

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche Scientifique**

Université Abderrahmane Mira de Bejaia  
Faculté des Sciences et technologies  
Département d'Electrotechnique

# *Mémoire de Fin d'Etude*

*En vue de l'obtention du diplôme master en Electrotechnique*  
*Option : Electromécanique*

## *Thème :*

**Etude d'un système éolien connecté au réseau, basé sur une GAS auto-excitée**

Présenté par :

M<sup>r</sup> Sadkine Smail  
M<sup>r</sup> Rachedi Aghiles

Encadré par :

M<sup>me</sup> Abdelli Radia

Devant le jury composé de :

Président : M<sup>r</sup> Meziani Ismail  
Examineurs : M<sup>r</sup> Yahiaoui Belkacem

*Promotion 2016/2017*

# Remerciements

*C'est un agréable plaisir pour nous d'exprimer nos vifs remerciements à notre promotrice Madame **R. ABDELLI** qui nous a fait profiter de ses connaissances et ses conseils précieux pour son aide, sa rigueur scientifique, ces orientations et ces remarques bienveillantes qu'elle nous a prodigués pour l'élaboration de ce travail.*

*Nos remerciements vont également aux membres de jury qui ont accepté d'évaluer notre travail. Nous sommes particulièrement sensibles au grand honneur qu'ils nous ont accordé en acceptant cette tâche.*

*Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce mémoire.*

Je dédie ce mémoire à ;

- ✚ Mes chers parents et mes chers grands parents
- ✚ Mon frère, Amine
- ✚ Ma sœurs
- ✚ Mes proches
- ✚ Tous mes amis.

Sadkine Smail

Je dédie ce mémoire à ;

- ✚ Mes chers parents et mes chers grands parents
- ✚ Mon frère koucila
- ✚ Ma sœurs
- ✚ Mes proches
- ✚ Tous mes amis.

Rachedi Aghiles



# Sommaire

Chapitre 1 : Généralité sur les systèmes de conversions éoliens

|  |    |
|--|----|
| I.1 Introduction.....  | 4  |
| I.2 Historique de l'énergie éolienne.....                            | 4  |
| I.3 Vitesse et direction du vent .....                               | 5  |
| I.4 Représentation d'une éolienne et son énergie de production ..... | 6  |
| I.4.1 Différents types d'éoliennes et leur utilisation .....         | 6  |
| I.4.1.1 Eolienne a axe vertical .....                                | 6  |
| I.4.1.2 Eolienne a axe horizontal.....                               | 8  |
| I.4.2.1. Eoliennes lentes.....                                       | 8  |
| I.4.2.2. Eoliennes rapides .....                                     | 9  |
| I.4.3 Principales composantes d'éolienne.....                        | 10 |
| I.4.3.1 Rotor .....  | 10 |
| a. Rotors à pas fixe .....   | 10 |
| b. Rotors à pas variable .....                                       | 11 |
| I.4.3.2 Mât.....   | 11 |
| I.4.3.3 Nacelle .....  | 11 |
| I.4.3.4 Arbre.....   | 12 |
| I.4.3.5 Multiplicateur .....   | 12 |
| I.4.3.6 systèmes de refroidissement .....                            | 12 |
| I.4.3.7 Génératrice (ou alternateur).....                            | 12 |
| I.4.4 Principe de fonctionnement.....                                | 12 |
| I.4.5 Conversion de l'énergie éolienne .....                         | 12 |

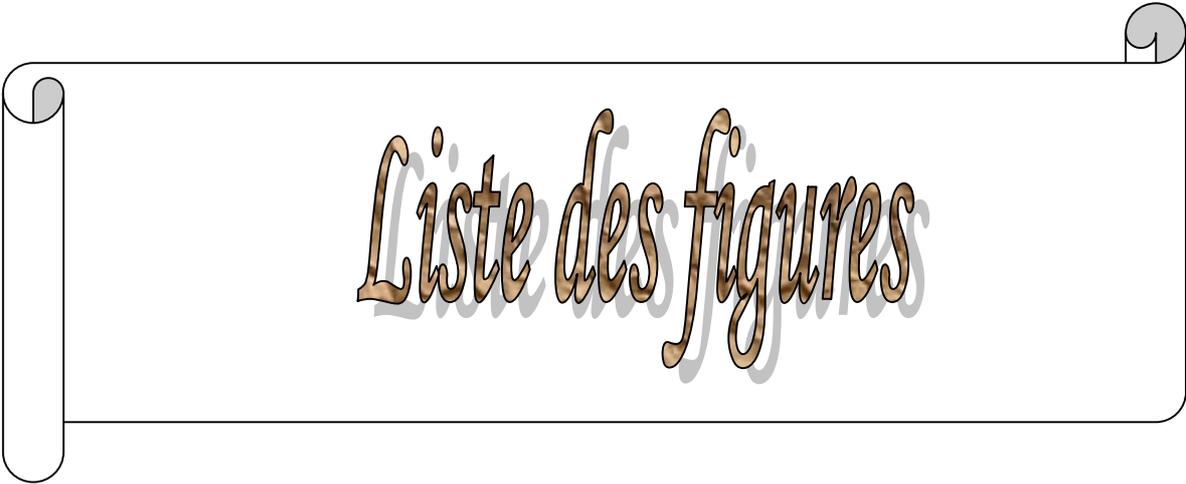
|  |    |
|--|----|
| I.4.6 Avantages ET inconvénients de l'énergie éolienne .....       | 13 |
| I.4.6.1 Avantages .....  | 13 |
| I.4.6.2 Inconvénients .....  | 14 |
| I.5 Rentabilité d'une éolienne .....                               | 14 |
| I.6 Descriptions des machines électrique à courant alternatif..... | 16 |
| I.6.1 Machine synchrone .....                                      | 16 |
| I.6.2 Machine asynchrone .....                                     | 17 |
| I.7 Différents systèmes qui existent.....                          | 18 |
| I.7.1 Génératrices synchrones (GS).....                            | 18 |
| I.7.2 Génératrice asynchrone a double alimentation (GADA).....     | 19 |
| I.7.3 Génératrice asynchrone à cage (GAS).....                     | 20 |
| I.7.4 Redresseur a diodes et onduleur MLI.....                     | 21 |
| I.7.5 Redresseur et onduleur MLI.....                              | 21 |
| I.8 Conclusion .....   | 22 |

## Chapitre II : Modélisation de la chaîne de conversion étudiée

|  |    |
|--|----|
| Introduction .....                               | 23 |
| II. Modélisation du système éolien .....         | 23 |
| II.1. Modélisation de la turbine.....            | 23 |
| II.1.1 Extraction de maximum de puissance .....  | 25 |
| II.2. Modèle du multiplicateur .....             | 26 |
| II.3. Modèle de la partie mécanique .....        | 27 |
| II.4 Modélisation de la machine asynchrone ..... | 28 |

|   |    |
|---|----|
| II.4.1 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone .....          | 28 |
| II.4.2 Hypothèses simplificatrices.....                                   | 29 |
| II.4.3 Modèle triphasé du moteur asynchrone.....                          | 29 |
| II.4.3.1 Equations électriques.....                                       | 29 |
| II.4.3.2 Equations magnétiques.....                                       | 31 |
| II.4.3 Equation mécanique.....  | 32 |
| II.4.4 Modèle biphasé de la MAS.....                                      | 33 |
| II.4.4.1 Transformation de Park.....                                      | 33 |
| II.4.4.2 Modèle de la MAS selon le système d'axes généralisé (u, v).....  | 34 |
| II.4.4.2.1 Système d'équations électriques.....                           | 35 |
| II.4.4.2.2 Système d'équations magnétiques.....                           | 35 |
| II.4.4.3 Choix du système d'axes .....                                    | 35 |
| II.4.4.3.1 Système d'axes ( $\alpha$ , $\beta$ ).....                     | 35 |
| II.4.4.3.2 Système d'axes (X, Y).....                                     | 36 |
| II.4.4.3.3 Système d'axes (d, q).....                                     | 36 |
| II.4.4.4.1 Modèle biphasé de la machine lié au système d'axes (d, q)..... | 36 |
| II.4.4.4.2 Equations magnétiques.....                                     | 37 |
| II.4.4.4.3 Puissance absorbée et couple électromagnétique.....            | 38 |
| II.5 Modélisation des convertisseurs statiques .....                      | 40 |
| II.5.1 Modèle du convertisseur statique.....                              | 40 |
| II.5.2 Commande MLI des convertisseurs.....                               | 42 |
| II.5.3 Modélisation de bus continu .....                                  | 44 |
| II.5.4 Modélisation du filtre .....                                       | 45 |

|  |    |
|--|----|
| Conclusion.....  | 48 |
| Chapitre III : Système de commande de la liaison au réseau |    |
| Introduction.....  | 49 |
| III.1 But de Commande MLI des convertisseurs .....         | 49 |
| III.2 Contrôle de liaison au réseau .....                  | 50 |
| III.2.1 Régulation de bus continu.....                     | 51 |
| III.2.2 Régulation de puissance .....                      | 51 |
| III.2.3 Contrôle des courants envoyés au réseau.....       | 53 |
| Conclusion.....  | 57 |
| Chapitre IV : Simulation du système étudié                 |    |
| Introduction.....  | 55 |
| IV. Résultats de simulation.....                           | 55 |
| IV.1.1 Essai a vitesse du vent constante.....              | 55 |
| IV.1.2 Interprétation des résultats de simulation.....     | 59 |
| IV.2.1 Essai a deux vitesses du vent différentes .....     | 60 |
| IV.2.2 Interprétation des résultats de simulation.....     | 62 |
| IV.3.1 Essai à vitesse du vent variable.....               | 63 |
| IV.3.2. Interprétation des résultats de simulation.....    | 67 |
| Conclusion.....  | 68 |
| Glossaire  |    |
| Liste des figures  |    |
| Bibliographie  |    |
| Annexe   |    |



*Liste des figures*

| <b>N° des figures</b> | <b>Titres des figures</b>  | <b>Pages</b> |
|-----------------------|--|--------------|
| <b>Chapitre I</b>     |  |              |
| Figure I.1            | Le moulin perse (à gauche) et le moulin à vent (à droite)          | 5            |
| Figure I.2            | éolienne de Savonius   | 7            |
| Figure I.3            | éolienne de Darrieus   | 8            |
| Figure I.4            | Composant d'une éolienne à axe horizontal                          | 11           |
| Figure I.5            | Éléments attachés à une nacelle                                    | 11           |
| Figure I.6            | Conversion de l'énergie cinétique du vent                          | 13           |
| Figure I.7            | Capacité mondiale installé en MW                                   | 15           |
| Figure I.8            | Principe du générateur synchrone                                   | 17           |
| Figure I.9            | Système éolien basé sur la machine synchrone à vitesse variable    | 19           |
| Figure I.10           | Système éolien basé sur la machine asynchrone double alimentation  | 20           |
| Figure I.11           | Système éolien basé sur une machine asynchrone à vitesse constante | 20           |
| Figure I.12           | Système éolien basé sur une machine asynchrone à vitesse variable  | 21           |
| <b>Chapitre II</b>    |  |              |
| Figure II.1           | Schéma de la turbine éolienne                                      | 23           |
| Figure II.2           | Allure du coefficient de puissance pour une éolienne réelle        | 25           |
| Figure II.3           | courbe de la puissance en fonction de la vitesse du vent           | 26           |
| Figure II.4           | Schéma bloc fonctionnel du modèle de la turbine                    | 28           |
| Figure II.5           | Représentation schématique des enroulements de la MAS              | 29           |
| Figure II.6           | Représentation du modèle généralisé de la MAS selon les axes (u,v) | 34           |
| Figure II.7           | Schéma d'un onduleur de tension triphasé                           | 35           |
| Figure II.8           | Modèle de l'onduleur commandé par MLI                              | 44           |
| Figure II.9           | Schéma de bus continu  | 44           |

|                     |   |           |
|---------------------|---|-----------|
| <b>Figure II.9</b>  | <b>Modèle du filtre dans le repère (d,q)</b>                | <b>47</b> |
| <b>Chapitre III</b> |   |           |
| <b>Figure III.1</b> | <b>Schéma de principe de la MLI naturelle</b>               | <b>49</b> |
| <b>Figure III.2</b> | <b>Schéma global de la commande de la liaison au réseau</b> | <b>50</b> |
| <b>Figure III.3</b> | <b>Contrôle de bus continu</b>                              | <b>51</b> |
| <b>Figure III.4</b> | <b>Contrôle de puissance</b>                                | <b>53</b> |
| <b>Figure III.5</b> | <b>Contrôle des courants</b>                                | <b>54</b> |
| <b>Chapitre IV</b>  |   |           |
| <b>Figure IV.1</b>  | <b>Tension du bus continu.</b>                              | <b>55</b> |
| <b>Figure IV.2</b>  | <b>Tension simple à la sortie de l'onduleur.</b>            | <b>56</b> |
| <b>Figure IV.3</b>  | <b>Courant envoyée au réseau</b>                            | <b>56</b> |
| <b>Figure IV.4</b>  | <b>Puissance mécanique.</b>                                 | <b>57</b> |
| <b>Figure IV.5</b>  | <b>Puissance active envoyée au réseau</b>                   | <b>57</b> |
| <b>Figure IV.6</b>  | <b>Puissance réactive envoyée au réseau</b>                 | <b>58</b> |
| <b>Figure IV.7</b>  | <b>facteur de puissance</b>                                 | <b>58</b> |
| <b>Figure IV.8</b>  | <b>Fréquence</b>  | <b>59</b> |
| <b>Figure IV.9</b>  | <b>Profil du vent</b>                                       | <b>60</b> |
| <b>Figure IV.10</b> | <b>Tension de bus continu</b>                               | <b>60</b> |
| <b>Figure IV.11</b> | <b>Puissance active envoyée au réseau</b>                   | <b>61</b> |
| <b>Figure IV.12</b> | <b>Puissance réactive envoyée au réseau</b>                 | <b>61</b> |
| <b>Figure IV.13</b> | <b>Courant envoyé au réseau</b>                             | <b>62</b> |
| <b>Figure IV.14</b> | <b>Profil du vent appliqué</b>                              | <b>63</b> |
| <b>Figure IV.15</b> | <b>Tension de bus continu</b>                               | <b>63</b> |
| <b>Figure IV.16</b> | <b>Tension simple à la sortie de l'onduleur</b>             | <b>64</b> |

|                     |   |           |
|---------------------|---|-----------|
| <b>Figure IV.17</b> | <b>Puissance mécanique</b>                  | <b>64</b> |
| <b>Figure IV.18</b> | <b>Courant envoyé au réseau</b>             | <b>65</b> |
| <b>Figure IV.19</b> | <b>Couple électromagnétique</b>             | <b>65</b> |
| <b>Figure IV.20</b> | <b>Puissance active envoyée au réseau</b>   | <b>66</b> |
| <b>Figure IV.21</b> | <b>Puissance réactive envoyée au réseau</b> | <b>66</b> |
| <b>Figure IV.22</b> | <b>Facteur de puissance</b>                 | <b>67</b> |



*Glossaire*

$P_{vent}$  : Puissance du vent captée par les pales

$\rho$  : Densité de l'air

$S$  : surface balayée par la turbine

$v_{vent}$  : vitesse du vent

$P_{aero}$  : Puissance aérodynamique

$C_p$  : Coefficient de puissance de la turbine

$\lambda$  : Vitesse en bout de pales

$\beta$  : Angle de calage

$V_v^{min}$  : vitesse de démarrage

$P_n$  : Puissance nominale

$\Omega_{turbine}$  : vitesse angulaire de la turbine

$R$  : Rayon d'une pale de la turbine

$C_{aero}$  : Couple aérodynamique de la turbine

$\Omega_{mec}$  : vitesse mécanique de la turbine

$C_{arbre}$  : couple au niveau de l'arbre

$G$  : Rapport du multiplicateur

$J_{turbine}$  : Inertie de la turbine

$J$  : Inertie totale des parties tournantes

$J_g$  : Inertie du générateur

$C_{mec}$  : Couple mécanique sur l'axe du générateur

$C_{em}$  : Couple électromagnétique du générateur

$C_{visq}$  : Couple de frottements visqueux

$f$  : Coefficient de frottement visqueux

$v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}$  : Tensions statoriques instantanées aux bornes des phases (a, b, c) respectivement

$R_s, (R_r)$  : Résistance équivalente d'une phase statorique (rotorique)

$i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$  : Courants statoriques instantanées traversant les phases (a,b,c) respectivement

$\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}$  : Flux statoriques correspondant aux phases (a,b,c) respectivement

$v_{ra}, v_{rb}, v_{rc}$  : Tensions rotoriques instantanées aux bornes des phases (a,b,c) respectivement

$i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}$  : Courants rotoriques instantanées traversant les phases (a,b,c) respectivement

$\Phi_{ra}, \Phi_{rb}, \Phi_{rc}$  : Flux rotoriques correspondant aux phases (a,b,c) respectivement

$V_{ds}, V_{qs}$  : Tensions statoriques instantanées sur les axes (d,q) respectivement

$i_{ds}, i_{qs}$  : Courants statoriques instantanées sur les axes (d,q) respectivement

$\Phi_{ds}, \Phi_{qs}$  : Flux statoriques sur les axes (d,q) respectivement

$V_{dr}, V_{qr}$  : Tensions rotoriques instantanées sur les axes (d,q) respectivement

$i_{dr}, i_{qr}$  : Courants rotoriques instantanées sur les axes (d,q) respectivement

$\Phi_{dr}, \Phi_{qr}$  : Flux rotoriques sur les axes (d,q) respectivement

$[v_s], [v_r]$  : vecteurs des tensions des phases statoriques et rotoriques.

$[\Phi_s], [\Phi_r]$  : vecteurs des flux statoriques et rotoriques.

$[i_s], [i_r]$ : vecteurs des courants de phases statoriques et rotoriques.

$L_s$ : inductance propre d'une phase statorique

$L_r$ : inductance propre d'une phase rotorique

$M_s$ : inductance mutuelle entre deux phases statoriques

$M_r$ : inductance mutuelle entre deux phases rotoriques

$M_{sr} = M_{rs}$ : inductance mutuelle entre phase a du stator et phase a du rotor

$M$ : valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle stator-rotor obtenue lorsque les axes en question coïncident.

$C_r$ : Couple résistant du générateur

$\Omega$ : vitesse angulaire de la machine

$\omega_r$ : pulsation des courants triphasés rotoriques

$\omega_s$ : vitesse de synchronisme

$\omega_{gl}$ : pulsation électrique fondamentale du glissement

$P$ : Nombre de paire de pôle de la machine

$\theta$ : Angle entre les systèmes d'axes biphasé et triphasé

$\theta_s$ : Angle électrique statorique

$\theta_r$ : Angle électrique rotorique

$\omega_{cor}$ : vitesse angulaire de rotation du système d'axe biphasé par rapport au système d'axe triphasé

$p_a$ : La puissance absorbée par le MAS selon le système d'axes (d, q)

$u_0$ : La tension initiale du condensateur

$P_{em}$ : puissance électromagnétique

$[v_s], [v_r]$ : vecteurs des tensions des phases statoriques et rotoriques.

$[\phi_s], [\phi_r]$ : vecteurs des flux statoriques et rotoriques.

$[i_s], [i_r]$  : vecteurs des courants de phases statoriques et rotoriques.

$I_{dc-1}$  : Courant à la sortie du redresseur (convertisseur coté génératrice)

$V_{dc}$  : Tension du bus continu

$V_{dc_{ref}}$  : Tension de référence du bus continu

$S1, S2, S3$  : Fonctions logiques désignant les instants de commutation des interrupteurs des convertisseurs MLI

$C$  : Capacité du condensateur du bus continu

$I_{cref}$  : Courant traversant le condensateur du bus continu, sa référence

$i_{c-ref}$

$I_{dc-2}$  : Courant à l'entrée du convertisseur coté réseau

$it1, it2, it3$  : Courants envoyés au réseau

$V_{on1}, V_{on2}, V_{on3}$  : Tensions à la sortie du convertisseur coté réseau et à l'entrée du filtre dont les références sont  $V_{on1ref}, V_{on2ref}, V_{on3ref}$

$R_f$  : Résistance équivalente d'une phase du filtre à l'entrée du réseau

$L_f$  : Inductance équivalente d'une phase du filtre à l'entrée du réseau

$V_{res-a}, V_{res-b}, V_{res-c}$  : Tensions aux bornes du réseau

$V_{ond}, V_{onq}$  : Les tensions à la sortie de l'onduleur dans le repère de Park dont les références sont  $V_{ondref}, V_{onqref}$

$itd, itq$  : Les courants envoyés au réseau dans le repère de Park, les références sont  $itd_{ref}, itq_{ref}$

$V_{res-d}, V_{res-q}$  : Les tensions aux bornes du réseau dans le repère de Park

$E_d, E_q$  : tension de couplage dans le repère de park

$V_{m-abc}$  : tensions de phases a, b et c modulées par le convertisseur cote réseau

$V_{m_{dq}}$  : tensions d'axes d et q modulées par le convertisseur cote réseau

$P$  : Puissance active envoyée au réseau, sa référence  $P_{ref}$

$Q$  : Puissance réactive envoyée au réseau sa référence dont la référence est  $Q_{r-ref}$

$P_c$  : Puissance stockée dans le condensateur du bus continu dont la référence est  $P_{c-ref}$

### Indices

$s, r$  : Accordés respectivement aux grandeurs statoriques et rotoriques

$a, b, c$  : Accordés aux trois phases du stator ou du rotor de la génératrice

$d, q$  : correspondent à l'axe direct (d) et quadrature (q) du repère de Park.

$\alpha, \beta$  : Correspondent aux deux axes de Concordia

### Grandeurs et matrices

$[ ]^T$  : Transposée de la matrice  $[ ]$

$P(\theta)$  : Matrice de transformation de Park et  $\theta$  est l'angle de rotation du repère de Park

$[G]$  : Vecteur désignant une grandeur quelconque

### Abréviation :

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion

GSAP : La génératrice synchrone à aimants permanents

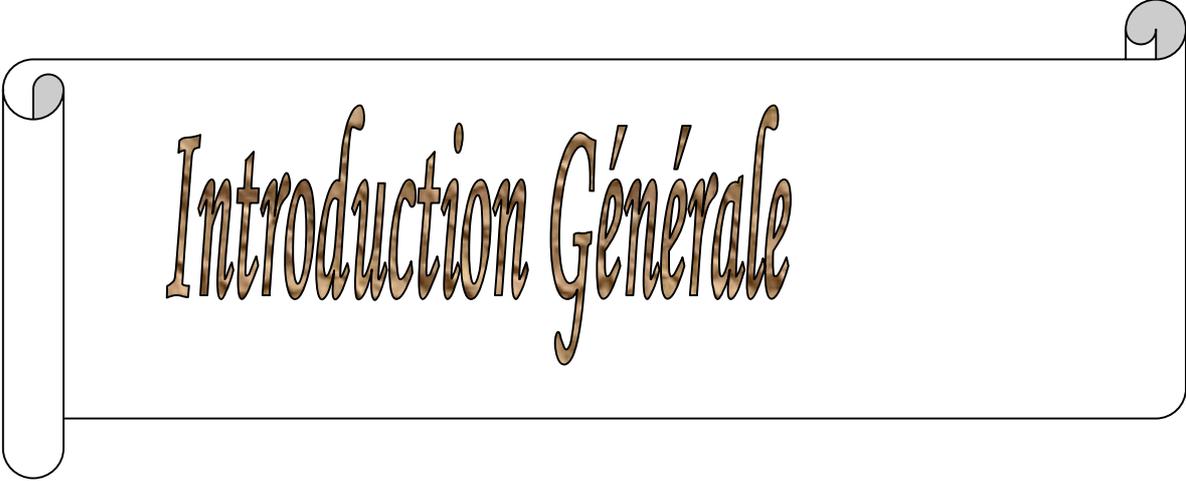
GAS : la génératrice asynchrone a cage d'écureuil

MPPT : Maximum Power Point Traking (suivi du point maximal de puissance).

GADA : la génératrice asynchrone a double alimentation

GS : les génératrices synchrones

IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor (transistor bipolaire à grille isolée)



*Introduction Générale*

### Introduction Générale :

Depuis la préhistoire, les hommes ont toujours eu des besoins croissants en énergie. De la maîtrise du feu à celle de l'électricité... A tel point qu'aujourd'hui, notre société ne saurait plus se passer de la seconde, devenue un élément indispensable à notre confort personnel, et surtout au développement de l'humanité. Dans un passé proche, la demande énergétique, constamment croissante, a poussé les hommes à développer de nouveaux moyens de « production » d'énergie, toujours plus efficaces, sans s'inquiéter outre mesure de leur impact environnemental et sanitaire.

