trois pales orientables, fixées sur un 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 cet ensemble subit trois contraintes à savoir sa propre inertie, le frottement et la contrainte élastique. 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 2.3 illustre d'une manière détaillée le schéma équivalent de la turbine éolienne [25].

Dans cette partie, on modélise la turbine éolienne, le multiplicateur de vitesse et l'arbre de transmission :

- La turbine éolienne se compose de 3 pales orientables.
- Le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique.
- L'arbre est relié la partie mécanique à la partie électrique autrement dit relie la turbine au générateur.

La figure 2.3, ci-dessous représente différents composants de la partie mécanique :

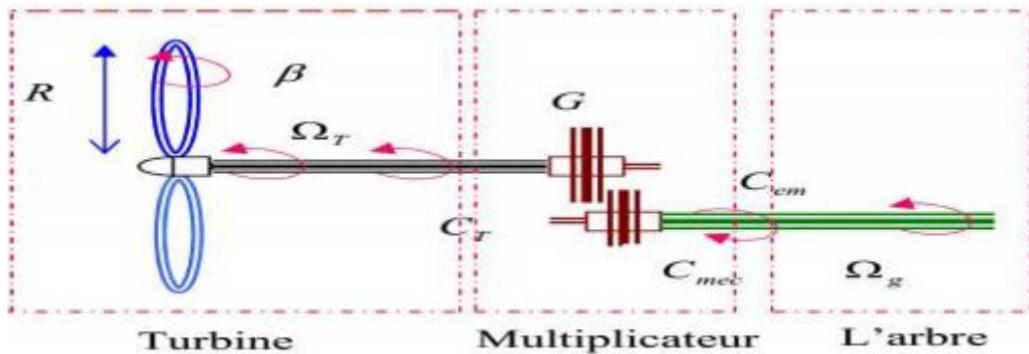


Figure 2.3 : Différents parties mécaniques de l'éolienne.

### II.3.2 Action du vent sur les pales :

L'action de l'air en mouvement va se traduire par des forces appliquées en chaque point de la surface. Les pales ont un profil aérodynamique présenté sur le schéma de la Figure 2.4.

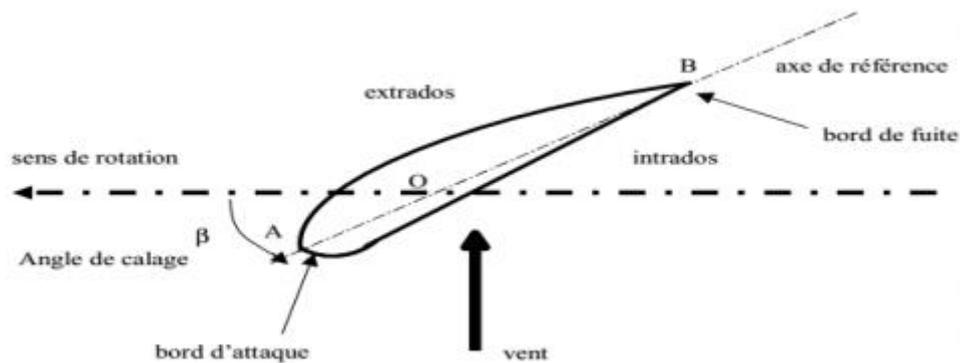


Figure 2.4 : Eléments caractéristiques d'une pale

On remarque plus particulièrement les éléments suivants[32]:

- extrados : dessus de la pale.
- intrados : dessous de la pale.
- corde : longueur  $l$  du profil du bord d'attaque au bord de fuite.
- angle de calage  $\beta$  : l'angle entre le plan de rotation et la corde du profil[33].

Les profils sont généralement de type plan-convexe (l'intrados est plan alors que l'extrados est convexe) ou alors biconvexe (l'intrados et l'extrados sont convexes)

Le système de réglage aérodynamique se base sur le principe de l'augmentation de l'angle de calage  $\beta$  ce qui diminue la valeur du facteur de puissance d'où une diminution du rendement de la turbine, ceci empêche l'augmentation de la vitesse de rotation de l'aérogénérateur[23].

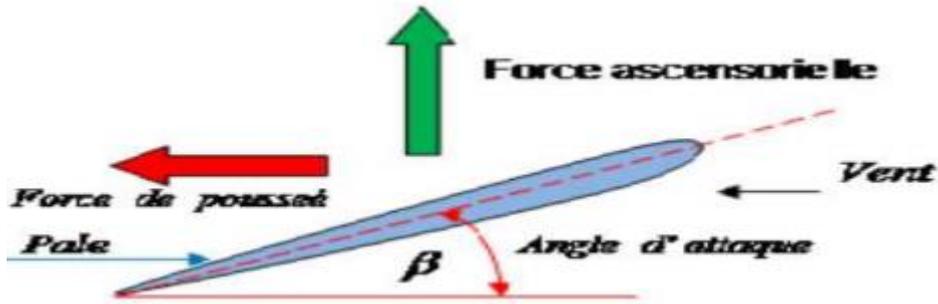


Figure 2.5 : Flux d'air sur un profil de pale.

### II.3.3 La turbine :

La turbine assure une transformation d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Elle est composée de trois pales qui pivotent sur les axes d'un angle  $\beta$ . Le vent de vitesse  $V$ , appliqué sur les pales de l'éolienne, entraîne sa mise en rotation et crée une puissance mécanique sur l'arbre de la turbine[34].

En combinant les équations (II.5), (II.6), et (II.7), la puissance mécanique  $P_t$  disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_t = C_p \cdot P_v = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3 \quad (II.9)$$

D'où l'expression du couple :

$$C_T = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{R \cdot P_t}{\lambda \cdot V} = \frac{C_p}{2\lambda} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot V^2 \quad (II.10)$$

Où :

$C_T$ : Couple de la turbine éolienne (N.m).

Le coefficient de puissance  $C_p$  représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne et dépend également de la caractéristique de la turbine[35].

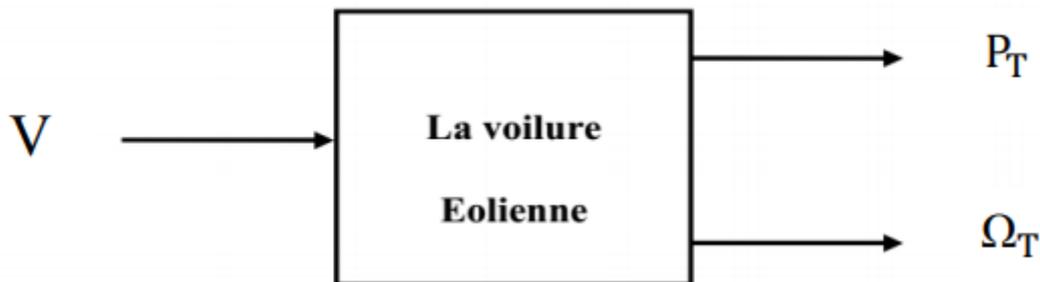


Figure 2.6 : Entrées-sorties du modèle de la turbine.

### II.3.4 Maximisation de la puissance (MPPT)[36] :

Les deux techniques de maximisation de puissance les plus utilisées dans le domaine des aérogénérateurs sont :

- La MPPT avec asservissement de vitesse
- La MPPT sans asservissement de vitesse

#### a) *MPPT avec asservissement de vitesse* :

On suppose dans cette technique que le couple électromagnétique développé par la machine est égale à sa valeur de référence quelque soit la puissance générée, et cela malgré les perturbations qu'engendre la nature fluctuante du vent. On peut écrire alors :

$$C_{em} = C_{em-ref} \quad (II.11)$$

Selon l'équation fondamentale de la dynamique permettant de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir de couple mécanique totale appliqué au rotor, on peut régler cette vitesse à une référence. Ceci est obtenu en utilisant un asservissement adéquat de vitesse pour avoir un couple électromagnétique de référence.

$$C_{em-ref} = C_{ass} (\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (II.12)$$

Avec:

**C<sub>ass</sub>** : Régulateur de vitesse

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

D'après l'équation, la vitesse de rotation de la turbine est égale à :

$$\Omega_T = \frac{\lambda \cdot V_v}{R} \quad (II.13)$$

La vitesse de référence de la turbine correspond à la valeur optimale de la vitesse spécifique  $\lambda_{opt}$  et la valeur maximale du coefficient de puissance  $C_{pmax}$ .

$$\Omega_{ref} = \frac{\lambda_{opt} \cdot V_v}{R} \quad (II.14)$$

L'efficacité de cette commande est assurée par le régulateur de vitesse qui doit asservir la vitesse mécanique à sa valeur de référence.

#### b) *MPPT sans asservissement de vitesse* :

Etant donné que la technique précédente de maximisation de puissance repose sur la connaissance précise de la vitesse du vent, ce qui rend le réglage de la vitesse de rotation de la turbine relativement difficile, et dégrade les puissances captées avec des mesures erronées de cette vitesse du vent. Le recours au contrôle des éoliennes sans asservissement de vitesse est devenu une nécessité pour la plupart des constructeurs.

## Chapitre II : modélisation de la chaîne de conversion éolienne

Cette méthode est basée sur l'hypothèse que la vitesse du vent, et par conséquent la vitesse de rotation de la turbine varie très peu en régime permanent. Ceci, nous conduit à déduire :

- Le couple mécanique exercé sur l'arbre est considéré nul  $C_{mec} = 0$
- Le couple résistant dû aux frottements peut être négligé  $C_f \approx 0$

De l'équation suivante :

$$C_{mec} = C_{em} - C_r - C_f = 0 \quad (II.15)$$

On peut déduire que :

$$C_{em} = C_r = \frac{C_{aer}}{G} \quad (II.16)$$

Le couple électromagnétique de référence est déterminé à partir d'une estimation du couple aérodynamique :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{aer-est}}{G} \quad (II.17)$$

On va déduire l'expression du couple aérodynamique estimé :

$$C_{aer-est} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_p \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \frac{1}{\Omega T-est} \cdot R^3 V-est \quad (II.18)$$

Avec :

$$\Omega T-est = \frac{\Omega mec}{G} \quad (II.19)$$

$$V_{V-est} = \frac{R \cdot \Omega T-est}{\lambda} \quad (II.20)$$

On déduit l'expression globale du couple électromagnétique de référence.

$$C_{em-ref} = \frac{1}{2} \frac{C_p}{\lambda^3} \rho \pi R^5 \frac{\Omega^2 mec}{G^3} \quad (II.21)$$

Pour que la puissance extraite soit maximale, on associe à la grandeur  $\lambda_{opt}$  qui correspond au maximum du coefficient de puissance.

