

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



**Faculté de Technologie**  
**Département de Génie Electrique**

# MEMOIRE DE FIN DE CYCLE

En vue de l'obtention du diplôme de master en électrotechnique

Option : Energies Renouvelables en Electrotechnique

**Thème :**

## **Gestion de l'Energie Eolienne en Fonctionnement Autonome à base d'une GADA**

**Présente par :**

**MEBARKI WALID**

**SADAOUI SONIA**

**Encadré par :**

**DR.R.BABOURI**

**Année universitaire : 2019/2020**



# *Remerciement*

*Avant tout nous remercions le tout puissant, de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience, et la santé durant toutes ces années et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.*

*Nous tenons à exprimer nos remerciements et notre gratitude à monsieur et mon professeur R.BABOURI, pour avoir assumé la responsabilité de nous encadrer, nous orienter et de nous conseiller tout au long de la réalisation de ce travail.*

*Nous remercions vivement tous les enseignants et tous ceux à qui nous devons notre formation. Sans oublier de remercier les jurys pour leurs évaluations*

*Des remerciements vont également à tous ceux qui, d'une quelconque façon, ont contribué à l'élaboration de ce modeste travail.*

---



# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à*

*Mon très cher père pour son soutien morale, et pour les sentiments  
d'affection et d'amour qui représentent pour moi le pilier de tous  
mes efforts*

*Ma très chère mère qui a été toujours à mes côtés, qu'elle sache  
que l'amour qu'elle me donne continue à m'animer et me permet  
d'envisager l'avenir comme un défi*

*Mes sœurs Lydia et Bouchra et mon frère Hakim*

*Mes grands parents qui ont été toujours là pour moi*

*« Que dieu vous garde tous pour moi, longue vie à vous »*

*Mes tantes et mes oncles*

*Tous mes cousins cousines*

*Tous mes amis*

*Mon binôme « WALID »*

*SONIA*



# *Dédicaces*

*Je dédie cet humble travail à ma chère mère source du bonheur,  
symbole de la tendresse qui ma toujours soutenue et qui a contribué  
efficacement à ma réussite*

*À mon cher père, celui qui a combattu toute sa vie pour procurer  
tout ce dont j'avais besoin*

*« Que dieu vous gardes et vous accordes longue vie »*

*À tous mes frères et ma sœur ainsi que mes neveux et ma nièce*

*À toute ma famille et mes amis*

*À ma binôme « SONIA »*

*WALID*



# Sommaire

# ***SOMMAIRE***

## ***LISTE DES FIGURES***

## ***NOMENCLATURE***

## ***INTRODUCTION GENERALE..... 1***

### **CHAPITRE I: GENERALITES SUR LE SYSTEME EOLIEN**

#### **I.1. INTRODUCTION..... 3**

#### **I.2. ENERGIE EOLIENNE ET SON PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT ..... 3**

#### **I.3. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE EOLIENNE..... 4**

##### **I.3.1. LES AVANTAGES :..... 4**

##### **I.3.2. LES INCONVENIENTS :..... 4**

#### **I.4. CONSTITUTION DES EOLIENNES..... 5**

##### **I.4.1. LE MAT ..... 5**

##### **I.4.2. LE ROTOR ..... 6**

##### **I.4.3. LA NACELLE ..... 6**

#### **I.5. LES TYPES D'EOLIENNES ..... 7**

##### **I.5.1. AEROGENERATEUR A AXE VERTICALE : ..... 7**

##### **I.5.2. AEROGENERATEUR A AXE HORIZONTALE : ..... 7**

#### **I.6. MODE DE FONCTIONNEMENT DES EOLIENNES..... 8**

##### **I.6.1. FONCTIONNEMENT A VITESSE FIXE ..... 8**

##### **I.6.2. FONCTIONNEMENT A VITESSE VARIABLE ..... 9**

<b>I.7. DIFFERENTES STRUCTURES DES SYSTEMES UTILISANT LES EOLIENNES .....</b>	<b>9</b>
<b>I.8. DIFFERENTES STRUCTURES DE LA MADA.....</b>	<b>12</b>
I.8.1. STRUCTURE KRAMMER .....	12
I.8.2. STRUCTURE A ENERGIE ROTORIQUE DISSIPEE .....	13
I.8.3. STRUCTURE « SHERBIUS » AVEC CYCLO-CONVERTISSEUR.....	14
I.8.4. STRUCTURE SHERBIUS AVEC CONVERTISSEUR MLI .....	14
<b>I.9. STRUCTURE DE LA MADA A DEUX CONVERTISSEURS.....</b>	<b>15</b>
<b>I.10. CONCLUSION.....</b>	<b>16</b>
 <b>CHAPITRE II: MODELISATION DES DIFFERENTES PARTIES DU SYSTEME</b>	
<b>II.1. INTRODUCTION.....</b>	<b>17</b>
<b>II.2. MODELISATION DU SYSTEME EOLIEN .....</b>	<b>17</b>
II.2.1. PARTIE MECANIQUE .....	17
II.2.1.1. Modélisation du vent :.....	17
II.2.1.2. Modélisation de la turbine :.....	18
II.2.1.3. Modélisation du multiplicateur de vitesse :.....	19
II.2.1.4. Modèle d'arbre de transmission :.....	20
<b>II.3. ZONES DE FONCTIONNEMENT D'UNE EOLIENNE : .....</b>	<b>21</b>
<b>II.4. TECHNIQUE D'EXTRACTION DU MAXIMUM DE LA PUISSANCE.....</b>	<b>22</b>
II.4.1. MAXIMISATION DE LA PUISSANCE SANS ASSERVISSEMENT DE LA VITESSE .....	23
<b>II.5. MODELISATION DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION.....</b>	<b>25</b>
II.5.1. HYPOTHESE SIMPLIFICATRICE .....	26

II.5.2. MODELE MATHEMATIQUE DE LA GADA DANS LE REPERE (ABC) .....	26
II.5.3. MODELE DE LA GADA DANS LE PLAN (D,Q) .....	30
II.5.4. APPLICATION DE LA TRANSFORMATION DE PARK À LA GADA .....	32
<b>II.6. MODELISATION DU CONVERTISSEUR D'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE .....</b>	<b>37</b>
II.6.1. MODELE ONDULEUR MLI : .....	37
II.6.2. Régulation de la tension du bus continu :.....	39
II.6.3. MODELE DU REDRESSEUR MLI:.....	40
<b>II.7. MODELISATION DE LA CHARGE L-R.....</b>	<b>41</b>
<b>II.8. MODELISATION DE SYSTEME DE STOCKAGE.....</b>	<b>41</b>
II.8.1. BATTERIE :.....	41
II.8.2. L'ETAT DE CHARGE : .....	42
<b>II.9. CONCLUSION.....</b>	<b>42</b>
<b>CHAPITRE III: COMMANDE ET GESTION DU SYSTEME GLOBALE</b>	
<b>III.1. INTRODUCTION.....</b>	<b>43</b>
<b>III.2. MODELE MADA AVEC COMMANDE VECTORIELLE .....</b>	<b>44</b>
III.2.1. LA COMMANDE VECTORIELLE :.....	44
III.2.2. MODELE DE LA GADA A FLUX STATORIQUE ORIENTE :.....	44
<b>III.3. SYNTHESE DU REGULATEUR PI CLASSIQUE.....</b>	<b>47</b>
<b>III.4. GESTION D'ENERGIE EOLIENNE.....</b>	<b>48</b>
III.5. LES MODES DE FONCTIONNEMENTS D'ORGANIGRAMME.....	50
<b>III.6. LES RESULTATS DE SIMULATION :.....</b>	<b>50</b>



**III.7. INTERPRETATION DES RESULTATS ..... 57**

**III.8. CONCLUSION..... 59**

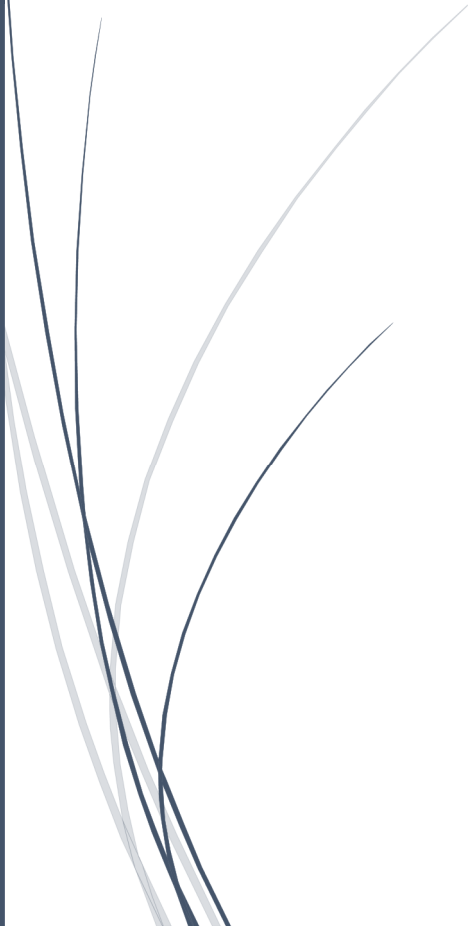
**CONCLUSION GENERALE ..... 60**

***ANNEXE***

***BIBLIOGRAPHIE***



# Liste des figures



## ***LISTE DES FIGURES***

### **CHAPITRE I**

<b>Figure I.1:</b> Conversion de l'énergie cinétique du vent .....	4
<b>Figure I.2:</b> Constitutions d'une éolienne .....	5
<b>Figure I.3:</b> Eolienne à axe verticale: turbine Savonius, turbine Darrieus, et turbine type H .....	7
<b>Figure I.4:</b> Eoliennes à axe horizontale .....	8
<b>Figure I.5:</b> Les configurations des éoliennes à axe horizontales .....	8
<b>Figure I.6:</b> Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'un ensemble Redresseur-Onduleur .....	10
<b>Figure I.7:</b> Schéma développé d'un rotor à cage classique et d'un rotor d'une machine asynchrone à double alimentation type « Brushless » .....	10
<b>Figure I.8:</b> Machine asynchrone Brushless connectée au réseau .....	11
<b>Figure I.9:</b> Configuration d'une machine asynchrone à rotor bobiné .....	12
<b>Figure I.10:</b> La structure Kramer d'une MADA .....	13
<b>Figure I.11:</b> MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipé .....	13
<b>Figure I.12:</b> Structure Sherbius avec cyclo-convertisseur .....	14
<b>Figure I.13:</b> Structure de Sherbius avec convertisseur MLI .....	15
<b>Figure I.14:</b> Configuration retenue pour l'étude .....	16

### **CHAPITRE II**

<b>Figure II.1:</b> Schéma de la turbine éolienne .....	18
<b>Figure II.2:</b> Le coefficient de puissance $C_p$ en fonction du rapport $\lambda$ .....	19

<b>Figure II.3:</b> Schéma bloc de la turbine éolienne .....	21
<b>Figure II.4:</b> Les zones de fonctionnement MPPT .....	22
<b>Figure II.5:</b> Représentation schématique de la GADA .....	25
<b>Figure II.6:</b> Modèle de Park à la GADA .....	30
<b>Figure II.7:</b> Représentation de la machine dans le repère diphasé .....	31
<b>Figure II.8:</b> Schéma électrique d'un onduleur .....	37
<b>Figure II.9:</b> Schéma équivalent de la batterie .....	41
 <b><u>CHAPITRE III</u></b>	
<b>Figure III.1:</b> Schéma du système globale.....	43
<b>Figure III.2:</b> Organigramme fonctionnelle .....	49
<b>Figure III.3:</b> Allure de la vitesse d vent .....	51
<b>Figure III.4:</b> Allure de la puissance de vent.....	51
<b>Figure III.5:</b> Allure de la vitesse de rotation de la GADA.....	51
<b>Figure III.6:</b> Allures des pulsations statorique et rotorique .....	52
<b>Figure III.7:</b> Allures des couples electromagnétiques .....	52
<b>Figure III.8:</b> Allure de la puissance statorique de la GADA .....	52
<b>Figure III.9:</b> Allure de la puissance rotorique de la GADA.....	53
<b>Figure III.10:</b> Allure de la puissance généré par l'éolienne .....	53
<b>Figure III.11:</b> Allure de la tension du bus continue.....	54
<b>Figure III.12:</b> Allure du courant redressé.....	54
<b>Figure III.13:</b> Allure de la puissance demandé par la charge .....	55
<b>Figure III.14:</b> Allure de la puissance des batteries .....	55
<b>Figure III.15:</b> Allure du courant des batteries.....	55
<b>Figure III.16:</b> Allure de la tension des batteries .....	56

---

<b>Figure III.17:</b> Allure d'état de charge des batteries .....	56
<b>Figure III.18:</b> Allures des puissances $P_{eol}$ , $P_{ch}$ , $P_{bat}$ .....	57



# Nomenclature

## *Nomenclature*

$V_v$  : vitesse moyenne du vent en (m/s)

$\Omega_t$  : vitesse de rotation de la turbine (rad/s)

$G$  : Le gain du multiplicateur

$P_v$  : La puissance de vent (w)

$S$  : La surface de la turbine ( $m^2$ )

$\rho$  : La masse volumique de l'air

$P_m$  : La puissance mécanique

$C_p$  : Le coefficient de puissance

$\beta$  : Angle d'orientation des pales (Degré°)

$\lambda$  : Rapport de vitesse en bout des pales

$R_t$  : Rayon de la turbine (m)

$C_g$  : Couple du multiplicateur (N.m)

$C_{aero}$  : Couple aérodynamique

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

$J_{turbine}$  : Inertie de la turbine éolienne ( $Kg/m^2$ )

$J_g$  : Inertie du rotor de la génératrice

$J$  : Inertie totale de l'arbre de transmission comprenant l'inertie de la génératrice et de la turbine ( $kg/m^2$ )

$\Omega_{mec}$  : La vitesse mécanique de la génératrice (Rad/s)

$C_{mec}$  : Le couple mécanique sur l'axe rapide de la turbine (N.m)

$C_{em}$  : Le couple électromagnétique (N.m)

$C_{vis}$  : Le couple des frottements visqueux

$f$  : Le coefficient de frottement dynamique ( $Kg/m^2.s$ )

## Nomenclature

$V_n$  : La vitesse nominale du vent

$V_{max}$  : La vitesse maximale du vent

$C_{em\_ref}$  : Le couple électromagnétique de référence (N.m)

$C_{aero\_estimé}$  : Le couple aérodynamique estimé (N.m)

$\Omega_{turbine\_estimé}$  : La vitesse estimée de la turbine (Rad/s)

$V_{estimé}$  : La vitesse du vent estimé de la turbine (m/s)

$C_{pmax}$  : Coefficient correspond à l'extraction de puissance maximale

$f.m.m$  : La force magnétomotrice

$V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$  : Les tensions des phases statorique

$V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}$  : Les tensions des phases rotorique

$\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}$  : Flux totaux à travers les bobines statoriques

$\Phi_{ra}, \Phi_{rb}, \Phi_{rc}$  : Flux totaux à travers les bobines rotorique

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

$i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}$  : Les courants des phases rotorique

$R_s$  : La résistance statorique

$R_r$  : La résistance rotorique

$[V_{sabc}], [V_{rabc}]$  : Vecteur tension statorique et rotorique dans le repère (abc)