Actuellement, à l'échelle mondiale, l'énergie que nous utilisons quotidiennement provient majoritairement des combustibles fossiles (pétrole, gaz, charbon), qui présentent l'avantage d'être facilement utilisables et restés longtemps bon marché. Mais leur emploi systématique et massif fait apparaître plusieurs problèmes majeurs. Tout d'abord, dans un futur très proche, l'homme sera vraisemblablement confronté à leur épuisement. Et il est d'ores et déjà confronté aux perturbations climatiques engendrées par le rejet massif de gaz à effet de serre produits lors de leur combustion.

La fission nucléaire, que l'on utilise actuellement, est en effet le moyen de « production » d'énergie le plus efficace que nous maîtrisons à ce jour, et l'uranium est présent en grande quantité sur la planète. Mais les risques encourus et potentiellement catastrophiques qu'elle engendre invitent à la réflexion quant à la légitimité du recours à ce mode de production d'électricité.

Face aux problèmes posés par les énergies fossiles et par la fission nucléaire, la première et meilleure réponse possible serait d'économiser l'énergie et de l'utiliser avec parcimonie, en évitant de la gaspiller. Mais l'homme ne pourra pas se passer d'elle. C'est pourquoi, il doit obligatoirement développer les moyens de substitution déjà existants et en chercher de nouveaux.

Ces moyens de substitution dont on parle, ce sont bien sûr les « énergies renouvelables ». Il s'agit d'énergies a priori peu polluantes et dont les sources présentent, en théorie, l'avantage d'être abondantes et inépuisables dans les millénaires à venir : par exemple, l'énergie lumineuse reçue du soleil par la terre pendant un an, est des milliers de fois plus importante que l'énergie consommée par l'humanité au cours de cette même période.

Parmi celles-ci, l'énergie éolienne apparaît clairement en bonne place, non pas en remplacement des sources conventionnelles, mais comme énergie d'appoint. En effet l'énergie potentielle des masses d'air en mouvement représente au niveau mondial un gisement

considérable. Cette énergie offre deux grands avantages, puisqu'elle est totalement propre et renouvelable. Lors de son exploitation, elle n'entraîne aucun rejet (pas d'effet de serre) et aucun déchet. Par ailleurs, le site d'implantation des éoliennes reste toujours exploitable, pour l'agriculture par exemple. Enfin, les petites installations permettent d'électrifier les lieux isolés et donnent une certaine indépendance à des petites communautés (un village, un regroupement d'industries...), mais le principal inconvénient de cette source d'énergie renouvelable est son manque de flexibilité et son inconstance. Le vent ne souffle pas forcément quand on a besoin.

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

Bien que les aérogénérateurs aient atteint une certaine maturité technique, la technologie des aérogénérateurs évolue. Les éoliennes de dernière génération fonctionnent à vitesse variable.

Ce type de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de diminuer les efforts mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe. C'est le développement des variateurs électroniques qui permet de contrôler la vitesse de rotation des éoliennes à chaque instant.

Toutefois, avec le développement ininterrompu dans le domaine de l'électronique de puissance à permis de développer plusieurs systèmes pour améliorer la qualité d'énergie et réduire les harmoniques produites par les convertisseurs de l'électronique de puissance. De nos jours, en plus de la fonction principale de ceux-ci, les règlements existants imposent une condition additionnelle de la bonne qualité de puissance.

Le travail exposé dans ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres principaux :

Le premier chapitre de cette thèse est consacré à des rappels sur les systèmes éoliens notamment sa description tout en donnant ses parties constitutives, son principe de fonctionnement, son énergie de production et les différentes génératrices et convertisseur utilisées dans les systèmes éolien.

Le second chapitre est consacré à l'étude et la modélisation de la chaîne de conversion (turbine, génératrice asynchrone à cage d'écureuil, convertisseurs MLI, bus continue et filtre).

Le troisième chapitre présente l'application et l'étude de la commande utilisée dans notre système éolien basé sur la GAS (machine asynchrone à cage d'écureuil).

Dans le quatrième et le dernier chapitre, on terminera notre travail par la simulation des différentes composantes de notre système avec le logiciel Matlab/Simulink à profil du vent variable et fixe.

Et on finalisera notre (mémoire) par une conclusion générale.

A decorative graphic of a scroll with a black outline and rounded corners. The scroll is unrolled, with the top and bottom edges showing a light gray shadow. The text is centered within the scroll.

# Chapitre I

*Généralités sur les système de production éolien*

## I.1. Introduction

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil (rayonnement), mais aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique).

Les sources renouvelables d'énergie, permettant une production décentralisée de l'électricité, peuvent contribuer à résoudre le problème de l'électrification des sites isolés où un grand nombre d'individus est dépourvu de tout apport énergétique, ne pouvant ainsi satisfaire aucun besoin même minime et améliorer ses conditions de vie. Faisant appel à des sources d'énergie universellement répandues, nécessitant un minimum de maintenance, la solution éolienne représente le plus souvent le choix économique et technologique idéal pour les régions ou installations isolées.

L'énergie éolienne est probablement une des plus anciennes sources d'énergie. Cette énergie propre et renouvelable existe depuis toujours. La technologie des aéromoteurs (ou capteurs éoliens) a connu une évolution fulgurante surtout ces dernières décennies; notamment dans le domaine de la production d'énergie électrique. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et leurs structures sont de plus en plus performantes. Ainsi dans ce qui suit nous allons énoncer un état de l'art sur l'énergie éolienne.

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

L'énergie éolienne est l'une des plus vieilles énergies de la terre. Le vent fût utilisé pendant plusieurs siècles pour la propulsion des navires, il présentait presque la seule source d'énergie pour les navires jusqu'à ce que WATT a inventé le moteur à vapeur dans le dix-huitième siècle [1].

L'histoire nous apprend qu'au dix-septième siècle A.J.C, l'empereur de Babylone, HAMMURABI, avait conçu un système d'irrigation basé sur l'énergie éolienne. Trois siècles A.J.C, L'Egyptien HERO d'Alexandrie avait décrit une simple turbine éolienne à axe horizontal à quatre pales pour getter des organes. Les perses utilisaient en septième siècle des éoliennes rudimentaires à axe vertical qui servait à l'irrigation des terres cultivées et au meulage du grain [1]. Ce type de moulins à vent va se répandre dans le monde arabe.

Par la suite, les croisées les ramenèrent en Orient. D'abord le système éolien est utilisés pour le pompage d'eau (POLDER), elles servirent par la suite au seizième siècle à d'autres fonctions, tel que couper le bois. Ce n'est qu'en 1890 au Danemark que les éoliennes seront utilisées pour créer de l'énergie électrique [2].

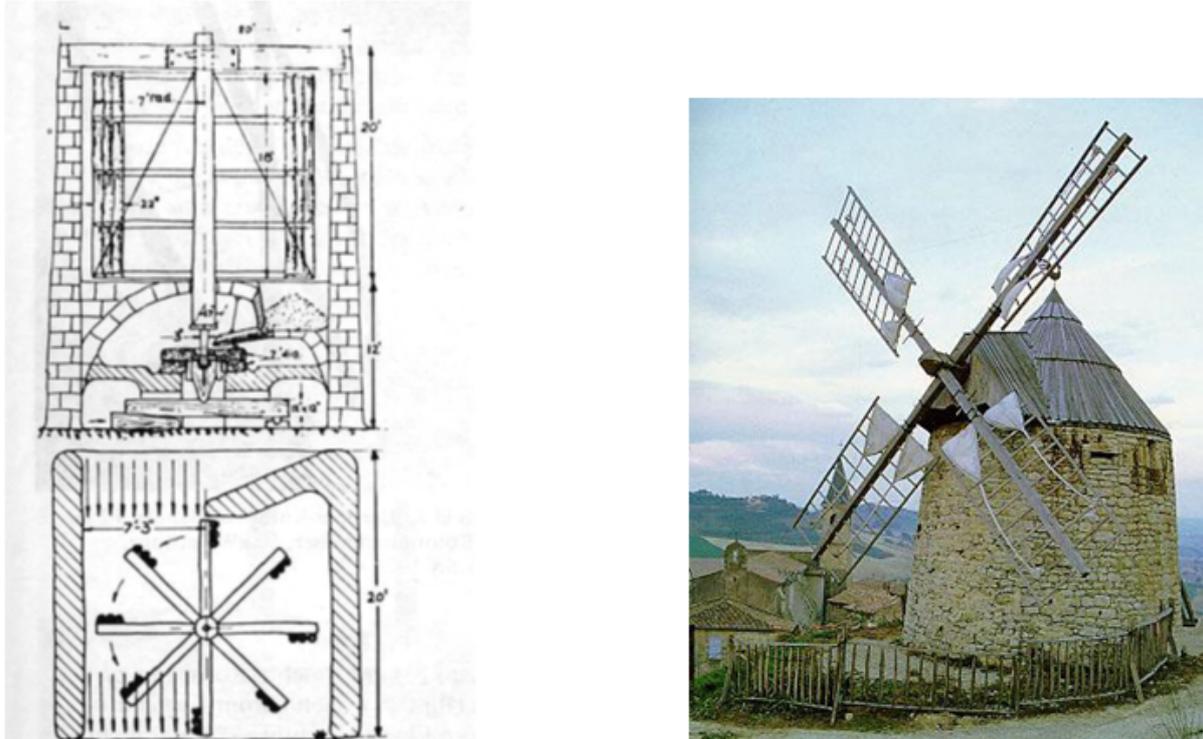


Figure I.1 Le moulin perse (à gauche) et le moulin à vent (à droite).

### I.3 Vitesse et direction du vent

Le vent souffle en principe des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions. Aux latitudes moyennes et aux grandes latitudes, sa direction est cependant modifiée du fait de la rotation de la terre. Le vent devient alors parallèle aux isobares au lieu de leur être perpendiculaire. Dans l'hémisphère nord, le vent tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre autour des aires cycloniques et dans le sens direct autour des zones anticycloniques. Dans l'hémisphère sud, les sens sont inversés par rapport aux précédents. La vitesse du vent est mesurée avec des anémomètres. Il en existe plusieurs types classés en deux catégories principales (les anémomètres à rotation et les anémomètres à pression). Une graduation a été établie, selon l'échelle Beaufort qui divise les vents en fonction de leurs vitesses en 17 catégories dont nous citons quelques unes au tableau I.1 [3].

| Degrés Beaufort | Vitesse du vent (m/s) | Vitesse du vent (km/h) | Description générale | Pression sur surface plane (daN/m <sup>2</sup> ) |
|-----------------|-----------------------|------------------------|----------------------|--|
| 0               | 0 à 0.4               | < 1                    | Calme                |  |
| 3               | 3.5 à 5.5             | 12 à 19                | Petite brise         | 3.2 (5 m/s)                                      |
| 4               | 5.5 à 8               | 20 à 28                | Jolie brise          | 6.4 (7 m/s)                                      |
| 6               | 11.4 à 13.9           | 39 à 49                | Vent frais           | 22 (13 m/s)                                      |
| 8               | 17.4 à 20.4           | 62 à 74                | Coup de vent         | 52 (20 m/s)                                      |
| 11              | 28.4 à 32.5           | 103 à 117              | Violente tempête     | 117 (30 m/s)                                     |
| 17              | 54.1 à 60             | 202 à 220              | Cyclone              | 470 (60 m/s)                                     |

**Tableau I.1 : Echelle Beaufort [3].**

En effet, pour implanter un parc éolien, la prospection des sites possibles constitue le premier travail à effectuer pour juger de la capacité de production d'une centrale éolienne. Des relevés météorologiques complets sur les sites présumés doivent être effectués au moins pendant une année pour déterminer la possibilité ou non d'implanter le parc. Non seulement il faut connaître la vitesse moyenne du vent, mais aussi sa variation en fonction de l'altitude. Les vents les plus intéressants qui donnent finalement le plus d'énergie annuelle, sont les vents réguliers qui ont une vitesse de 6 à 10 m/s. [4]

## I.4 Représentation d'une éolienne et son énergie de production

Une éolienne est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Les éoliennes sont composées de pales en rotation autour du rotor et actionnées par le vent. Elles sont généralement utilisées pour produire de l'énergie électrique de catégorie des énergies renouvelables.

### I.4.1 Différents types d'éoliennes et leur utilisation

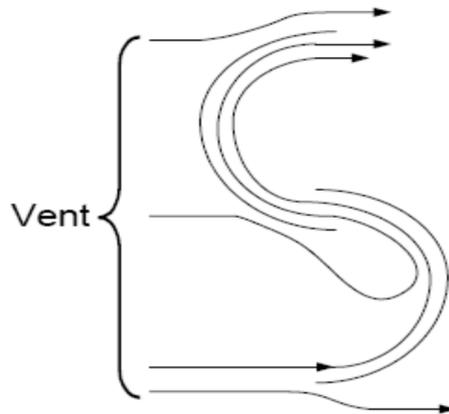
Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : les éoliennes à axe vertical qui tendent à disparaître, les éoliennes lentes à axe horizontal utilisées surtout pour le pompage et les éoliennes rapides à axe horizontal plus particulièrement utilisées dans la production d'énergie électrique.

#### I.4.1.1 Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. De nombreuses variantes ont été testées depuis les

années vingt, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation :

Le rotor de Savonius dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur (Figure I.2).



**Figure I.2: éolienne de Savonius.**

Les éoliennes à variation cyclique d'incidence dont la structure la plus répandue est celle de Darrieus. Leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles (Figure I.3) est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle-même. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur).

Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées voire actuellement abandonnées. En effet la présence du capteur d'énergie près du sol l'expose aux turbulences et au gradient de vent ce qui réduit son efficacité. Elles sont de plus exposées à des problèmes d'aéroélasticité dus aux fortes contraintes qu'elles subissent. Enfin la surface qu'elles occupent au sol est très importante pour les puissances élevées [5].

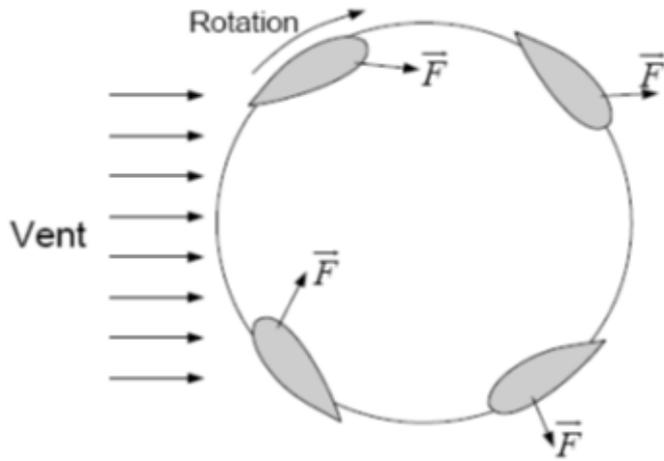


Figure I.3: Eolienne de Darrieus.

**I.4.1.2 Eoliennes à axe horizontal**

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

**I.4.2.1. Eoliennes lentes**

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Ces éoliennes multipales sont surtout adaptées aux vents de faible vitesse. Elles démarrent à vide pour des vents de l'ordre de 2 à 3 m/s et leurs couples de démarrage sont relativement forts. Cependant elles sont moins efficaces que les éoliennes rapides et sont surtout utilisées pour le pompage d'eau. La puissance maximale susceptible d'être obtenue par ce type de machine peut se calculer en fonction du diamètre par l'expression suivante [3] :

$$P = 0.15 * D^2 * V^3 \dots\dots\dots (I.1)$$

La puissance étant exprimée en Watts, le diamètre (D) en mètre et la vitesse (V) du vent en m/s.

### I.4.2.2. Eoliennes rapides

Les éoliennes rapides ont un nombre de pales assez réduit, qui varie en général entre 2 et 4 pales. Elles sont les plus utilisées dans la production d'électricité en raison de leur efficacité, de leur poids (moins lourdes comparées à une éolienne lente de même puissance) et de leur rendement élevé. Elles présentent, par contre, l'inconvénient de démarrer difficilement. Leurs vitesses de rotation sont beaucoup plus élevées que pour les machines précédentes et sont d'autant plus grandes que le nombre de pales est faible. Le tableau 2 propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice.

Le tableau I.2 propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice.

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

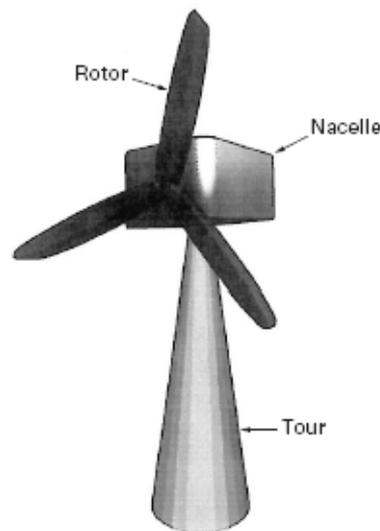
**Tableau I.2 : Classification des turbines éoliennes [3]**

En effet, les éoliennes ont différentes dimensions, et puisque l'air est une ressource diffuse, la tendance générale favorise les appareils de plus en plus gros. Les progrès en science des matériaux ont permis la fabrication de pales plus légères et plus solides ainsi que l'amélioration de la conception des tours et des fondations, ce qui permet la construction d'appareils de plus en plus imposants. En 1995, les éoliennes de 500 kW étaient la dernière nouveauté. Aujourd'hui, des appareils individuels de 4,5 MW (4 500 kW) sont en production commerciale [6]. Dans ce qui suit, notre étude se portera spécialement sur les éoliennes rapides dont nous essayerons de donner une description globale du modèle. Formule pratique pour une éolienne rapide à axe horizontal, tenant compte d'un rendement moyen:

$$P = 0.15 * D^2 * V^3 \dots\dots\dots (I.2)$$

### I.4.3 Principales composantes d'éolienne

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux: comme illustré sur la figure I.4.



**Fig I.4 : Composant d'une éolienne à axe horizontal.**

#### I4.3.1. Rotor

Il est formé par les pales assemblées dans leur moyeu, il fait tourner le mécanisme d'entraînement construites habituellement en matériaux composites à base de fibre de verre, plastique renforcé ou en bois.

Le nombre de pales varie de un à trois, le rotor tripale étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le cout, l'impact visuel et le bruit [7].

On distingue deux types de rotors :

##### a. Rotors à pas fixe

Ils sont souvent munis d'un système d'orientation des pales permettant une connexion directe au réseau ou à la charge sans dispositif d'électronique de puissance, c'est un mécanisme presque idéal assurant une optimisation de la vitesse disponible. Mais un tel dispositif est complexe et couteux.

### b. Rotors à pas variable

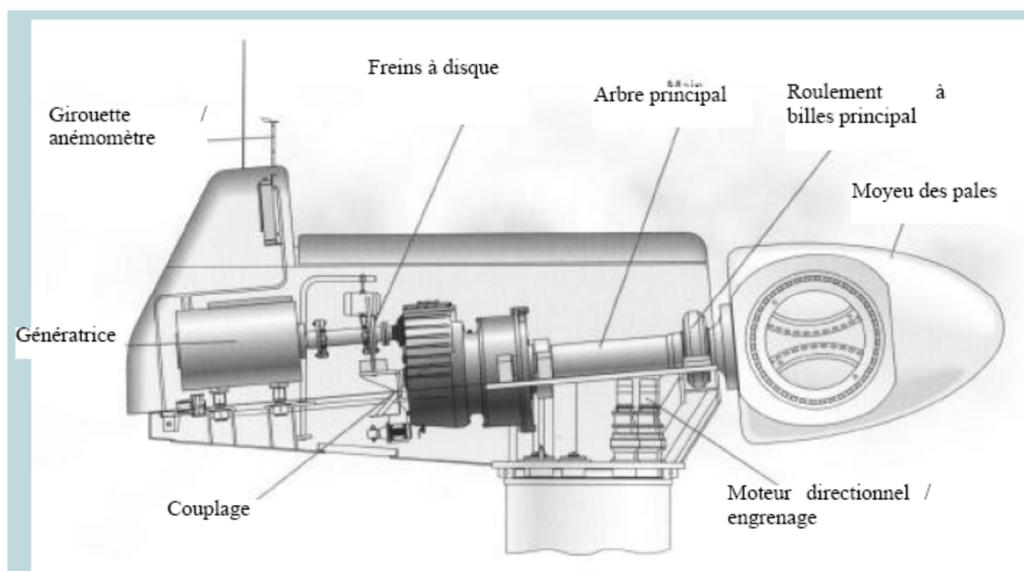
Ils sont coûteux car le dispositif d'orientation des pales est dans la plupart des cas supprimé. Toutefois, une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire.

#### I.4.3.2. Mât

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 la capture de l'énergie. Le mât est généralement un tube d'acier d'une hauteur comprise entre 60 à 100m, à l'intérieur de laquelle se trouvent l'échelle d'accès et les câbles électriques de raccordement au réseau.

#### I.4.3.3. Nacelle

Elle est située en haut du mât, elle comporte toute l'installation de production d'électricité : le multiplicateur, le générateur, les systèmes de frein et d'orientation de l'éolienne et tous les équipements automatisés d'asservissement de l'ensemble des fonctions de l'éolienne. La nacelle est une structure en acier ou en fonte à laquelle tous ces éléments sont attachés entre eux et le générateur. Les pales doivent être légères, solides et durables, elles sont construites habituellement en matériaux composites à base de fibre de verre, plastique renforcé ou en bois. La figure I.5 montre la nacelle et ces éléments.



**Figure I.5 : Eléments attachés à une nacelle.****I.4.3.4. Arbre**

Il relie le moyeu au multiplicateur et contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.

**I.4.3.5. Multiplicateur**

Il adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique. Ce multiplicateur est muni d'un frein mécanique à disque actionné en cas d'urgence lorsque le frein aérodynamique tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne.

**I.4.3.6. Système de refroidissement**

Il comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à huile (ou eau) pour le multiplicateur.

**I.4.3.7. Génératrice (ou alternateur)**

C'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Différents types de génératrices peuvent être rencontrés.

**I.4.4 Principe de fonctionnement**

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

**I.4.5 Conversion de l'énergie éolienne**

La conversion de l'énergie cinétique en énergie électrique 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 puis au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique (figure I.6).

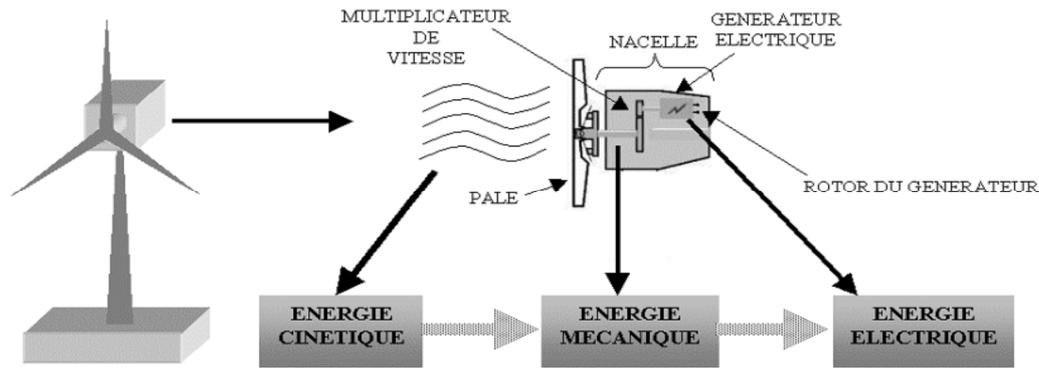


Figure I.6 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [4]

## I.4.6 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

Tout système de production d'énergie a ses avantages et ses inconvénients :

### I.4.6.1 Avantages

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, écologique, économique, et inépuisable, c'est une énergie qui respecte l'environnement [8].

Bien que ne pouvant envisager de remplacer totalement les sources traditionnelles d'énergie, l'énergie éolienne peut toutefois proposer une alternative intéressante et renouvelable. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de CO<sub>2</sub> [9].

L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas des déchets toxiques ou radioactifs [10].

L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires [10].

La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à de nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles [11].

C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables [10].

Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique déjà existant [10].

#### **I.4.6.2 Inconvénients**

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :

L'impact visuel : ça reste néanmoins un thème subjectif [10].