La valeur du couple électromagnétique de référence est alors réglée à la valeur maximale suivante :

$$C_{em-ref} = \frac{1}{2} \frac{C_{pmax}}{\lambda^3_{opt}} \rho \pi R^5 \frac{\Omega^2 mec}{G^3} \quad (II.22)$$

En mettant

$$K_{opt} = \frac{1}{2} \frac{C_{pmax}}{\lambda^3} \rho \pi R^5 \frac{1}{G^3} \quad (II.23)$$

L'expression devient alors :

$$C_{em-ref} = K_{opt} \cdot \Omega^2 \cdot m_{ec} \quad (II.24)$$

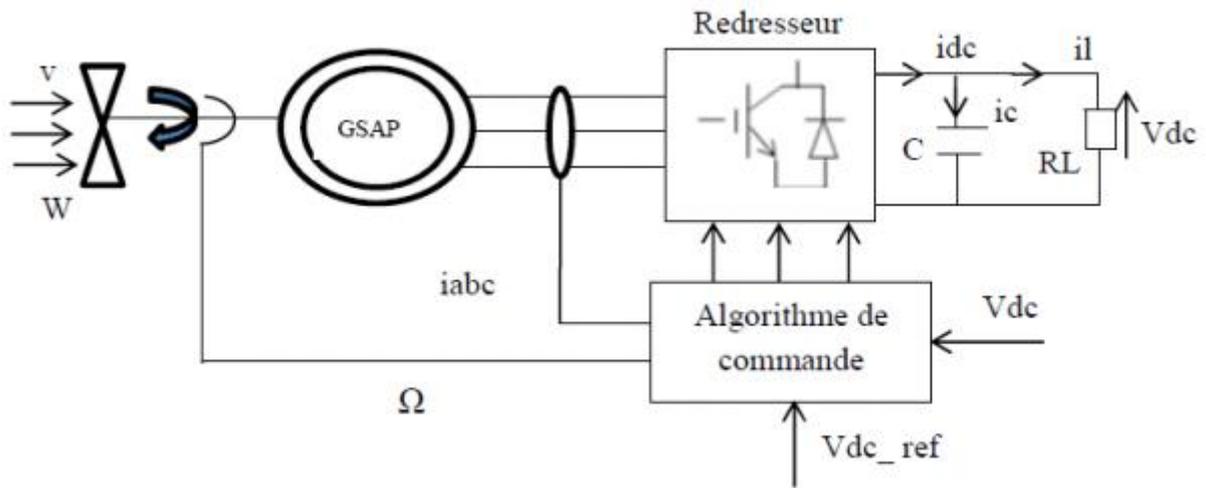


Figure 2.7 : structure du générateur éolien étudié

### II.3.5 Arbre de transmission :

L'équation fondamentale du moment du couple dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse à partir du couple mécanique total  $C_{mec}$  appliqué au rotor[37].

$$C_{mec} = J \frac{d\Omega_g}{dt} \quad (II.25)$$

Où :

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

Le couple mécanique est la somme de tous les couples appliqués sur le rotor[26] :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_f \quad (II.26)$$

$C_{mec}$ : Le couple électromagnétique développé par la génératrice en (N.m).

$C_g$  : Le couple après le multiplicateur en (N.m).

$C_{em}$ : Le Couple électromagnétique de la génératrice en (N.m).

$C_f$  : Le couple résistant dû aux frottements en (N.m).

$$C_f = f \cdot \Omega_g \quad (II.27)$$

On aura :

$$J \frac{d\Omega_g}{dt} + f \cdot \Omega_g = C_g - C_{em} \quad (II.28)$$

Où :

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

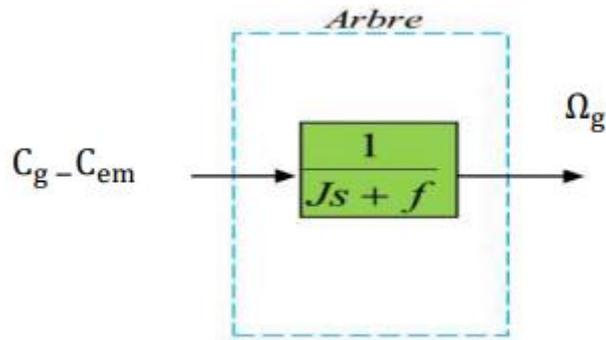


Figure 2.8 : Modélisation de l'arbre générateur.

#### II.4 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents :

Grâce aux nombreux avantages qu'elle a par rapport aux autres types de machines électriques (maintenance, prix), la machine synchrone à aimants permanents est intéressante pour l'utilisation comme génératrice couplée à une turbine éolienne. Le modèle mathématique de la machine synchrone à aimants permanents obéit à certaines hypothèses essentielles simplificatrices[38] :

- L'absence de saturation dans le circuit magnétique.
- La distribution sinusoïdale de le FMM créée par les enroulements du stator.
- L'hystérésis est négligée avec les courants de Foucault et l'effet de peau.
- L'effet d'encoche est négligeable.
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température.

*Les équations électriques* des machines électriques dans un repère fixe lié au stator sont décrites par :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

Avec :

$R_s$  : La résistance des phases statoriques.

$[V_{sa} V_{sb} V_{sc}]$  : Les tensions des phases statoriques.

$[I_{sa} I_{sb} I_{sc}]$  : Les courants des phases statoriques.

$[\phi_{sa} \phi_{sb} \phi_{sc}]$  : Les flux totaux à travers les bobines statoriques.

Comme les enroulements statoriques sont montés en étoile à neutre isolé, la somme instantanée des courants statoriques est nulle, de sorte qu'il n'y a pas de courant homopolaire. Par conséquent, s'il existe une composante homopolaire de tension ou de flux, elle n'intervient

pas dans le couple. Le comportement de la machine est donc représenté par deux variables indépendantes.

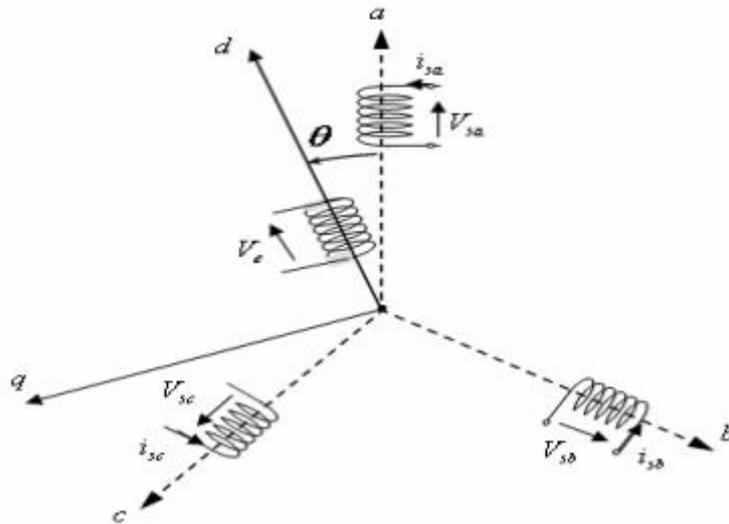


Figure 2.9 : Structure de la génératrice synchrone dans le repère triphasé

Pour simplifier le système d'équations à coefficients variables, un modèle dans le repère de Park de cette machine sera utilisé  $V_{sd}$ ,  $V_{sq}$  et  $I_{sd}$ ,  $I_{sq}$ . Le repère de Park est en fait un repère diphasé, équivalent du repère triphasé, plus simple à manipuler car les grandeurs électriques évoluent comme des grandeurs continues. On peut passer de l'un à l'autre repère à l'aide de matrices de passage[39].

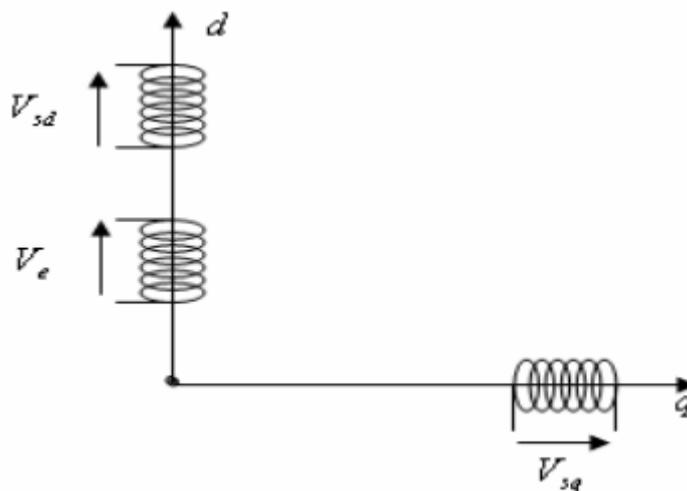


Figure 2.10 : Les enroulements de la génératrice synchrone suivant le système d'axe (dq).

$$[V_{sdq}] = [P(\theta)][V_{abc}] \tag{II.30}$$

$$[I_{sdq}] = [P(\theta)][I_{abc}] \tag{II.31}$$

Avec :

$P(\theta)$  Transformation de **PARK** est donnée par :

$$[P(\theta)] = \frac{\sqrt{2}}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.32})$$

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

Après développement des équations ci-dessus, on obtient les équations suivantes :

$$V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - P\Omega \Phi_{sq} \quad (\text{II.34})$$

$$V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d}{dt} \Phi_{sq} + P\Omega \Phi_{sd} \quad (\text{II.35})$$

Dans les machines synchrones à répartition sinusoïdale des conducteurs,  $\Phi_{sd}$  et  $\Phi_{sq}$  sont fonctions linéaires des courants  $I_{sd}$  et  $I_{sq}$ :

$$\Phi_{sd} = L_{sd} I_{sd} + \Phi_e \quad (\text{II.36})$$

$$\Phi_{sq} = L_{sq} I_{sq} \quad (\text{II.37})$$

Où:  $\Phi_e$  représente le flux des aimants à travers le circuit équivalent direct. Les équations de la machine dans le repère de Park sont les suivantes :

$$V_{sd} = R_s I_{sd} + L_s \frac{dI_{sd}}{dt} - L_s P\Omega I_{sq} \quad (\text{II.38})$$

$$V_{sq} = R_s I_{sq} + L_s \frac{dI_{sq}}{dt} + L_s P\Omega I_{sd} + \Phi_e P\Omega \quad (\text{II.39})$$

$$\omega = P\Omega$$

Avec :

$I_{sd}$ : Courants statoriques dans le repère de Park [A].

$V_{sd}$ : Tensions statoriques dans le repère de Park [V].

$R_s$  : Résistance statoriques [ $\Omega$ ].

$L_s$  : Inductance cyclique statorique [H].

$P$  : Nombre de paire de pôles de la machine synchrone.

$\omega$ : Pulsation des tensions [rad/s].