$[i_{sabc}], [i_{rabc}]$  : Vecteur courant statorique et rotorique dans le repère (abc)

$[\Phi_{sabc}], [\Phi_{rabc}]$  : Vecteur flux statorique et rotorique dans le repère (abc)

$[M_{sr}]$  : La matrice de l'inductance mutuelle entre les phases statorique et rotorique

$M$  : L'inductance mutuelle maximale

$M_s, M_r$  : L'inductance mutuelle statorique et rotorique

$L_s, L_r$  : Les inductances propres d'une phase statorique et rotorique

$V_s$  : La tension statorique

$C_r$  : Le couple résistant (N.m)



## Nomenclature

$[X_{dq}]$  : Vecteur des grandeurs dans le repère (dq)

$[X_{abc}]$  : Vecteur des grandeurs dans le repère (abc)

$P(\theta)$  : La transformation de Park

$\theta_s$  : Angle de transformation de Park des grandeurs statoriques

$\theta_r$  : Angle de transformation de Park des grandeurs rotoriques

$V_d, V_q$  : Tensions dans le repère (dq)

$\omega_s, \omega_r$  : Les pulsations statorique et rotorique

$V_{qr}, V_{ds}, V_{qs}, V_{dr}$  : Les tensions statorique et rotorique dans le repère (dq)

$i_{sq}, i_{rq}, i_{sd}, i_{rd}$  : Les courants statorique et rotorique dans le repère (dq)

$V_{tsd}, V_{tsq}, V_{trd}, V_{trq}$  : Les tensions intermédiaires

$P1d, P1q, P2d, P2q$  : Les termes de couplages

$T_s, T_r$  : Constante électrique statorique et rotorique

$\sigma$  : Coefficient de dispersion

$p$  : Nombre de paire de pole

$V_{dc}$  : Tension du bus continue

$i_c$  : Courant redressé

$i_{ond}$  : Courant de charge

$T_i, T_i'$  : Composant électronique

$S_a, S_b, S_c$  : Fonction logique correspondant a l'état de l'interrupteur

$U_0$  : Tension initiale du condensateur

$V_{bat}$  : Tension de la batterie

$E_{bat}$  : Force électromotrice de la batterie

$R_{bat}$  : La résistance de la batterie

$i_{bat}$  : Le courant de la batterie

$EDC$  : État de charge de la batterie

## Nomenclature

$Q_m$  : La quantité de charge manquante de la batterie

$C_{bat}$  : Capacité de la batterie

$i_{qs}^*, i_{qr}^*, i_{rd}^*, i_{sd}^*$  : Courants statorique et rotorique de référence

$C_{em}^*$  : Couple électromagnétique de référence

$P_s, P_r$  : Puissances active statorique et rotorique

$Q_s, Q_r$  : Puissance réactive statorique et rotorique

$K_i, K_p$  : Coefficient de proportionnalité et d'intégration

$P_{eol}$  : Puissance générée par l'éolienne

$P_{ch}$  : Puissance de charge

$P_{bat}$  : Puissance de la batterie

$P_{surp}$  : Puissance surplus

$EDC_{min}, EDC_{max}$  : État de charge minimale et maximale

### **Abréviation**

**MADA** : Machine Asynchrone a Double alimentation

**GADA** : Génératrice Asynchrone a Double Alimentation

**MLI** : *Modulation à Largeur d'Impulsions.*

**PI** : *Action Proportionnelle et Intégrale.*

**FTBO** : *La fonction de transfert en boucle ouverte.*

**FTBF** : *La fonction de transfert en boucle fermée.*

**MPPT** : *Maximum Power Point Tracking*



# Introduction Générale

### ***Introduction générale***

L'électricité est une énergie vitale pour le développement de toutes les sociétés. Son impact positif et direct dans le domaine socio-économique dans la vie quotidienne des populations l'a rendu plus qu'indispensable, notamment dans les pays développés où on ne peut se passer de cette forme d'énergie. L'ampleur d'industrialisation de ces dernières décennies, la multiplication d'équipements électriques domestiques ont considérablement élevé la consommation au point où elle est devenue très importante.

Face à ce rythme de consommation d'électricité provenant des énergies fossiles telles que le pétrole, gaz, charbon et les centrales nucléaires, plusieurs pays se sont tournés vers les énergies renouvelables. D'où l'énergie éolienne est identifiée comme l'une des plus prometteuses.

Le système éolien, est considéré parmi les plus anciens, l'énergie qu'il produit est issue de la force exercée par le vent sur les pales d'une hélice montée sur un arbre rotatif, lui-même relié soit à des systèmes mécaniques qui servent à moudre le grain ou à pomper l'eau, soit à un aérogénérateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.

Dans la plupart des régions isolées et ventées, l'énergie éolienne constitue la principale source potentielle d'énergie électrique. La baisse continue des prix des aérogénérateurs et les développements technologiques se rapportant à l'électronique de puissance, ajouté à cela les incitations des différents services environnementales, ont intensifié l'utilisation d'éolienne autonome. La variabilité et les fluctuations des ressources (vent) ainsi que les fluctuations de charge engendrées selon les périodes annuelles ou journalières, qui ne sont pas forcément corrélées avec les ressources, empêchent l'exploitation plus large.

Notre projet, a pour objectif d'étudier une génératrice à double alimentation totalement interfacée et de gérer l'énergie produite par un système éolien à base de cette génératrice, alimentant des batteries de stockage ainsi qu'une charge électrique, la réalisation de ce mémoire était organisée en trois chapitres principaux.

Le premier chapitre consistera à éclaircir le principe de la conversion éolienne en général, sa constitution, son fonctionnement et ses différentes structures en se basant sur la MADA.

Le deuxième chapitre sera basé sur le modèle de la turbine éolienne et celui de la machine asynchrone à double alimentation tout en ajoutant les modèles des convertisseurs d'électronique de puissance reliés à la génératrice, et avec le stockage qui alimente ce système.

Le dernier chapitre doit contenir la commande de la génératrice à double alimentation et le module de gestion d'énergie éolien, suivi de résultats explicatifs de l'étude du système globale.

Enfin, nous présenterons une conclusion générale en résumant les principales conclusions de cette étude et nous proposerons aussi quelques perspectives.



# Chapitre I

Généralités sur le système éolien

## **I.1. Introduction**

L'industrialisation mondiale, a engendré une forte croissance du besoin d'électricité. Cette énergie est généralement issue des fossiles (épuisables) ou du nucléaire (dangereux). Pour cela, la plupart des pays industrialisés ont commencé à se basculer vers d'autres sources renouvelables pour produire de l'énergie électrique à base de système entraîné en rotation par d'importantes masses d'air appelé éolienne. Ces éoliennes transforment l'énergie cinétique du vent en énergie électrique ou en d'autres formes d'énergies.

Dans ce chapitre nous s'intéresserons essentiellement à présenter des généralités sur le système, des différents types d'éoliennes et les différentes chaines utilisées dans la conversion de l'énergie éolienne.

## **I.2. Energie éolienne et son principe de fonctionnement**

L'énergie éolienne est une énergie intermittente qui correspond à des flux naturels qui provient du déplacement des masses d'airs dues indirectement à l'ensoleillement sur la terre. Plus spécifiquement l'énergie est tirée des masses d'airs qui sont en perpétuel déplacement. Elles sont produites par le phénomène de différence de pression crée par le phénomène de réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres.

A l'aide d'un dispositif appelé éolienne ou moulin à vent qui sert à convertir l'énergie du vent de son caractère cinétique en caractère mécanique qui est assuré par un arbre de transmission, puis de son caractère mécanique en électrique en accouplant un générateur électrique ou un dynamo, ce qui donne lieu à un courant alternatif transformé par des convertisseurs statiques (courant continue obtenue par un redresseur, et courant alternatif grâce à un onduleur), qui alimente soit des batteries ou relié directement au réseau, on le nomme alors aérogénérateur.

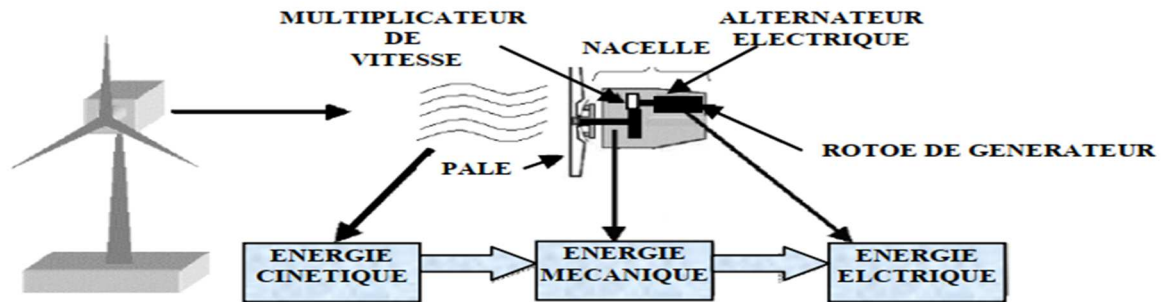


Figure I.1: Conversion de l'énergie cinétique du vent [8]

### I.3. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

#### I.3.1. Les avantages :

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, propre, inépuisable, fiable, non dégradée, qui ne produit aucun rejet atmosphérique ou radioactif, par conséquent elle n'est pas dangereuse contrairement à l'énergie nucléaire.
- C'est une énergie moins chère par rapport aux autres énergies renouvelables.
- L'industrie éolienne présente un potentiel important en termes d'emploi et au niveau de la fabrication et de l'installation.
- Elle relève une excellente ressource d'appoint pour d'autres énergies notamment dans les pics de consommation en hiver.
- C'est un dispositif qui peut être facilement arrêté pour des opérations de maintenance ou lors de baisse de demande énergétique.
- Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> [6].

#### I.3.2. Les inconvénients :

- Le vent est une source renouvelable variable donc la production de l'énergie est aussi variable.
- La qualité de puissance électrique : la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante raison pour laquelle elle n'est pas considérée très bonne. A l'heure actuelle le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau demeure limité aux systèmes hybrides.



- Le bruit : la source essentielle du bruit dans les éoliennes provient du multiplicateur, mais ce dernier commence à disparaître après l'apparition des éoliennes à attaque directe [1].
- L'impact des oiseaux : certaines études montrent que les oiseaux évitent les aérogénérateurs. D'autres ont montré que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux afin qu'ils ne se fassent pas attraper par les aéroturbines [31].

#### I.4. Constitution des éoliennes

L'éolienne classique est constituée de trois éléments principaux mécaniques et électriques qui sont :

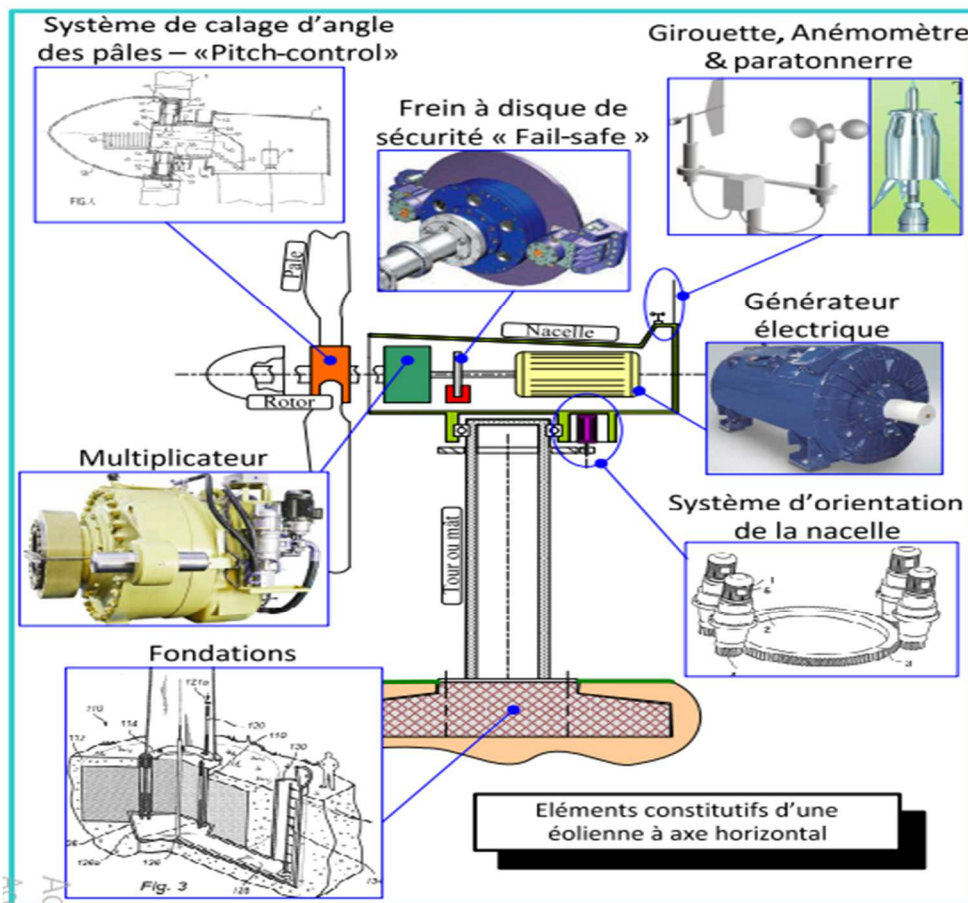


Figure I.2: Constitutions d'une éolienne [4]

**I.4.1. Le mat :** est un tube d'acier ou un treillis métallique qui renferme les câbles assurant la liaison électrique et l'accès à la nacelle par l'intermédiaire d'une échelle intégrée. Son rôle principal est de supporter l'ensemble rotor+nacelle pour placer le rotor à une hauteur élevée

suffisamment, car plus le mat est élevé en hauteur plus la vitesse du vent est grande d'où la puissance captée augmente. Mais cela s'accompagne également de l'accroissement du coût de la quantité de matière mise en œuvre [1].

Il est fixé sur une fondation au sol et pour faire face à la force du vent il doit être formé du béton qui assure les maintiens d'éolienne.

La hauteur du mat peut atteindre 10m et 80m, ceci dépend du type d'éolienne et du site d'implantation [1].

**I.4.2. Le rotor :** représente la partie mobile du système. Il transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Il se compose d'un moyeu qui supporte des pales au bout de l'éolienne et se monte sur l'arbre lent (primaire du multiplicateur). Le nombre de pale varie généralement de 1 à 3. Plus ce nombre est élevé plus le couple transmis à l'arbre du rotor est grand. Ils sont aussi munis d'un système d'orientation des pales pour réguler la vitesse de rotation prise du vent en agissant sur les rotors à vitesse fixe permettant à la génératrice de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositifs électroniques de puissance cela le rend simplifiée et moins coûteux, quant aux rotors à vitesse variable la réduction du coût pourrait être apporté par la possibilité de suppression du système d'orientation des pales [2][3].

**I.4.3. La nacelle :** c'est le cœur de l'éolienne, elle regroupe tous les éléments de transmission mécanique et pneumatique entre le rotor éolien et le générateur électrique qui est souvent une machine synchrone ou asynchrone sous leurs diverses variantes. Celle-ci comporte le multiplicateur de vitesse, l'arbre primaire et l'arbre secondaire.