Les bruits mécaniques ou aérodynamiques [11].

Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux.

La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante.

La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne [10].

Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes utilisant des sources d'énergie classiques, comme les groupes électrogènes à essence, mais à long terme, ils constituent une source d'énergie économique et ils demandent peu d'entretien [10].

Il a fallu plusieurs décennies pour réaliser des éoliennes silencieuses, esthétiques et résistantes aux conditions météorologiques [12].

### **I.5 Rentabilité d'une éolienne**

Les facteurs qui déterminent le coût de l'énergie éolienne sont les suivants :

- .le coût initial de l'éolienne et de sa installation ;
- .le taux d'intérêt à payer sur l'investissement ;
- .la quantité d'énergie produite ;

Les éoliennes installées dans un endroit fortement exposé au vent produisent de l'électricité moins coûteuse que les mêmes éoliennes installées dans un endroit moins venté. Il est donc important de choisir l'endroit de l'installation de l'éolienne en se basant sur le facteur vitesse du vent.

Le coût de production de l'électricité à partir de l'énergie éolienne dans les endroits exposés à de bons vents est quelque peu supérieur aux frais associés à une installation

d'électricité, cependant les coûts de l'énergie éolienne diminuent chaque année, tandis que les coûts de production plus traditionnelle continuent d'augmenter.

Lorsque l'on compare le prix de détail de l'électricité payée par les consommateurs, le coût global de l'énergie nécessaire à la production d'électricité à partir du vent est maintenant concurrentiel avec les sources d'énergie traditionnelles comme les combustibles fossiles. Cette réduction du coût de l'électricité est le résultat de progrès importants de la technologie utilisée par cette industrie (amélioration des conceptions aérodynamiques, amélioration des matériaux utilisés) [13]. Donc en terme global, l'énergie éolienne est l'une des énergies les moins coûteuses.

Cependant, sur les sites moins ventés le coût de l'énergie éolienne reste encore plus élevé que celui des sources classiques.

Actuellement, l'énergie éolienne est bien implantée parmi les autres sources d'énergie avec une croissance très forte [13].

Comme il est montré sur la Figure I.7 la production de l'énergie éolienne connaît depuis quelques années une forte croissance.

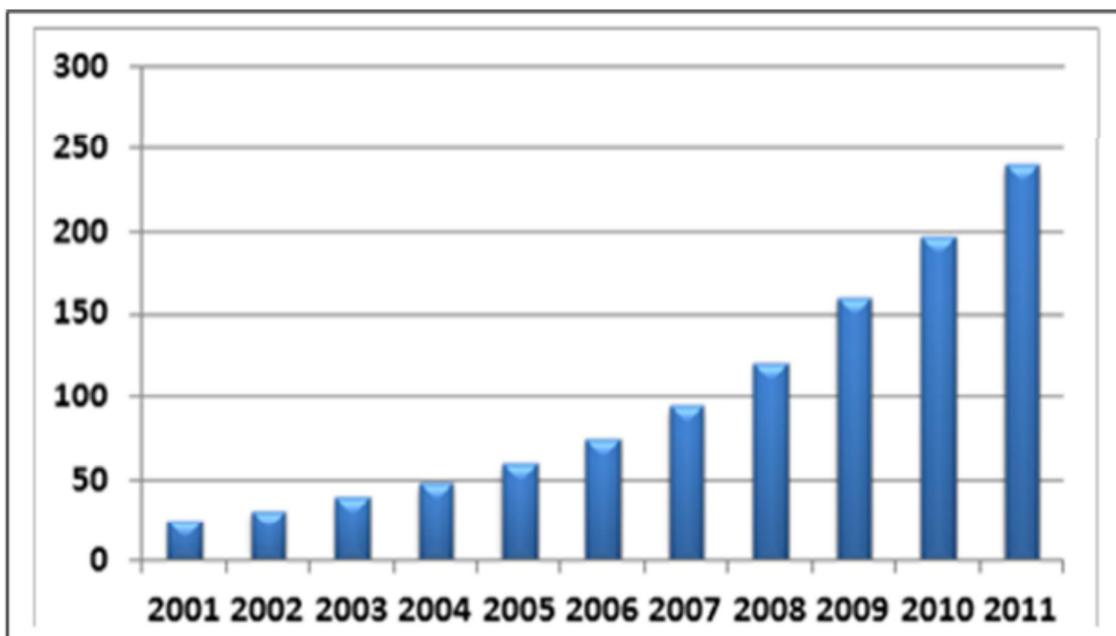


Figure I.7 : Capacité mondiale installée en MW [14].

## I.6 Descriptions des machines électrique à courant alternatif

Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de sa configuration. Les avantages principaux des deux types de fonctionnement sont les suivants [15]:

### Fonctionnement à vitesse fixe

- Système électrique plus simple.
- système robuste.
- Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne.
- Pas besoin de système électronique de commande.
- Moins cher.

### Fonctionnement à vitesse variable

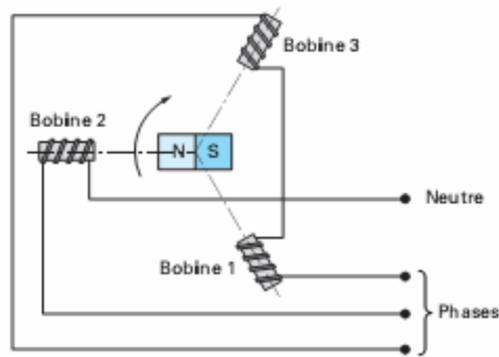
- Augmentation du rendement énergétique.
- Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance.
- Réduction des efforts subis par le train de puissance.
- Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

Les deux types de machine électrique les plus utilisés dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes [15].

#### I.6.1 Machine synchrone :

L'ensemble des génératrices (ou moteurs) triphasées utilisent un champ magnétique tournant. Si l'on dit que le moteur est synchrone, c'est parce que l'aimant au centre tourne à une vitesse constante qui est synchrone avec la rotation du champ magnétique [16], [17].

Le principe de fonctionnement est basé sur la création d'une variation de flux magnétique par la rotation d'un aimant (nommé rotor) passant devant les faces de trois bobines fixes (appelées stator) alimentées par le réseau (figure I.8). Cette variation provoque l'apparition d'une force électromotrice d'induction dans chacune des bobines, créant ainsi un courant triphasé. Dans ce type de générateur, la rotation de l'aimant, entraîné par le rotor de l'éolienne, doit être synchrone avec l'excitation des bobines, d'où son appellation [18].



**Figure I.8 : Principe du générateur synchrone.**

En faisant varier le nombre de pôles magnétiques du rotor d'un générateur synchrone, on fait également varier sa vitesse de synchronisation.

Le nombre de pôles du générateur influe directement sur sa taille, et il faut mentionner que le couple moteur supportable par un générateur dépend de son volume. Habituellement, les générateurs à quatre ou six pôles ont la préférence des constructeurs car leur encombrement permet des économies au niveau de la taille de la nacelle qui doit les accueillir [17].

Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien, ceux de 500 KW à 2 MW sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille. De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion génératrice - réseau, les fluctuations du couple captée par l'aéroturbine se propagent sur tout le train de puissance jusqu'à la puissance électrique produite. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau [15]. Pour ces raisons, on place systématiquement une interface d'électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation [19], [20].

### **I.6.2 Machine asynchrone**

La connexion directe au réseau de ce type de machine est bien plus douée grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor. Ceci explique pourquoi pratiquement toutes les éoliennes à vitesse fixe utilisent des machines à induction. Dans les années 90 les Danois ont rajouté une deuxième machine électrique pour pouvoir faire fonctionner l'éolienne à deux vitesses et ainsi augmenter le rendement énergétique de leurs aérogénérateurs. L'introduction de convertisseurs de puissance entre la

machine et le réseau permet comme pour la machine synchrone de découpler la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine et ainsi de faire fonctionner l'aérogénérateur à vitesse variable avec tous les avantages cités auparavant. Comme pour les machines synchrones il existe différents types de machine asynchrones, qui associées à divers convertisseurs de puissance, fonctionnent avec des domaines de variation de vitesse de rotation plus ou moins grands. Deux des désavantages principaux des machines à induction sont la consommation de puissance réactive et le courant élevé au démarrage, mais ces problèmes peuvent être résolus par l'utilisation d'éléments d'électronique de puissance [21].

La vitesse variable permet également d'améliorer la qualité de la puissance électrique produite, en introduisant de la souplesse dans la réaction du système face aux fluctuations brusques de la vitesse du vent. L'inconvénient principal de ce genre de système est le surcoût introduit par l'incorporation des convertisseurs de puissance. Ce coût dépendant de la taille de ces convertisseurs, il devient relativement important pour les éoliennes de grande taille [22].

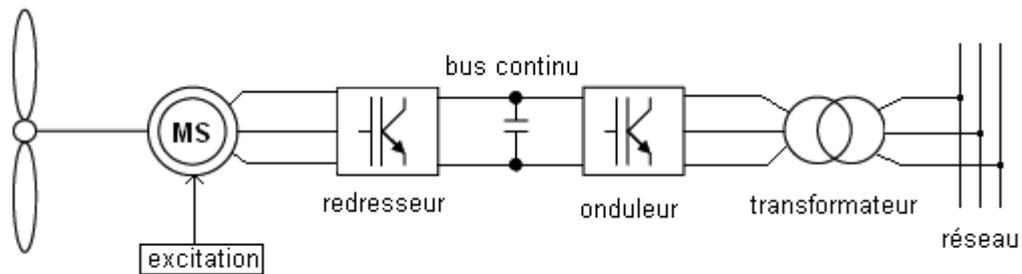
## **I.7 différents systèmes qui existent**

Diverses chaînes de production coexistent pour la production d'électricité par aérogénérateurs couplés au réseau. Elles peuvent être très différentes selon la nature du convertisseur électromécanique utilisé et le mode de fonctionnement (vitesse fixe ou variable), on peut citer:

### **I.7.1 Génératrices synchrones (GS) [23]**

Les machines asynchrones présentent le défaut d'imposer la présence d'un multiplicateur de vitesse. Elles sont en effet bien adaptées à des vitesses de rotation relativement importantes et un couple insuffisant pour un couplage mécanique direct sur les voilures éoliennes. Par contre, les machines synchrones sont conçues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes. Les systèmes de ce type possèdent aussi leurs défauts. Les machines synchrones à rotor bobiné demandent un entretien régulier de système des bagues et balais. Le circuit d'excitation de l'inducteur demande la présence du réseau et une fourniture de la puissance réactive. Les sites isolés ne sont adaptés à ces génératrices qu'en présence d'une source de tension indépendante. Par contre, la possibilité de réglage de l'inducteur de ces machines offre un moyen supplémentaire d'ajustement du point de fonctionnement énergétique. Le couplage direct sur le réseau est proscrit car étant beaucoup

trop rigide. Une électronique de puissance s'impose pour toutes les applications utilisant ce type de machine fonctionnant à vitesse variable.



**Figure I.9 : Système éolien basé sur la machine synchrone à vitesse variable.**

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) ou génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur.

### I.7.2 Génératrices asynchrones à double alimentation (GADA) [23]

Dans ce cas, le stator de la génératrice est directement couplé au réseau alors l'enroulement rotorique est connecté à ce même réseau via une interface d'électronique de puissance.

Le convertisseur de puissance connecté au rotor (coté rotor) partage un bus de tension continue avec un second convertisseur identique connecté au réseau électrique (coté réseau) via un transformateur tel qu'illustré à la figure I.10. Le condensateur permet de découpler les deux convertisseurs et agit comme un réservoir d'énergie afin d'atténuer les perturbations de tension et courant lors des commutations. C'est le convertisseur coté rotor qui permet d'imposer les courants nécessaires afin de contrôler les puissances actives et réactives. Pour sa part, le convertisseur coté réseau s'occupe de maintenir la tension du bus constante en échangeant la puissance active fournie ou absorbée par le rotor avec le réseau électrique. La tension du rotor étant généralement différente de celle du stator, un transformateur est nécessaire afin d'adapter les différents niveaux de tension.

De même, l'utilisation d'un filtre juste après les convertisseurs s'impose pour contrôler le niveau des harmoniques. Le multiplicateur est présent dans ce cas aussi. Ses principaux avantages sont le fonctionnement à vitesse variable ( $\pm 30\%$  de la vitesse de synchronisme) et l'optimisation de la puissance extraite pour les vents faibles et moyens. De plus les prix ne sont pas trop élevés car la machine est standard et l'électronique de puissance est dimensionnée seulement à 30% de la puissance nominale. Il reste toutefois, la maintenance de la boîte de vitesse, le contrôle est complexe et la présence de système à bagues et balais comme inconvénients.

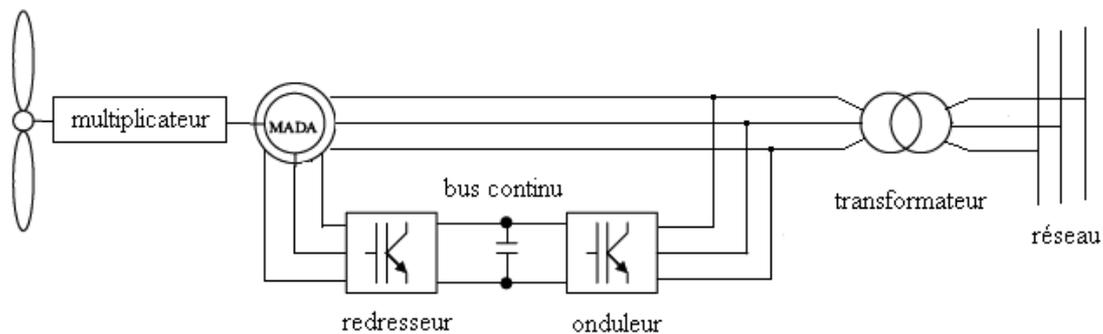


Figure I.10 : Système éolien basé sur la machine asynchrone double alimentation.

### I.7.3 Génératrices asynchrones à cage (GAS) [23]

La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur. Mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues, la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne.

Dans les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grande puissance et rayon de pales important), la vitesse de rotation est peu élevée. Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse pour adapter la vitesse de la turbine à celle de la génératrice.

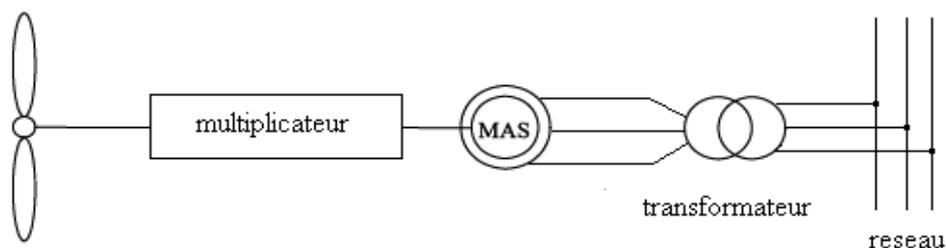
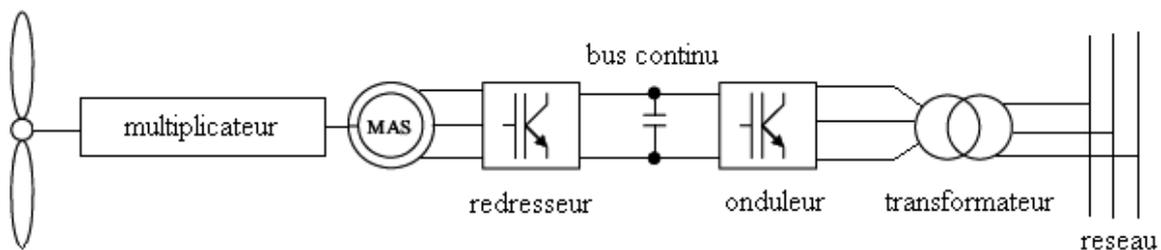


Figure I.11 : Système éolien basé sur une machine asynchrone à vitesse constante.

Le principal avantage de cette structure est le faible coût de la machine et l'absence d'électronique de puissance d'interfaçage. Néanmoins, on peut noter comme inconvénients, la puissance extraite est non optimisée, et la maintenance de la boîte de vitesse.

Si la machine asynchrone fonctionne en autonome, il faut introduire des capacités d'auto-excitation pour sa magnétisation.

Dans le cas du fonctionnement à vitesse variable, l'utilisation des convertisseurs de puissances s'impose pour découpler la fréquence délivrée par la machine et celle du réseau.



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

#### I.7.4 Redresseur à diodes et onduleur MLI

Cette topologie utilise un redresseur à diodes entre le bus continu et la génératrice, et un onduleur à IGBT (contrôlé par MLI) placé entre le bus continu et le réseau. La puissance transitée entre la génératrice et le bus continu est donc unidirectionnelle : la génératrice ne peut pas être que freinée. Le réglage de la vitesse de la GAS est donc limité ce qui réduit la possibilité d'extraire la puissance maximale.

#### I.7.5 Redresseur et onduleur MLI

Le redresseur est un convertisseur à IGBT fonctionnant à fréquence variable. La vitesse de la GAS est alors parfaitement contrôlable. Un deuxième convertisseur (onduleur à MLI) connecté au réseau est nécessaire pour contrôler les transit de puissance.

**Conclusion**

Nous avons présenté dans ce chapitre quelques généralités sur les systèmes éoliens où on a donné un bref historique sur l'utilisation de l'énergie éolienne, la représentation d'une éolienne et son énergie de production, les différents types d'éolienne et leurs principales composantes, les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne, la rentabilité d'une énergie éolienne, les différentes génératrices et convertisseurs utilisés dans les systèmes éoliens.

Le deuxième chapitre fera l'objet de la modélisation des différentes parties de l'ensemble turbine, machine asynchrone à cage d'écureuil, multiplicateur, convertisseurs de puissance, filtre, transformateur, et le réseau.

## **Chapitre II**

*Modélisation de la chaîne de conversion étudiée*

## Introduction

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

L'objectif de ce chapitre est la modélisation de l'ensemble turbine, machine et onduleur, ou nous nous intéresserons à la machine asynchrone à cage d'écurieul, qui est la plus utilisée dans les systèmes éoliens.

## II. Modélisation du système éolien

Le comportement électrique et dynamique d'un système quelconque ne peut être étudié que s'il est possible de le définir par un modèle mathématique, c'est ce qu'on appelle modélisation, il est donc évident que cette étape de modélisation est un passage indispensable pour concevoir des systèmes de commande performants.

### II.1. Modélisation de la turbine

Un système éolien classique (voir fig. II. 1) est constitué d'un aérogénérateur qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique, d'un multiplicateur de vitesse de gain  $G$  qui permet à la fois de diminuer le couple et d'augmenter la vitesse de rotation, et d'un générateur électrique qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

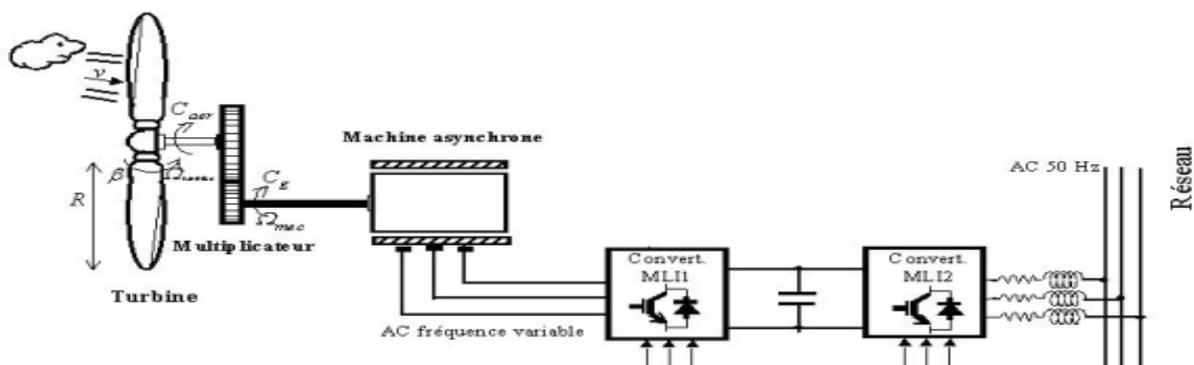


Figure.II.1 Schéma de la turbine éolienne.

La puissance du vent captée par les pales est définie de la manière suivante [24] [25] :

$$P_{vent} = \frac{\rho}{2} \cdot S \cdot v_{vent}^3 \dots\dots\dots (II.01)$$

Avec :

$\rho$  : La densité de l'air qui est égale à 1,22 kg/m<sup>3</sup> à la pression atmosphérique à 15°C.

S : La surface balayée par la turbine. (m<sup>2</sup>)

$v_{vent}$  : La vitesse du vent. (m/s)

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

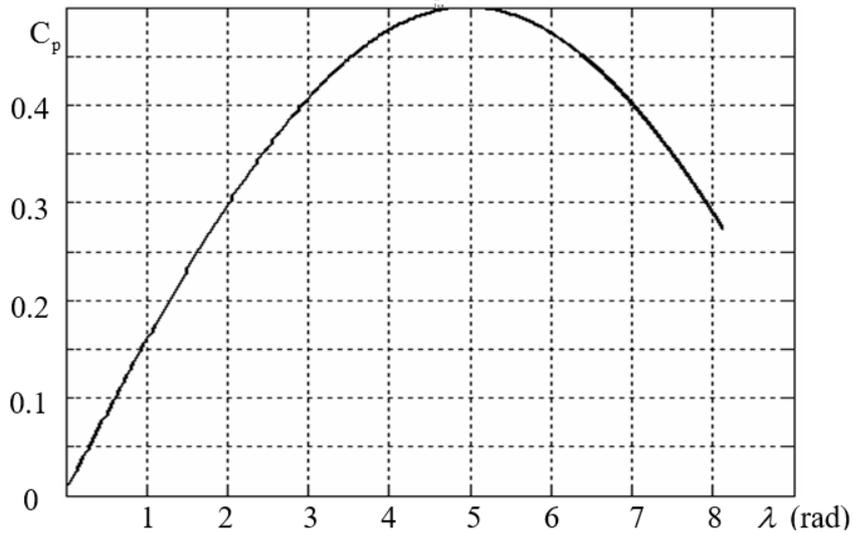
$$P_{aero} = C_p(\lambda, \beta) \cdot P_{vent} \dots\dots\dots (II.02)$$

Où :

Le coefficient de puissance  $C_p$  représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine. Une approximation par interpolation de l'expression de  $C_p$  pour une éolienne réelle d'un angle de calage  $\beta = 2^\circ$ , donne [28] :

$$C_p(\lambda, 2) = 0.5 \sin\left(\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18}\right) \dots\dots\dots (II.03)$$

L'allure du coefficient de puissance  $C_p$  de l'équation précédente est représentée dans la (Fig.II.2).



**Figure.II.2 Allure du coefficient de puissance pour une éolienne réelle**

Dans le cas de la régulation de type « pitch » impose la prise en considération de l'angle de calage  $\beta$ , il advient que  $C_p$  dépend de cet angle; ainsi l'expression de  $C_p$  est donnée par la relation suivante [28] :

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.5 - 0.0167(\beta - 2)) \sin\left(\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18 - 0.3(\beta - 2)}\right) - A \dots\dots\dots (II.04)$$

Avec :

$$A = 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \dots\dots\dots (II.05)$$

**II.1.1 Extraction de maximum de puissance**

La Figure (fig.II.4) donne la courbe de puissance d'une éolienne en fonction de la vitesse du vent. Après une partie (A) où aucune puissance n'est délivrée pour des vitesses du vent inférieures à la vitesse du démarrage  $V_v^{\min}$  une section de fonctionnement normal existe. Si on extrait alors la puissance maximale de la turbine (MPPT) celle-ci évolue alors selon le cube de la vitesse du vent (B). Quand la puissance nominale  $P_n$  est atteinte, elle doit être limitée (C). Au-delà d'une certaine limite de vitesse du vent la turbine doit être arrêtée.[28]

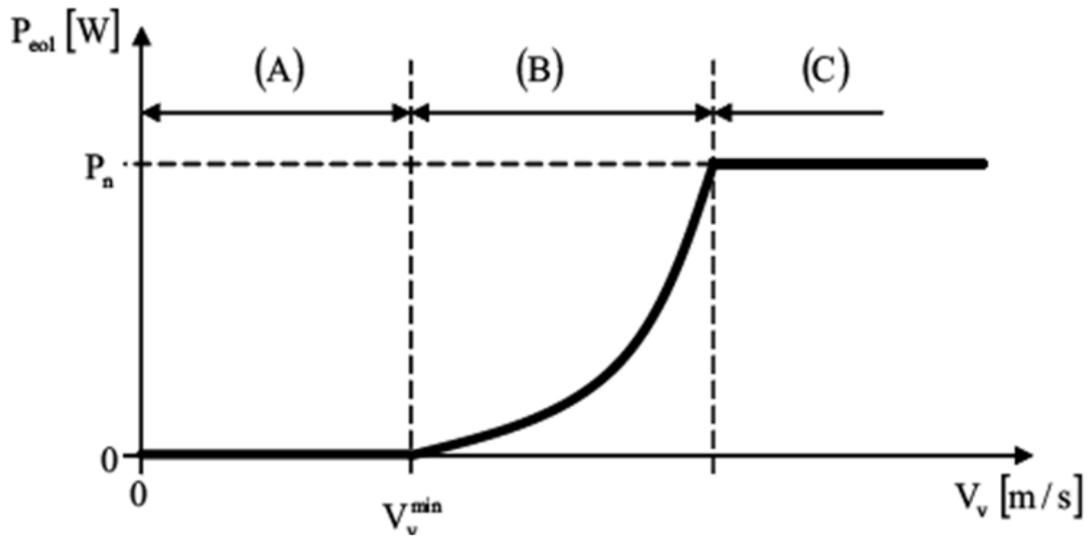


Figure.II.4 Courbe de la puissance en fonction de la vitesse du vent.