Les tensions étant les grandeurs d'entrée, on peut exprimer les grandeurs de sortie (les courants) en fonction de celles-ci. On obtient alors :

$$\frac{dIsq}{dt} = \frac{1}{L_s} (Vs_q - R_s Is_q - L_s P \Omega Is_d - \Phi_e P \Omega). \quad (II.40)$$

En les exprimant sous forme matricielle, on a :

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} Is_d \\ Is_q \end{pmatrix} = \frac{1}{L_s} \left[ \begin{pmatrix} Vs_d \\ Vs_q \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} R_s & -L_s P \Omega \\ L_s P \Omega & R_s \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} Is_d \\ Is_q \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ \Phi_e P \Omega \end{pmatrix} \right] \quad (II.41)$$

Le couple électromécanique développé par les machines synchrones à f.é.m. sinusoïdale peut être donné par la relation suivante :

$$T_{em} = \frac{3}{2} [\Phi_s d Is_q - \Phi_s q Is_d] \quad (II.42)$$

$$T_{em} = \frac{3}{2} [(L_s d - L_s q) + I_s] \quad (II.43)$$

On a une machine à pole lisse, on aura donc :

$$L_s d = L_s q = L_s \quad (II.44)$$

Le couple électromagnétique devient :

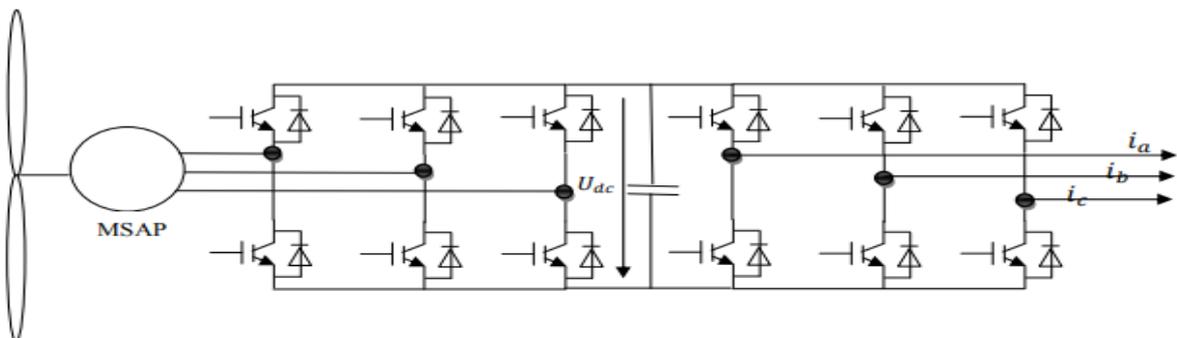
$$T_{em} = \frac{3}{2} P \Phi_e I_s q \quad (II.45)$$

### II.5 Modélisation d'interface d'électronique de puissance :

Dans cette partie, on va étudier le convertisseur qui intervient dans la chaîne de conversion éolienne[40]

#### II.5.1 Modélisation des convertisseurs statiques :

Le redresseur et l'onduleur sont formés de trois bras, composés chacun de deux cellules de commutations. Chaque bras de l'onduleur est constitué de deux interrupteurs bidirectionnels. Chaque cellule à son tour est constituée d'un transistor et une diode en antiparallèle. Cette structure impose l'utilisation des interrupteurs commandables à l'amorçage et au blocage.



**Figure 2.11:** Le schéma global de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne

### II.5.2 Modélisation du redresseur :

Les interrupteurs utilisés sont des transistors IGBT avec diodes antiparallèles, ces interrupteurs sont bidirectionnels, qui permet le transit de puissance dans les deux sens du système. Les signaux de commande de l'ouverture et de la fermeture des interrupteurs sont générés par des comparateurs à hystérésis.

### II.5.3 La commande M.L.I :

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. La technique choisie pour la commande de nos convertisseurs est la M.L.I sinus-triangle car elle permet d'éliminer les harmoniques et l'obtention d'un bon rendement. Elle est basée sur la comparaison d'un signal triangulaire de grande fréquence et d'un signal sinusoïdal de la même fréquence que le signal de référence que l'on souhaite obtenir. Le signal triangulaire est appelé la Porteuse et le signal sinusoïdal est appelé la Modulante. Ces signaux ont les propriétés suivantes[41] :

- La modulante est une onde sinusoïdale  $V_{ref}(t)$  d'amplitude  $U_r$  et de fréquence  $f_r$ .
- La porteuse est une onde triangulaire ou en dents de scie  $V_p(t)$ , d'amplitude  $|U_p| \geq |U_r|$ , et d'une fréquence  $f_p \gg f_r$ .
- L'indice de modulation  $m = \frac{f_p}{f_r}$
- Le coefficient de réglage en tension  $r$ , qui est égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence à celle de la porteuse  $r = \frac{U_r}{U_p}$

Le principe de cette commande est que la valeur de la fonction  $F$  qui correspond à la première cellule de commutation soit égale à 1 si  $U_p \geq U_r$  sinon elle prend la valeur zéro. La valeur des autres fonctions se déduit facilement par la complémentarité qui existe entre deux cellules d'un même bras et le décalage de  $\frac{2\pi}{3}$  pour deux phases qui se suivent

### II.5.4. Modèle du redresseur MLI :

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 - charge), on s'intéressera uniquement au comportement dynamique des variables électriques et mécaniques de la machine.

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

Pour le modèle dynamique du système, on va diviser l'étude du convertisseur en trois parties: le coté 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[42]

$$S = \begin{cases} +1, & s_{ij} = -1 \\ -1, & s_{ij} = +1 \end{cases} \quad J \in \{a, b, c\} \quad (\text{II.46})$$

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  $i_a, i_b, i_c$

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (\text{II.47})$$

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

$$U_{sab} = (S_a - S_b).U_{dc} \quad (\text{II.48})$$

$$U_{sbc} = (S_b - S_c).U_{dc} \quad (\text{II.49})$$

$$U_{sca} = (S_c - S_a).U_{dc} \quad (\text{II.50})$$

### II.5.5. Modélisation du bus continu :

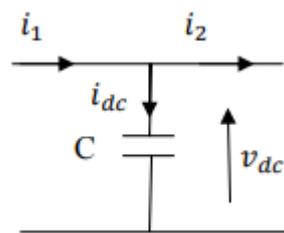


Figure 2.12 : Schéma électrique du bus continu

Les courants dans le bus à courant continu agissent directement sur la valeur de la tension à ses bornes  $V_{dc}$ . A partir de la figure précédente, on peut écrire l'équation suivante :

$$i_{dc} = i_1 - i_2 \quad (\text{II.51})$$

La tension  $V_{dc}$  est une fonction du courant  $i_{dc}$  :

$$i_{dc} = C \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (\text{II.52})$$

$$V_{dc} = V_{dc0} + \frac{1}{C} \int_{i_1}^{i_2} i_{dc} dt \quad (\text{II.53})$$

Avec :

C : Capacité du condensateur

$V_{dc0}$  : Tension initiale aux bornes du condensateur

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

La valeur de la tension  $V_{dc}$  est fonction des courants  $i_1$  et  $i_2$ , si le générateur fournit plus d'énergie, la valeur de  $V_{dc}$  augmentera parce que la différence d'énergie est accumulée dans le condensateur. Par contre, si le générateur ne peut pas fournir l'énergie demandée par la charge, celle-ci prendra au condensateur le reste d'énergie demandé, alors la valeur de la tension  $V_{dc}$  va diminuer [43].

## II.6 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons traité la modélisation des différentes parties de la chaîne de conversion éolienne. Nous avons établi les équations électriques, magnétiques et mécaniques dans le repère triphasé puis dans le repère biphasé pour simplifier le modèle à utiliser.

Le chapitre suivant sera dédié à la commande vectorielle d'un moteur synchrone à aimant permanent.

### III.1 Introduction :

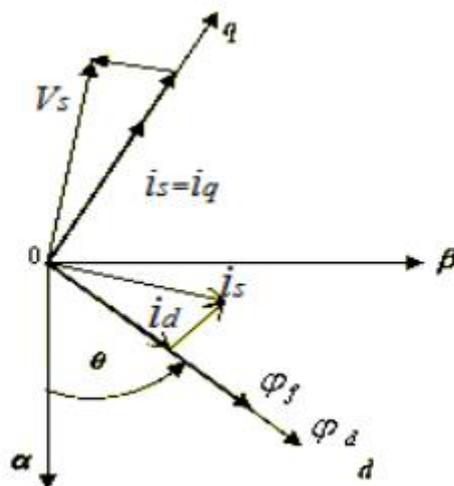
L'objectif de ce chapitre est de présenter les structures de commande pour une MSAP, définie dans un référentiel tournant (d, q). Nous choisissons de travailler avec une commande vectorielle dans le repère de Park associée à une stratégie de MLI et en utilisant un redresseur MLI qui va développer une combinaison adéquate de ces interrupteurs pour assurer la bonne commande de la MSAP. Dans une première partie nous présenterons le principe de la commande vectorielle appliquée à la MSAP. Ensuite nous développons un modèle de simulation sur Matlab-Simulink.

### III.2 Principe de la commande vectorielle de la MSAP :

Le principe de base de la commande vectorielle a été proposé par BALSCHKE et HASSE dans les années 70. Cette commande consiste à orienter le vecteur courant et le vecteur flux afin de rendre le comportement de la machine synchrone similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée. Le but de la commande vectorielle appliquée à la MSAP est d'éliminer le problème de couplage entre l'induit et l'inducteur.

Pour réaliser un contrôle similaire à celui des machines à courant continu à excitation séparée, il est nécessaire de maintenir le courant  $I_d$  nul et de réguler la vitesse ou la position par le courant  $i_q$  via la tension  $V_q$ .

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



**Figure 3.1 : Diagramme de phase de la MSAP dans le référentiel (d,q) lié au champ tournant :**

La figure (3.1) montre que la position instantanée du rotor, et par conséquent le flux rotorique est situé à un angle  $\theta$  par rapport à l'axe  $\alpha$ , du référentiel  $(\alpha, \beta)$  liée au stator. L'application de la commande vectorielle nécessite que l'axe de la composante  $i_q$  soit en quadrature par rapport au flux rotorique. Par conséquent, la composante  $i_d$  du courant statorique doit être

colinéaire au flux rotorique. Si le courant  $i_d$  est dans la même direction que le flux rotorique, le flux statorique suivant l'axe 'd' s'ajoute au flux des aimants, ce qui donne une augmentation au flux d'entrefer (sur excitation). D'autre part, si le courant  $i_d$  est négatif, le flux statorique sera en opposition à celui du rotor, ce qui donne une diminution du flux d'entrefer (sous excitation). Le courant  $i_d$  doit être nul, lorsque le système travaille à couple constant [45].

$i_d = 0$  Donc  $i_q = i_s$

Donc :

$\phi_d = \phi_s f$

La forme du couple électromagnétique est donnée par :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \phi_s f i_q \quad (III.1)$$

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

$$C_{em} = K_t \cdot i_q \quad (III.2)$$

Avec :

$$K_t = \frac{3}{2} p \phi_s f \quad (III.3)$$

Dans le cas de fonctionnement en survitesse, une stratégie de défluxage est appliquée, la consigne de courant  $i_d$  n'est plus égale à zéro et le couple est limité de manière à toujours respecter la relation suivante :

$$\sqrt{i_d^2 + i_q^2} \leq I_{max} \quad (III.4)$$

Où :  $I_{max}$  est le courant maximal.