Les systèmes d'orientation de la nacelle emploient les capteurs de vent ou sont utilisés généralement girouette, anémomètre et d'autres systèmes électroniques qui servent à contrôler le mécanisme d'orientation et le fonctionnement général.

Les convertisseurs électroniques de puissance sont utilisés par les éoliennes qui sont souvent connectées soit au réseau ou en fonctionnement autonome dont le refroidissement est assuré soit par air ou par eau [4] [5][6].

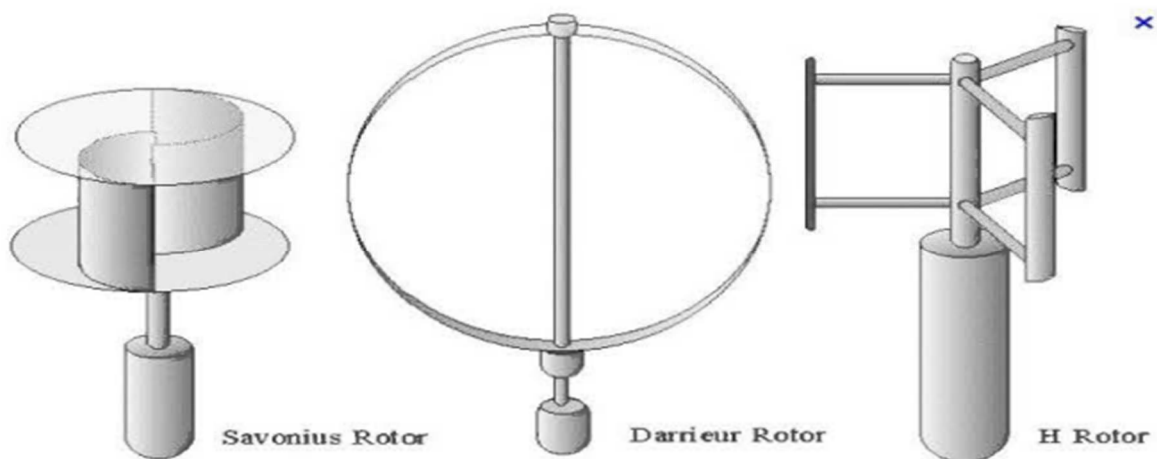
## I.5. Les types d'éoliennes

Les éoliennes sont classées en deux types principaux qui diffèrent selon l'orientation de leurs axes.

### I.5.1. Aérogénérateur à axe verticale :

Aujourd'hui, ce type est assez mal connu et très peu utilisé que celle à axe horizontal, car la difficulté du guidage mécanique le rend moins performant.

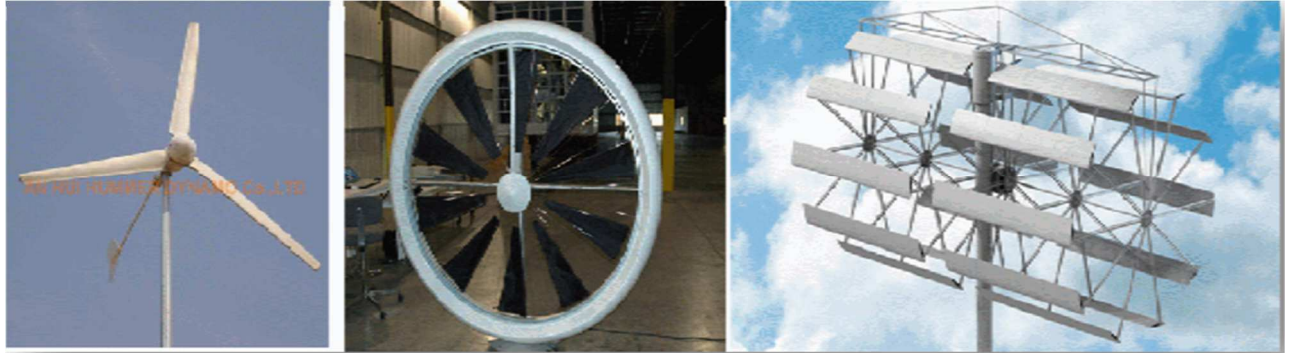
Il existe trois technologies VAWT différentes : les turbines Savonius, les turbine Darrieus, et les turbines à pale droite (Type H) dont la partie mécanique se trouve près du sol pour que les opérations de maintenance deviennent plus faciles, mais cela impose que l'éolienne fonctionne avec le vent proche du sol, moins qu'en hauteur ce qui réduit significativement l'efficacité de ces machines. De plus elles peuvent avoir un intérêt dans certains secteurs et elles possèdent l'avantage de la non nécessité du système d'orientation des pales [7][8][9].



**Figure I.3: Eolienne à axe verticale : turbine Savonius, turbine Darrieus, et turbine type H [27]**

### I.5.2. Aérogénérateur à axe horizontale :

Les éoliennes à axe horizontale sont constituées de deux ou plusieurs pales. Actuellement les plus exploitées sont les hélices à trois pales sous forme des ailes d'avion, nécessitant un système d'orientation qui résulte un rendement plus élevé. De plus elles présentent un bon coefficient de puissance qui les rend plus rentables pour produire plus d'énergie que les éoliennes à axes verticales fonctionnant à la même vitesse du vent. La longueur des pales des éoliennes qui produisent plusieurs MW peut atteindre 60m [10].

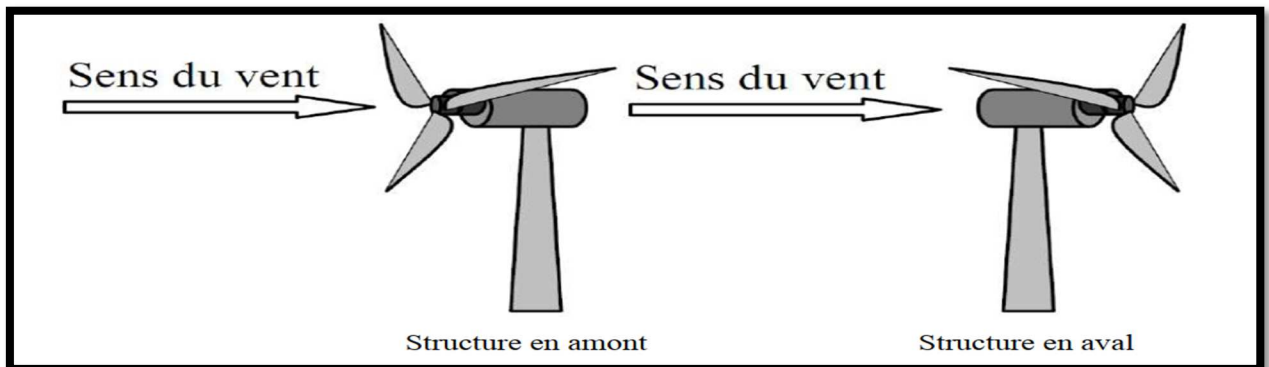


**Figure I.4: Eoliennes à axe horizontale [6]**

En revanche, il existe deux types de configuration d'éoliennes à axe horizontale :

La structure « **amont** » ou les pales sont rigides et exposées au vent, est orientée généralement par un dispositif d'orientation.

La structure « aval » qui est théoriquement auto-orientable possède des rotors plus flexibles [1].



**Figure I.5: Les configurations des éoliennes à axe horizontales [1]**

## I.6. Mode de fonctionnement des éoliennes

### I.6.1. Fonctionnement à vitesse fixe

Les générateurs tournants à vitesse fixe fonctionnent selon le glissement de la machine (appelé concept danois) qui repose sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage reliée directement au réseau. La plupart d'entre eux sont destinés à un fonctionnement moteur. Elles sont munies d'un système d'orientation des pales (Pitch control), permettant à la machine de fonctionner en générateur à une vitesse maintenue constante (au voisinage du synchronisme) et

entraînée par un multiplicateur. La puissance générée dans ce type d'éolienne, ne peut pas être réglée. De plus la connexion directe au réseau d'une génératrice asynchrone à cage nécessite l'ajout de banc de condensateur afin de limiter la puissance réactive du réseau.

### **I.6.2. Fonctionnement à vitesse variable**

D'une autre part, l'éolienne connectée au réseau fonctionnant à vitesse variable, contient une turbine, un multiplicateur, un générateur synchrone ou asynchrone, et deux convertisseurs de puissance qui permettent d'assurer le couplage au réseau.

Cette technologie a l'avantage de générer de grandes puissances comparées à celle qui travaille à vitesse fixe, de plus elles servent à augmenter le rendement énergétique et nécessitent un système d'orientation des pales pour commander la vitesse de générateur [11].

L'inconvénient que présente ce fonctionnement réside dans :

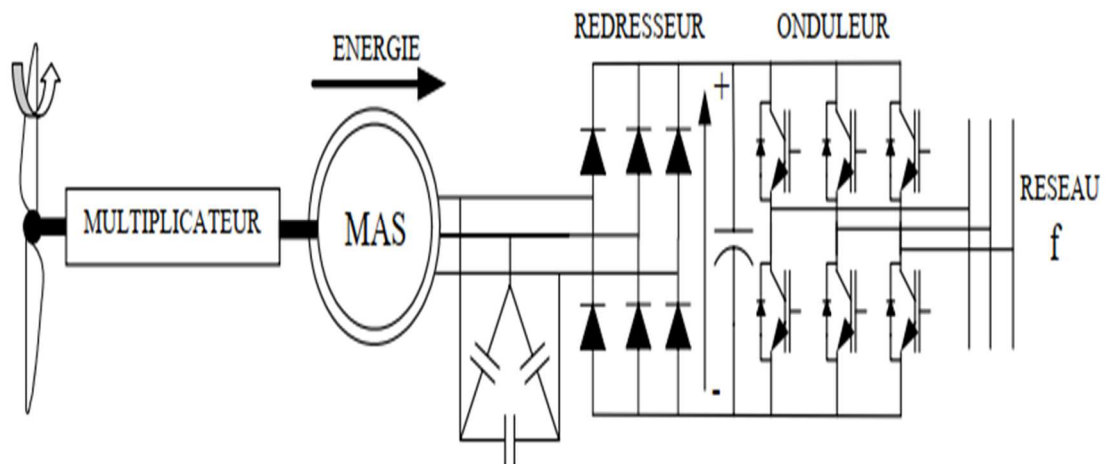
- L'utilisation de machine spéciale
- Convertisseur de puissance complexe
- Nécessité d'utiliser un convertisseur de fréquence
- Gestion de la puissance entre le redresseur à MLI, onduleur et le placement au point continue optimale de l'éolienne.

## **I.7. Différentes structures des systèmes utilisant les éoliennes**

### **I.7.1. Machine asynchrone à cage connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance (gradateur MLI onduleur) :**

Le dispositif représenté dans la figure I.6, fonctionne à vitesse variable sans limite physique théorique. Il est constitué d'une génératrice asynchrone à cage d'écureuil connectée directement au réseau par l'intermédiaire d'un redresseur et un onduleur de tension. En effet la tension produite est transformée et redressée en tension continue par le convertisseur de puissance employé. Ensuite l'onduleur délivre une tension alternative de fréquence fixe correspondant à celle du réseau avec un facteur de puissance unitaire. La puissance nominale de la génératrice détermine alors la puissance maximale que peut fournir l'éolienne. Les convertisseurs utilisés représentent un coût important, des pertes non négligeables (jusqu'à 3% de la puissance nominale) et entraînent des perturbations qui nuisent au rendement et à la qualité de l'énergie délivrée. De plus la présence de capacités est indispensable pour fournir l'énergie réactive

nécessaire à la magnétisation de la machine. Cette énergie ne peut pas être fournie par le réseau car le redresseur MLI fonctionne à base d'IGBT dont la structure est semblable à celle de l'onduleur. Dans ce cas, le transfert de puissance réactive est contrôlable et se fait de bus continue vers la machine et le transfert de puissance active est identique dans le cas du redresseur simple [2].



**Figure I.6: Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'un ensemble Redresseur-Onduleur [2]**

### I.7.2. Machine asynchrone à double alimentation type « Brushless »

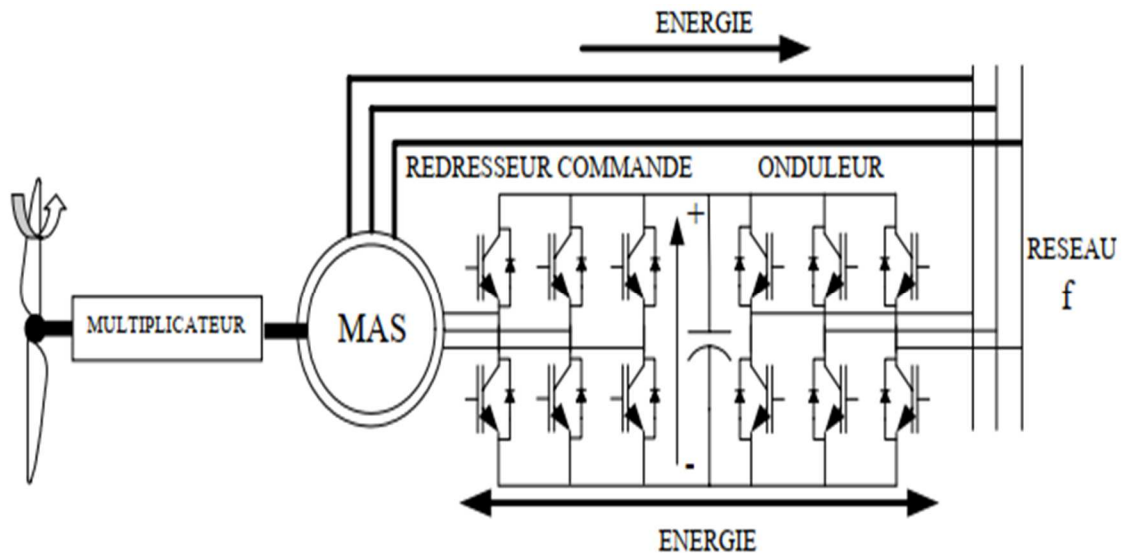
Ce type de machine contient deux bobinages au stator dont l'un est connecté directement au réseau qui sert à transférer la puissance. Quant à l'autre est formé d'une section moins élevée, permettant de commander les flux d'excitations de la machine.



**Figure I.7: Schéma développé d'un rotor à cage classique et d'un rotor d'une machine asynchrone à double alimentation type « Brushless » [2]**

Le rotor de ce dispositif est constitué de plusieurs boucles conductrices et concentriques différemment que celui dans la machine asynchrone à cage d'écureuil classique.

Dans ce cas, le convertisseur de puissance utilisée est destiné à contrôler les facteurs de puissance ainsi que le courant du rotor d'où l'optimisation du rendement [2].