Le rapport de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent [25] [26] [27] :

$$\lambda = \frac{R.\Omega_{turbine}}{V_{vent}} \dots\dots\dots(\text{II.06})$$

Où :

$\Omega_{turbine}$  : vitesse angulaire de la turbine.

Le couple aérodynamique est déterminé par la relation suivante :

$$C_{aero} = \frac{P_{aero}}{\Omega_{turbine}} = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho}{2} S \cdot v_{vent}^3 \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \dots\dots\dots(\text{II.07})$$

**II.2. Modèle du multiplicateur [25] [27]**

Les vitesses mécaniques de la turbine et celle de la génératrice sont liées par la relation suivante :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \dots\dots\dots(\text{II.08})$$

Les couples sur l'arbre lent  $C_{aéro}$  et sur l'arbre rapide  $C_{arbre}$  sont exprimés par la relation suivante :

$$C_{arbre} = \frac{C_{aéro}}{G} \dots\dots\dots(II.09)$$

**II.3. Modèle de la partie mécanique**

Les masses des différents éléments de la turbine sont représentées par l’inertie  $J_{turbine}$ . Le modèle mécanique proposé considère l’inertie totale  $J$  constituée de l’inertie de la turbine ramenée sur l’axe rapide et celle de la génératrice  $J_g$ , et on suppose que le multiplicateur de vitesse est idéal. L’inertie totale  $J$  est donnée par l’expression suivante :[30]

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \dots\dots\dots(II.10)$$

L’équation fondamentale de la dynamique permet d’établir l’évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total  $C_{méc}$  appliqué au rotor :

$$J \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = \sum C = C_{méc} \dots\dots\dots(II.11)$$

Le couple mécanique est en fonction du couple électromagnétique  $C_{em}$  produit par la génératrice, du couple de frottements visqueux  $C_{visq}$ , et du couple issu du multiplicateur  $C_{arbre}$

$$C_{méc} = C_{arbre} - C_{em} - C_{vis} \dots\dots\dots(II.12)$$

Le couple visqueux est donné par l’expression suivante :

$$C_{vis} = f . \Omega_{méc} \dots\dots\dots(II.13)$$

Avec :

$f$  : Le coefficient de frottement visqueux.

Après quelques manipulations des équations (II.11) et (II.12) et (II.13), on aura :

$$J \frac{d\Omega_{méc}}{dt} + f . \Omega_{méc} = C_{arbre} - C_{em} \dots\dots\dots(II.14)$$

On établit à partir des équations précédentes, un schéma bloc fonctionnel du modèle de la turbine (fig.II.2) :

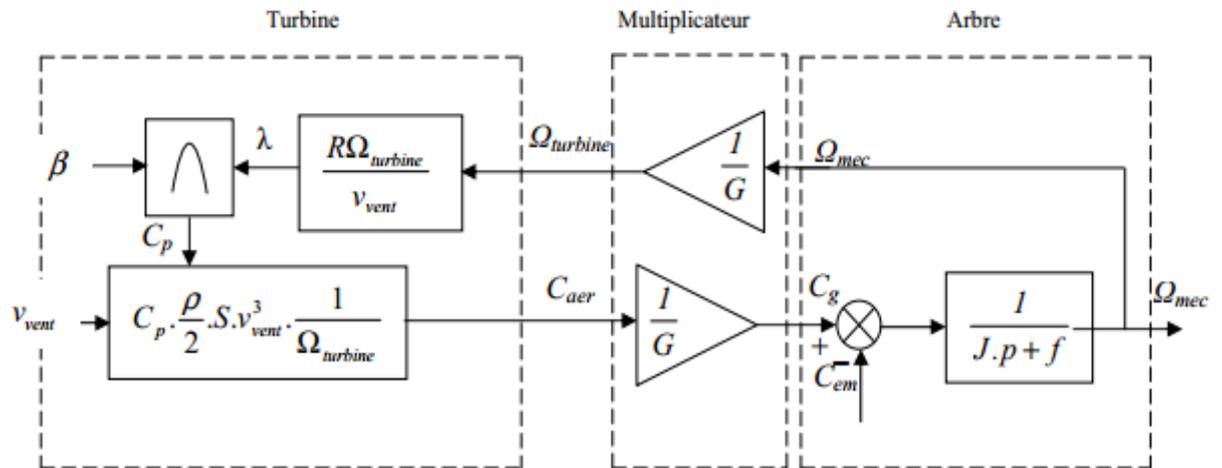


Figure.II.5 Schéma bloc fonctionnel du modèle de la turbine.

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

## II.4 Modélisation de la machine asynchrone

La génératrice asynchrone à cage est actuellement la machine électrique dont l'usage est le plus répandu dans la production d'énergie éolienne à vitesse fixe. Elle peut également fonctionner à vitesse variable grâce à l'emploi des convertisseurs de puissance, et peut générer une production de puissance électrique sur une vaste gamme de vitesse du vent [30].

### II.4.1 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone

La machine asynchrone triphasée comporte un stator fixe et un rotor mobile autour de l'axe de symétrie de la machine. Dans des encoches régulièrement réparties sur la face interne du stator sont logés trois enroulements identiques, à « p » paire de pôle ; leurs axes sont distants entre eux d'un angle électrique égal à  $2\pi/3$ . Les phases du stator sont alimentées par un réseau triphasé de tension sinusoïdale à fréquence et a amplitude réglables [32].

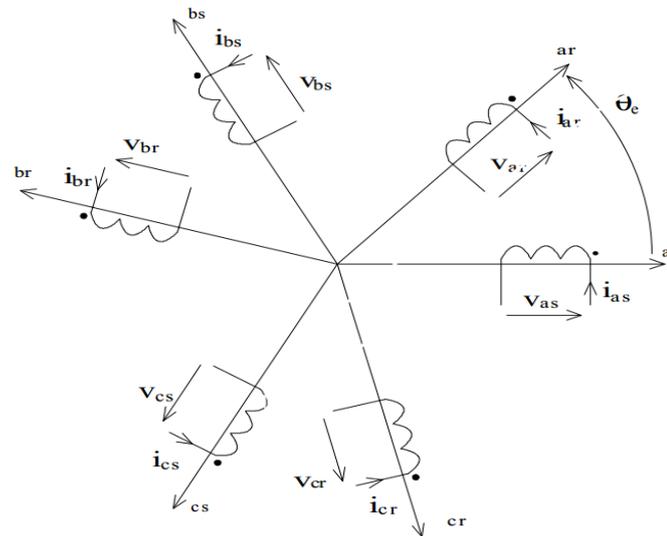


Figure.II.6 Représentation schématique des enroulements de la MAS.

## II.4.2 Hypothèses simplificatrices

La MAS avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie propre est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte. Cependant le modèle que nous adopterons tient compte des hypothèses simplificatrices suivantes [31]

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme.
- L'effet d'encoche est négligeable.
- Force magnétomotrice à répartition spatiale sinusoïdale.
- Machine de construction symétrique.
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.

## II.4.3 Modèle triphasé du moteur asynchrone

### II.4.3.1 Equations électriques

Les équations électriques des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques s'écrivent [33] :

Au stator :

$$\begin{cases} v_{sa} = R_s i_{sa} + \frac{d}{dt} \phi_{sa} \\ v_{sb} = R_s i_{sb} + \frac{d}{dt} \phi_{sb} \\ v_{sc} = R_s i_{sc} + \frac{d}{dt} \phi_{sc} \end{cases} \dots\dots\dots(\text{II.15})$$

Au rotor :

$$\begin{cases} v_{ra} = R_r i_{ra} + \frac{d}{dt} \phi_{ra} = 0 \\ v_{rb} = R_r i_{rb} + \frac{d}{dt} \phi_{rb} = 0 \\ v_{rc} = R_r i_{rc} + \frac{d}{dt} \phi_{rc} = 0 \end{cases} \dots\dots\dots(\text{II.16})$$

Soit en écriture matricielle :

$$\begin{cases} [v_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt} [\phi_s] \\ [v_r] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt} [\phi_r] \end{cases} \dots\dots\dots(\text{II.17})$$

Avec :

$$[v_s] = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} ; [v_r] = \begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} ; [i_s] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} ; [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad [\phi_s] = \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} ; [\phi_r] = \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix}$$

Et

$$[\mathbf{R}_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; [\mathbf{R}_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Tel que :

$R_s, R_r$  : Résistances par phases statoriques et rotoriques.

$[\mathbf{v}_s], [\mathbf{v}_r]$  : vecteurs des tensions des phases statoriques et rotoriques.

$[\boldsymbol{\phi}_s], [\boldsymbol{\phi}_r]$  : vecteurs des flux statoriques et rotoriques.

$[\mathbf{i}_s], [\mathbf{i}_r]$  : vecteurs des courants de phases statoriques et rotoriques.

### II.4.3.2 Equations magnétiques

Les hypothèses que nous avons présentées conduisent à des relations linéaires entre les flux et les courants. L'écriture matricielle ci-dessous résume les équations des flux statoriques :

$$[\boldsymbol{\phi}_s] = [\mathbf{L}_s][\mathbf{i}_s] + [\mathbf{M}_{sr}][\mathbf{i}_r] \dots\dots\dots(\text{II.18})$$

Avec :

$$[\mathbf{L}_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix}; [\mathbf{M}_{sr}] = \begin{bmatrix} M_{sa} & M_{sb} & M_{sc} \\ M_{ra} & M_{rb} & M_{rc} \\ M_{ca} & M_{cb} & M_{cc} \end{bmatrix}$$

De façon similaire, on aura les équations des flux rotoriques :

$$[\boldsymbol{\phi}_r] = [\mathbf{L}_r][\mathbf{i}_r] + [\mathbf{M}_{sr}][\mathbf{i}_s] \dots\dots\dots(\text{II.19})$$

Avec :

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}; [M_{sr}] = \begin{bmatrix} M_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & M_{bb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & M_{cc} \end{bmatrix}$$

Tel que :

$L_s$  : inductance propre d'une phase statorique.

$L_r$  : inductance propre d'une phase rotorique.

$M_s$  : inductance mutuelle entre deux phases statoriques.

$M_r$  : inductance mutuelle entre deux phases rotoriques.

$M_{sr}=M_{rs}$  : inductance mutuelle entre phase a du stator et phase a du rotor.

Pour l'ensemble stator et rotor, on écrit en notation matricielle :

$$\begin{bmatrix} [\phi_s] \\ [\phi_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \dots\dots\dots(\text{II.20})$$

La matrice d'inductance mutuelle entre le stator et le rotor est donnée par :

$$[M_{sr}] = M \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 4\pi / 3) & \cos(\theta - 2\pi / 3) \\ \cos(\theta - 2\pi / 3) & \cos(\theta) & \cos(\theta - 4\pi / 3) \\ \cos(\theta - 4\pi / 3) & \cos(\theta - 2\pi / 3) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \dots\dots\dots(\text{II.21})$$

$M$  : valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle stator-rotor obtenue lorsque les axes en question coïncident.

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^t$$

### II.4.3.3 Equation mécanique

L'équation fondamentale du mouvement de la machine est donnée par [34] :

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + K.\Omega \dots\dots\dots(\text{II.22})$$

Avec :

$$\Omega = \frac{\omega_r}{p} \dots\dots\dots(\text{II.23})$$

D'autre part :

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \dots\dots\dots(\text{II.24})$$

## II.4.4 Modèle biphasé de la MAS

### II.4.4.1 Transformation de Park

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

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

$$[p(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(\text{II.26})$$

Avec :

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

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

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

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

### II.4.4.2 Modèle de la MAS selon le système d'axes généralisé (u, v)

La figure II.3 représente le modèle généralisé de la MAS selon le système d'axe (u, v) tournant à vitesse  $\omega_{coord}$  [34].

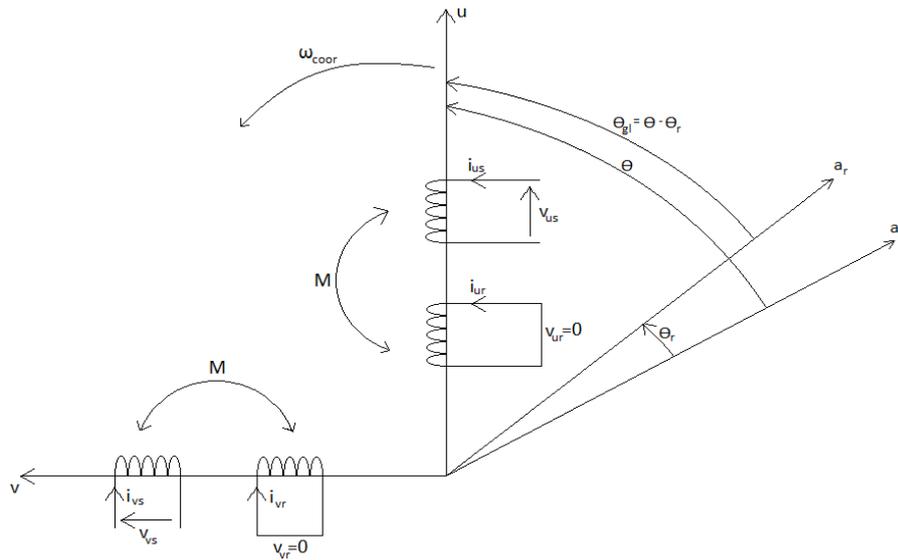


Figure II.7 : Représentation du modèle généralisé de la MAS selon les axes (u,v).

Avec :

$$\theta = \int_0^t \omega_{coord} dt$$

C'est l'angle entre les systèmes d'axes biphasé et triphasé.

$\omega_{coord}$  : vitesse angulaire de rotation du système d'axe biphasé par rapport au système d'axe triphasé.

Les systèmes d'équations différentielles de la MAS selon (u, v) tournant à la vitesse  $\omega_{coord}$  sont :

**II.4.4.2.1 système d'équations électriques**

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{us} = R_s i_{us} + \frac{d}{dt} \phi_{us} - \omega_{coord} \phi_{vs} \\ v_{vs} = R_s i_{vs} + \frac{d}{dt} \phi_{vs} + \omega_{coord} \phi_{us} \\ v_{ur} = R_r i_{ur} + \frac{d}{dt} \phi_{ur} - (\omega_{coord} - \omega_r) \phi_{vr} \\ v_{vr} = R_r i_{vr} + \frac{d}{dt} \phi_{vr} + (\omega_{coord} - \omega_r) \phi_{ur} \end{array} \right. \dots\dots\dots (II.27)$$

**II.4.4.2.2 Système d'équations magnétiques**

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{us} = L_s i_{us} + M i_{ur} \\ \phi_{vs} = L_s i_{vs} + M i_{vr} \\ \phi_{ur} = L_r i_{ur} + M i_{us} \\ \phi_{vr} = L_r i_{vr} + M i_{vs} \end{array} \right. \dots\dots\dots (II.28)$$

**II.4.4.3 Choix du système d'axes**

**II.4.4.3.1 Système d'axes ( $\alpha, \beta$ )**

Ce système est immobile par rapport au stator, alors :

$$\omega_{coord} = 0 \Rightarrow \theta = 0$$

**II.4.4.3.2 Système d'axes (X, Y)**

Celui-ci est immobile par rapport au rotor, d'où :

$$\omega_{\text{coor}} = \omega_r \quad \implies \quad \theta = \int_0^t \omega_r dt$$

**II.4.4.3.3 Système d'axes (d, q)**

Ce dernier est immobile par rapport au champ électromagnétique créée par les enroulements statoriques, donc :

$$\omega_{\text{coor}} = \omega_s \quad \implies \quad \theta = \int_0^t \omega_s dt$$

**II.4.4.4.1 Modèle biphasé de la machine lié au système d'axes (d, q)**

En remplaçant dans les systèmes d'équations (II.26) et (II.27)  $\omega_{\text{coor}}$  par  $\omega_s$  et les indices (u, v) par (d,q), on obtient :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega_s \phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega_s \phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr} = 0 \quad \dots\dots\dots(\text{II.29}) \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \phi_{dr} = 0 \end{array} \right.$$

II.4.4.4.2 Equations magnétiques

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \dots\dots\dots(\text{II.30})$$

En introduisant le système d'équations (II.30) dans (II.29), et en posant  $\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r$  et

$p=d/dt$  On trouve :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + L_s p i_{ds} + M p i_{dr} - \omega_s (L_s i_{qs} + M i_{qr}) \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + L_s p i_{qs} + M p i_{qr} - \omega_s (L_s i_{ds} + M i_{dr}) \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + L_r p i_{dr} + M p i_{ds} - \omega_{gl} (L_r i_{qr} + M i_{qs}) \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + L_r p i_{qr} + M p i_{qs} - \omega_{gl} (L_r i_{dr} + M i_{ds}) \end{cases} \dots\dots\dots(\text{II.31})$$

L'écriture sous forme matricielle est :

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s L_s & 0 & -\omega_s M \\ \omega_s L_s & R_s & \omega_s M & 0 \\ 0 & -\omega_{gl} M & R_r & -\omega_{gl} L_r \\ \omega_{gl} M & 0 & \omega_{gl} L_s & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}$$

D'où :

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s L_s & 0 & -\omega_s M \\ \omega_s L_s & R_s & \omega_s M & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} - \omega_{gl} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}$$

En mettant le système (II.29) sous forme d'équation d'état, on trouve :

$$[\dot{I}] = [L]^{-1} \{ [B][U] - \omega_{gl} [C][I] - [D][I] \} \dots\dots\dots(II.32)$$

Tel que :

$$[B] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; [U] = \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix}; [I] = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}; [\dot{I}] = p[I] \quad ; [L] = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}$$

$$[D] = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s L_s & 0 & -\omega_s M \\ \omega_s L_s & R_s & \omega_s M & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}; [C] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -M & 0 & L_r \\ M & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

**II.4.4.4.3 Puissance absorbée et couple électromagnétique**

La puissance absorbée par le MAS selon le système d'axes (d, q), tout en négligeant les composantes homopolaires est exprimée par[31] :

$$P_a = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \dots\dots\dots(II.33)$$

En remplaçant les tensions  $v_{ds}$  et  $v_{qs}$  par leurs expressions (II.29) dans (II.33), on aura

$$p_a = \left\{ R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) \right\} + \left\{ i_{ds} \frac{d\phi_{ds}}{dt} + i_{qs} \frac{d\phi_{qs}}{dt} \right\} + \left\{ \omega_s (\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds}) \right\} \dots\dots(II.34)$$

L'expression (II.34) se compose de trois termes :

- Le premier terme correspond aux pertes par effet Joule.
- Le second représente la variation de l'énergie électromagnétique.
- Le dernier terme est la puissance électromagnétique ( $P_{em}$ ).

Sachant que :

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_s} = p \frac{P_{em}}{\omega_s} \dots\dots\dots(II.35)$$

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

$$C_{em} = p(\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds}) \dots\dots\dots(II.33)$$

En remplaçant les flux ( $\phi_{ds}, \phi_{qs}$ ) donnés par la relation (II.30) dans la relation (II.36) on obtient :

$$C_{em} = pM (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \dots\dots\dots(II.34)$$

En substituant les courants rotoriques par leurs expressions (II.30) :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_r} (\phi_{dr} i_{qs} - \phi_{qr} i_{ds}) \dots\dots\dots(II.35)$$

## II.5 Modélisation des convertisseurs statiques

L'onduleur de tension représente aujourd'hui la « brique de base » dans les systèmes d'interface avec le réseau. Il permet entre autres de contrôler les puissances (active et réactive) échangées avec le réseau. Il peut être utilisé en mode onduleur ou en mode redresseur mais la modélisation reste la même dans les deux cas.

### II.5.1 Modèle du convertisseur statique

Les convertisseurs considérés dans notre étude sont de type parallèle double PD3 et constitués d'IGBT et de diodes en antiparallèle commandés par modulation de largeur d'impulsion (MLI) pour deux raisons principales :

- Modifier le contenu harmonique de la tension de sortie (qui conserve sa période  $T$ ) de façon à repousser ses harmoniques vers les rangs (donc les fréquences) élevés, ainsi le filtrage de la tension se trouvera facilité.
- Permettre le réglage de la valeur efficace du fondamental de la tension. C'est indispensable dans le cas de l'alimentation d'une machine à fréquence (vitesse) variable pour pouvoir fonctionner à flux constant. [29]

Afin de simplifier le modèle des convertisseurs, en considérant les interrupteurs (IGBT et diode) parfaits. La figure II.4 représente un onduleur de tension alimenté par une tension continu  $u$ .

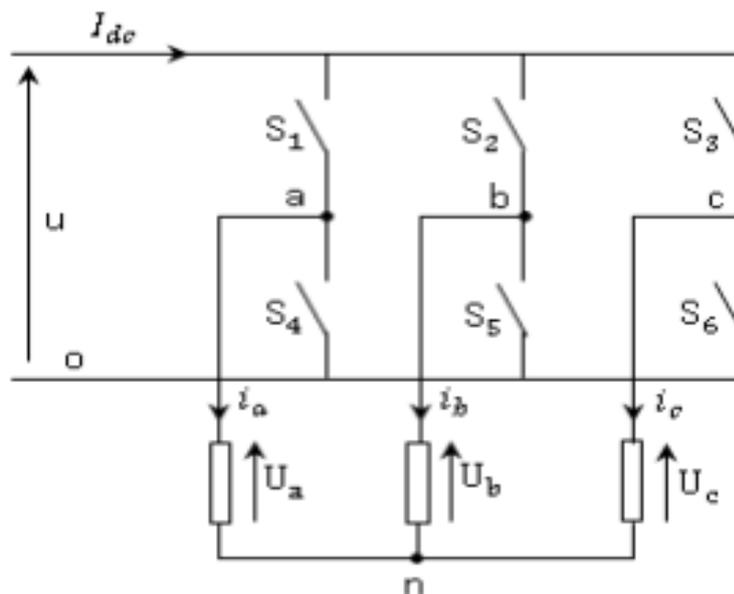


Figure II.1 : Schéma d'un onduleur de tension triphasé.