### III.3 Commande vectorielle de la (MSAP) :

Il existe deux méthodes distinctes pour contrôler le courant :

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

### III.4 Commande vectorielle de la (MSAP) alimentée en tension :

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

### III.5 Stratégie de la commande vectorielle de la MSAP :

Le modèle de la MSAP alimenté en tension est donné par les équations suivantes :

$$\begin{cases} Vd = R_s \cdot id + Ld \cdot \frac{did}{dt} - LqLi\omega \\ Vq = R_s \cdot iq + Lq \cdot \frac{diq}{dt} + Ld\omega id + \omega\phi sf \end{cases} \quad (III.5)$$

$$\frac{d}{dt}id = \frac{1}{Ld}(Vd - R_s \cdot id + Lq \cdot iq \cdot \omega) \quad (III.6)$$

$$\frac{d}{dt}iq = \frac{1}{Lq}(Vq - R_s \cdot iq - Ld \cdot \omega \cdot id - \omega\phi sf) \quad (III.7)$$

$$J \frac{d\omega r}{dt} = C_{em} - C_r - f\omega r \quad (III.8)$$

Avec :

$$\omega = p \cdot \omega r$$

$$C_{em} = \frac{3}{2} P [(Ld - Lq) id iq + \phi sf \cdot iq] \quad (III.9)$$

Le modèle décrit par les équations précédentes montre que la MSAP est un système multi variable, non linéaire et fortement couplé.

Le but principal de la commande vectorielle des machines à courants alternatifs est d'améliorer leurs comportements statiques et dynamiques grâce à une structure de contrôle similaire à celle d'une machine à courant continu

La machine étudiée est de couple électromagnétique est maximal lorsque le courant statorique dans le référentiel de Park est maintenu calé sur l'axe q ( $I_s = I_q$ ). Ceci revient à imposer la composante directe du courant nulle figure (2.9) qui a pour effet la diminution des pertes joule. Le système d'équations (2.10) devient :

$$\begin{cases} Vd = -Lq\omega iq \\ Vq = R_s iq + Lq \frac{diq}{dt} + \omega\phi sf \end{cases} \quad (III.10)$$

Et le couple devient :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \cdot \phi sf \cdot iq \quad (III.11)$$

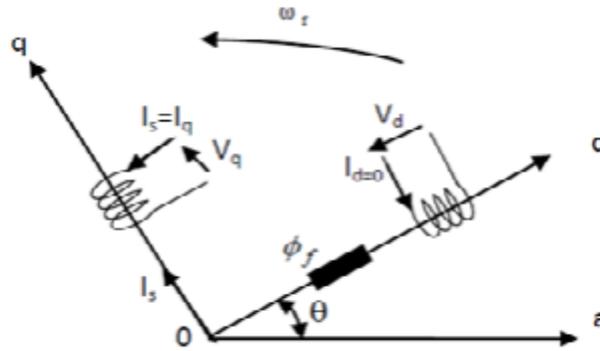


Figure 3.2 : Principe de la commande vectorielle

### III. 6. Commande vectorielle avec découplage de la régulation des courants par compensation[46] :

Afin de justifier le recours à la commande vectorielle avec découplage de la régulation des courants par compensation, examinons d'abord le modèle de la machine synchrone dans le plan de Park qui est donné par les équations.

$$v_d = R_s \cdot i_d + L_d \cdot \frac{di_d}{dt} - \omega_r \cdot \phi_q \quad (III.12)$$

$e_q = \omega_r \cdot \phi_q$ : f.e.m de la machine sur l'axe q

$$v_q = R_s \cdot i_q + L_q \cdot \frac{di_q}{dt} + \omega_r \cdot \phi_d \quad (III.13)$$

$e_d = \omega_r \cdot \phi_d$ : f.e.m de la machine sur l'axe d

La commande vectorielle avec découplage de la régulation des courants par compensation permet de découpler les courants  $i_d$  et  $i_q$  et de permettre de faire la régulation adéquate à chacun des deux séparément. Cette commande nous mène à un modèle de la machine synchrone similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée. Les termes de couplage en  $E_d, q = \pm \omega_r \cdot \phi_{d, q}$  sont considérés comme des perturbations mesurables .

Ainsi la machine peut être représentée par la fonction de transfert suivante :

$$G_s(p) = \frac{1}{R_s + L_s p} = \frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + T_e p} \quad (III.14)$$

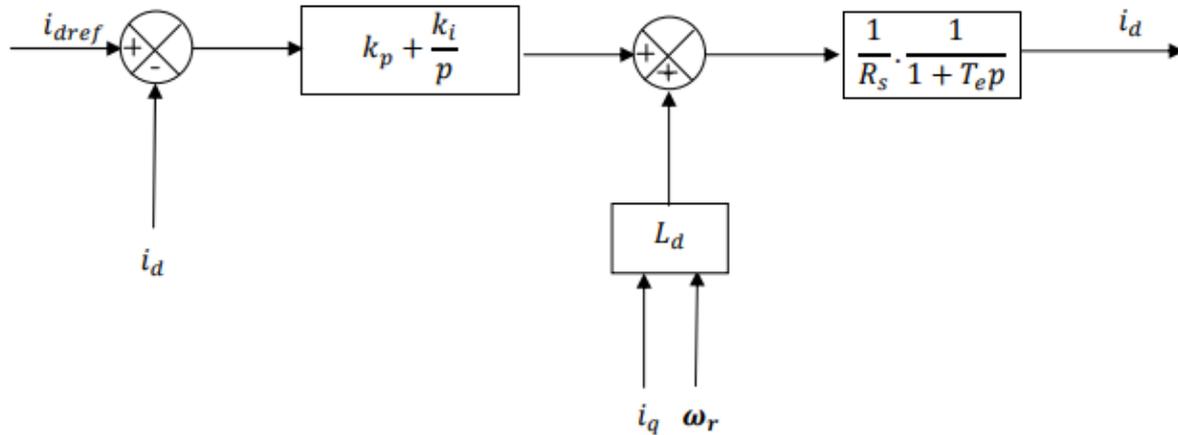
Avec :

$T_e = \frac{L_s}{R_s}$ : la constante de temps électrique.

Si on tient compte de la perturbation,  $G_s(p)$  sera sous la forme donnée en III.20, en vertu du théorème de superposition

$$G_s(p) = \frac{i_{d,q}(p)}{V_{d,q}(p) + E_{d,q}(p)} \quad (III.15)$$

Afin d'imposer la référence du courant sur l'axe d égale à zéro on utilise un régulateur PI. La boucle de régulation du courant  $i_d$  est donnée par le schéma bloc suivant :



**Figure 3.3: Boucle de régulation du courant  $i_d$**

### III.7. Calcul du régulateur PI :

La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée comme suit :

$$G_0(p) = \frac{K_p p + K_i}{p} \cdot \frac{1}{R_s p + L_d} = \frac{K_p p + K_i}{p} \cdot \frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + T_e p} \quad (III.16)$$

En fin :

$$G_0(p) = \frac{K_p p + K_i}{p} \cdot \frac{G_0}{1 + T_e p} \quad (III.17)$$

$T_e = \frac{K_p}{K_i}$ : La constante de temps électrique

$G_0$ : Le gain statique

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par  $G(p) = \frac{G_0}{1 + G_0(P)}$

Les paramètres du régulateur sont calculés par la méthode de placement de pôle La fonction de transfert en boucle ouverte est

$$G_{bo}(p) = \frac{K_p p + K_i}{p} \cdot \frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + T_e p} \quad (III.18)$$

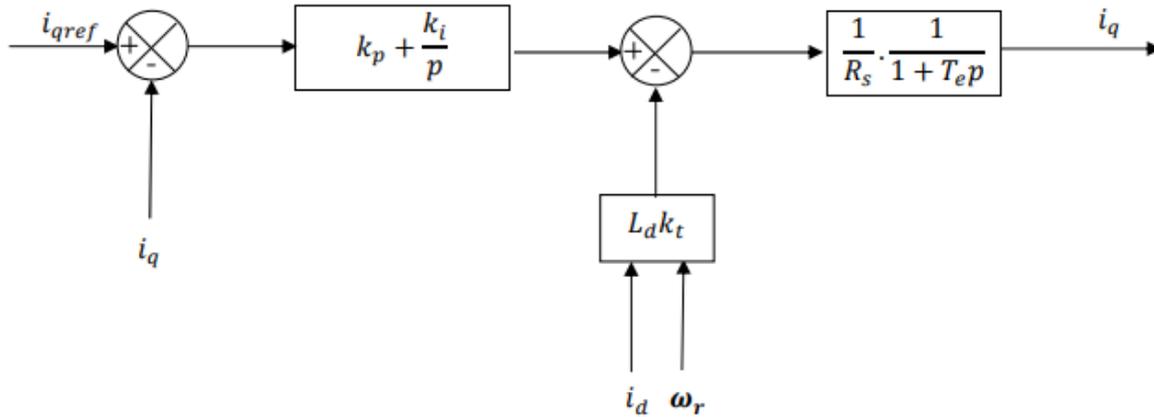
La fonction de transfert en boucle fermée est

$$G_{bf}(p) = \frac{G_{bo}}{1 + G_{bo}(p)} = \frac{K_p p + K_i}{R p^2 + (L_q + K_p) p + K_i} \quad (III.19)$$

$$Kp = \frac{2\xi n Ki}{\omega n} - J \quad (III.20)$$

$$Ki = \omega n^2 J \quad (III.21)$$

La boucle de régulation du courant  $i_q$  est donnée par le schéma bloc suivant :



**Figure 3.4 : Boucle de régulation du courant  $i_q$**

$$I_{qref} = \frac{Cemref}{Kt} = Cte \cdot \frac{\Omega t^2}{Kt} \quad (III.22)$$

$$Cemref = \frac{Peolmax}{\Omega t} \quad (III.23)$$

$$P_{éolmax} = \frac{1}{2} \cdot Cpmax(\lambda) \cdot \rho \cdot S \cdot Vv^2 \quad (III.24)$$

$$S = \pi \cdot R^2 \quad (III.25)$$

Si on remplace la puissance éolienne  $P_{éol}$  et la surface active  $S$ , par leurs formules respectives, données en (III.24) et (III.25), on obtient :

$$Cte = \frac{\rho \cdot \pi \cdot R t^2 \cdot Cpmax}{2 \cdot \lambda o p t^3} \quad (III.26)$$

### III.8 Régulation de la tension [47]:

Les boucles des courants étant considérées unitaires. Le régulateur de la boucle tension  $V_{dc}$  permet la génération du courant de référence  $I_q$  (référence) afin de maintenir la tension aux bornes du bus continu constante, un régulateur de type PI est y inséré.

### III. 9 Avantages et inconvénients de la commande vectorielle :

#### III.9.1 Avantages de la commande vectorielle :

- ✚ Elle est basée sur le modèle transitoire (traiter les régimes transitoires ce que ne permettait pas de faire le variateur classique).

- ✚ Elle est précise et rapide.
- ✚ Il y a un couple de contrôle à l'arrêt.
- ✚ Le contrôle des grandeurs se fait en amplitude et en phase.