**Figure I.8: Machine asynchrone Brushless connectée au réseau [1]**

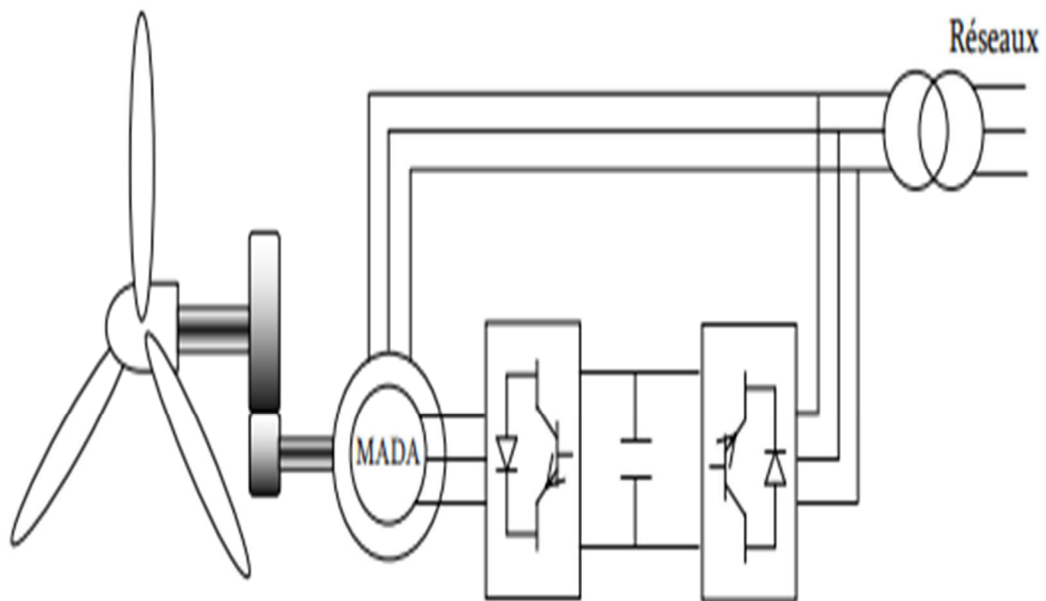
Elle a l'avantage d'être moins coûteuse grâce à l'onduleur connecté simultanément au réseau et au stator. En revanche son stator est plus volumineux et plus complexe à fabriquer. Cependant ce système devient plus attractif à cause de la diminution de rendement et l'augmentation du coût du convertisseur due au glissement qui dépasse la valeur de 30% [12].

### **I.7.3. Machine asynchrone à rotor bobiné**

La configuration basée sur les machines asynchrones, à rotor bobiné est une solution très intéressante dans les applications éoliennes à vitesse variable et présente un potentiel économique très attractif représenté par la Figure I.9.

Cette machine contient un système bague-balais triphasé contrairement à la machine asynchrone à cage d'écureuil qui engendre un surcôt dans l'utilisation des convertisseurs de puissance réduite. Malgré les conditions de maintenance recommandées (environ 1 à 2ans pour les balais et 10ans pour les bagues) ce qui donne un inconvénient à l'exploitation de ses machines dans les projets éoliens de puissance supérieures à 1MW couramment.

Son fonctionnement consiste à alimenter un circuit statorique directement dans le réseau et un second placé au rotor qui est également relié au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance, à travers la transition d'une puissance rotorique réduite, le cout des convertisseurs alors diminué en comparaison avec une éolienne à vitesse variable et alimentée au stator par les convertisseurs de puissance, ce qui en résulte une forte puissance produite par cette génératrice [13].



**Figure I.9: Configuration d'une machine asynchrone à rotor bobiné [13]**

## **I.8. Différentes structures de la MADA**

### **I.8.1. Structure Kramer**

Elle est constituée d'un ensemble redresseur-onduleur dimensionnée pour une fraction de la puissance nominale de la machine (Figure I.10). Elle permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine, c'est pour cela, le glissement est maintenu inférieur à 30%. L'utilisation de thyristor pour l'onduleur nuit au facteur de puissance, de plus le redresseur est unidirectionnel, donc le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures au synchronisme. Cette solution n'est plus utilisée au profit de la structure de Scherbius avec convertisseur à IGBT [2].



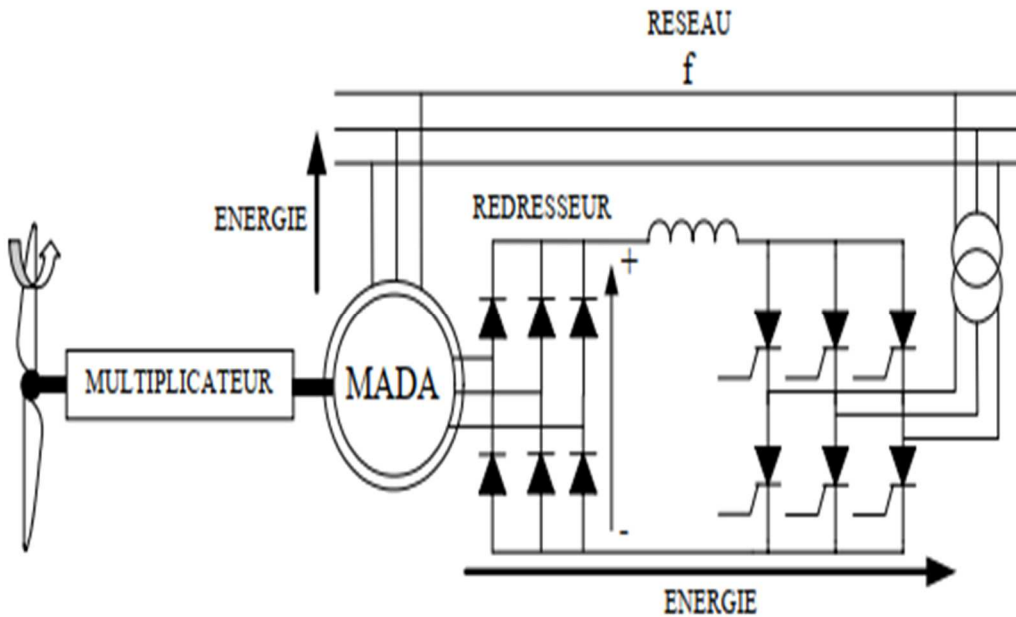


Figure I.10: La structure Kramer d'une MADA [2]

### I.8.2. Structure à énergie rotorique dissipée

Avec cette configuration (Figure I.11), la machine fonctionne à vitesse variable, son stator connecté directement au réseau et son rotor connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO. Le contrôle d'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone [2] [24].

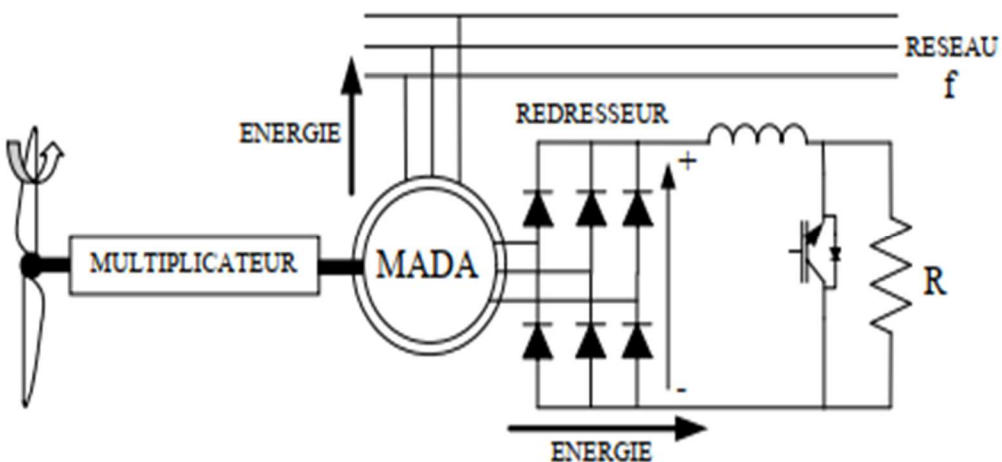


Figure I.11: MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipé [2]

### I.8.3. Structure « Sherbius » avec cyclo-convertisseur

Dans la configuration montrée à la Figure I.12, l'ensemble redresseur-onduleur est remplacé par un cyclo-convertisseur permettant d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, la plage de variation est doublée par rapport à la structure Kramer. En effet si la variation du glissement doit rester inférieure à 30% pour préserver l'efficacité du système, cette variation peut être positive (fonctionnement hypo-synchrone) ou négative (fonctionnement hyper-synchrone) [17].

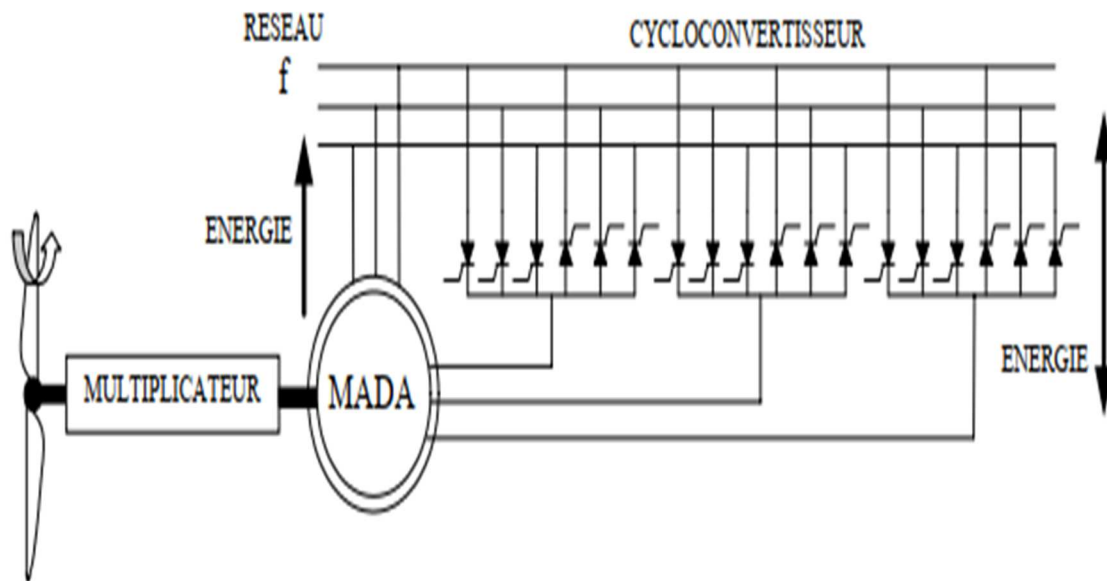


Figure I.12: structure Sherbius avec cyclo-convertisseur [2]

### I.8.4. Structure Sherbius avec convertisseur MLI

Les progrès des convertisseurs de puissance dans cette configuration (Figure I.13), permettent d'avoir des interrupteurs, qui peuvent être commandé à l'ouverture et à la fermeture comme les IGBT avec une fréquence de commutation. L'utilisation à base de ce type d'interrupteur permet le rejet des premiers harmoniques vers les fréquences élevées ce qui limite les perturbations harmoniques et facilite le filtrage [16].

La bidirectionnalité du convertisseur rotorique, permet le fonctionnement hyper-synchrone et hypo-synchrone et le contrôle du facteur de puissance coté réseau. Si le glissement reste inférieur à  $\pm 30\%$  autour du synchronisme, le convertisseur est alors dimensionné pour un tiers de la puissance nominale de la machine. De plus, le fonctionnement hyper synchrone permet de produire de l'énergie du stator vers le réseau mais également vers le réseau. La puissance

totale ainsi produite peut alors dépasser la puissance nominale de la machine et le facteur de puissance de l'ensemble peut être maintenue unitaire [17].

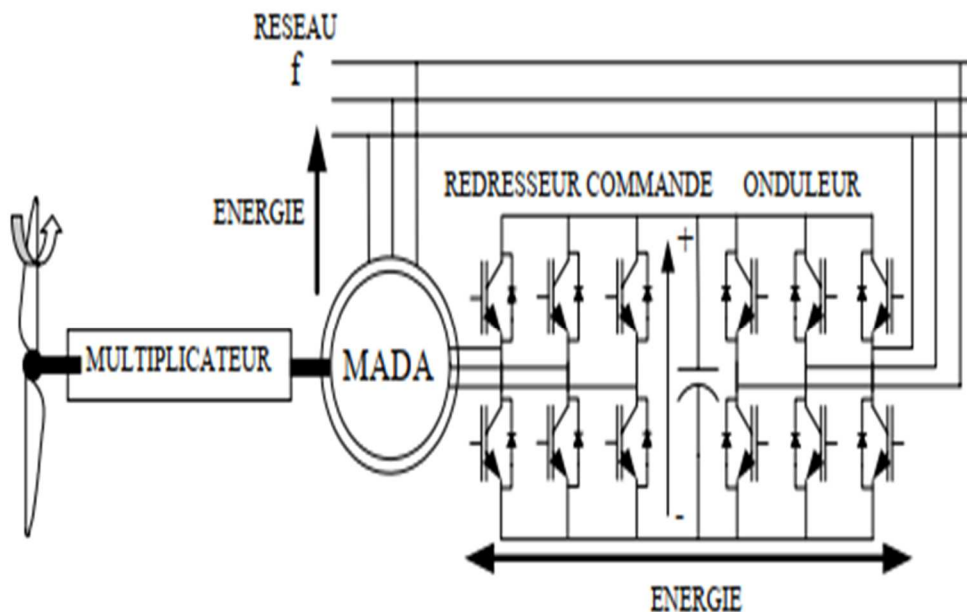


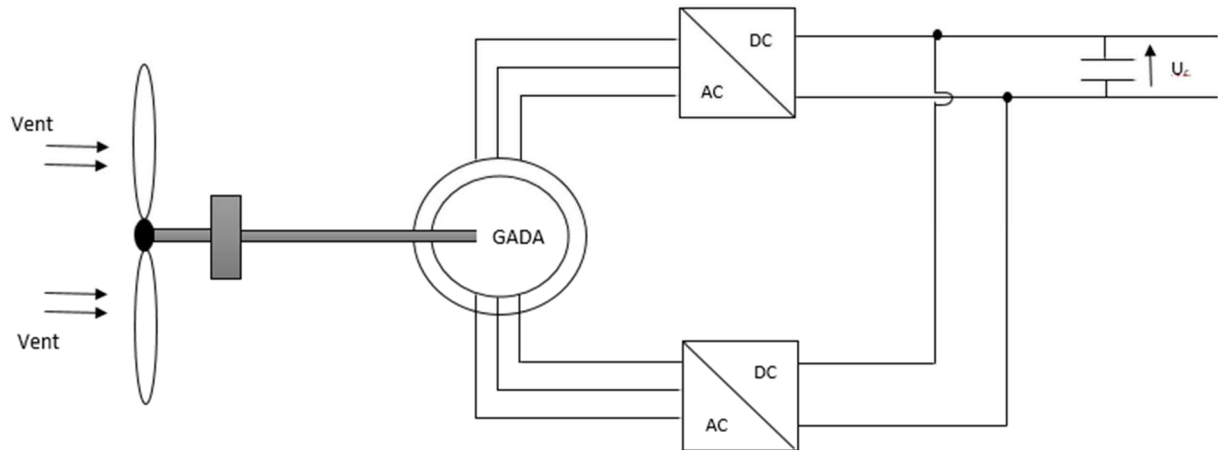
Figure I.13: structure de Sherbius avec convertisseur MLI [2]

### I.9. Structure de la MADA à deux convertisseurs

Cette configuration (Figure I.14) permet d'alimenter le rotor et le stator de la MADA chacun à un onduleur de tension, elle peut prendre deux forme :

- deux onduleurs alimentés en parallèle par un redresseur commun, ce dernier est donc une source d'alimentation commune à deux côtés.
- deux onduleurs alimenté par leurs propres redresseurs dans ce cas c'est le réseau qui est la source de couplage électrique existant entre les deux cotés [26] [27].