La loi des mailles nous donne

$$\begin{cases} U_{ao} = U_{an} + U_{no} \\ U_{bo} = U_{bn} + U_{no} \\ U_{co} = U_{cn} + U_{no} \end{cases} \dots\dots\dots(\text{II.36})$$

D'autre part le fait que la charge soit équilibrée donne :

$$U_{an} + U_{bn} + U_{cn} = 0 \dots\dots\dots(\text{II.37})$$

D'où :

$$U_{no} = \frac{1}{3} (U_{ao} + U_{bo} + U_{co}) \dots\dots\dots(\text{II.38})$$

Les expressions des tensions de phases sont alors exprimées comme suit :

$$\begin{cases} U_{an} = U_a = \frac{1}{3} (2U_{ao} - U_{bo} - U_{co}) \\ U_{bn} = U_b = \frac{1}{3} (-U_{ao} + 2U_{bo} - U_{co}) \\ U_{cn} = U_c = \frac{1}{3} (-U_{ao} - U_{bo} + 2U_{co}) \end{cases} \dots\dots\dots(\text{II.39})$$

L'expression de la tension  $U_{j0}$ , est fonction de l'état logique de conduction des interrupteurs du bras de l'onduleur ou il est connecté. Soit à noter l'état passant du  $i^{\text{eme}}$  interrupteur par  $S_i=1$  et son état bloqué par  $S_i=0$ ,  $U_{j0}$  s'exprime alors par la relation suivante :  $U_{j0}=u.S_i$  pour  $i$  prenant les valeurs 1,2 et 3 et  $j=a, b$  et  $c$

Nous déduisons le modèle de l'onduleur sous forme matricielle en fonction des états logiques des interrupteurs :

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \frac{u}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(\text{II.40})$$

De plus la relation entre le courant modulé par le convertisseur ( $I_{dc}$ ) et les courants alternatifs ( $i_a, i_b$  et  $i_c$ ) est définie par l'équation suivante :

$$I_{dc} = \begin{bmatrix} S_1 & S_2 & S_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \dots\dots\dots(\text{II.41})$$

### II.5.2 Commande MLI des convertisseurs

L'objectif de la commande à MLI est de diminuer les harmoniques présents dans les courants générés par le convertisseur. Le principe est de comparer un signal triangulaire appelé porteuse qui détermine la période de découpage à une modulante dont le fondamentale est à la fréquence de la référence. Le résultat de cette comparaison est le signal MLI qui est utilisé comme fonction de commutation pour commander les interrupteurs du convertisseur. Cette méthode permet d'obtenir, de façon simple, les temps de conduction de chaque interrupteur [35].

Les tensions de références sinusoïdales sont exprimées par :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{aréf} = \sqrt{2}v_{eff} \sin(2\pi ft) \\ v_{bréf} = \sqrt{2}v_{eff} \sin(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}) \\ v_{créf} = \sqrt{2}v_{eff} \sin(2\pi ft + \frac{2\pi}{3}) \end{array} \right. \dots\dots\dots(\text{II.42})$$

L'équation de la porteuse est donnée par :

$$V_p(t) = \begin{cases} V_{pm} \left[ 4\left(\frac{t}{T_p}\right) - 1 \right] & \text{Si } 0 \leq t \leq T_p / 2 \\ V_{pm} \left[ -4\left(\frac{t}{T_p}\right) + 3 \right] & \text{Si } T_p / 2 \leq t \leq T_p \end{cases} \dots\dots\dots(\text{II.43})$$

Cette technique est caractérisée par deux paramètres sont les suivants :

1. L'indice de modulation  $m$  égal au rapport de la fréquence de modulation ( $f_p$ ) sur la fréquence de référence ( $f$ ).
2. Le coefficient de réglage en tension  $r$  égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence ( $V_m = \sqrt{2}v_{eff}$ ) à la valeur crête de l'onde de modulation ( $V_{pm}$ ).

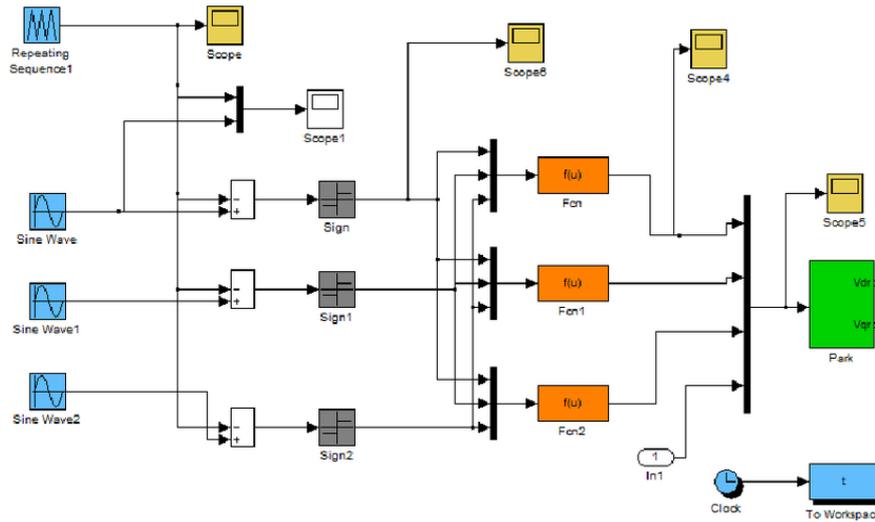


Figure II.2 : Modèle de l'onduleur commandé par MLI.

### II.5.3 Modélisation de bus continu

Le couplage des deux convertisseurs statiques (coté rotor et coté réseau) est fait par l'intermédiaire d'un bus continu, il est donc nécessaire d'avoir le modèle mathématique de ce circuit. Dans la figure II.10 est représenté en détail le bus continu et on peut voir qu'il est représenté par le condensateur où sont connectés les bus continus des convertisseurs. Chaque convertisseur exerce son influence sur le circuit, par le courant qu'il donne ou qu'il prend au condensateur [28].

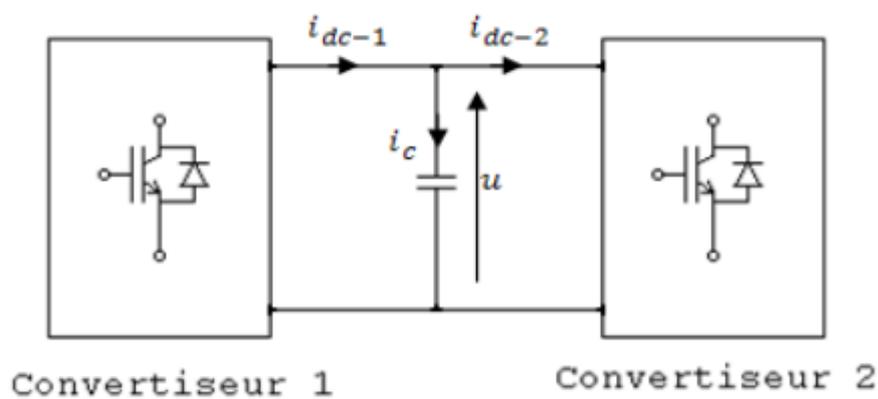


Figure II.10 : Schéma du bus continu.

L'évolution temporelle de la tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif :

$$\frac{du}{dt} = \frac{1}{C} i_c \dots\dots\dots(\text{II.44})$$

Le courant du condensateur est issu d'un nœud où circulent deux courants modulés par chaque convertisseur :

$$i_c = i_{dc-1} - i_{dc-2} \dots\dots\dots(\text{II.45})$$

Ainsi on a :

$$u = \int \frac{du}{dt} + u_o \dots\dots\dots(\text{II.46})$$

Avec  $u_o$  est la tension initiale du condensateur

Le réglage du bus continu est réalisé au moyen d'une boucle de régulation permettant de maintenir une tension constante du bus continu, avec un correcteur proportionnel intégral générant la référence du courant à injecter dans le condensateur ( $i_{c-ref}$ ).

## II.5.4 Modélisation du filtre

La liaison au réseau électrique est réalisée via un filtre d'entrée R-L.

L'ensemble des équations liant les tensions modulées et les courants qui transitent le filtre sont regroupées dans l'équation différentielle suivante :[36]

$$\begin{pmatrix} V_{m-a} \\ V_{m-b} \\ V_{m-c} \end{pmatrix} = R_f \begin{pmatrix} i_{f-a} \\ i_{f-b} \\ i_{f-c} \end{pmatrix} + L_f \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{f-a} \\ i_{f-b} \\ i_{f-c} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_{res-a} \\ V_{res-b} \\ V_{res-c} \end{pmatrix} \dots\dots\dots(\text{II.47})$$

En appliquant la transformation de Park, l'équation précédente devient :

$$\begin{cases} V_{res-d} = R_f i_{fd} + L_f \frac{d}{dt} i_{fd} - L_f \omega_s i_{fq} + V_{md} \dots\dots\dots(\text{II.48}) \\ V_{res-q} = R_f i_{fq} + L_f \frac{d}{dt} i_{fq} + L_f \omega_s i_{fd} + V_{md} \end{cases}$$

On considère les tensions de couplage suivantes :

$$\begin{cases} e_d = -L_f \omega_s i_{fq} \dots\dots\dots(\text{II.49}) \\ e_d = +L_f \omega_s i_{fd} \end{cases}$$

Les équations différentielles peuvent être simplifiées en :

$$\begin{cases} V_{bd} = R_f i_{fd} + L_f \frac{d}{dt} i_{fd} \dots\dots\dots(\text{II.50}) \\ V_{bq} = R_f i_{fq} + L_f \frac{d}{dt} i_{fq} \end{cases}$$

Où les tensions aux bornes des bobines sont définies par :

$$\begin{cases} V_{bd} = V_{md} - e_q - V_{res-d} \dots\dots\dots(\text{II.51}) \\ V_{bq} = V_{mq} - e_d - V_{res-q} \end{cases}$$

En appliquant la transformée de Laplace pour les équations (II.50), on fait apparaître deux fonctions de transfert identiques :

$$F(p) = \frac{i_{fd}(p)}{V_{bd}(p)} = \frac{i_{fq}(p)}{V_{bq}(p)} = \frac{1}{R_f + pL_f} \dots\dots\dots(\text{II.52})$$

Le modèle obtenu du filtre dans le repère diphasé (d,q) est dans la figure suivante :

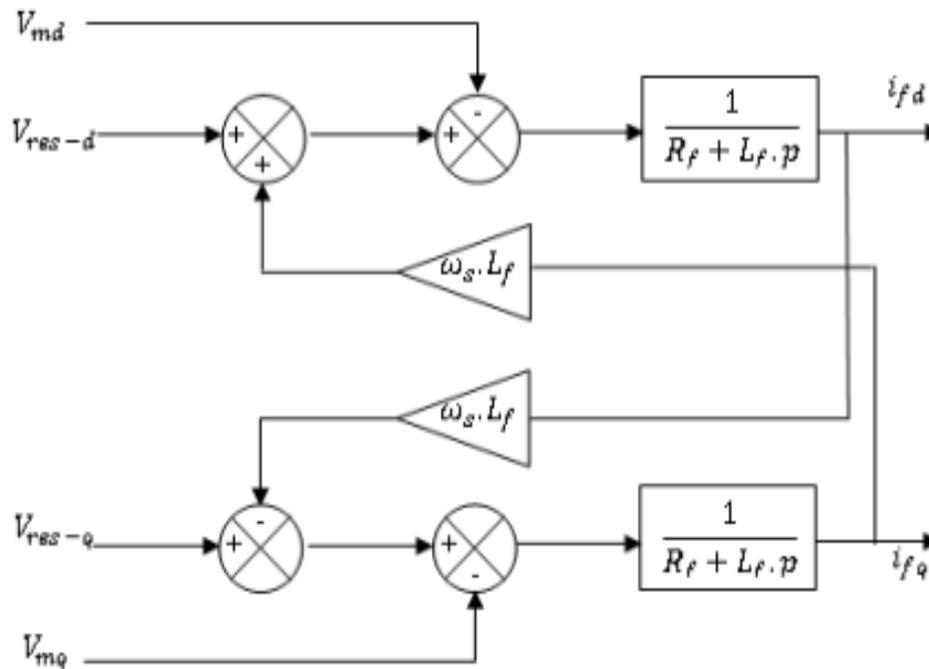


Figure II.11 : Modèle du filtre dans le repère (d,q).

**Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord présenté le système physique à étudier. Puis, nous avons présenté la modélisation du système.

Cette modélisation, basée sur la décomposition du système global étudié, en sous-système, en bloc distincts a permis d'aboutir à une structure modulaire. Ce qui permet la réutilisation de certains blocs pour d'autres applications, et de passer d'un programme à un autre facilement.

Le troisième chapitre sera consacré à la simulation et le contrôle de puissance du système étudié.

# **Chapitre III**

*Système de commande de la liaison au réseau*

## Introduction

Après avoir présenté les différentes chaînes de conversion au chapitre I, nous avons choisi la machine asynchrone à cage d'écureuil associée à deux convertisseurs statiques commandés en MLI .afin de permettre une production optimale d'électricité et quelques soit les conditions de vent et de vitesse de l'éolienne.

Dans ce chapitre, nous avons décrit le système de commande de la liaison au réseau, qui permettra de commander indépendamment les puissances actives et réactives. Enfin, pour tester le modèle élaboré nous Présentons les résultats de simulation du système étudié.

### III.1 But de la Commande MLI des convertisseurs

L'objectif de la commande à MLI est de diminuer les harmoniques présents dans les courants générés par le convertisseur. Le principe est de comparer un signal triangulaire appelé porteuse qui détermine la période de découpage à une modulante dont le fondamental est à la fréquence de la référence. Le résultat de cette comparaison est le signal MLI qui est utilisé comme fonction de commutation pour commander les interrupteurs du convertisseur. Cette méthode permet d'obtenir, de façon simple, les temps de conduction de chaque interrupteur [37], [38].

Plusieurs types de MLI intersectives sont utilisés. On peut citer par exemple, la MLI intersective sinus avec porteuse triangulaire, la MLI pré calculée, la MLI vectorielle, etc.

Toute fois dans notre étude nous adoptons la MLI naturelle à cause de sa simplicité d'élaboration, dont son principe est représenté dans la Fig.III.1.

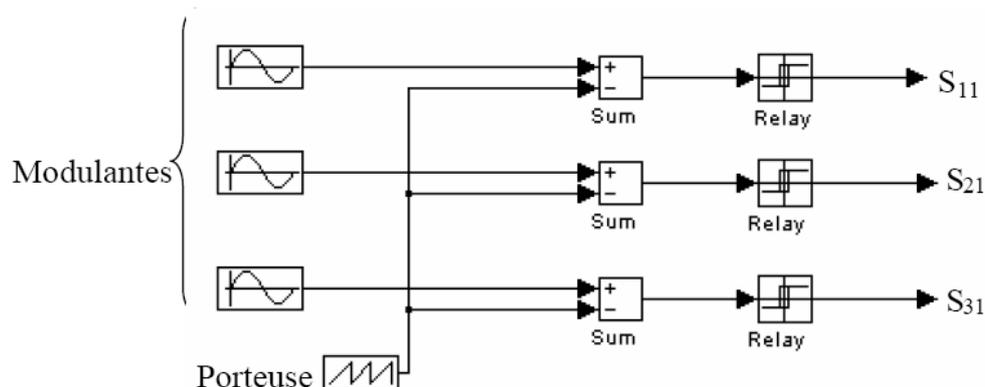


Figure III.1 : Schéma de principe de la MLI naturelle.

III.2 Contrôle de la liaison au réseau :

Avec le convertisseur à côté réseau, il est possible de commander les puissances actives et réactives qui alimentent la charge. Le système global de la commande de la liaison au réseau est montré sur la figure III.2 où la commande utilise la commande MLI en calculant les courants de référence [28]

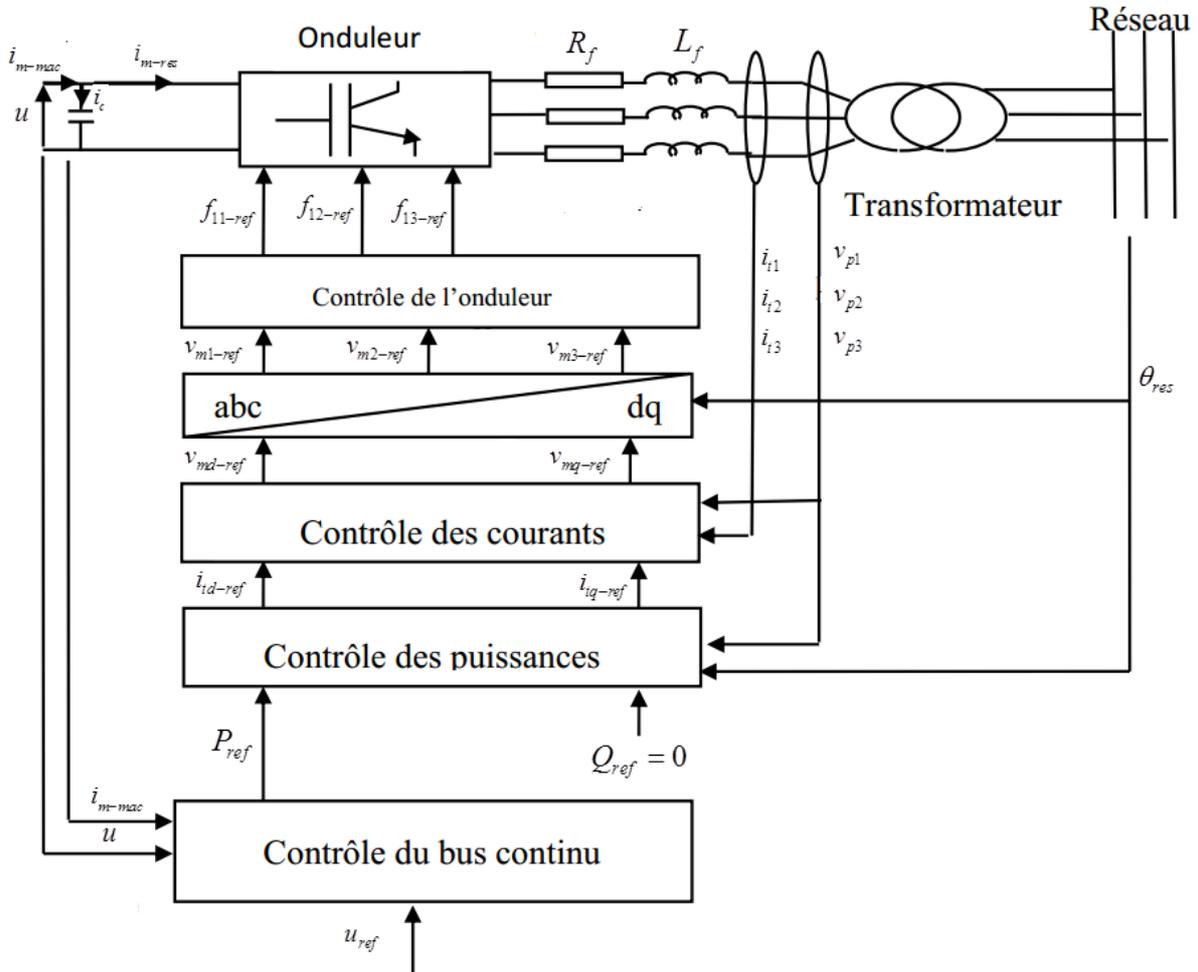


Figure III.2 : Schéma global de la commande de la liaison au réseau.

La topologie du convertisseur permet de générer et également d'appeler un courant provenant du réseau. C'est notamment le cas lors de la phase de démarrage durant laquelle le condensateur doit être chargé. L'objectif du convertisseur relié au réseau électrique est de maintenir la tension du bus continu constante quel que soit l'amplitude et le sens de l'écoulement de la puissance.

La structure de commande de la liaison au réseau permet, de régler la puissance générée sur le réseau à une valeur de référence ( $P_{ref}$ ) correspondant à un certain fonctionnement optimal, et de fixer la valeur de la puissance réactive envoyée au réseau à une valeur de référence nulle ( $Q_{ref} = 0$ ) pour avoir un facteur de puissance proche de l'unité.

### III.2.1 Régulation du bus continu :

Le réglage du bus continu est réalisé au moyen d'une boucle de régulation, permettant de maintenir une tension constante du bus continu, avec un correcteur Proportionnel Intégral PI générant la référence du courant à injecter dans le condensateur  $i_{c-ref}$ . [28]

La puissance stockée dans le condensateur et sa référence sont exprimées respectivement par les relations suivantes :

$$P_{condens} = ui_c \dots\dots\dots (III.1)$$

$$P_{condens-ref} = ui_{c-ref} \dots\dots\dots (III.2)$$

En négligeant les pertes dans le condensateur, dans le convertisseur et dans le filtre par rapport à la puissance transitée, on abouti au schéma bloc suivant :

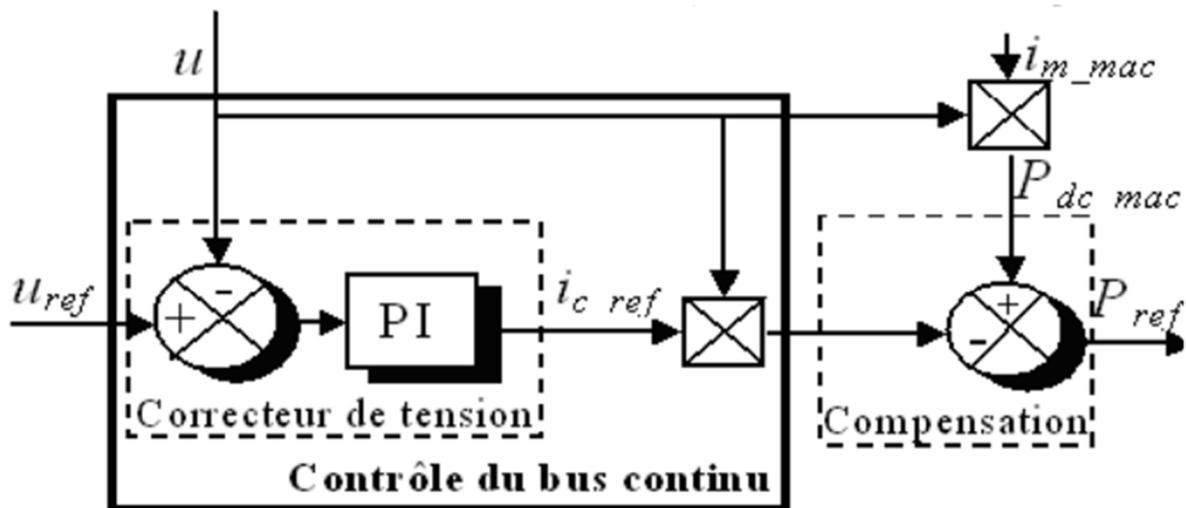


Figure III.3 : Contrôle de bus continu.

### III.2.2 Régulation de puissance :

Le dispositif de commande permet d'imposer les courants transités à suivre leurs références. Cela entraîne les puissances active et réactive transitées suivantes:

$$P = v_{pd}i_{td} + v_{pq}i_{tq} \dots\dots\dots (III.3)$$

$$Q = v_{pq} i_{td} - v_{pd} i_{tq} \dots\dots\dots(\text{III.4})$$

En multipliant l'équation de puissance active (III.3) par  $v_{pd}$  et l'équation de puissance réactive (III.4) par  $v_{pq}$  on aura :

$$v_{pd} P = (v_{pd})^2 i_{td} + v_{pd} v_{pq} i_{tq} \dots\dots\dots(\text{III.5})$$

$$v_{pq} Q = (v_{pq})^2 i_{td} - v_{pq} v_{pd} i_{tq} \dots\dots\dots(\text{III.6})$$

On réalise la somme des deux équations précédentes (III.5) et (III.6), le courant  $i_{td}$  sera donné par :

$$i_{td} = \frac{P v_{pd} + Q v_{pq}}{(v_{pd})^2 + (v_{pq})^2} \dots\dots\dots(\text{III.7})$$

De la même manière, on trouve l'expression du courant  $i_{tq}$  :

$$i_{tq} = \frac{P v_{pq} - Q v_{pd}}{(v_{pd})^2 + (v_{pq})^2} \dots\dots\dots(\text{III.8})$$

Il est donc possible d'imposer des références pour la puissance active  $P_{ref}$  et la puissance réactive  $Q_{ref}$  en imposant les courants de références comme suite :

$$i_{td} = \frac{P_{ref} v_{pd} + Q_{ref} v_{pq}}{(v_{pd})^2 + (v_{pq})^2} \dots\dots\dots(\text{III.9})$$

$$i_{tq} = \frac{P_{ref} v_{pq} - Q_{ref} v_{pd}}{(v_{pd})^2 + (v_{pq})^2} \dots\dots\dots(\text{III.10})$$

La composante directe du courant est utilisée pour réguler la tension du bus continu. Ce dernier est contrôlé à l'aide d'un régulateur (PI). La composante en quadrature est utilisée pour réguler la puissance réactive transmise.

Le système de commande doit permettre de maintenir la tension de bus continu constante, et d'obtenir des tensions sinusoïdales au primaire du transformateur d'amplitude et de fréquence identiques à celles du réseau. La puissance réactive est imposée nulle  $Q_{ref} = 0$ .