### III.9.2 Inconvénients de la commande vectorielle :

Le contrôle vectoriel par orientation de flux rotorique présente un certain nombre d'inconvénient :

- ✚ Très chère (encodeur incrémental ou estimateur de vitesse).
- ✚ Présence de transformations de coordonnées dépendant d'un  $\Theta_s$  estimé.

La vitesse de rotation intervient explicitement dans l'algorithme de commande. Quand on ne mesure pas cette vitesse (variateur sans capteur de vitesse), les erreurs sur l'estimée de cette vitesse dégradent les performances de variateur.

### III.10 Modélisation de l'onduleur :

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

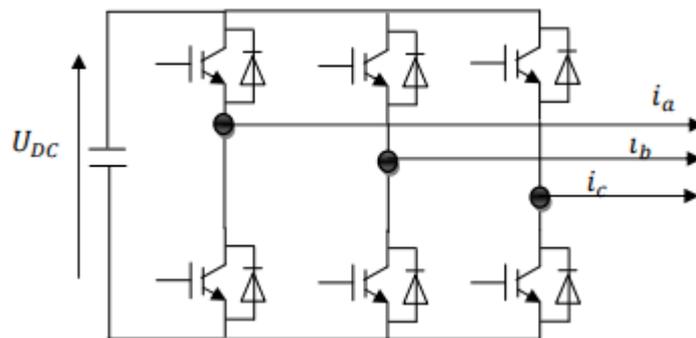


Figure 3.5 : Le schéma global d'un onduleur à MLI

Soit les fonctions  $F_1, F_2, F_3$  qui représentent l'état des interrupteurs  $K_1, K_2, K_3$ . La loi des mailles permet d'obtenir les tensions composées entre phases

$$U_{ab} = (F_1 - F_2)$$

$$U_{bc} = (F_2 - F_3)$$

$$U_{ca} = (F_3 - F_1)$$

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

### Chapitre III : Commande et simulation de la chaine de conversion

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

$$\begin{bmatrix} ea \\ eb \\ ec \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} ia \\ ib \\ ic \end{bmatrix} + L \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} ia \\ ib \\ ic \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Vsa \\ Vsb \\ Vsc \end{bmatrix}$$

Avec :

$$Vsa = \frac{2Sa - Sb - Sc}{3} \cdot Udc$$

$$Vsb = \frac{2Sb - Sa - Sc}{3} \cdot Udc$$

$$Vsc = \frac{2Sc - Sa - Sb}{3} \cdot Udc$$

Les équations précédentes dans les coordonnées dq sont :

$$ed = R \cdot id + L \cdot \frac{did}{dt} - \omega_s \cdot L \cdot iq + Usd \quad (III.27)$$

$$eq = R \cdot iq + L \cdot \frac{diq}{dt} - \omega_s \cdot L \cdot id + Usd \quad (III.28)$$

Finalement, on déduit l'équation de couplage entre côté alternatif et continu en fonction des fonctions d'état des interrupteurs par :

$$C \frac{dUdc}{dt} = Sa \cdot ia + Sb \cdot ib + Sc \cdot ic - il \quad (III.29)$$

$il$  : le courant de charge du redresseur.

En combinant les équations, on obtient la relation

$$\begin{bmatrix} Vsa \\ Vsb \\ Vsc \end{bmatrix} = \frac{Vdc}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F1 \\ F2 \\ F3 \end{bmatrix}$$

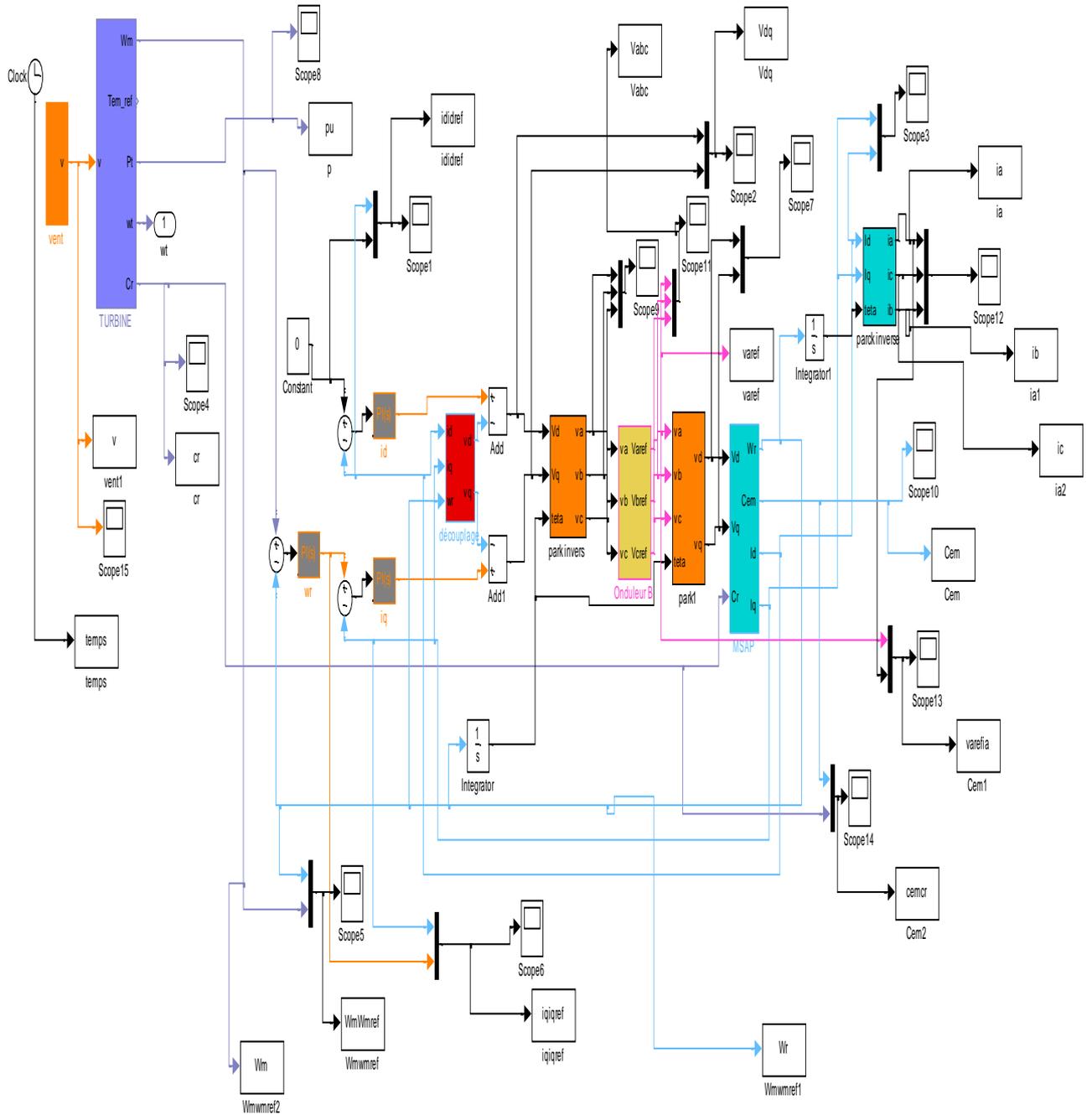


Schéma bloc de la simulation

III.11 Résultats de la simulation et interprétations :