Cette structure possède de nombreux avantages on peut citer : le cout global de l'ensemble est moins cher malgré le nombre de convertisseurs utilisé, de plus c'est une machine pouvant assurer le fonctionnement des autres machines, et la large vitesse accessible à couple et à flux constant, ajoutant à ça elle permet d'envisager le pilotage de cette machine de manière plus globale en dédiant à la gestion de l'optimisation des échanges d'énergie au sein du système auquel la MADA est intégrée.



**Figure I.14: Configuration retenue pour l'étude**

Notre travail va se baser sur la structure de la Figure (I.14). L'énergie produite est utilisée pour alimenter une charge et un système de stockage, tout en intégrant un algorithme de gestion d'énergie.

### **I.10. Conclusion**

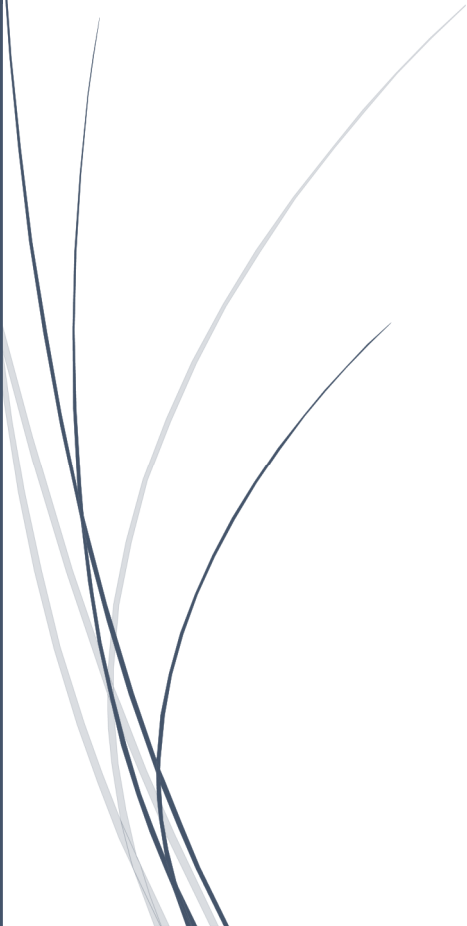
Une présentation du système de conversion d'énergie éolienne a été montrée dans ce chapitre, après avoir introduit dans la première partie un rappel des notions de la conversion mécanique d'énergie éolienne. La partie qui suit, nous a permis de mentionner quelques machines utilisées dans ce système.

En fin de ce chapitre nous avons abordé la structure de la MADA à deux convertisseurs d'électronique de puissance, en signalant l'intérêt d'utilisation de cette machine dans les éoliennes pour la production de l'énergie électrique.

A dark blue vertical bar is on the left side of the page. A blue arrow points from the bar towards the right, pointing towards the chapter title.

# Chapitre II

Modélisation des différentes  
parties du système éolien



## **II.1. Introduction**

Dans ce chapitre nous s'intéresserons à la modélisation des différents composants des éoliennes à base d'une GADA, reliée à une charge et au système de stockage contrôlé par un module de stockage.

La première partie va se baser sur un modèle mathématique simplifiant l'ensemble mécanique, de la turbine ainsi que la technique d'extraction du maximum de puissance.

Nous consacrons la deuxième partie pour modéliser la GADA par des équations mathématiques non linéaires en se basant sur la transformation de Park, ensuite nous passerons au modèle d'association de l'onduleur redresseur MLI. Enfin de ce chapitre nous présenterons le modèle de stockage associé à l'ensemble.

## **II.2. Modélisation du système éolien**

### **II.2.1. Partie mécanique**

La partie mécanique d'un système éolien, contient des pales reliées au moyeu qui est couplé à l'arbre lent, ce dernier relié à son tour au multiplicateur de vitesse pour fonctionner à un rythme plus élevé compatible avec la plage.

Un couple est généré à partir du mouvement des pales, connectées au couple de la génératrice qui définit la vitesse de rotation de l'ensemble du système. Pour le modéliser, il est nécessaire de commencer d'abords par le vent, puis la turbine suivie du multiplicateur de vitesse et les arbres de transmission [7].

#### **II.2.1.1. Modélisation du vent :**

Le vent est la source principale de l'énergie éolienne. Elle est transformée d'abords en énergie mécanique par une turbine puis en énergie électrique grâce à un générateur électrique. Sa modélisation est essentielle pour définir les conditions de fonctionnement de l'éolienne. Aussi, les effets qui s'appliquent sur les pales, nous amènent à développer la modélisation du rotor et d'évaluer le potentiel d'énergie utilisable, enfin elle fournit une aide pour l'implémentation de la machine.

La vitesse de vent peut être modélisée comme une fonction scalaire qui évolue dans le temps [28] :

$$V_v = f(t) \quad (\text{II.1})$$

### II.2.1.2. Modélisation de la turbine :

Le modèle qui sera étudiée comprend trois pales orientables de longueur R. elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse  $\Omega_{tur}$  qui est relié à un multiplicateur de gain G, ce multiplicateur entraine une génératrice électrique [15].

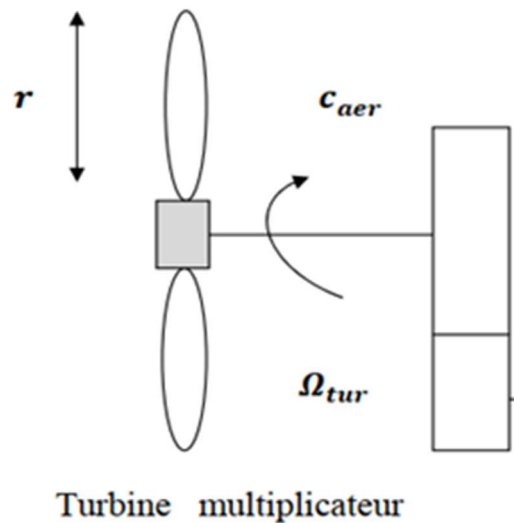


Figure II.1: schéma de la turbine éolienne

L'expression de puissance cinétique captée par les pales s'écrit :

$$P_v = \frac{1}{2} * S * \rho * V_v^3 \quad (\text{II.2})$$

$\rho$ : masse volumique de l'air

$S$  : surface circulaire balayée par la turbine

$V_v$  : vitesse de vent en m/s

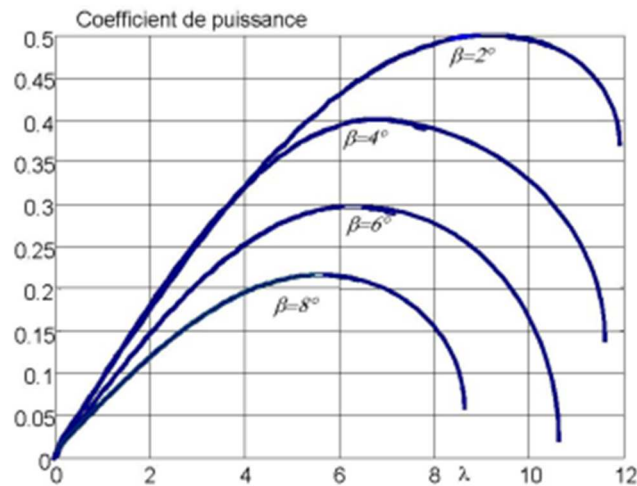
La puissance mécanique au niveau du rotor est donnée par la formule suivante :

$$P_m = P_v * C_p = \frac{1}{2} * \rho * S * V_v^3 * C_p \quad (\text{II.3})$$

Le coefficient de puissance  $C_p$  désigne le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il varie en fonction du rapport de vitesse  $\lambda$ , et de l'angle d'orientation des pales  $\beta$ . Il est approché par l'expression suivante [15] :

$$C_p = (0.5 - 0.0167) \cdot (\beta - 2) \cdot \sin\left(\frac{\pi(\lambda+0.1)}{18.5-0.3(\beta-2)}\right) - 0.00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \quad (\text{II.4})$$

La figure présente la variation de la caractéristique de  $C_p$  en fonction du rapport  $\lambda$



**Figure II.2: le coefficient de puissance  $C_p$  en fonction du rapport  $\lambda$**

$\lambda$  représente le rapport de vitesse en bout de pales, définit comme suit :

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R_t}{V_p} \quad (\text{II.5})$$

Sachant que :  $\Omega_t$  vitesse de rotation de la turbine,  $R_t$  : Rayon de la turbine éolienne,  $V$  : vitesse de vent.

Par la vitesse de rotation de la turbine, on déduit un couple aérodynamique généré au bout de l'arbre primaire qui s'exprime par [14] :

$$C_{aero} = \frac{P_m}{\Omega_t} = \frac{\pi}{2 \cdot \lambda} \cdot R^3 \cdot V^2 \cdot \rho \cdot C_p \quad (\text{II.6})$$

### II.2.1.3. Modélisation du multiplicateur de vitesse :



La modélisation du multiplicateur de vitesse permet d'adapter les couples de vitesse de l'arbre lent de la turbine et la génératrice (GADA), couplée au réseau afin, d'avoir une élasticité entre eux.

Le couple du multiplicateur est défini à partir du couple de la machine par les équations suivantes [3] :

$$C_g = \frac{1}{G} \cdot C_{aero} \quad (\text{II.7})$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (\text{II.8})$$

#### II.2.1.4. Modèle d'arbre de transmission :

Les masses des différents éléments de la turbine sont représentées par l'inertie  $J_{turbine}$ . Le modèle mécanique proposé considère l'énergie 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 [19] [15] :

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (\text{II.9})$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique  $C_{mec}$ , appliqué au rotor [19]:

$$\frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \sum C = C_{mec} \quad (\text{II.10})$$

Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique  $C_{em}$ , produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux  $C_{vis}$ , et le couple issu du multiplicateur  $C_g$  [15] :

$$C_g = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (\text{II.11})$$

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

$$C_{vis} = f\Omega_{mec} \quad (\text{II.12})$$

Le schéma bloc suivant représentant le modèle de l'ensemble de la chaîne cinématique de la turbine, sont obtenue en regroupant les éléments étudiés précédemment [21] :

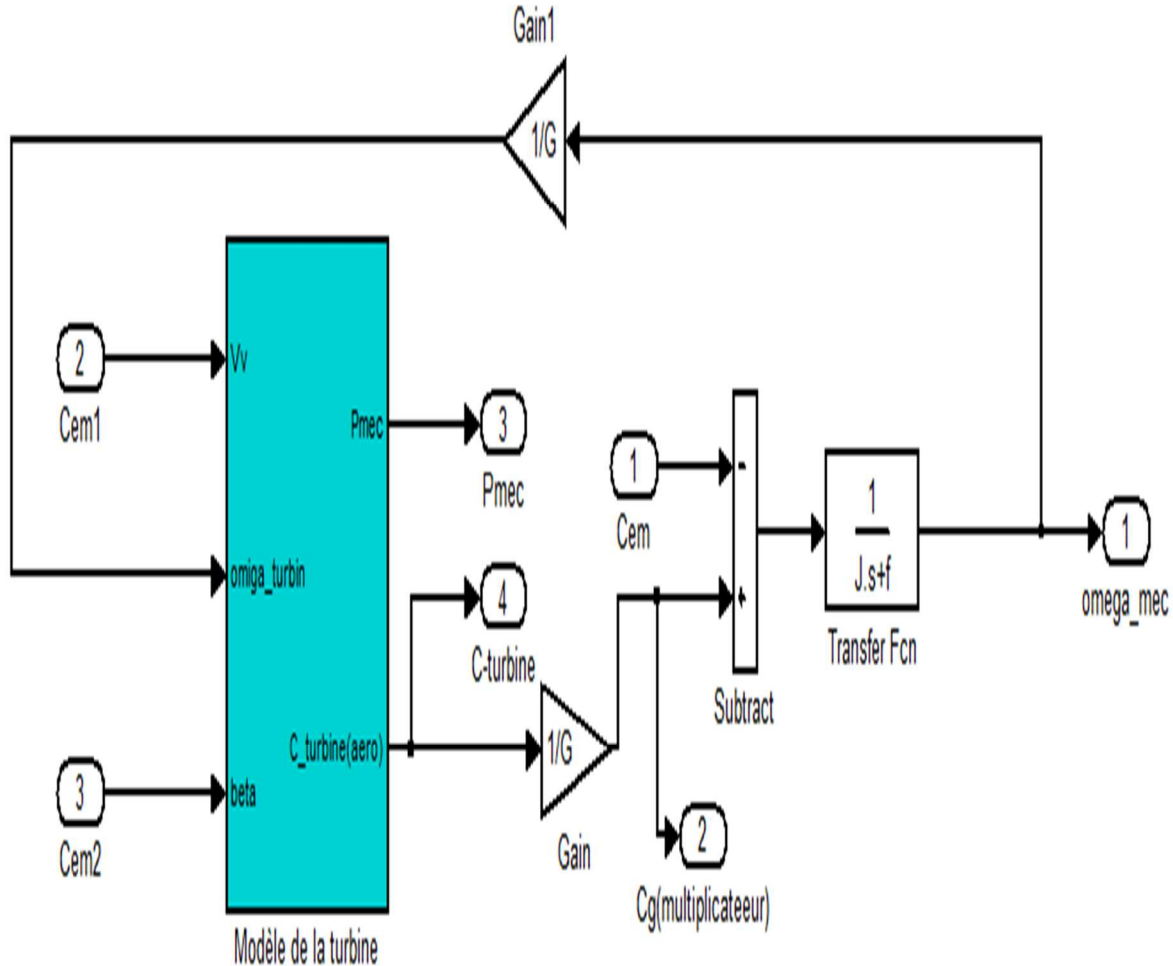
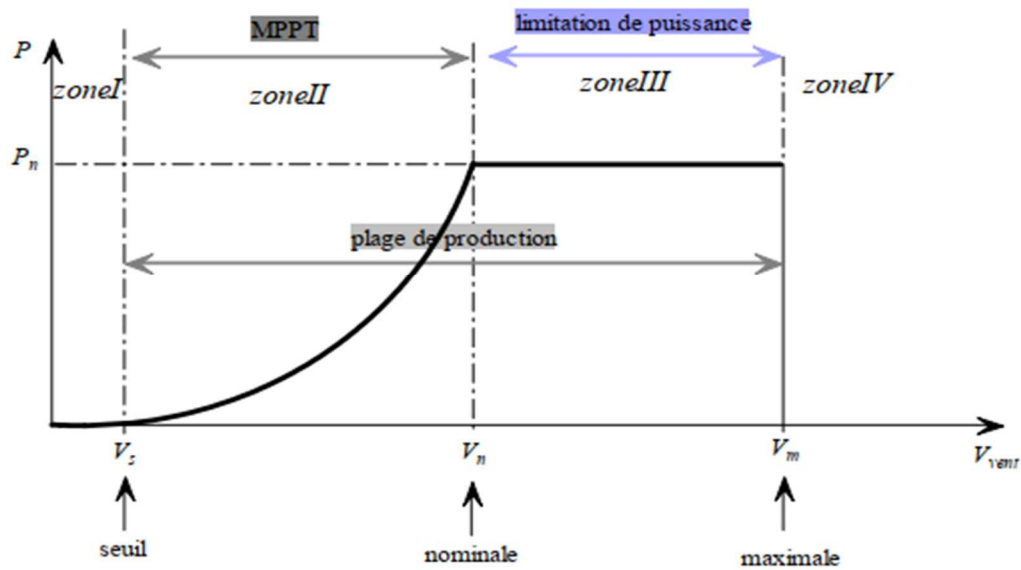


Figure II.3: schéma bloc de la turbine éolienne

### II.3. Zones de fonctionnement d'une éolienne :

La puissance maximale qui peut être produite par une éolienne, correspond à sa puissance nominale. Celle-ci est atteinte à la vitesse du vent nominale  $V_n$ . Au-dessus de  $V_n$  la puissance restera constante jusqu'à atteindre  $V_{max}$  à laquelle pour des raisons de protection des parties mécanique, l'éolienne est conçue pour s'arrêter.