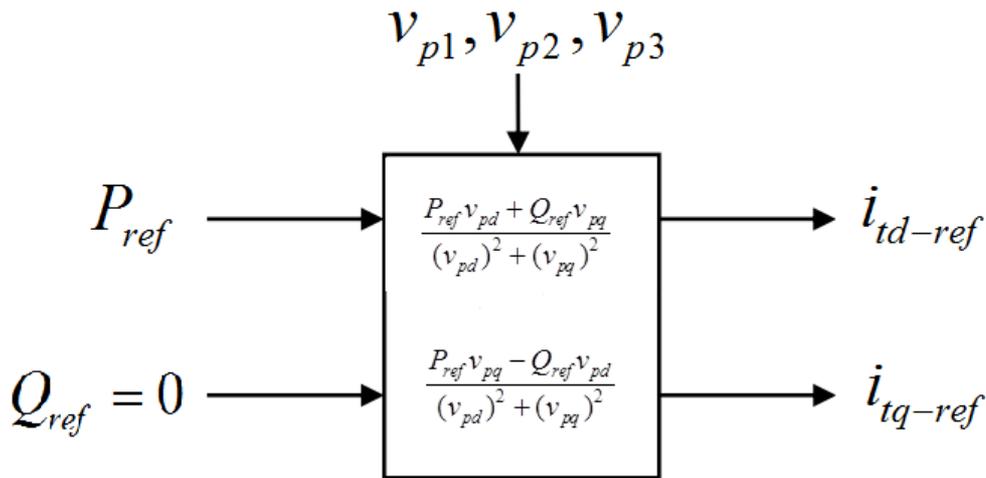


Figure III.4 : Contrôle de puissance.

### III.2.3 Contrôle des courants envoyés au réseau :

Un contrôle en boucle fermée des courants envoyés au réseau donne les deux tensions de référence suivantes :

$$v_{bd-ref} = [PI](i_{td-ref} - i_{td-mes}) \dots\dots\dots(III.11)$$

$$v_{bq-ref} = [PI](i_{tq-ref} - i_{tq-mes}) \dots\dots\dots(III.12)$$

Les tensions de référence de la commande de l'onduleur  $v_{md-ref}$  et  $v_{mq-ref}$  sont donnée en fonction des deux tensions  $v_{bd-ref}$  et  $v_{bq-ref}$  par les deux équations suivantes :

$$v_{md-ref} = v_{bd-ref} - \omega_s L_t i_{tq-mes} + v_{pd-mes} \quad \dots\dots\dots (III.13)$$

$$v_{mq-ref} = v_{bq-ref} + \omega_s L_t i_{td-mes} + v_{pq-mes} \quad \dots\dots\dots (III.14)$$

Le schéma de la figure III.5 montre le contrôle des courants envoyés au réseau :

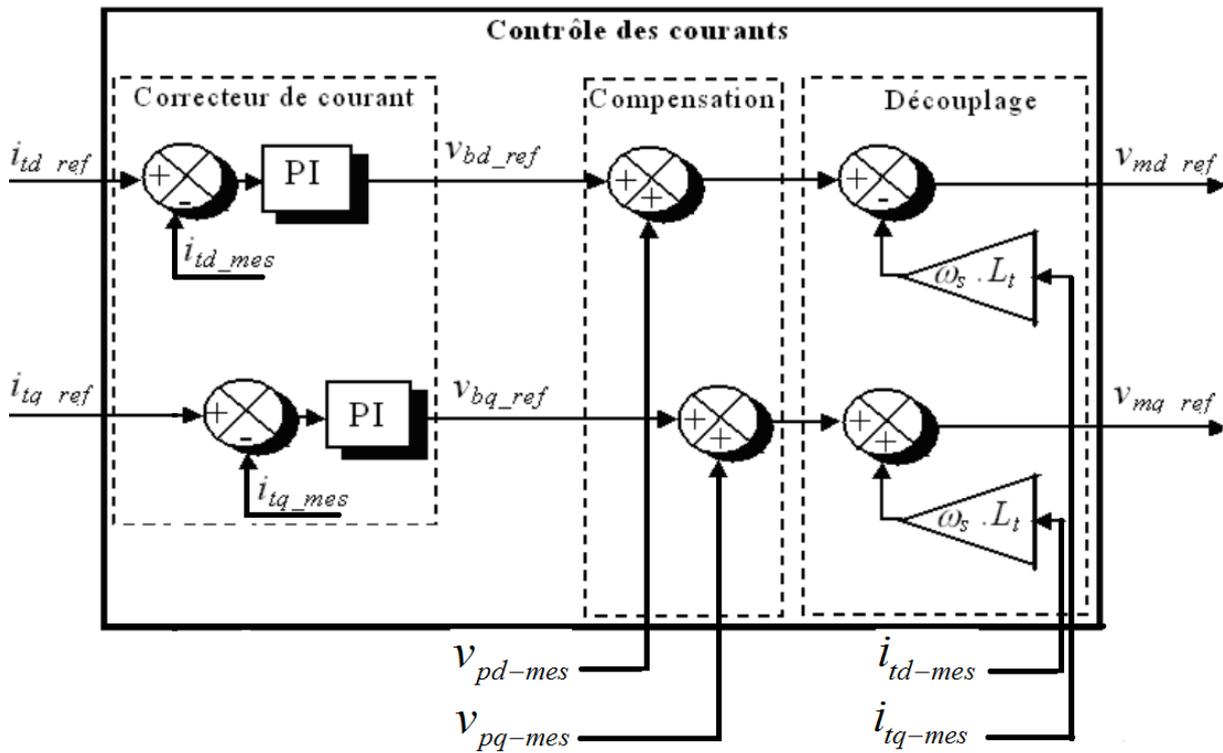


Figure III.5 : Contrôle des courants.

**Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons décrit le système de commande de la liaison au réseau. La structure de ce système permet, de régler la puissance générée sur le réseau ( $P=P_{ref}$ ), et de fixer la valeur de la puissance réactive envoyée au réseau à une valeur de référence pour avoir un facteur de puissance proche de l'unité. Il permet également maintenir constante la tension du bus continu quelque soit les variations du vent, afin d'avoir une amplitude et une fréquence des tensions alternatives compatibles avec celles du réseau.



## **Chapitre IV**

*Simulation du système étudié*

## Introduction

Le système étudié de la Figure II.1 a été modélisé et complété par un système de régulation Figure III.2. Dans ce chapitre différents expériences ont été réalisés afin de visualiser les réponses du système et de tester la robustesse de celui-ci vis-à-vis de certaines perturbations.

## IV. Résultats de simulation

### IV.1.1 Essai a vitesse du vent constante

On prendra comme convention : le signe négatif signifie que la puissance est fournie.

La vitesse du vent est fixée à 10 m/s. On fixe la valeur de la tension de référence du bus continu à 465 v. On obtient alors les résultats suivants :

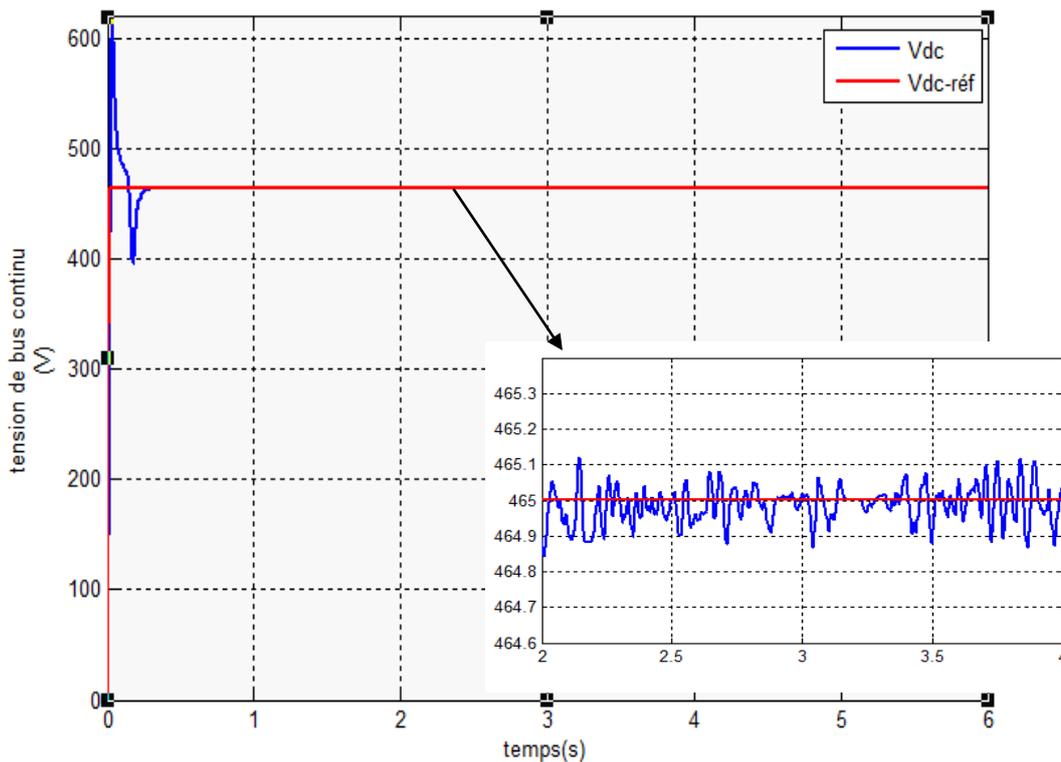


Figure IV.1 : Tension du bus continu.

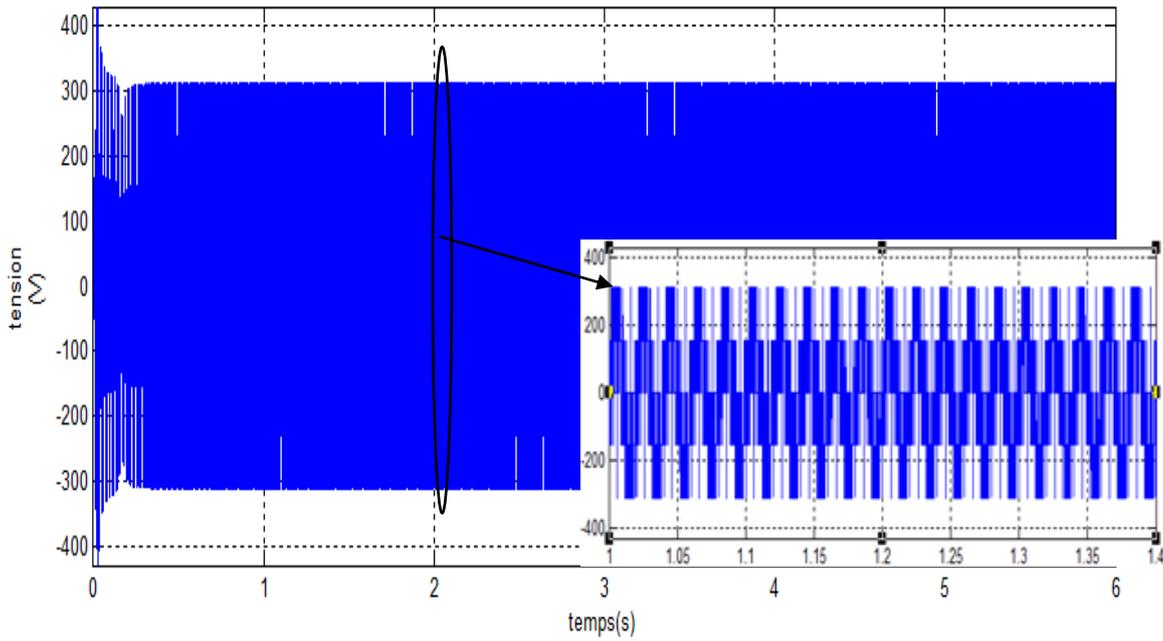


Figure IV.2 Tension simple à la sortie de l'onduleur.

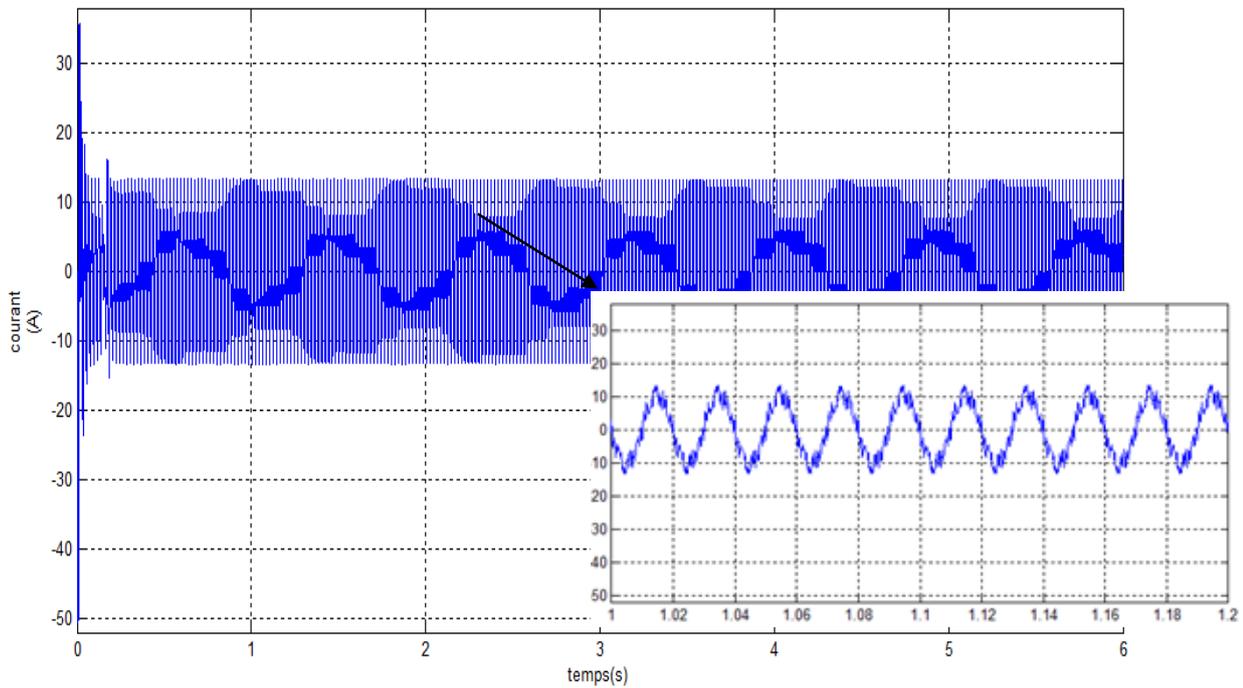


Figure IV.3 Courant envoyée au réseau.

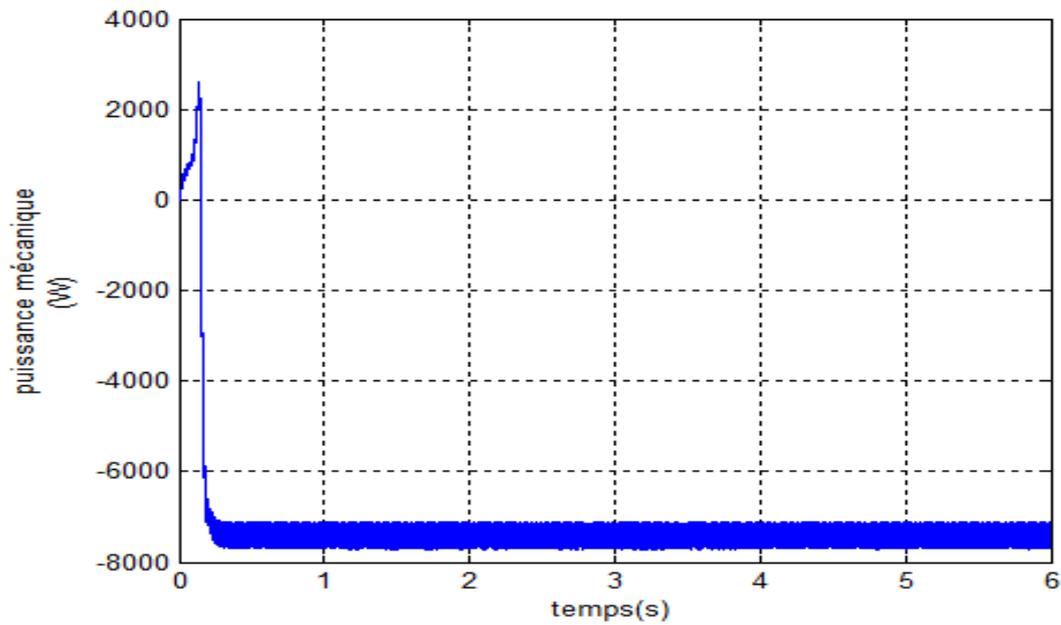


Figure IV.4 : Puissance mécanique

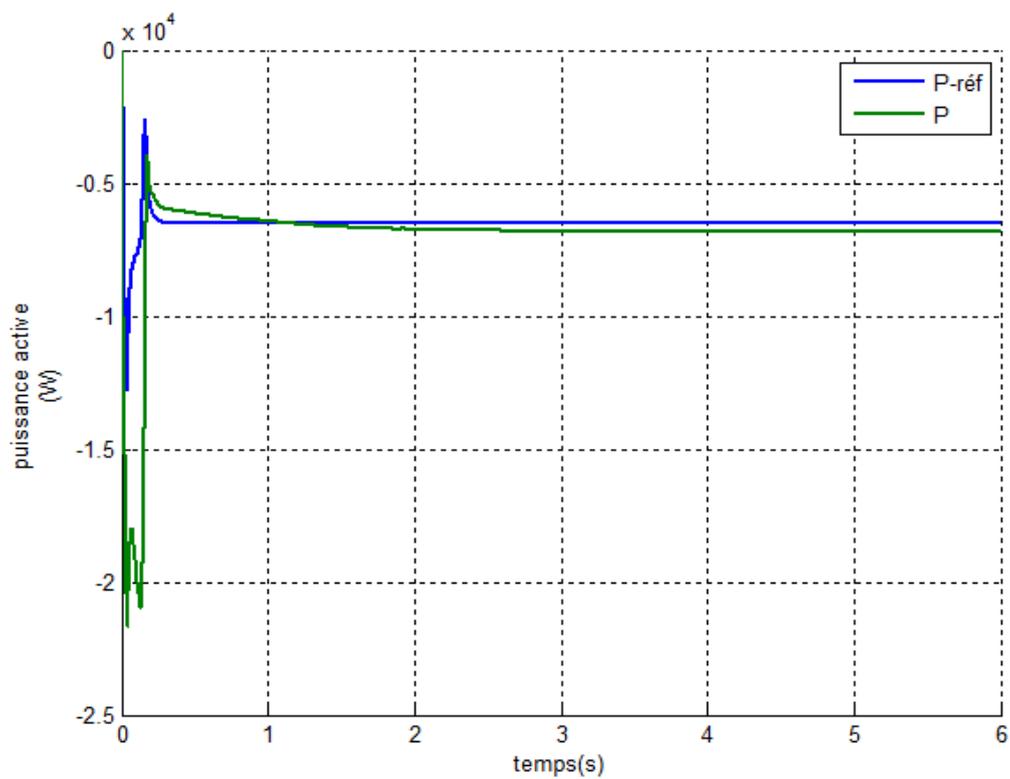


Figure IV.5 : Puissance active envoyée au réseau.

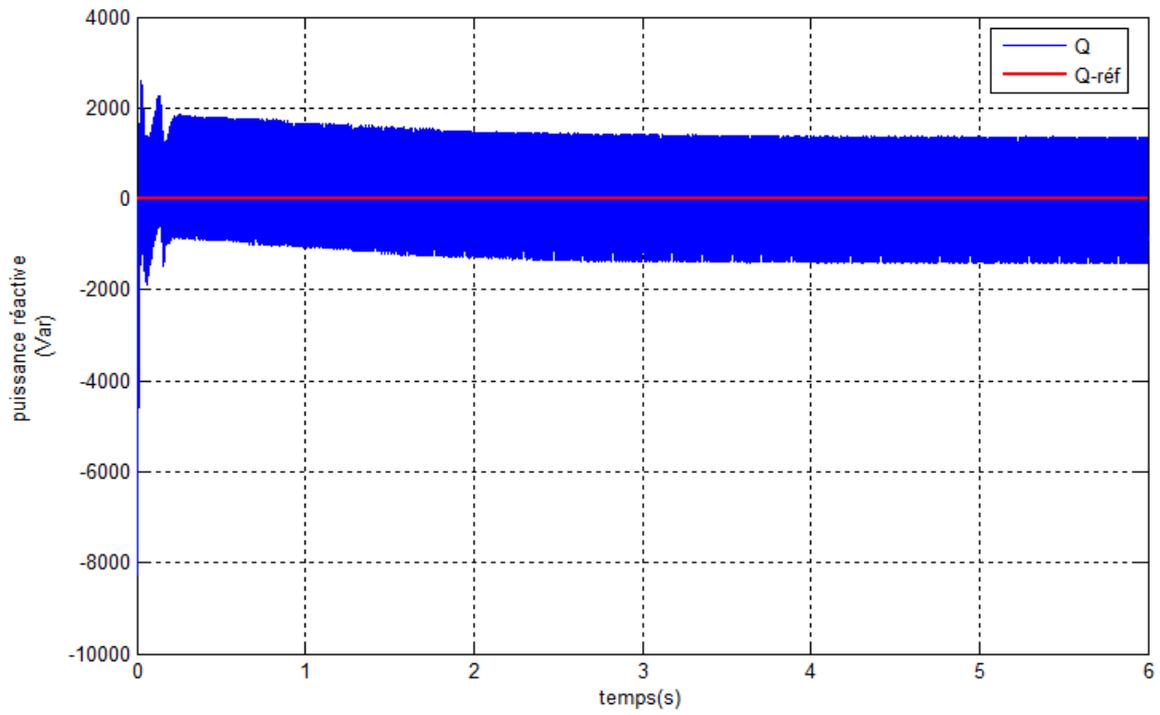


Figure IV.6 : Puissance réactive envoyée au réseau.

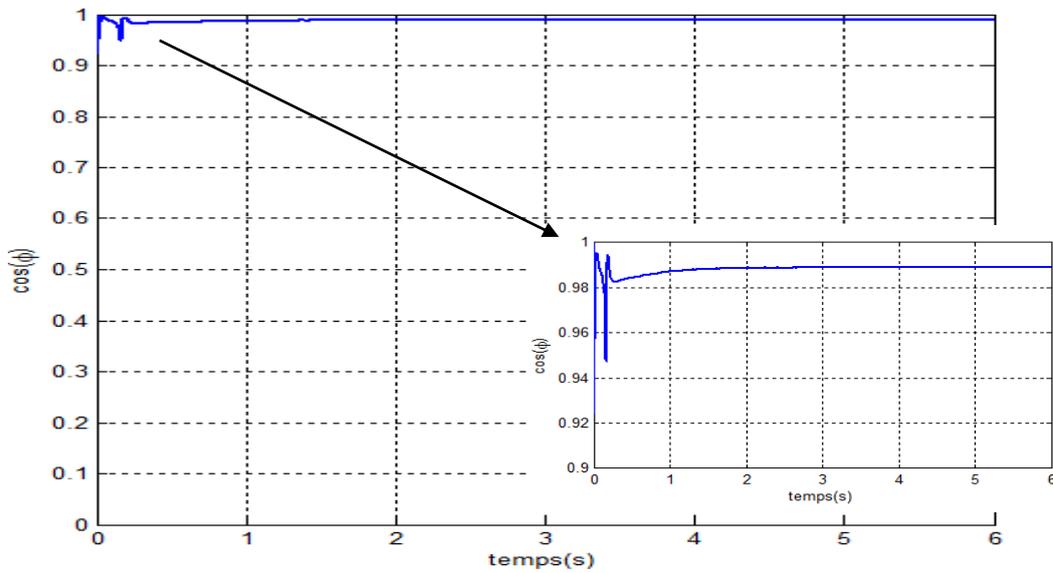
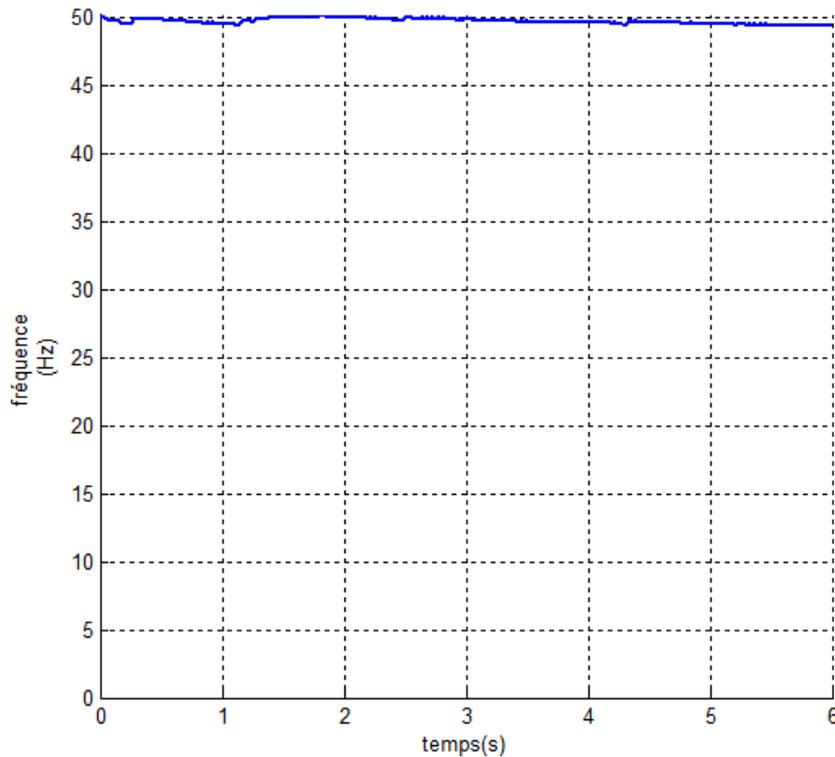


Figure IV.7 : Facteur de puissance.