❖ Pour un vent aléatoire

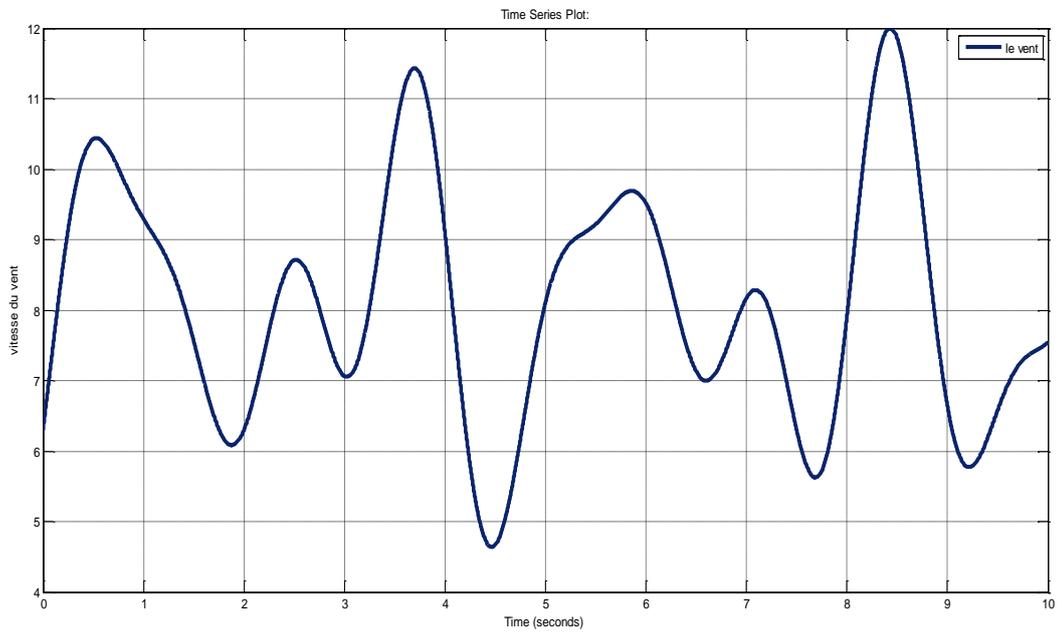


Figure 3.6 : profil de vent

❖ Pour le couple résistant et électromagnétique

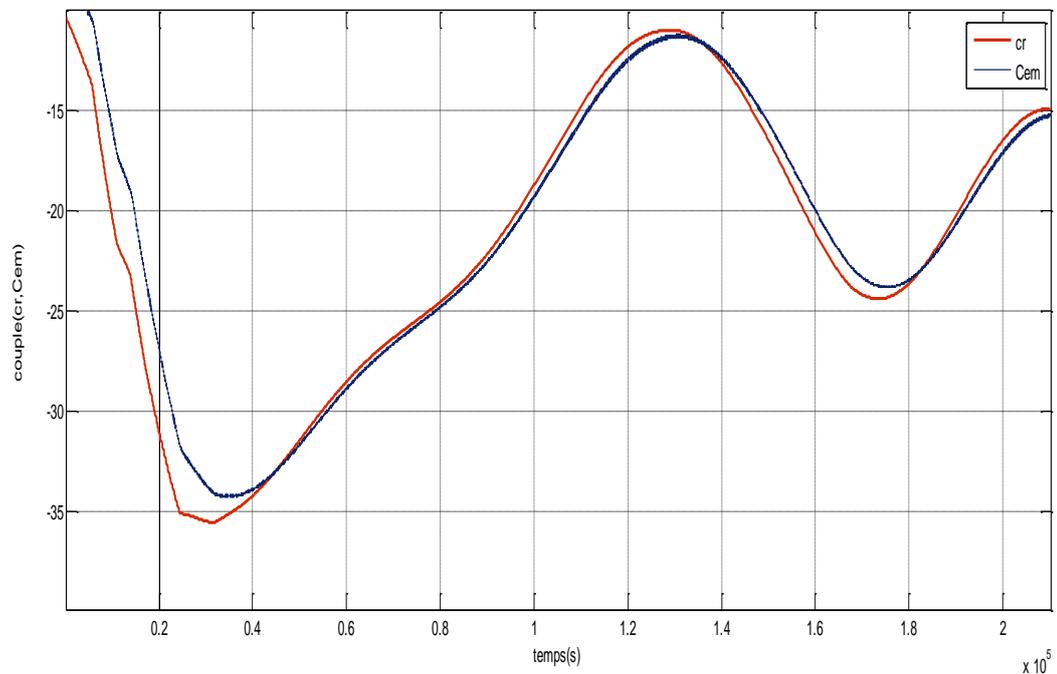


Figure 3.7 : couple résistant et électromagnétique

## ❖ Vitesse de rotation de la MSAP et sa référence

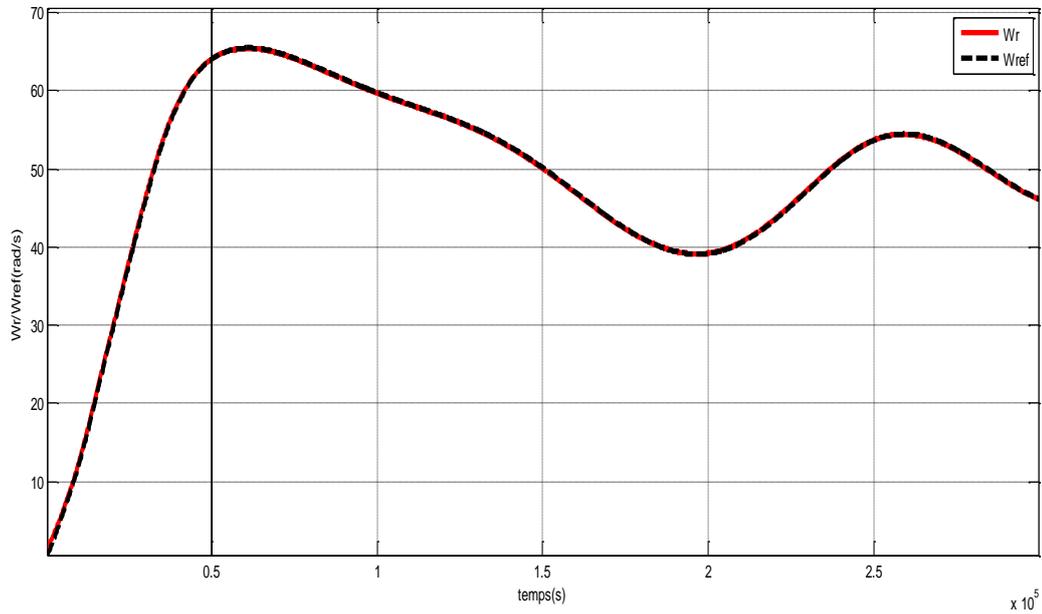


Figure 3.8 : Vitesse de rotation de la MSAP et sa référence

## ❖ Pour la vitesse mécanique

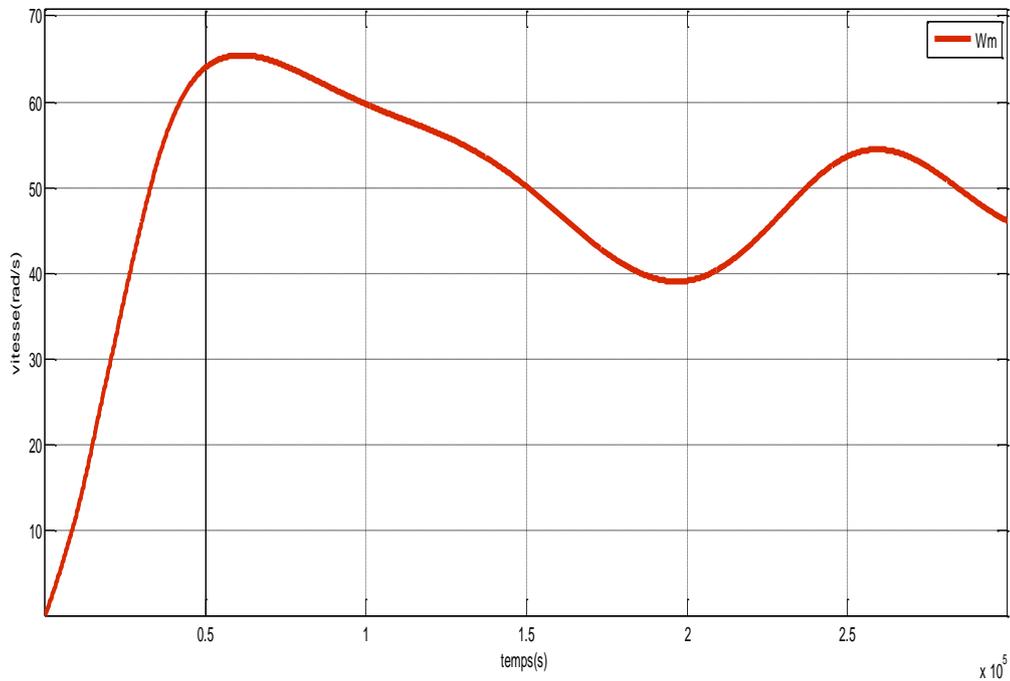


Figure 3.9: vitesse mécanique

Pour la puissance :

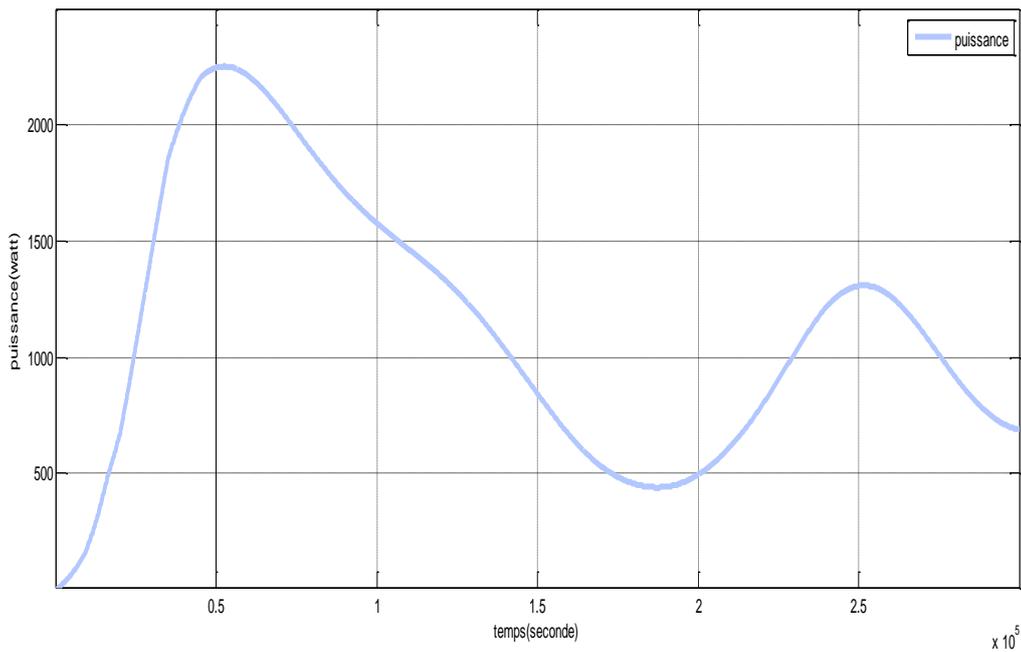


Figure 3.10: Puissance de la turbine

❖ Pour les courants ( $i_a, i_b, i_c$ ) :

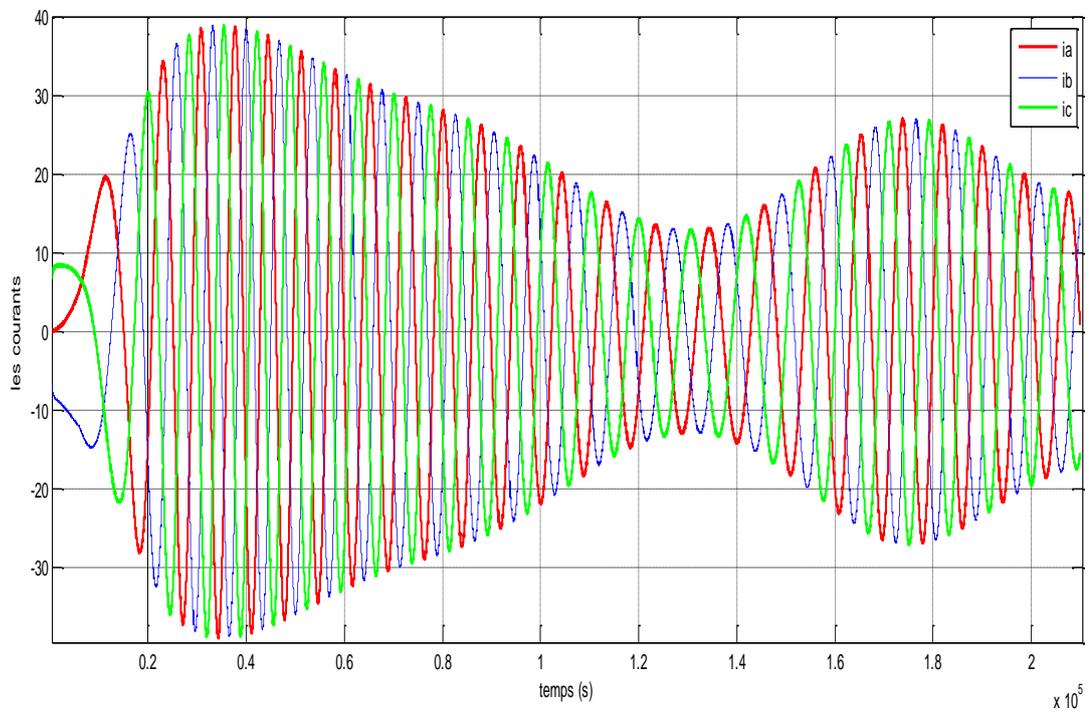


Figure 3.11 : allures des courants ( $i_a, i_b, i_c$ )

❖ Allures des courants ( $i_d, i_q$ ):