La vitesse du vent la plus basse pour que l'éolienne fonctionne est appelée la vitesse du seuil  $V_s$ . Dans l'intervalle compris  $V_s$  et  $V_n$  la puissance nominale de l'éolienne varie proportionnellement avec la vitesse de vent [14]. Tout cela est illustré par la Figure II.4.



**Figure II.4: les zones de fonctionnement MPPT**

- Zone I :  $V_{vent} < V_s$ , ou  $P=0$  la turbine ne fonctionne pas (énergie capté est trop faible).
- Zone II :  $V_s < V_{vent} < V_n$ , la puissance fournie dans cette zone dépend de la vitesse de vent : production normal jusqu'à atteindre la puissance nominale.
- Zone III :  $V_n < V_{vent} < V_m$ , la vitesse de rotation est constante, ce qui limitée la puissance extraite, mais proche de sa valeur nominale.
- Zone IV :  $V_{vent} > V_m$ , après que le vent atteint sa vitesse maximale, le système de sureté de fonctionnement fais arrêter l'éolienne [14].

#### II.4. Technique d'extraction du maximum de la puissance

La puissance capturée par la turbine éolienne peut être essentiellement maximisée en ajustant le coefficient de puissance  $C_p$ .

La relation de dépendance du coefficient de puissance  $C_p$  de la vitesse du vent ou de la vitesse de rotation, permet la maximisation de la puissance capturée dans l'utilisation d'une éolienne à vitesse variable.

Donc, Il est nécessaire de concevoir une stratégie de commande permettant de maximiser la puissance (le couple) en ajustant la vitesse de la turbine et sa valeur de référence quel que soit la vitesse du vent.

Il existe différentes stratégies de contrôle du couple électromagnétique permettant de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée. Ce principe est connu sous le nom Maximum Point Power Traking (MPPT), et correspond à la zone 2 de la caractéristique de fonctionnement de l'éolienne [20].

Deux familles de commande de l'éolienne se distinguent :

- Le contrôle avec asservissement de vitesse
- Le contrôle sans asservissement de vitesse

Dans notre travail nous avons opté pour la structure sans asservissement de vitesse

#### II.4.1. Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse

La précision de la mesure la vitesse du vent est pratiquement difficile à réaliser pour les deux raisons suivantes :

- L'emplacement de L'anémomètre situé derrière le rotor de la turbine, entraîne la lecture erronée de la vitesse du vent.
- Aussi, plus le diamètre de la surface balayée par les pales étant important (typiquement 70m pour une éolienne de 1.5MW), plus il y a une possibilité de variation sensible du vent qui peut apparaitre et cela, suivant la hauteur où se situe l'anémomètre. Pour cela, l'utilisation d'un seul anémomètre doit se limiter à une seule mesure locale de la vitesse du vent ce qui n'est donc pas suffisamment représentative de la valeur moyenne apparaissant sur l'ensemble des pales [13].

Ce qui permet de conclure qu'une mesure erronée de la vitesse du vent conduit forcément à une dégradation de la puissance captée selon la technique MPPT utilisant un capteur de vitesse du vent. C'est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse.

La technique basée sur l'hypothèse de la vitesse très peu variable du vent en régime permanent conclue qu'à partir de l'équation dynamique de la turbine, on obtient l'équation statique décrivant le régime permanent de la turbine [15] :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = 0 = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (I.13)$$

On négligeant le couple des frottements ( $C_{vis} \approx 0$ ), on obtient :

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

A partir d'une estimation du couple éolien, on détermine le couple électromagnétique d'estimation comme suite :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{aer\_estimé}}{G} \quad (\text{II.15})$$

Alors, le couple éolien estimé est déterminé par :

$$C_{aer\_estimé} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine\_estimé}} \cdot V_{estimé}^3 \quad (\text{II.16})$$

L'estimation de vitesse de la turbine est obtenue à partir de la mesure de vitesse mécanique :

$$\Omega_{turbine\_estimé} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (\text{II.17})$$

La mesure de vitesse de vent apparaissant au niveau de la turbine étant délicate, l'estimation de sa valeur peut être déterminée par cette équation :

$$V_{estimé} = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{\lambda} \quad (\text{II.18})$$

D'après les quatre équations développées précédemment, on obtient une relation globale de contrôle :

$$C_{em\_ref} = \frac{C_p}{\lambda_{C_p}^3} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \cdot \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad (\text{II.19})$$

Pour extraire le maximum de la puissance généré, il faut fixer le ratio de vitesse à la valeur  $\lambda_{C_{pmax}}$  qui correspond au maximum du coefficient de puissance  $C_{pmax}$ .

Donc le couple électromagnétique d'estimation doit être réglé à cette valeur :

$$C_{em\_ref} = \frac{C_p}{\lambda_{C_{pmax}}^3} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \cdot \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad (II.20)$$

### II.5. Modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation

Une GADA totalement interfacée est constituée d'un stator assimilé à celui de la machine asynchrone à cage connecté à un onduleur de tension, et d'un rotor qui n'est pas une cage d'écureuil mais contenant trois bobinages déposés de la même manière que les bobinages statoriques, ses derniers sont connectés en étoile et alimenté à un onduleur de tension. Ce qui permet d'avoir une puissance égale deux fois la puissance nominale de la génératrice

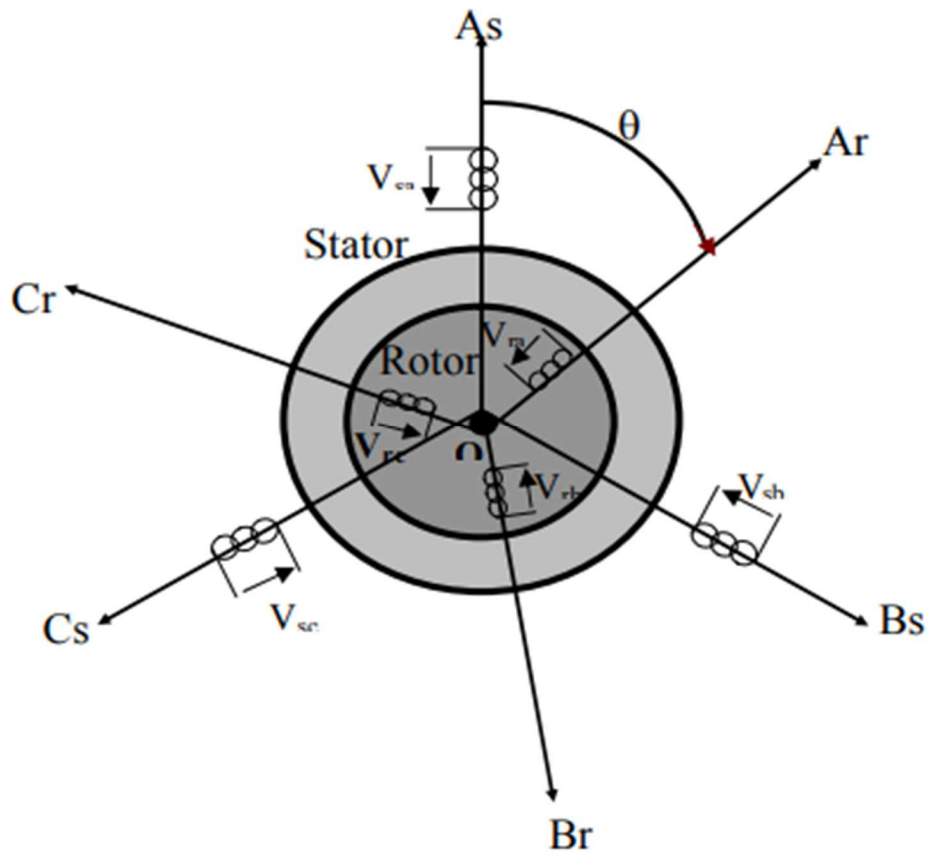


Figure II.5: représentation schématique de la GADA [28]

### II.5.1. Hypothèse simplificatrice

Dans cette partie, nous allons modéliser et contrôler la puissance active et réactive de la GADA et analyser les performances de la commande pour les vitesses de vents variables tout en adoptant la représentation dite « vectorielle ».

Les hypothèses simplificatrices prise en compte sont :

- L'entrefer est constant
- Le circuit magnétique n'est pas saturé, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau.
- Et admettant, que la f.m.m créée par chacune des armatures est à répartition sinusoïdale [5].

### II.5.2. Modèle mathématique de la GADA dans le repère (abc)

#### Les équations électriques de la GADA

D'après la loi de Faraday :

$$\frac{d\Phi}{dt} = V - Ri \quad (\text{II.21})$$

On permet d'écrire :

$$V = Ri + \frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{II.22})$$

En l'appliquant sur les enroulements triphasés du rotor et du stator on déduit les équations suivantes qui décrivent le fonctionnement de la machine :

Au stator :

$$\begin{cases} V_{sa} = R_s \cdot i_{sa} + \frac{d\Phi_{sa}}{dt} \\ V_{sb} = R_s \cdot i_{sb} + \frac{d\Phi_{sb}}{dt} \\ V_{sc} = R_s \cdot i_{sc} + \frac{d\Phi_{sc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

Au rotor :

$$\begin{cases} V_{ra} = R_r \cdot i_{ra} + \frac{d\Phi_{ra}}{dt} \\ V_{rb} = R_r \cdot i_{rb} + \frac{d\Phi_{rb}}{dt} \\ V_{rc} = R_r \cdot i_{rc} + \frac{d\Phi_{rc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

La forme matricielle condensée des phases statoriques :

$$[V_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{sabc}] \quad (\text{II.25})$$

La forme matricielle condensée des phases rotoriques :

$$[V_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{rabc}] \quad (\text{II.26})$$

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

$[i_{sa} i_{sb} i_{sc}]$  : les courants des phases statoriques

$[\Phi_{sa} \Phi_{sb} \Phi_{sc}]$  : les flux totaux a travers les bobines statoriques

#### - Les équations magnétiques de la MADA

Il est possible d'exprimer les flux en fonction des courants et des différentes inductances propre et mutuelle par :

Pour les enroulements statoriques :



$$\begin{cases} \Phi_{sa} = L_s \cdot i_{sa} + M_{sr} \cdot i_{ra} \\ \Phi_{sb} = L_s \cdot i_{sb} + M_{sr} \cdot i_{rb} \\ \Phi_{sc} = L_s \cdot i_{sc} + M_{sr} \cdot i_{rc} \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

Pour les enroulements rotoriques :

$$\begin{cases} \Phi_{ra} = L_s \cdot i_{ra} + M_{sr} \cdot i_{sa} \\ \Phi_{rb} = L_s \cdot i_{rb} + M_{sr} \cdot i_{sb} \\ \Phi_{rc} = L_s \cdot i_{rc} + M_{sr} \cdot i_{sc} \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

Donc :

$$[\Phi_{sabc}] = [L_s][i_{sabc}] + M_{sr}[i_{rabc}] \quad (\text{II.29})$$

$$[\Phi_{rabc}] = [L_r][i_{rabc}] + M_{sr}[i_{sabc}] \quad (\text{II.30})$$

Celle-ci comporte 36 coefficients non nul, dont la moitié de ces coefficients dépend du temps par l'intermédiaire de l'angle électrique « $\theta$ » qui représente la position de la phase (AR) du rotor par rapport à la phase (AS) du stator.

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \\ \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s & M_1 & M_3 & M_2 \\ M_s & l_s & M_s & M_2 & M_1 & M_3 \\ M_s & M_s & l_s & M_3 & M_2 & M_1 \\ M_1 & M_2 & M_3 & l_r & M_r & M_r \\ M_3 & M_1 & M_2 & M_r & l_r & M_r \\ M_2 & M_3 & M_1 & M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

Avec :

$$\begin{cases} M_1 = M \cdot \cos(\theta) \\ M_2 = M \cdot \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_3 = M \cdot \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

$l_s$  et  $l_r$  : Les inductances propres d'une phase statorique et rotorique.

M : représente la valeur maximale des inductances mutuelle du couplage stator-rotor.

On déduit quatre matrices à partir de la matrice  $[L(\theta)]$  :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sabc} \\ \Phi_{rabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] [M_{sr}] \\ [M_{sr}] [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sabc} \\ i_{rabc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

La matrice d'inductance statorique  $[L_s]$  est donnée par :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix}$$

La matrice d'induction rotorique  $[L_r]$  :

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

$[M_{sr}]$  : La matrice de l'inductance mutuelle entre les phases statoriques et rotoriques, est présenté par :

$$[M_{sr}]^T = [M_{sr}] = [M] \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.34})$$

#### - Les équations mécaniques de la GADA

L'équation mécanique de la génératrice est décrite :

$$C_{em} - C_r - C_{visq} = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{II.35})$$

$$C_{vis} = f \cdot \Omega \quad (\text{II.36})$$

Avec :

$f$  : coefficient de frottement visqueux

$J$  : le moment d'inertie du moteur

$C_r$  : Le couple résistant

$C_{em}$  : Le couple moteur électromagnétique

### II.5.3. Modèle de la GADA dans le plan (d,q)

Le changement du repère, rend l'écriture des équations électrique et mécanique plus facile à exploiter [5].

La transformation de Park permet de transformer les enroulements statoriques et rotoriques en grandeurs équivalentes représentées dans un repère orthogonal [25].

Les deux bobines d et q produisent le même effet que les trois bobines réelles fixes.