**Figure IV.8 : Fréquence de périodicité.**

### IV.1.2. Interprétation des résultats de simulation

La figure IV.1 montre que la tension du bus continu suit très bien sa référence.

La puissance réactive envoyée au réseau est maintenue nulle pour avoir un facteur de puissance proche de l'unité (Figure IV.6. et Figure IV.7).

La puissance active est superposée à sa référence, on peut remarquer que la machine absorbe de l'énergie du réseau pendant une courte durée transitoire (0.3227 s), (Figure IV.5).

Le facteur de puissance (Figure IV.7) est très proche de l'unité, ce bon résultat est dû au choix de la valeur de la puissance réactive ( $Q=0$ ) et au vent qui est parfaitement constant (10 m/s)

### IV.2.1 Essai a deux vitesses du vent différentes

Maintenant, on fixe la tension du bus continu à 465 V et la puissance réactive de référence est maintenue toujours nulle. et le vent sera 10m/s de 0 à 3s et à partir de 3s on applique un échelon de 7.5m/s .Les résultats qu'on a obtenu sont comme suite :

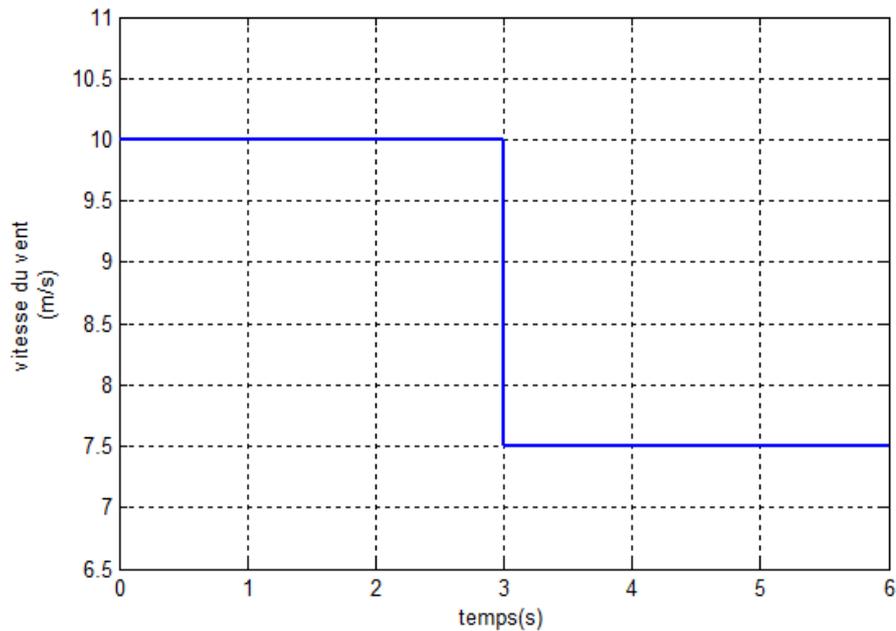


Figure IV.9 : Profile du vent.

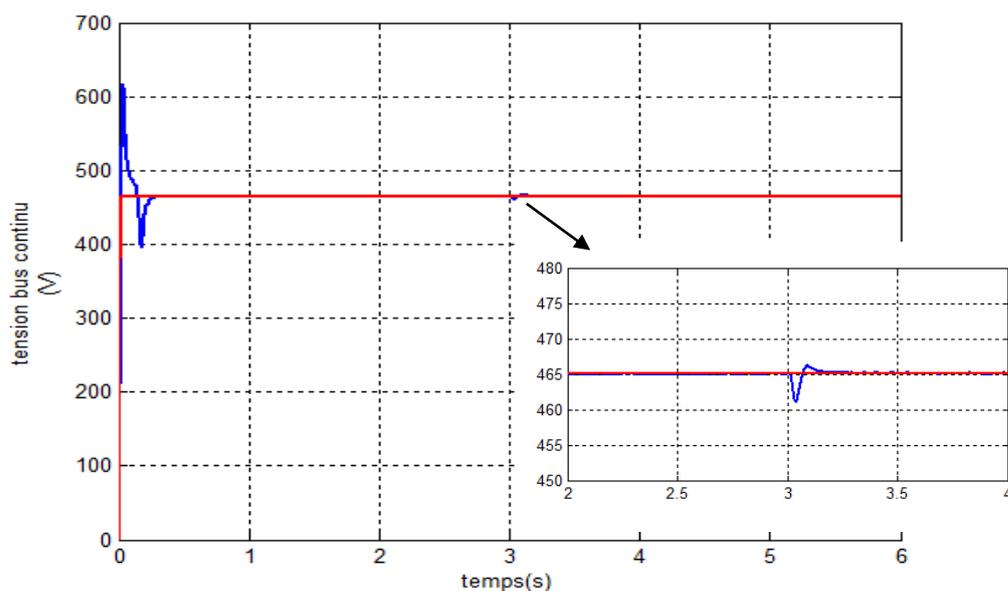


Figure IV.10 : Tension du bus continu.

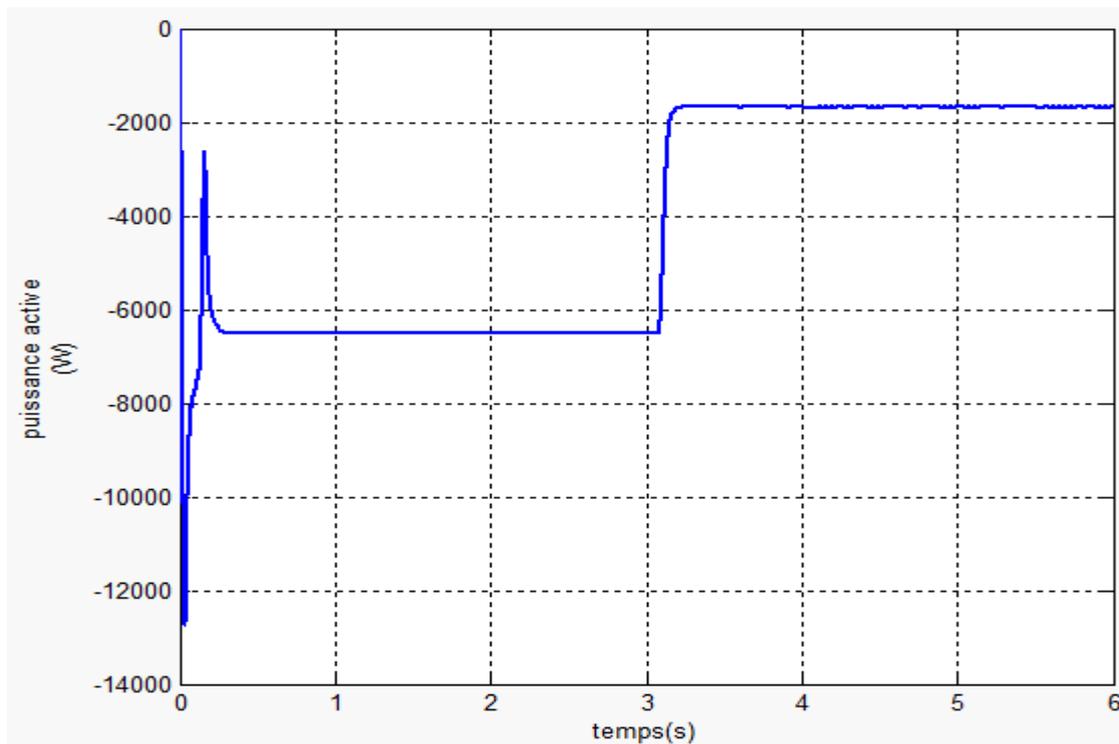


Figure IV.11 : Puissance active.

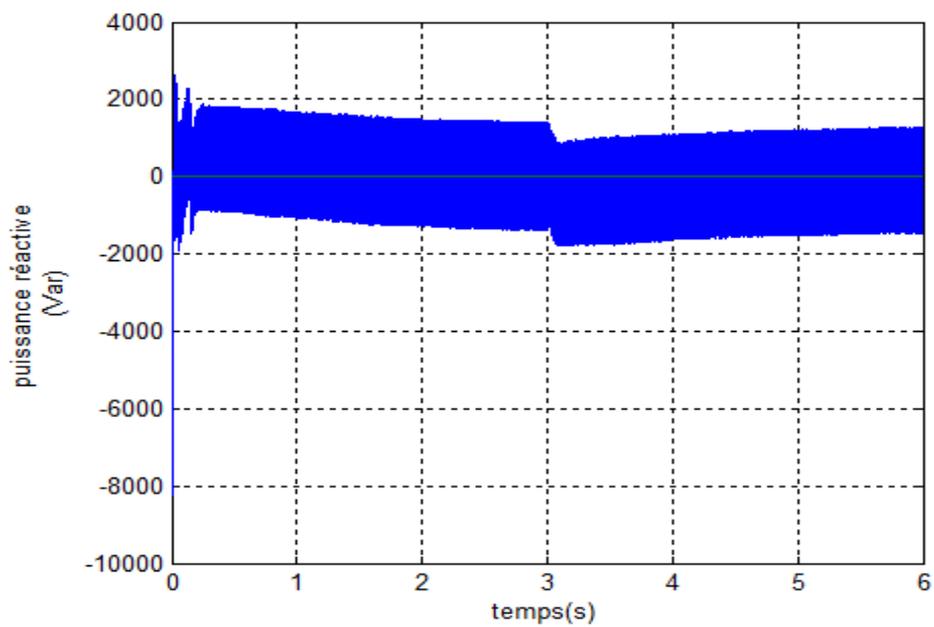
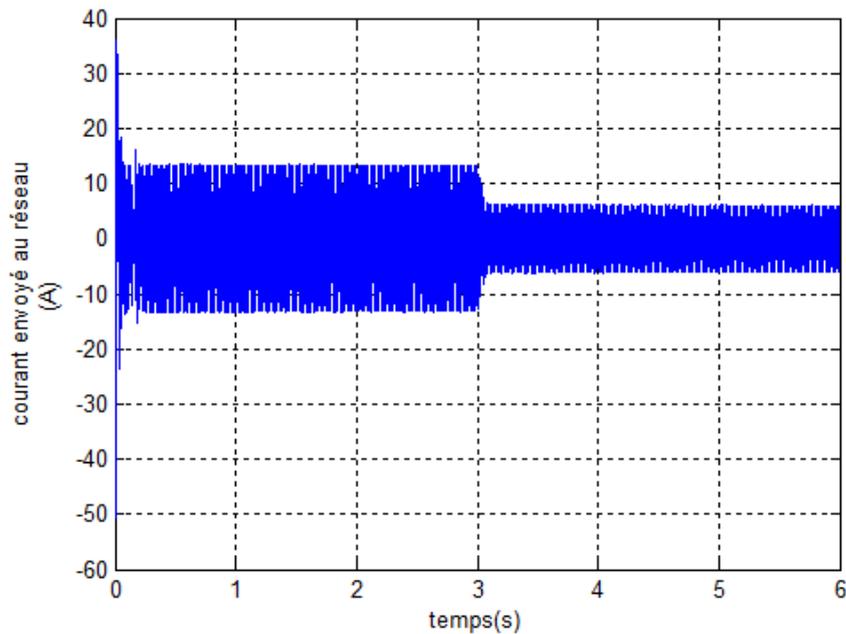


Figure IV.12 : Puissance réactive.



**Figure IV.13 : Courant envoyé au réseau.**

### IV.2.2 Interprétation des résultats de simulation

La tension de bus contenu (Figure IV.10) est bien régulée même après avoir appliqué un échelon de 7.5m/s. on remarque un faible dépassement à  $t=3s$  qui est dû au changement dans la vitesse du vent.

Le courant envoyé au réseau suit la variation du vent (figure IV.13) ainsi que la puissance active injecté au réseau figure (IV.11).

La puissance réactive est toujours maintenue à sa valeur de référence figure (IV.12).

### IV.3.1 Essai à vitesse du vent variable

On applique le profile du vent de la figure IV.13 avec de grands gradients de vitesse, les résultats obtenus sont représentés sur les figures suivantes :

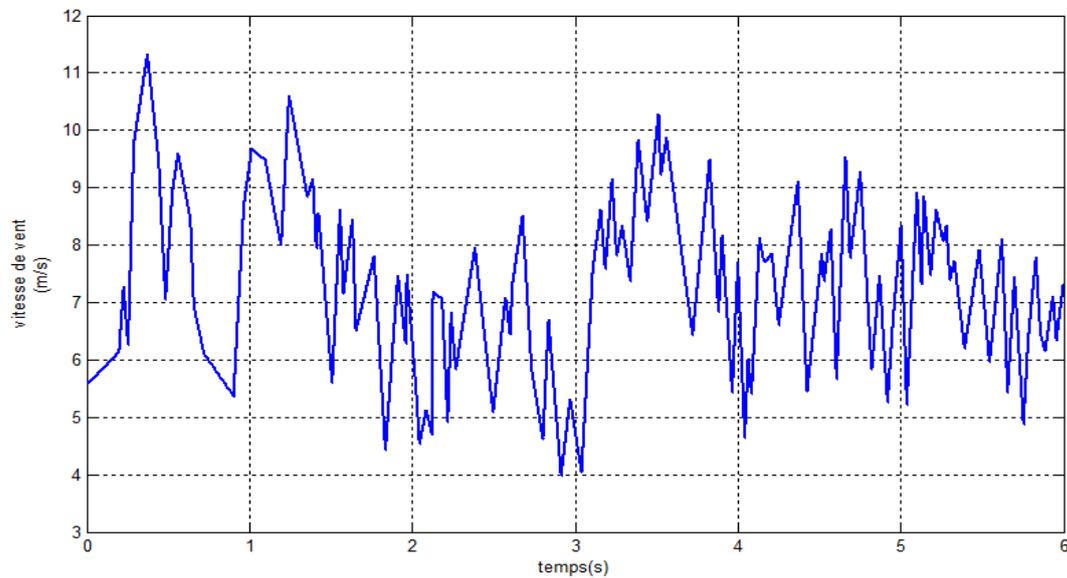


Figure IV.14 : Profile du vent appliqué.

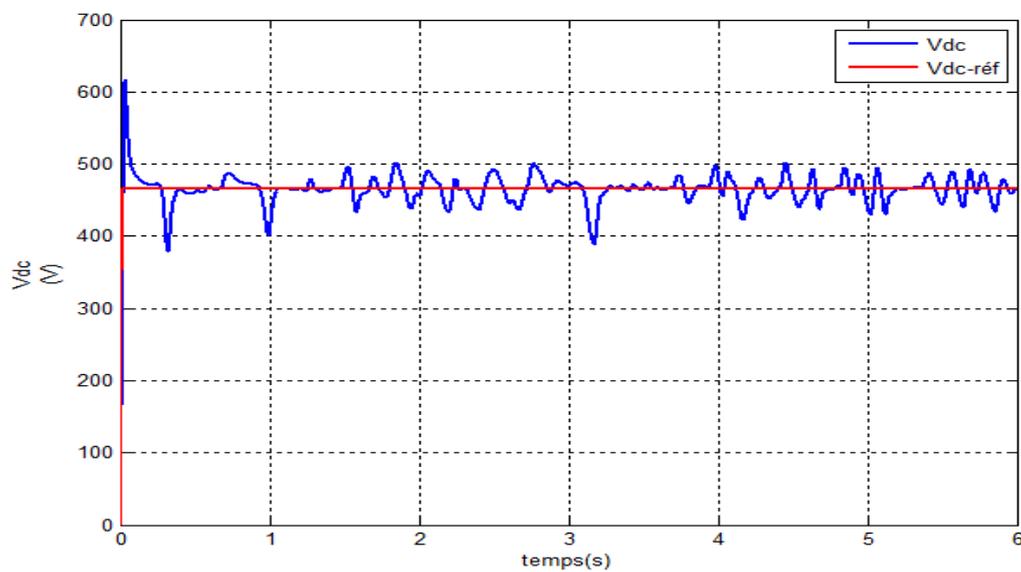


Figure IV.15 : Tension du bus continue.

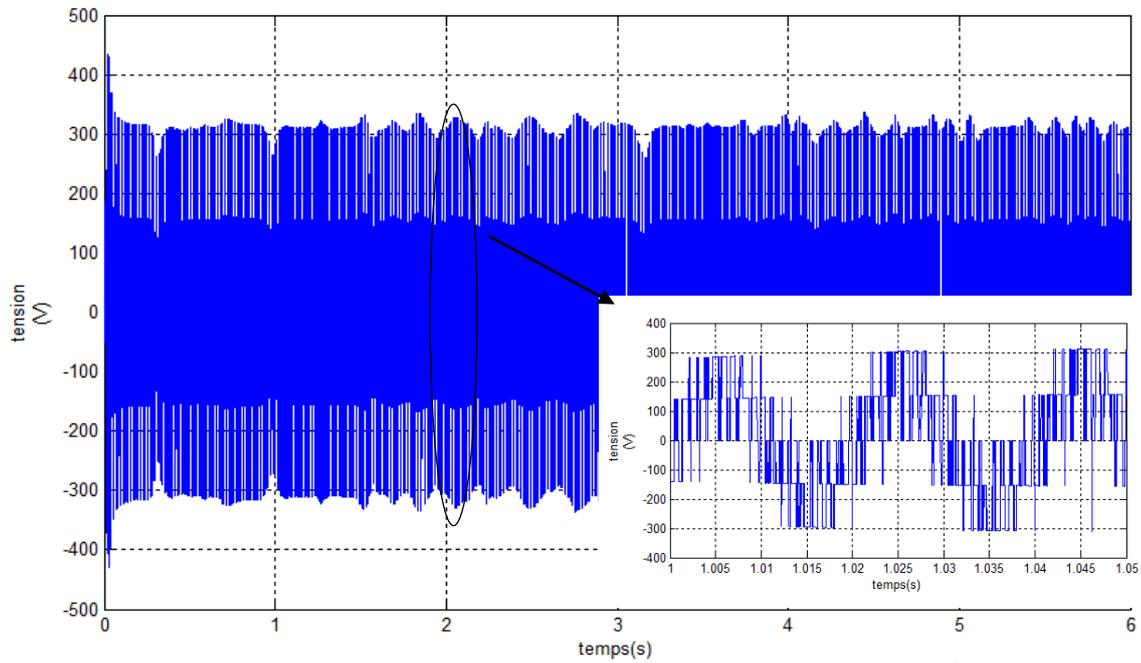


Figure IV.16 : Tension simple a la sortie de l'onduleur.

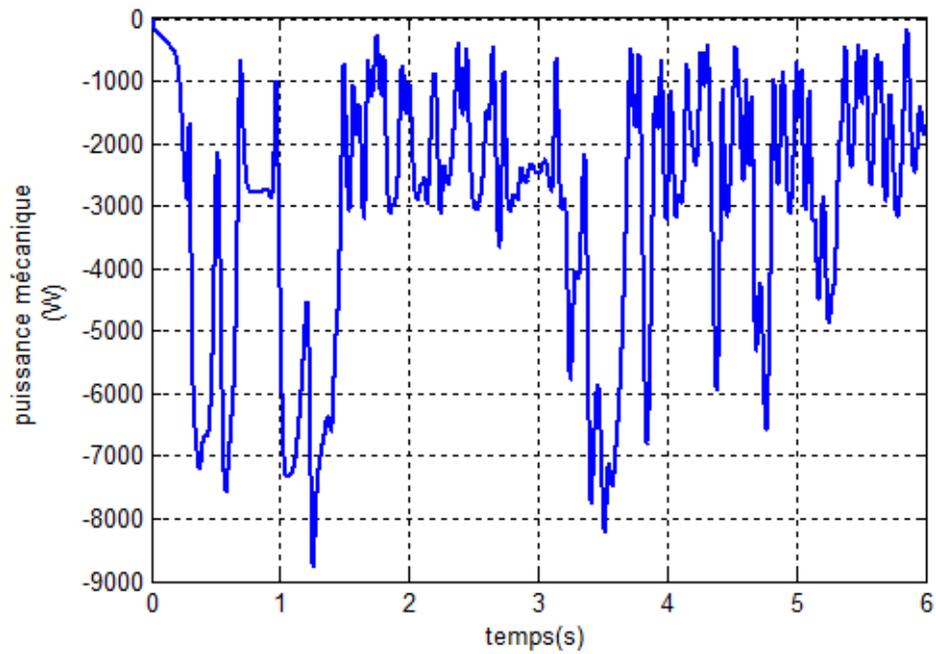


Figure IV.17 : Puissance mécanique.

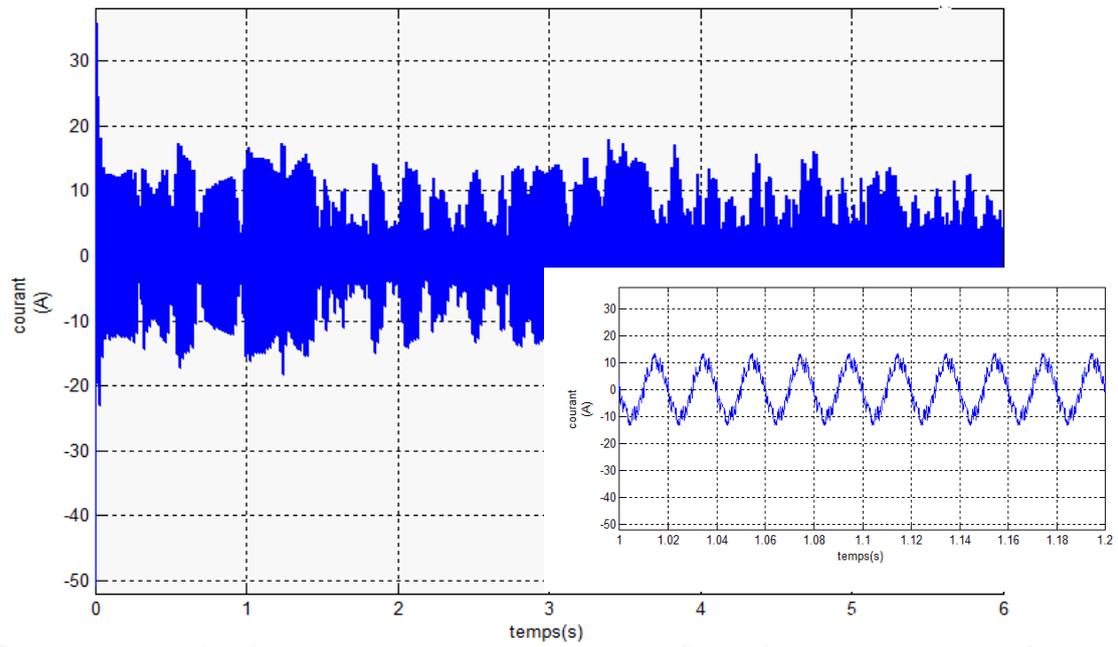


Figure VI.18 : Courant envoyé au réseau.