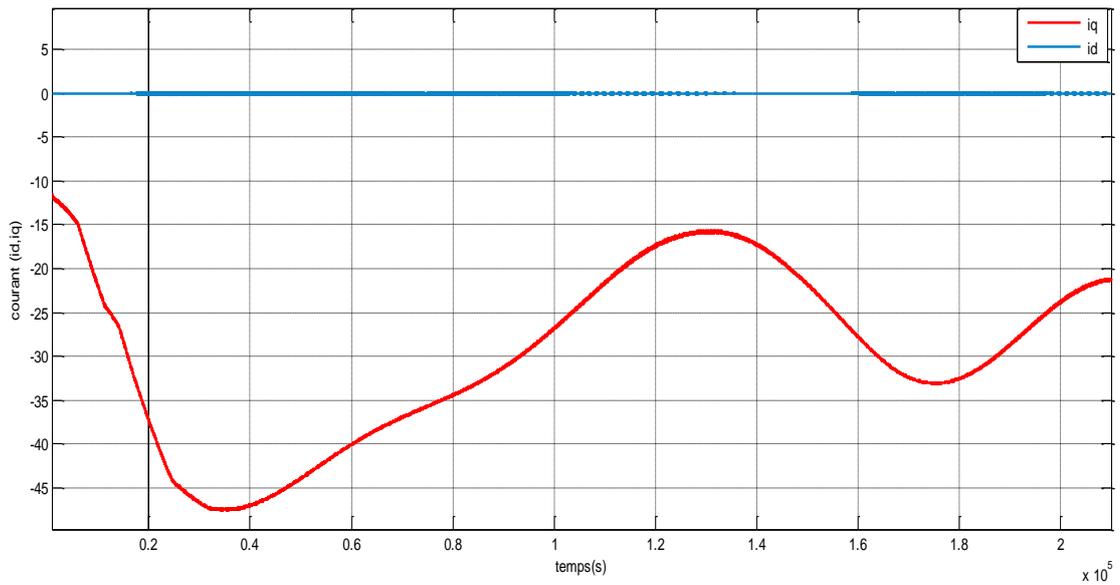


Figure 3.12: allures des courants ( $I_d, i_q$ )

❖ Pour les tensions ( $v_a, v_b, v_c$ )

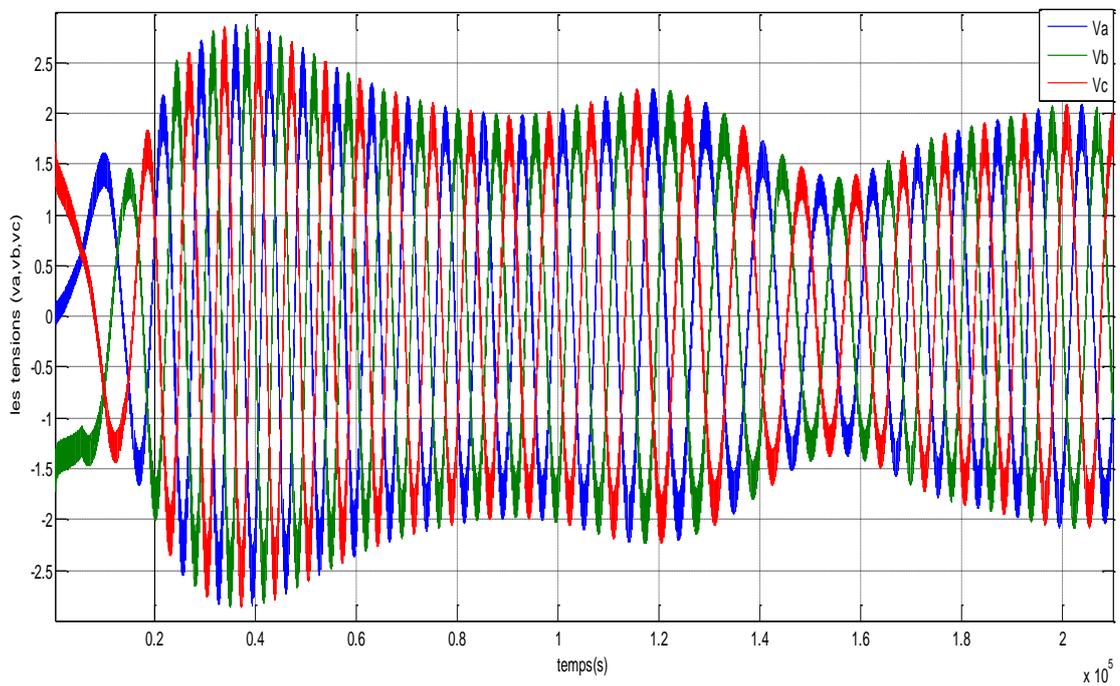


Figure 3.13: allures des tensions ( $v_a, v_b, v_c$ )

❖ Pour le courants  $i_d, i_{dref}$  :

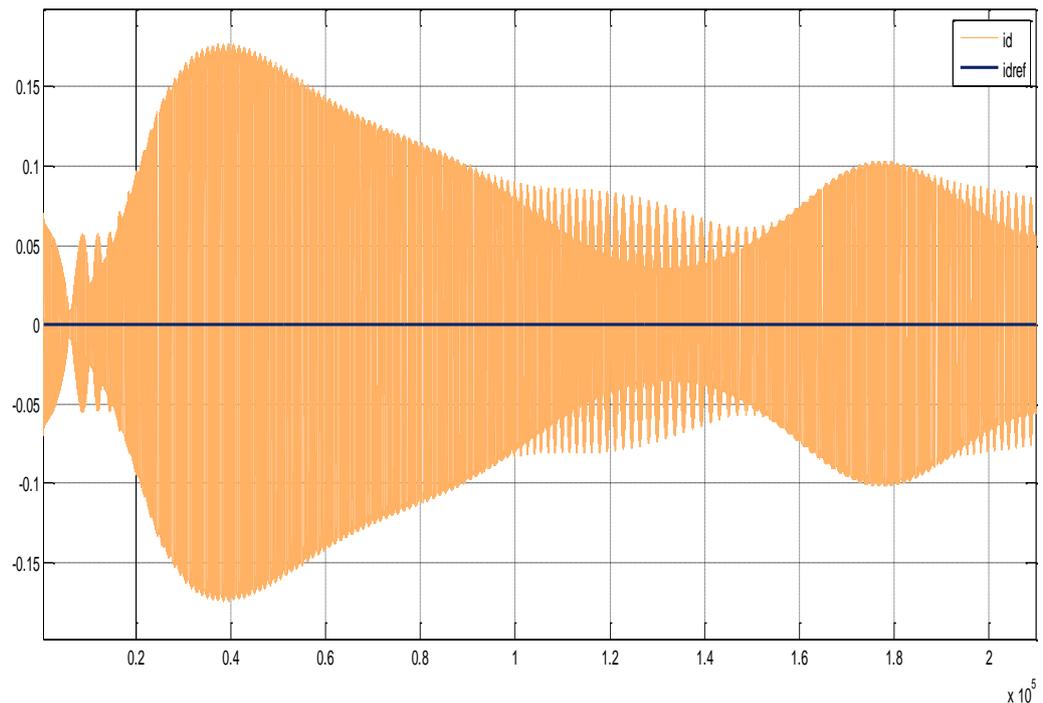


Figure 3.14 : Courant mesurer  $i_d$  et référence  $i_{dref}$

❖ Pour le courants  $i_q, i_{qref}$  :

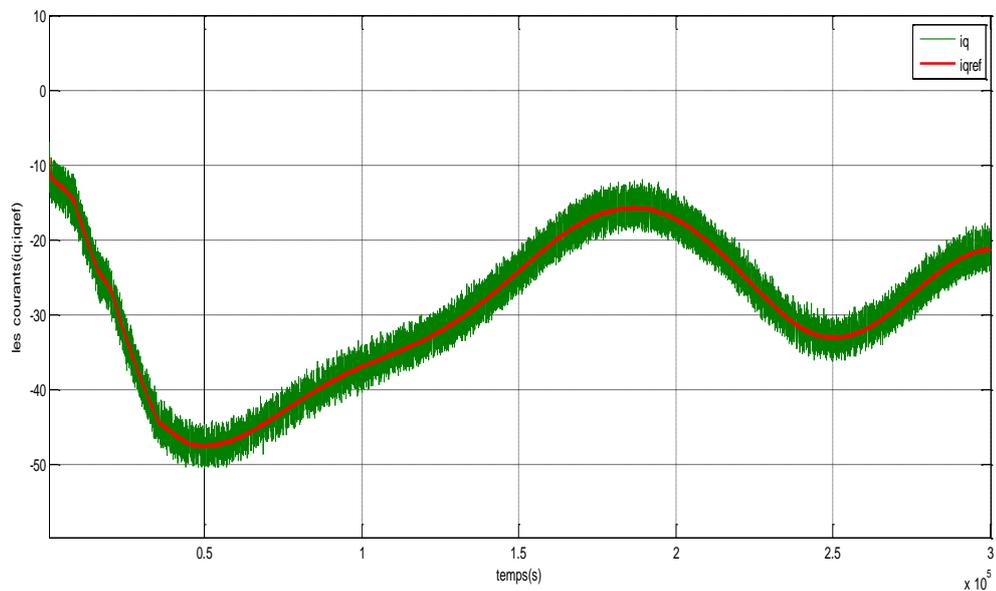


Figure 3.15 : Courant mesurer  $i_q$  et référence  $i_{qref}$

**Interprétation des résultats :**

- ✚ La figure (3.6) représente une séquence de vent générée par le modèle Simulink avec une vitesse moyenne de vent qui varie entre (6.62m/s) à (12 m/s).
- ✚ La figure (3.7) montre le couple électromagnétique qui suit le couple résistant délivré par la turbine avec un signe négatif, cela justifie que notre machine est en mode génératrice.

- ✚ La figure (3.8) montre la vitesse de rotation de la MSAP qui suit parfaitement ça référence.
- ✚ La figure (3.9) représente la vitesse mécanique, issue de la turbine est qui suit la variation du profil du vent.
- ✚ Figure (3.10) représente Puissance de la turbine estimé a 2250 Watt. On constate aussi qu'elle suit la fluctuation de la vitesse du vent.
- ✚ Figure (3.11) représente les allures des courants ( $i_a, i_b, i_c$ ), après L'application de la transformée inverse de Park aux courants  $i_d$  et  $i_q$ .
- ✚ Figure (3.12) représente les allures des courants ( $I_d, i_q$ ). On remarque toujours que le courant  $I_q$  est l'image du couple tan-dis que le courant  $I_d$  est maintenue presque nul.
- ✚ Figure (3.13) représente les allures des tensions ( $v_a, v_b, v_c$ ) .par L'application de la transformée inverse de Park aux tensions  $V_d$  et  $V_q$  qui permet de tracer l'allure de ces tensions.
- ✚ La figure (3.14) représente respectivement le courant  $i_d$  qu'on a imposé égal à zéro, On remarque que  $i_{dref}$  suit bien ça consigne.
- ✚ La figure (3.15) représente  $i_q$  qu'on a obtenu grâce au régulateur PI. Qui Suit parfaitement le  $i_{qref}$ .

### IV. Conclusion :

Les résultats de simulation obtenus montrent le bon fonctionnement de l'aérogénérateur et la fiabilité de la commande vectorielle appliquée au système.

Enfin on peut conclure que malgré la variation de l'entrée du système qui est le vent, la tension à la sortie de redresseur reste constante à la valeur désirée ce qui justifie la robustesse de la commande réalisée.