Notation :

d : axe en directe au stator et rotor

q : axe quadrature stator et rotor

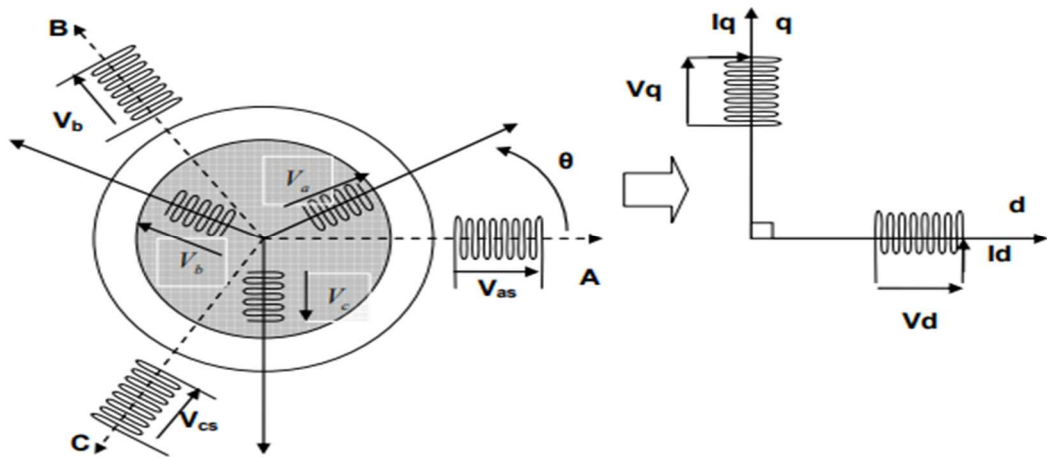


Figure II.6: modèle de Park à la GADA [31]

La matrice de transformation de Park est donnée par :

$$[X_{dq}] = P(\theta)[X_{abc}] \quad (\text{II.37})$$

Avec :

$[X_{dq}]$  : Vecteur des grandeurs dans le repère (dq)

$[X_{abc}]$  : Vecteur des grandeurs dans le repère (abc)

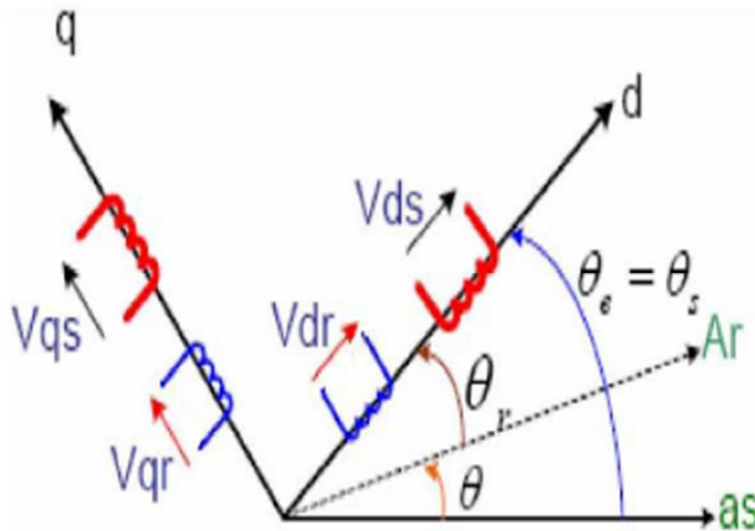
$$[P(\theta)] = c \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

Dans le cas de conservation de la puissance nous avons  $c = \sqrt{\frac{2}{3}}$

Il est noté que :

$\theta_s$  Pour l'angle des transformations Park des grandeurs statoriques

$\theta = \theta_s - \theta_r \Rightarrow$  Pour les grandeurs rotoriques



**Figure II.7: représentation de la machine dans le repère diphasé [31]**

La matrice inverse de Park définie les équations précédentes dans le plan abc et on applique :

$$[X_{abc}] = [P(\theta)]^{-1}[X_{dq}] \quad (\text{II.39})$$

La matrice inverse de transformation de Park est donnée :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.40})$$

#### II.5.4. Application de la transformation de Park à la GADA

Pour chaque vecteur tension, courant, flux statorique et rotorique définie précédemment, on applique la transformation de Park et on tire :

Le modèle biphasé suivant est obtenue à partir des équations (II.29, II.30, II.31) on obtient :

$$\begin{cases} V_d = R \cdot i_d + \frac{d\Phi_q}{dt} + \frac{d\theta}{dt} \Phi_d \\ V_q = R \cdot i_q + \frac{d\Phi_d}{dt} + \frac{d\theta}{dt} \Phi_q \end{cases} \quad (\text{II.41})$$

- Les équations électriques :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.42})$$

$V_{ds}, V_{qs}, V_{dr}, V_{qr}$ , Sont les tensions statoriques et rotoriques directes en quadratures du système diphasé

Où :

$$\begin{cases} \theta_{coord} = \theta_s \Rightarrow \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \\ \theta_{coord} = \theta_s - \theta_r \Rightarrow \frac{d\theta}{dt} = \frac{d(\theta_s - \theta_r)}{dt} = (\omega_s - \omega_r) \end{cases}$$

$\omega_s$  et  $\omega_r$  sont les pulsations des grandeurs électriques statoriques et rotoriques

- **Les équations magnétiques :**

Ces équations sont obtenues en appliquant la transformation de Park pour établir les relations entre flux d'axes (d,q) et ceux d'axes (a,b,c) on obtient alors :

$$\begin{cases} [\Phi_{dqs}] = [P(\theta)][\Phi_s] \\ [\Phi_{dqr}] = [P(\theta)][\Phi_r] \end{cases} \quad (\text{II.43})$$

Au stator :

$$\begin{cases} [\Phi_{dqs}] = [P(\theta)][L_s][i_s] + [M_{sr}][i_r] \\ [\Phi_{dqs}] = [P(\theta)][L_s][P(\theta)]^{-1}[i_{dqs}] + [P(\theta)][M_{sr}][P(\theta)]^{-1}[i_{dqr}] \end{cases} \quad (\text{II.44})$$

Au rotor :

$$\begin{cases} [\Phi_{dqr}] = [P(\theta)][L_r][i_r] + [M_{sr}][i_s] \\ [\Phi_{dqr}] = [P(\theta)][L_r][P(\theta)]^{-1}[i_{dqr}] + [P(\theta)][M_{sr}][P(\theta)]^{-1}[i_{dqs}] \end{cases} \quad (\text{II.45})$$

Donc on obtient ce système matriciel suivant :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \\ \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s - M_s & 0 & \frac{3}{2}(M_{sr}) & 0 \\ 0 & l_s - M_s & 0 & \frac{3}{2}(M_{sr}) \\ \frac{3}{2} & 0 & l_r - M_r & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}(M_{sr}) & 0 & l_r - M_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.46})$$

Avec :

$L_s = l_s - M_s$  : Inductance cyclique du stator

$L_r = l_r - M_r$  : Inductance cyclique du rotor

$M = \frac{3}{2} M_{sr}$  : Inductance mutuel cyclique entre le stator et le rotor

On tire cette matrice :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \\ \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.47})$$

En remplaçant le système d'équation (II.42) dans l'équation (II.47) on tire les équations suivantes :

$$\begin{cases} R_s \cdot i_{sd} + L_s \cdot \frac{di_{sd}}{dt} = V_{sd} + \omega_s \cdot L_s \cdot i_{sq} + \omega_s \cdot M \cdot i_{rq} - M \frac{di_{rd}}{dt} \\ R_s \cdot i_{sq} + L_s \cdot \frac{di_{sq}}{dt} = V_{sq} + \omega_s \cdot L_s \cdot i_{sd} + \omega_s \cdot M \cdot i_{rd} - M \frac{di_{rq}}{dt} \\ R_r \cdot i_{rd} + L_r \cdot \frac{di_{rd}}{dt} = V_{rd} + (\omega_s - \omega) \cdot L_r \cdot i_{rq} + (\omega_s - \omega) \cdot M \cdot i_{sq} - M \frac{di_{sd}}{dt} \\ R_r \cdot i_{rq} + L_r \cdot \frac{di_{rq}}{dt} = V_{rq} + (\omega_s - \omega) \cdot L_r \cdot i_{rd} + (\omega_s - \omega) \cdot M \cdot i_{sd} - M \frac{di_{sq}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.48})$$

Après modélisation des équations de la GADA, on a appliqué la transformation de la place sur les équations électriques :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \Phi_{sd} - \omega_s \cdot \Phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \Phi_{sq} + \omega_s \cdot \Phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r \cdot i_{rd} + \Phi_{rd} - \omega_r \cdot \Phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + \Phi_{rq} + \omega_r \cdot \Phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.49})$$

Pour un bon découplage nous définissons [26] :

$$\begin{cases} V_{sd} - \frac{M}{L_r} \cdot V_{rd} = V_{tsd} \\ V_{rd} - \frac{M}{L_s} \cdot V_{sd} = V_{trd} \\ V_{sq} - \frac{M}{L_r} \cdot V_{rq} = V_{tsq} \\ V_{rq} - \frac{M}{L_s} \cdot V_{sq} = V_{trq} \end{cases} \quad (\text{II.50})$$

Dans le terme de couplage à compenser apparaissent P1d, P1q, P2d, P2q

$$\begin{cases} V_{tsd} = R_s(1 + pT_s\sigma)i_{sd} + P1d \\ V_{trd} = R_s(1 + pT_s\sigma)i_{sq} + P1q \\ V_{tsq} = R_r(1 + pT_r\sigma)i_{rd} + P2d \\ V_{trq} = R_r(1 + pT_r\sigma)i_{rq} + P2q \end{cases} \quad (\text{II.51})$$

Tel que :

$$\begin{cases} T_s = \frac{L_s}{R_s} \\ T_r = \frac{L_r}{R_r} \\ \sigma = \frac{1 - M^2}{L_r L_s} \end{cases} \quad (\text{II.52})$$

Les expressions du terme de couplage :



$$\begin{cases} P1d = \frac{-M}{L_r} \cdot R_r \cdot i_{rq} - \omega_s \cdot \Phi_{sq} + \omega \cdot \frac{M}{L_r} \cdot \Phi_{rq} \\ P1q = \frac{-M}{L_r} \cdot R_r \cdot i_{rd} + \omega_s \cdot \Phi_{sd} - \omega \cdot \frac{M}{L_r} \cdot \Phi_{rd} \\ P2d = \frac{-M}{L_s} \cdot R_s \cdot i_{sd} - \omega \cdot \Phi_{rq} + \omega_s \cdot \frac{M}{L_s} \cdot \Phi_{sq} \\ P2q = \frac{-M}{L_s} \cdot R_s \cdot i_{sq} + \omega \cdot \Phi_{rd} - \omega_s \cdot \frac{M}{L_s} \cdot \Phi_{sd} \end{cases} \quad (\text{II.53})$$

Fonction de transfert :

$$\begin{cases} G_{sd} = \frac{i_{sd}}{V_{tsd} - P1d} = \frac{1/R_s}{1 + pT_s\sigma} \\ G_{sq} = \frac{i_{sq}}{V_{tsq} - P1d} = \frac{1/R_s}{1 + pT_s\sigma} \\ G_{rd} = \frac{i_{rd}}{V_{trd} - P1d} = \frac{1/R_r}{1 + pT_r\sigma} \\ G_{rq} = \frac{i_{rq}}{V_{trq} - P1d} = \frac{1/R_r}{1 + pT_r\sigma} \end{cases} \quad (\text{II.54})$$

- **Expression du couple électromagnétique :**

L'expression du couple électromagnétique est définie comme suit :

$$C_{em} = p(\Phi_{dr}i_{qr} - \Phi_{qs}i_{ds}) \quad (\text{II.55})$$

Avec

P : nombre de pair de pole

- **Expression du couple mécanique :**

On donne l'équation mécanique suivante :

$$C_{em} - C_r - f\Omega_{mec} = J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} \quad (\text{II.56})$$

$C_r$  : Couple résistant

$\Omega_{mec}$  : La vitesse angulaire mécanique

$f$  : coefficient de frottement visqueux

$J$  : le moment d'inertie du moteur

- Les puissances active et réactive statoriques et rotoriques de la MADA :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} \cdot i_{ds} + V_{qs} \cdot i_{qs} \\ Q_s = V_{qs} \cdot i_{ds} - V_{ds} \cdot i_{qs} \\ P_r = V_{dr} \cdot i_{dr} + V_{qr} \cdot i_{qr} \\ Q_r = V_{qr} \cdot i_{dr} - V_{dr} \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (II.57)$$

## II.6. Modélisation du convertisseur d'électronique de puissance

### II.6.1. Modèle onduleur MLI :

L'onduleur est un convertisseur statique constitué de cellules de commutations généralement de transistor (IGBT), il permet les conversions continues/alternatives. Dans notre étude, l'onduleur est commandé par la technique à MLI, c'est onduleur bidirectionnelle en courant et classiquement composé de trois bras Independent portant chacun 2 interrupteurs, chaque interrupteur contient un transistor IGBT qui sont connectés à une diode en antiparallèle, il permet d'imposer à la machine des tensions ou des courants à amplitude et fréquences variables [22][18].

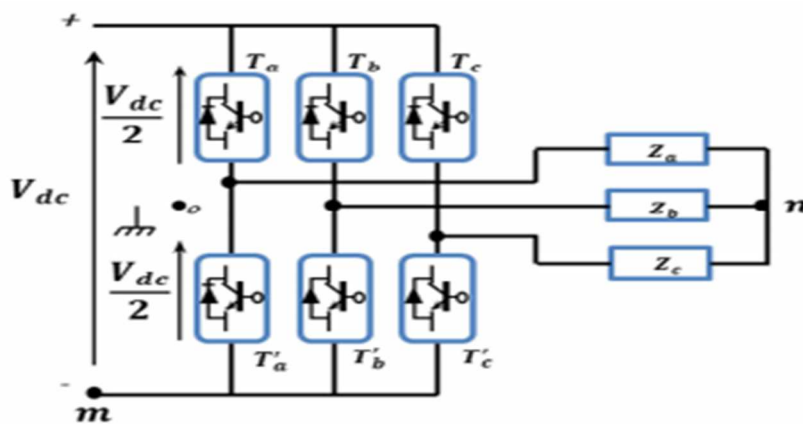


Figure II.8: schéma électrique d'un onduleur [18]

La charge a été modélisée à partir des tensions simple on les notes  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$ , et  $V_{cn}$

L'onduleur utilisé est piloté à partir de grandeurs logiques  $S_i$ . On appelle  $T_i$  et  $T_i'$  les transistors (supposé des interrupteurs idéaux),  $S_i$  et  $S_i'$  les commandes logiques associées [22].