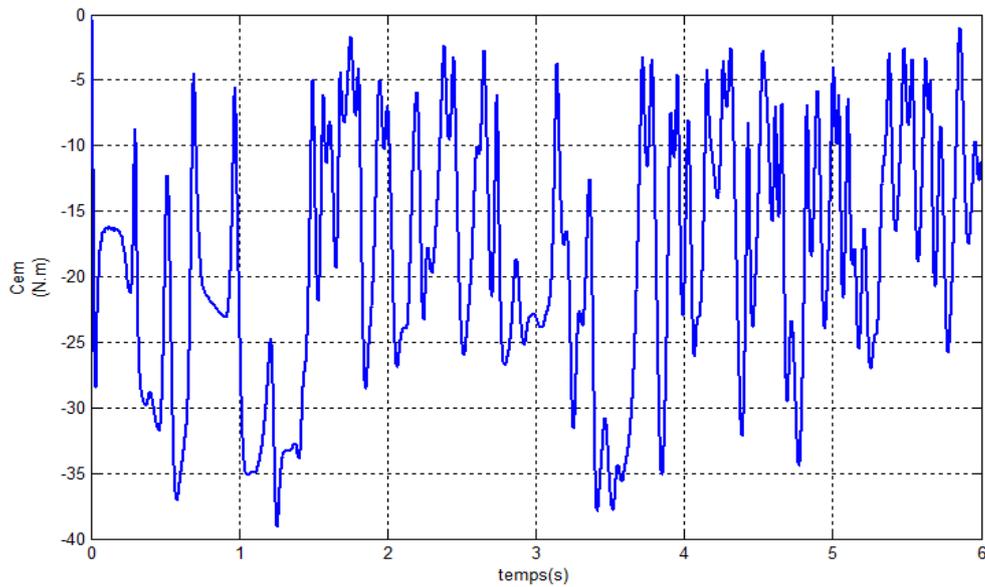


Figure IV.19 : Couple électromagnétique.

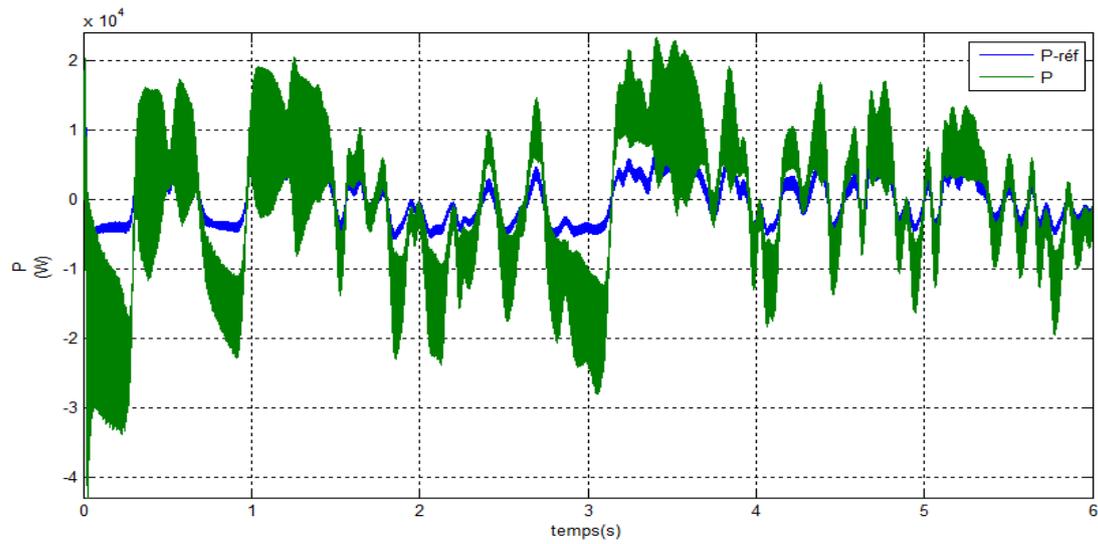


Figure IV.20 : Puissance active envoyée au réseau.

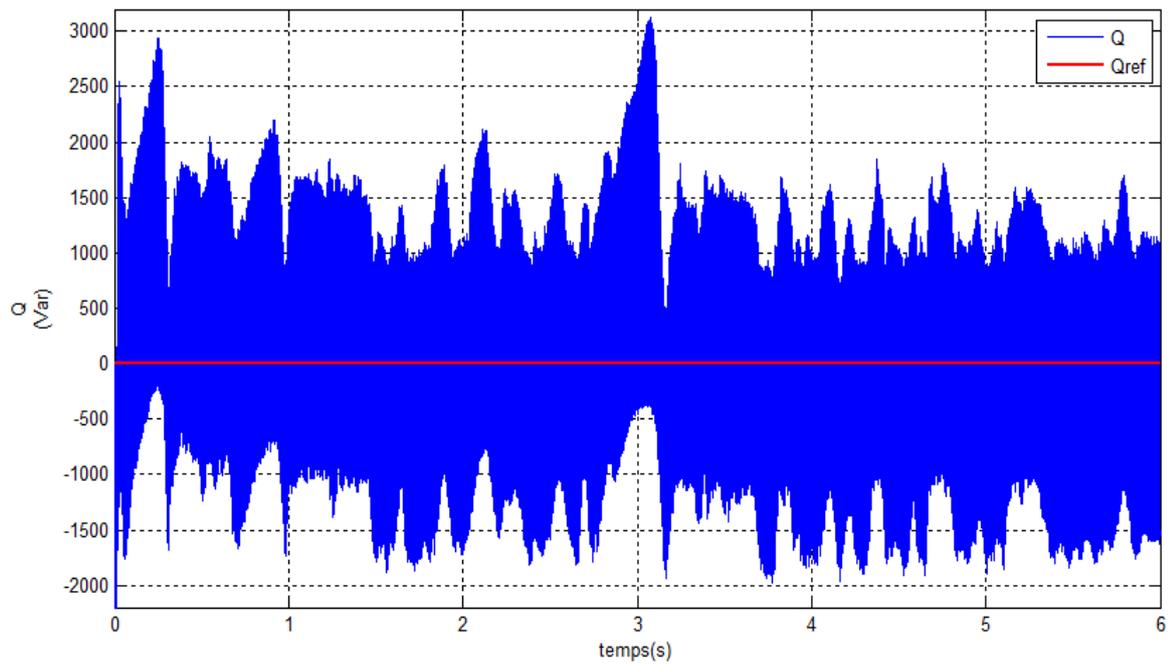


Figure IV.21 : Puissance réactive envoyée au réseau.

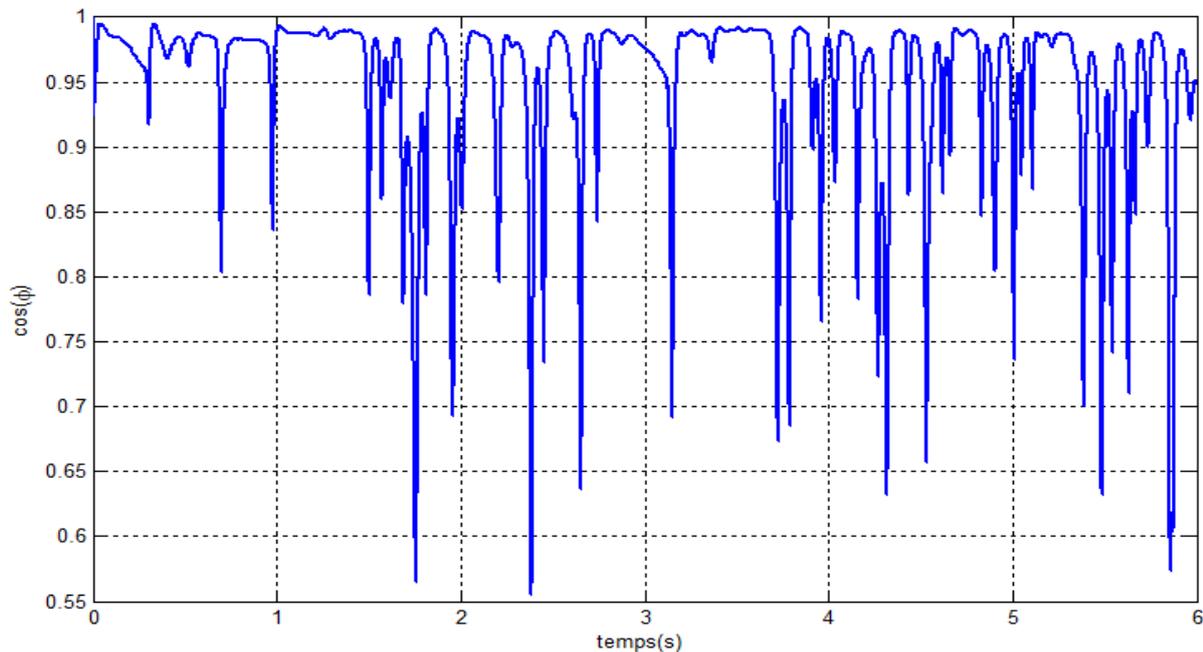


Figure IV.22 : Facteur de puissance.

### IV.3.2. Interprétation des résultats de simulation

La tension du bus continu est variable en fonction de la variation rapide du vent (Figure IV.15), cela est dû au régulateur PI qui ne maîtrise les grands gradients de vitesse.

On constate aussi que le courant généré, suit bien la vitesse du vent (Figure IV.18 et Figure IV.14).

Les figures (IV.19 et IV.17) montrent que le couple électromagnétique et la puissance mécanique suivent bien le profil du vent.

La puissance active et Réactive varie en fonction de la vitesse du vent. Les deux puissances n'arrivent pas à suivre parfaitement leur référence au moment où on a de grande variation du vent cela est dû aux régulateur PI qui sont linéaire et qui n'arrive pas à mieux contrôler les grandes variations du vent

On remarque bien que la puissance mécanique, le couple mécanique et le facteur de puissance suit la variation du vent.

Variation des courants envoyés au réseau dû à la variation rapide du vent.

La figure IV.18 nous montre que la période du courant envoyé au réseau est 0.02 s ce qui va nous donnée une fréquence qui est égale 50 Hz.

## Conclusion

Après avoir décrit les différentes structures des éoliennes basées sur plusieurs génératrices différentes ; nous avons établi un modèle de chaîne de conversion éolienne constitué d'une génératrice asynchrone à cage d'écureuil, un redresseur triphasé et l'onduleur, l'ensemble est relié au réseau via un bus continu. Nous avons ensuite, construit un dispositif de commande de la chaîne de conversion proposée.

Après avoir simulé pour différentes valeurs de la vitesse du vent dans le profil constant on a conclu que pour une vitesse  $v=10\text{m/s}$  on obtient un bon fonctionnement de notre système, on remarque aussi que cette valeur qui donne le régime nominale de la machine.

Comparée à un profil du vent très variable, les résultats de simulation montrent des puissances active et réactive ainsi que la tension régulée qui arrivent à suivre leur référence, une légère différence entre la référence et les puissances ainsi la tension régulée est dû au régulateur PI linéaire qui n'arrive pas à suivre la ou il y a de grande variation du gradient de vitesse.



*Conclusion générale*

**Conclusion Générale**

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude et la simulation d'une chaîne de conversion éolienne basée sur une génératrice asynchrone à cage d'écureuil (GAS).

La génératrice est connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance (deux convertisseurs à base d'IGBT) commandés en MLI. Ces convertisseurs sont interconnectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue et reliés au réseau via un filtre d'entrée. L'outil utilisé pour arriver à ce but est le logiciel "MATLAB".

Le premier chapitre rappelle les concepts fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique et dresse un état de l'art sur les différentes associations machines électriques – convertisseurs pouvant être accouplées à une éolienne. Au regard de ce chapitre, il est apparu que la production d'énergie électrique par éoliennes se divise en deux grandes catégories : l'éolien de proximité où les machines sont très souvent autonomes et de petites puissances, et le grand éolien où l'énergie électrique est produite directement sur le réseau de distribution.

Le deuxième chapitre mené dans ce mémoire concerne la présentation du système physique à étudier. Puis, on a élaboré un modèle du système éolien global qui comprend la turbine, le multiplicateur de vitesse, la machine asynchrone à cage d'écureuil (GAS) dans le repère de PARK, les deux convertisseurs MLI ainsi que le filtre.

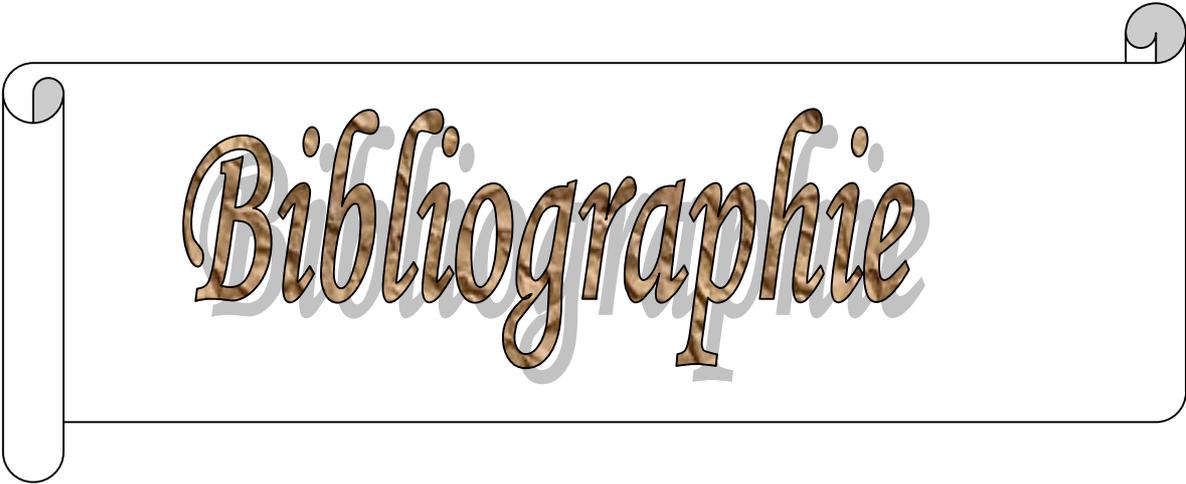
Dans le troisième chapitre nous avons décrit le système de commande de la liaison au réseau. La structure de ce système permet, de régler la puissance générée sur le réseau ( $P=P_{ref}$ ), et de fixer la valeur de la puissance réactive envoyée au réseau à une valeur de référence pour avoir un facteur de puissance proche de l'unité. Il permet également maintenir constante la tension du bus continu quelque soit les variations du vent.

Dans le quatrième et dernier chapitre La simulation du système élaboré nous a permis de constater le fonctionnement de la génératrice et que la puissance est effectivement maximisée, elle a aussi montré l'effet de la variation de la vitesse du vent et du gradient de la vitesse sur la puissance captée et la chronologie de fonctionnement de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent.

Face aux résultats obtenus, des perspectives intéressantes pouvant être contribuées à l'amélioration du fonctionnement du dispositif étudié sont envisageables :

- Utilisation d'autres types de régulateurs.

- Utilisation d'un algorithme de maximisation de la puissance captée par différentes techniques : logique floue, réseau de neurones, la commande adaptative, ...etc.
- L'intégration d'un système de stockage inertiel.
- L'étude des perturbations de la production de l'énergie éolienne vis-à-vis des déséquilibres du réseau.



*Bibliographie*

- [1] E. Golding, The generation of electricity by wind power, *Haldsted Press, New York, 1976.*
- [2] Le Gourrière, Désiré, Energie éolienne, théorie, conception et calcul pratique des installations, *Paris, Editions Eyrolles, 1980.*
- [3] Désiré Le GOURIERE, Energie éolienne, Théorie, Conception et calcul pratique des installations, édition Eyrolles, 1982.
- [4] Frédéric POITIERS, Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'utilisation de l'Energie Eolienne, Machine asynchrone à cage autonome ; Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau, Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 2003.
- [5] O. De Vries, "On the theory of the horizontal axis wind turbine", *Ann. Rev. Fluid. Mech.* 1983, 15, pp. 77-96.
- [6] Thomas Ackermann, Wind Power in Power systems, Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden, 2005.
- [7] <http://www.windpower.org/fr/core.html>
- [8] R. Ramakumar, A. Naeter, "Role of Renewable Energy in the Development and Electrification of Remote and Rural Areas", *Power Engineering Society General Meeting IEEE*, 6-12 June 2004, Vol.2, PP. 2103 – 2105.
- [9] Technique de l'ingénieur BM 4640.
- [10] H. Camblong, "Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable", Thèse de doctorat, 18 décembre 2003, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux.
- [11] L. Chang, "Systèmes de conversion de l'énergie éolienne", *IEEE Canadian Review*, Summer/Eté 2002, PP. 1-5.
- [12] B. Multon, G. robin, M. Ruellan et H. Ben Ahmed, " Situation énergétique mondiale à l'aube du 3ème millénaire : Perspectives offertes par les ressources renouvelables", *Revue 3EI*, no36 Mars 2004, pp. 1-14.
- [13] M. JOURIEH «développement d'un modèle représentatif d'une éolienne afin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien» Thèse de Doctorat Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2007.
- [14] WWEA «Rapport Mondial 2010 sur l'Energie Eolienne» April 2011.
- [15] R. Ramakumar, Albrecht Naeter, « Role of renewable energy in the development and electrification of remote and rural areas », *IEEE – PES general meeting Denver, Colorado, USA*, June 6 à12, 2004.

- [16] Gabriel-Octavian Cimuca, « Système inertiel de stockage d'énergie associée à des générateurs éoliens », thèse doctorat, E.N.S.A.M, centre de Lille, 2005.
- [17] Technique de l'ingénieur D 3 960.
- [18] Technique de l'ingénieur BM 4 640.
- [19] A.S. Neris, N.A. Vovos, G.B. Giannakopoulos, « A variable speed wind energy conversion scheme for connection to weak AC systems », IEEE transactions on energy conversion, vol. 14, N° 1, march 1999, pp. 122-127.
- [20] B. Raison, A. Morales, M. Crappe, « L'énergie électrique éolienne, partie I : présentation générale et approche probabilistique », revue internationale de génie électrique, vol. 5/3-4 – 2002, pp. 405-484.
- [21] C. Haritza, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable ». Doctorat, E.N.S.A.M Paris, décembre 2003.
- [22] J. Chen, C. Nayar, L. XU, « Design and FE analysis of an outer-rotor PM generator for directlycoupled wind turbine applications », proceeding of the IEEE industry applications conference, New York, USA, 1998, vol 1, pp. 387-394.
- [23] Abdelli Radia « commande linéaires et non linéaire d'une génératrice asynchrone dans un système d'énergie renouvelable », thèse de doctorat de l'université A/Mira de Béjaïa, algérie.2014
- [24] : F.Poitiers. "Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne" ; Thèse de doctorat, à l'école polytechnique de l'université de Nantes, France, 2003)
- [25] : D.Aouzellag, K.Ghedamsi "Modeling of Doubly Fed Induction Generator with Variable Speed Wind Turbine for Network Power Flow Control" WSEAS TRANSACTIONS on POWER SYSTEMS, pp: 1995-2000, Issue 12, Volume 1, Dec 2006).
- [26] : L.Aloui, "Etude par simulation d'une éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation alimentée par convertisseur matriciel" ; Mémoire de Magister en électrotechnique à l'Université de Bejaïa, octobre 2006)
- [27] : D.Rekioua, D.Aouzellag, S.Tarafi "Etude des performances de la MADA dans une éolienne à vitesse variable connectée au réseau " ICRE'07 University of Bejaïa,2007, pp 1-6).
- [28] : S.El Aïmani (modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension) thèse de doctorat, L2EP de l'école centrale de Lille [2004].
- [29] : Armand Boyette (contrôle commande d'un générateur asynchrone à

double alimentation avec un système de stockage pour la production éolienne) thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy I [2006]

[30] : B. Multon, G. Robin, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, Le génie électrique dans le vent : état de l'art et recherche dans le domaine de la génération éolienne, Actes des journées de jeunes chercheurs en génie électrique, Saint-Nazaire, pp 287-297, 2003.

[31] : H. Amimeur et S. Aouane- "réglage par mode de glissement d'un moteur asynchrone alimenté par un convertisseur matriciel" Mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique de l'université A.Mira de Bejaia, algerie, juin2009.

[32] : N.Benbaha-"commande robuste tolérante aux défauts : application à la machine à courant alternatif " Mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique de l'université Batna, algerie,2009.

[33] : A/M Benkhaloune et Medjdoub-" commande par mode de glissement d'une machine asynchrone muni d'un pilotage vectoriel" mémoire d'ingénieur en électrotechnique de l'université A.Mira de bejaia, algerie.2003.

[34] : T. Boumegoura - " recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue de diagnostic" thèse de doctorat Ecole centrale de lyon, Ecully, France, 2001.

[35] : K. Amei, Y. Igkayasu, T. Ohji and M. Sakui, '*A Maximum Power Control of Wind Generator System Using a Permanent Magnet Synchronous Generator and a Boost Chopper Circuit*', 0-7803-7156-9, IEEE, 2002.

[36] : Abdelli Radia « commande linéaires et non linéaire d'une génératrice asynchrone dans un système d'énergie renouvelable », thèse de doctorat de l'université A/Mira de béjaia, algerie.2014

[37] : C.GOMBERT. *Simulation temps-réel des dispositifs d'électronique de puissance dédiés aux réseaux d'énergie électrique*. Thèse de doctorat institut national polytechnique de Grenoble, 2005.

[38] : R.CHAUPRADE et F.MILSANT. *Electronique de puissance. Commande des moteurs à courant alternatif*. EYROLLES, 1984.

| <b>Paramètres de la GAS</b>                              |
|--|
| Puissance nominale $P_n$ : 7500 W                        |
| Nombre de paire de pôles $p$ : 2                         |
| Résistance d'enroulement statorique $R_s$ : 1.07131 Ohm  |
| Résistance d'enroulement rotorique $R_r$ : 1.29511 Ohm   |
| Inductance cyclique statorique $L_s$ : 0.1137 H          |
| Inductance cyclique rotorique $L_r$ : 0.1096 H           |
| Inductance magnétisante $M$ : 0.10474 H                  |
| Gain proportionnel de correcteur de puissance $K_p$ : 17 |
| Gain intégral de correcteur de puissance $K_i$ : 20      |
| <b>Paramètres de la turbine éolienne</b>                 |
| Rayon de l'hélice $R$ : 3.5 m                            |
| Nombre de pales : 3                                      |
| Rapport de vitesse du multiplicateur $G$ : 8.46          |
| Inertie totale $J$ : 0.0075 kg.m <sup>2</sup>            |
| Coefficient de frottement visqueux $f$ : 0 N             |
| <b>Paramètres du filtre</b>                              |
| Résistance du filtre $R_f$ : 3 Ohm                       |
| Inductance du filtre $L_f$ : 0.001H                      |
| <b>Paramètres du bus continu</b>                         |
| Valeur de la capacité $c$ : 1 mF                         |

## **Résumé :**

Dans ce mémoire nous avons présenté la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil comme étant une solution originale dans les applications de génération de l'énergie électrique, notamment l'énergie éolienne.

Ce type de machine peut fonctionner dans un mode peu particulier dans les deux quadrants (en moteur ou en génératrice), de plus cette dernière (GAS) pilotée par le stator par des convertisseurs contrôlés en MLI et reliés au réseau via un bus continu, un filtre et un transformateur.

On a principalement décrit la commande par puissance de la GAS, le contrôle de la liaison au réseau avec la régulation du bus continu. Ce dernier est relié au réseau alternatif via un second convertisseur MLI qui permet de contrôler les échanges de puissance active et réactive avec le réseau.

Plusieurs essais de simulation sous simulink/matlab sont effectués en vue de mettre en évidence les performances du système de commande.

## **Mots clés :**

Turbine, Machine asynchrone à cage d'écureuil, Convertisseur AC/DC et DC/AC, Commande puissance, Commande MLI, Vitesse variable.

## **Abstract :**

In this memory we presented the three-phase asynchronous machine at squirrel-cage as being an original solution in the applications of generation of the electric power, in particular the wind power.

This type of machine can function in a not very particular mode in the two quadrants (out of engine or generator), moreover the latter (GAS) controlled by the stator, converters controlled in MLI and connected to the network via a continuous bus, a filter and a transformer.

One mainly described the operation by power of the GAS, the control of the connection to the network with the regulation of the continuous bus. This last is connected to the alternative network via a second converter MLI which makes it possible to control exchanges of active and reactive power with the network.

Several tests of simulation under simulink/matlab are carried out in order to highlight the performances of the control device.