### *Conclusion générale*

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'utilisation de la machine synchrone à aimant permanent dans un système de conversion d'énergie éolienne. Un état de l'art de l'éolien et des différents type d'aérogénérateur est présenté dans le premier chapitre. La production d'électricité d'origine éolienne est de plus en plus importante et les performances des aérogénérateurs sont en évolution permanente afin d'améliorer le rendement énergétique, de baisser les charges mécaniques, d'améliorer la qualité de l'énergie produite et de diminuer le coût d'exploitation.

Une modélisation des différents éléments de la chaîne éolienne a été élaborée selon une structure de conversion d'énergie choisie constituée d'une machine synchrone à aimants permanents, commander par un convertisseur contrôlé par MLI, un bus continu placé en aval de ce convertisseur, garde par un control adéquat une tension constante. Un modèle continu équivalent du système complet, a été développé dans le but d'analyser son comportement dynamique. Compte tenu de la complexité du système étudié, un dispositif de commande a été développé dont est basé sur la commande vectorielle de la génératrice.

Dans un dernier chapitre, l'essentiel de notre contribution est abordé, à savoir la simulation de la chaîne de conversion. Les différents modèles étudiés sont conformes à la réalité. Un modèle de simulation a été mis au point pour prédire le comportement du système en entier. Nous avons étudié la chaîne de conversion éolienne, décrit les différents constituants de la chaîne de conversion et présenter les résultats de simulation sous Matlab-Simulink.

Les résultats de simulations obtenus d'après le travail nous a permet de conclure la fiabilité de la commande vectorielle utilisée.

On peut proposer quelques perspectives qui peuvent améliorer les performances de la chaîne de conversion proposée :

- Utilisation des commandes non linéaires (mode glissant, logique floue, ...)
- Remplacer les convertisseurs à deux niveaux par des convertisseurs multi niveaux
- Rajouter des convertisseurs pour pouvoir connecter la génératrice au réseau

## *Bibliographie*

---

### *Bibliographie*

- [1]- : "Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade", Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif. 06 /07 /2010.
- [2]- : M.A HASSAD, "Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques", Mémoire de Magister, université Sétif 1 (Algérie).2012.
- [3]- : A. BOYETTE, "Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne", thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy. 11/12/2006.
- [4]- : A. MIRECKI, "Etude comparative des chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance", Thèse de Doctorat, institut national polytechnique de Toulouse. 05/04/2005.
- [5]- : Z. TIR, "Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade", Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif. 06 /07 /2010.
- [6]- : M. T LATRECHE, "Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien", Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif 24 /06 /2012.
- [7]- : M. K. TOUATI, "Étude D'une Génératrice Éolienne Connectée Au Réseau Électrique", Mémoire de Magister, Université de Batna, 15/01/2015.
- [8]- : N. KHEZAMI, "Commande multi modèle optimale des éoliennes : Application à la participation des éoliennes au réglage de la fréquence", Thèse de Doctorat, école centrale de Lille, école supérieure des sciences et techniques de Tunis. 17/ 10/2011.
- [9]- : F. BOUMARAF, "Commande D'un Aérogénérateur- Apport Des Techniques de L'intelligence Artificielle", thèse de doctorat, université de Batna. 24/06/2014.
- [10]- : S. MOKRANE, " modélisation et commande d'un aérogénérateur à machine asynchrone à double alimentation en vue de simulation des problèmes de cogénération", université du Québec en Abitibi-Témiscaminque, mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie. Août 2013.

## *Bibliographie*

---

- [11]- : S. MOKRANE, " modélisation et commande d'un aérogénérateur à machine asynchrone à double alimentation en vue de simulation des problèmes de cogénération", université du Québec en Abitibi-Témiscaminque, mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie. Août 2013.
- [12]- : M. MAYOUF, "Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents", Mémoire de Magister, l'université Hadj Lakhdar Batna. 13/02/ 2008.
- [13]- : M. MAYOUF, "Etude comparative des architectures et stratégies de contrôle d'un aérogénérateur synchrone a aimants permanents", Thèse de Doctorat, l'université Hadj Lakhdar Batna. 20/04/ 2014.
- [14]- : P. LECONTE, M. RAPIN, E. SZECHENYI, "Éoliennes", Techniques de l'Ingénieur. 04/11/2008.
- [15]- : F. MERRAHI, "Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne)", mémoire de magister, Ecole Nationale polytechnique. 30/06/2007.
- [16]- : A. Abdelli, << Optimisation Multicritères d'une chaîne éolienne passive >>, Thèse de Doctorat en Electrotechniques, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2007.
- [17] - :S. El Aimani, << Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension >>, Thèse de Doctorat d'Etat en Electronique et Génie Electrique. Ecole Centrale de Lille (ECL), 2005.
- [18]-: R. Melicio, V.M.F. Mendes, J.P.S. Catalao, << Computer simulation of wind power systems: Power Electronics and Transient Stability Analysis >>, International Conference on Power System Transients (IPST 2009), Kyoto, Japan, Juin 3-6, 2009.
- [19]- : F. MAZOUZ, " commande d'un système éolien a base d'un générateur synchrone a aimants permanents", mémoire de magister, université Hadj Lakhdar Batna. 27/06/2013.
- [20]- : A BOUHADDA, "Contribution à l'étude de système de commande d'une éolienne", mémoire de magister, université Mouloud Maameri , Tizi-ouzou.07/07/2011.
- [21]- : F. POITIERS, "Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne", Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes : -Machine asynchrone à cage autonome-Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau". 19/12/ 2003.

## *Bibliographie*

---

- [22]- : Y. BEKAKRA, "Contribution à l'Etude et à la Commande Robuste d'un Aérogénérateur Asynchrone à Double Alimentation", Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra. 21/10/2014.
- [23]- : Touahri.A, «Application de la DTC à un aérogénérateur Asynchrone double alimentation», mémoire de magister, option : Machines Electriques, L'université Batna 2, 2016.
- [24]- : P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, << Eolienne >>, Techniques de l'Ingénieur, BM 4640.
- [25]- : M. Aydin, S. Huang, T. A Lipo "Quality and Comparison of Internai and External Rotor Axil Flux Surface-Magnet Dise Machines", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 53, N° 3, Juin 2006.
- [26]- : Mayouf Messaoud, «Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents », Mémoire de magister, option : Energie renouvelables, UNIV de Batna, Algérie, 2008.
- [27]- : K.GHEDAMSI, Contribution à la modélisation et la commande d'un convertisseur direct de fréquence. Application à la conduite de la machine asynchrone, Thèse de Doctorat, ENP Alger (Algérie), 2008.
- [28]- : Poitiers F. : Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne. Machine asynchrone à cage autonome. Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau. Thèse présenté pour l'obtention du diplôme de Doctorat, école polytechnique de l'Université de Nantes, 2003.
- [29]- :F.S. Dos Reis, << Active shunt filter for harmonic mitigation in wind turbines generators>>, 37th IEEE Power Electronic Specialists Conference, Juin 18-22, 2006, Jeju, Korea.
- [30]-:R. Chibani, << Application de l'automatique aux cascades à onduleurs à cinq niveaux à structure NPC >>, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2007.
- [31]- : S. Bolkrachef, << Analyse et contrôle de l'onduleur de tension à cinq niveaux à structure NPC. Application à la commande floue de la machine asynchrone >>, Mémoire de Magister, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, Alger, May 2001.

## *Bibliographie*

---

- [32]-:G. Grellet, G. Clerc, << Actionneurs électriques >>, Editions Eyrolles, 1997.
- [33]- : Maghsel S, «Contribution à l'amélioration et la commande d'une turbine éolienne» mémoire de magistère, option : Électrotechnique, UNIV du 20 aout 1955 – Skikda, Algérie, 2012.
- [34]- : Nicolas LAVERDURE, «l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires», Thèse de Doctorat, Spécialité : Génie Electrique, Institut national polytechnique de Grenoble, décembre 2005.
- [35]- : Adnane Zaimi, «Optimisation de la commande d'une éolienne A basse de machine synchrone à aimants permanents», Diplôme de L'ingénieur, Conservatoire Nationale des Arts et Métiers, Centre de Maroc, 2014.
- [36]- : Toufik Zidelmal, «Modèle de prédiction et de commande de la machine synchrone à aimants permanents : application dans les aérogénérateurs», Mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie, Université du Québec en Abitibi Témiscamingue, École de Génie, AVRIL 2015.
- [37]- : Heier S.: Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems. 1998.
- [38]- :T. REKIOUA, «Contribution à la modélisation et à la commande vectorielle des machines à aimants permanents», thèse de doctorat de l'I.N.P.L, 1992.
- [39]- :LOUAR.F, «Modélisation et simulation d'une chaine de conversion d'énergie éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent», Thèse de doctorat, option : Gestion et Qualité de l'Énergie Electrique, Université Baji- Mokhtar Annaba, Algérie, 2016.
- [40]- :F.MEIBODY-TABAR, « Machines synchrones à aimants permanents alimentées par onduleurs de tension ; Modélisation, Commande et Segmentation de puissance », habilitation à diriger des recherche, Nancy, France, 2000.
- [41]- :S.ALLOUNE, K. IDJDARENE, «Etude de la commande vectorielle de la machine synchrone double étoile », mémoire d'Ingénieur, université A. Mira Bejaia, 2002.
- [42]- :L. khattache, «Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique double alimentée», Batna, 2007.

## *Bibliographie*

---

[43]- :G. Segulier, F. Labrique, << Les convertisseurs de l'électronique de puissance >>, Edition Lavoisier, Tech and Doc, 1998, tome 1 et tome 4.

[44]- : <http://www.windpower.org/fr/tour/wtrb/comp/index.htm>.

[45]- : A. Golea," Contribution au développement d'une méthodologie de conception des associations Convertisseurs -Machines ", Thèse de doctorat de l'INP de Grenoble, 1994.

[46]- : C.Bouchereb "Contrôle direct du couple des machines synchrones ".mémoire de magister en électrotechnique, université de Batna, 2005.

[47]- : N.Benyahia, K. Srairi, S. M. Mimoune," Commande de la machine asynchrone par orientation du flux rotorique", pp.147-150, N°06, Juin 2005.

## *Annexes*

### **1. Les paramètres de la turbine**

$$R= 1.5 \text{ [m]}$$

$$\text{Rho}= 1.225 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$G= 1$$

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

$$j= 0.1 \text{ [kg.m}^2\text{]}$$

$$\text{Cp max}= 0.5270$$

### **2. Les paramètres de la MSAP**

$$Lq= 9.515 \text{ e-4 [H]}$$

$$Ld=8.54\text{e -4 [H]}$$

$$J=0.1 \text{ [kg.m}^2\text{]}$$

$$f= 0.0085 \text{ [N.m.s/rad]}$$

$$\text{Flux}= 0.12$$

$$P=4$$

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

### **3. Régulateurs de vitesse de la turbine :**

$$K_i = 1510.3$$

$$K_p = 121730$$