On a :

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

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

- Calculons les tensions entre les points a,b,c et le point m

$$\begin{cases} V_{am} = V_a - V_m = S_a \cdot E & (V_{am} = V_{dc} \text{ si } (T_a) \text{ est fermé,} & V_{am} = 0 \text{ si } (T_a) \text{ est ouvert) } \\ V_{bm} = V_b - V_m = S_b \cdot E & (V_{am} = V_{dc} \text{ si } (T_b) \text{ est fermé,} & V_{am} = 0 \text{ si } (T_b) \text{ est ouvert) } \\ V_{cm} = V_c - V_m = S_c \cdot E & (V_{am} = V_{dc} \text{ si } (T_c) \text{ est fermé,} & V_{am} = 0 \text{ si } (T_c) \text{ est ouvert) } \end{cases}$$

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

D'où nous déduisons :

$$\begin{bmatrix} V_{am} \\ V_{bm} \\ V_{cm} \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.58})$$

$$\begin{cases} V_{am} = V_{an} + V_{nm} \\ V_{bm} = V_{bn} + V_{nm} \\ V_{cm} = V_{cn} + V_{nm} \end{cases} \quad (\text{II.59})$$

Donc :

$$\Rightarrow V_{am} + V_{bm} + V_{cm} = (V_{an} + V_{bn} + V_{cn}) + 3V_{nm} \quad (\text{II.60})$$

$$\text{Si la charge est équilibrée : } V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{II.61})$$

$$\text{On a alors : } V_{nm} = \frac{1}{3}(V_{am} + V_{bm} + V_{cm}) \quad (\text{II.62})$$

En remplaçant  $V_{nm}$  dans le système précédant on aura :

$$\begin{cases} V_{am} = V_{an} + \frac{1}{3}(V_{am} + V_{bm} + V_{cm}) \\ V_{bm} = V_{bn} + \frac{1}{3}(V_{am} + V_{bm} + V_{cm}) \\ V_{cm} = V_{cn} + \frac{1}{3}(V_{am} + V_{bm} + V_{cm}) \end{cases} \quad (\text{II.63})$$

$$\Rightarrow \begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(2V_{am} - V_{bm} - V_{cm}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(V_{am} - 2V_{bm} - V_{cm}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(V_{am} - V_{bm} - 2V_{cm}) \end{cases} \quad (\text{II.64})$$

Sous forme matricielle le modèle sera :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{am} \\ V_{bm} \\ V_{cm} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.65})$$

Et les équations de tension :

$$\begin{cases} V_{an} = R \cdot i_a + L \frac{di_a}{dt} \\ V_{bn} = R \cdot i_b + L \frac{di_b}{dt} \\ V_{cn} = R \cdot i_c + L \frac{di_c}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.66})$$

### II.6.2. Régulation de la tension du bus continu :

Le lissage de tension se fait par la capacité qui existe dans le bus continu, sa tension est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitive, on a donc :

$$V_{dc} = \frac{1}{C} \int i_c dt \quad (\text{II.67})$$

Le courant du condensateur est issu d'un nœud où circulent deux courants modulés par chaque convertisseur on le présente par l'équation suivante :

$$i_c = i_{dc} - i_{ond} \quad (\text{II.68})$$

Avec :

$i_{dc}$  : Courant redressé

$i_{ond}$  : Courant de charge

Avec  $U_0$  tension initial de condensateur, on écrit :

$$U_{dc}(t) = \frac{1}{C} \int i_c(t) + U_0 \quad (\text{II.69})$$

### II.6.3. Modèle du Redresseur MLI:

Redresseur à MLI consiste à commander les transistors IGBT à l'ouverture et à la fermeture pour une tension continue au bus, la réalisation se fait par une comparaison de la tension du bus à la tension de référence qui est quasi-continue.

La possibilité de commande à l'ouverture permet un contrôle total du convertisseur, parce que les interrupteurs peuvent être commutés, selon les besoins, aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture [32].

Le redresseur MLI est modélisé pas la matrice suivante

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.70})$$

Avec :

$$i_{dc} = S_a \cdot i_a + S_b \cdot i_b + S_c \cdot i_c \quad (\text{II.71})$$

Tel que :

$V_{dc}$  : Tension redressée

$i_{dc}$  : Courant redressé

## II.7. Modélisation de la charge L-R

Généralement les charges consommatrice de puissance utilisé sont de type L-R, elles varient en fonction du temps, l'équation électrique d'écrivant ses charges est donné par :

$$L \frac{di(t)}{dt} = V - Ri \quad (\text{II.72})$$

## II.8. Modélisation de système de stockage

### II.8.1. Batterie :

En raison du cout et la disponibilité, les batteries au plomb sont les plus utilisées. Suivant les applications et les contraintes auxquelles elles sont soumises, les batteries réagissent différemment, elles existent en plusieurs modèles de différentes circonstances, c'est pour cela on a choisi de présenter un modèle simplifié d'une batterie simple :

$$V_{bat} = E_{bat} + R_{bat}I_{bat} \quad (\text{II.73})$$

Avec :

$V_{bat}$  : La tension de la batterie

$E_{bat}$  : La force électromotrice de la batterie

$R_{bat}$  : La résistance de la batterie

$I_{bat}$  : Courant de la batterie

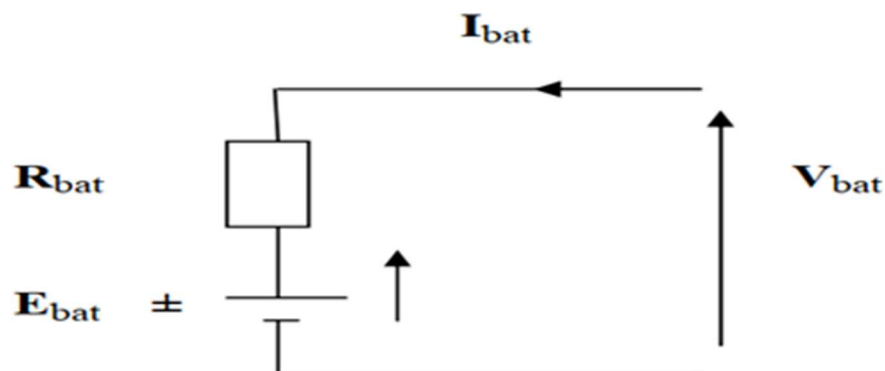


Figure II.9: schéma équivalent de la batterie

### II.8.2. L'état de charge :

L'état de charge de la batterie EDC, noté SOC pour state of charge en anglais

$$EDC = 1 - \frac{Q_m}{C_{bat}} \quad (\text{II.74})$$

$$Q_m = I_{bat} * t \quad (\text{II.75})$$

$Q_m$  : La quantité de charge manquante a la batterie

$C_{bat}$  : La capacité de batterie

$t$  : La durée de fonctionnement de la batterie

### II.9. Conclusion

Ce chapitre a été dédié à la modélisation du système éolien, ou nous avons présenté le modèle de la partie mécanique, contenant le vent, la turbine, les arbres de transmissions et le multiplicateur de vitesse.

Ensuite, nous avons passé au modèle de la GADA en utilisant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices avec un changement de repère par l'application de la transformation de Park.

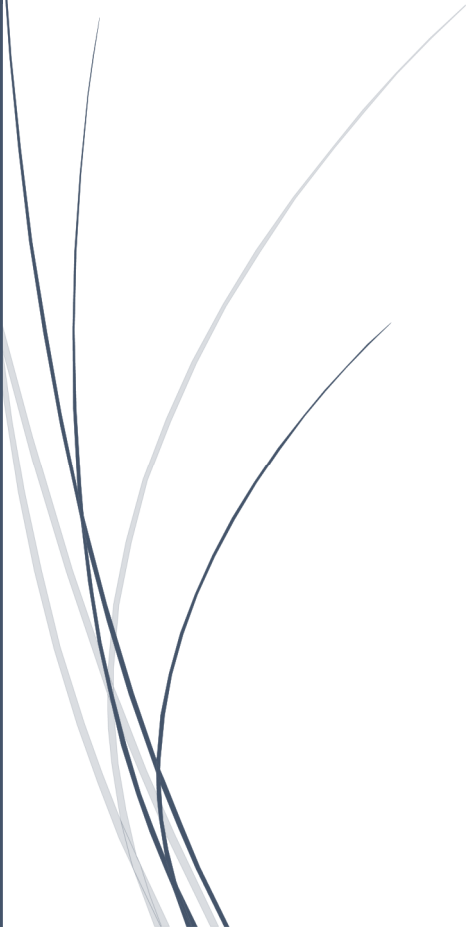
Dans la dernière partie, nous avons modélisé les convertisseurs statiques intégrés dans le système étudié en expliquant leurs principes de fonctionnements.

A la fin de ce chapitre, nous avons étudié les modèles de stockage reliant le système.

A dark blue vertical bar is on the left side of the page. A blue arrow points to the right from the bar, pointing towards the chapter title.

# Chapitre III

Commande et Gestion du système globale





### III.1. Introduction

La commande vectorielle par orientation du flux présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour le cas de la génératrice asynchrone à double alimentation

Dans ce chapitre nous appliquerons une commande vectorielle à la génératrice, et la régulation directe des courants, puis nous proposerons l'association du stockage et une charge électrique à travers un système de gestion.

Vers la fin nous discuterons les résultats obtenus par les différentes parties du système global.

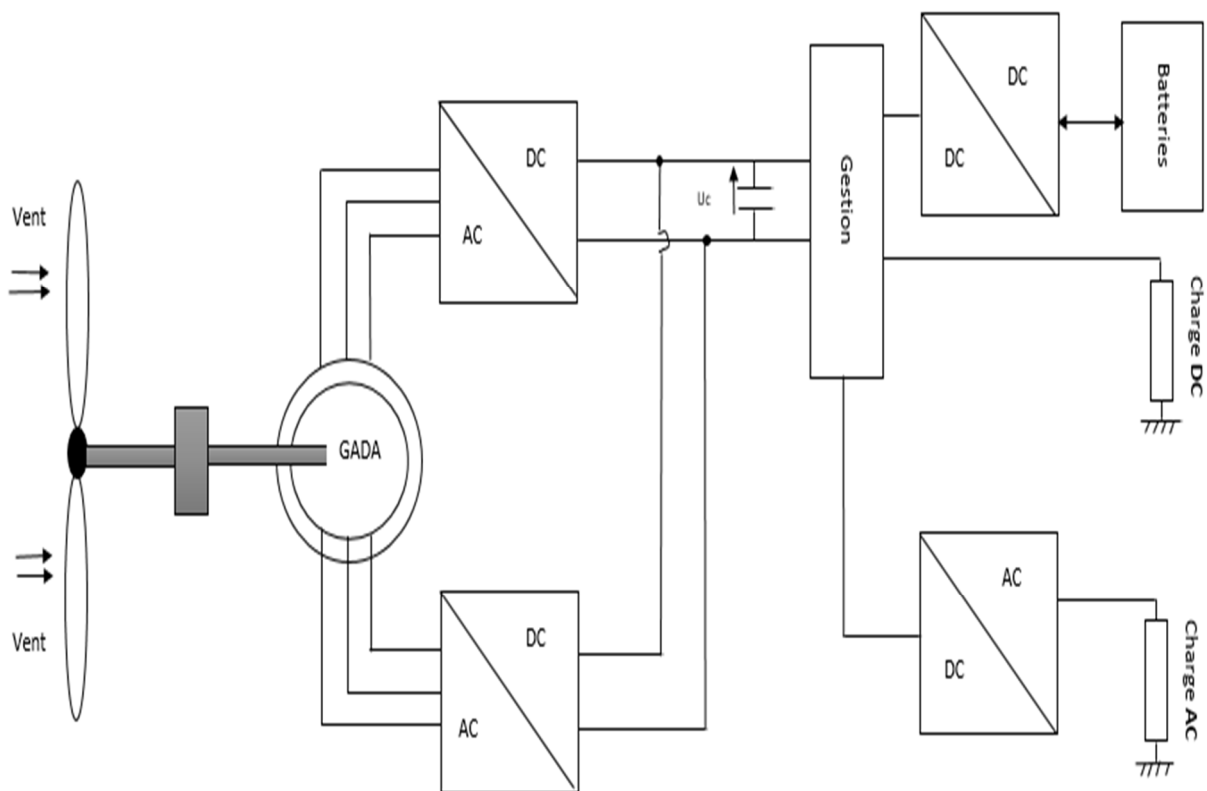


Figure III.1: schéma du système global

## III.2. Modèle MADA avec commande vectorielle

### III.2.1. La commande vectorielle :

Le nom de cette commande vient du fait que les relations finales sont vectorielles. Elle permet d'obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants [9].

L'intérêt qu'offre cette commande, est l'obtention des performances semblable à celle de la machine à courant continu à excitation séparé qui consiste en le découplage naturelle entre les grandeurs commandant le flux et celle commandant le couple à partir de l'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation [29].

### III.2.2. Modèle de la GADA à flux statorique orienté :

Une commande vectorielle de cette machine a été conçu en orientant le repère de Park pour que les flux statoriques suivant q soit nul :  $\Phi_{ds} = \Phi_s$   $\Phi_{qs} = 0$

- Les équations de tensions statoriques et rotoriques deviennent alors :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \Phi_{ds} \cdot \omega_s \\ V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - \Phi_{qr} \cdot (\omega_s - \omega) \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + \Phi_{dr} \cdot (\omega_s - \omega) \end{cases} \quad (III.1)$$

D'après l'hypothèse du  $\Phi_{ds}$  constant, le couple  $C_{em}$  se produit par la machine à cause du choix du repère ce qui fait que seule la puissance active dépendante du courant rotorique d'axe q. et si on prend aussi une hypothèse pour les machines de moyenne et forte puissances d'énergie éolienne en négligeant la résistance statorique  $R_s$  la relation devient:

$$V_s = \Phi_s \cdot \omega_s \quad (III.2)$$

On déduit que le repère lié au flux statorique tourne à la même vitesse angulaire que les vecteurs de tension statorique et qu'il est en avance de  $\frac{\pi}{2}$  sur ce vecteur, ce qui nous permet d'écrire :

$$\begin{cases} V_{qs} = V_s \\ V_{ds} = 0 \end{cases} \quad (III.3)$$

Nous pouvons simplifier les équations de tensions, et des flux statorique tout en suivant le repère choisi donc :

- **Les équations de la tension statorique :**

$$\begin{cases} V_{qs} = V_s = \omega_s \cdot \Phi_{ds} \\ V_{ds} = 0 \end{cases} \quad (III.4)$$

- **Les équations des flux statoriques et rotoriques :**

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} = \Phi_s \\ \Phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} = 0 \end{cases} \quad (III.5)$$

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} \end{cases} \quad (III.6)$$

- **Les équations reliant les courants statoriques et rotoriques :**

À partir des équations (III.5) et (III.6) on peut établir le lien entre les courant statoriques et rotorique suivante :

$$\begin{cases} i_{qs} = -\frac{M}{L_s} \cdot i_{qr} \\ i_{ds} = \frac{\Phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} \cdot i_{dr} \end{cases} \quad (III.7)$$

- **L'équation du couple électromagnétique devient :**

$$C_{em} = P \frac{M}{L_s} \cdot \Phi_s \cdot i_{qs} \quad (III.8)$$

A partir de l'équation du couple électromagnétique et de la relation de proportionnalité qui existe entre les deux courants on peut déterminer directement les courants de références suivants [27] :

$$\begin{cases} i_{qs}^* = \frac{C_{em}^*}{P \cdot \Phi_s^*} \\ i_{qr}^* = \frac{-L_s}{M} i_{qs}^* \end{cases} \quad (III.9)$$

Les courants de l'axe directe d, assure la magnétisation de la MADA, pour cela nous avons choisi dans ce travail de répartir les courants statoriques et rotoriques de l'axe direct à égalité, donc ils ont la même expression :

$$i_{sd}^* = i_{rd}^* = \frac{\Phi_s^*}{M + L_s} \quad (III.10)$$

- **Les équations liant la puissance active et réactive statorique et rotorique :**

En adaptant ses équations aux hypothèses simplificatrices et au système d'axe choisie  $V_{ds} = 0$  on écrit :

$$\begin{cases} P_s = V_s \cdot i_{qs} \\ Q_s = V_s \cdot i_{ds} \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

En remplaçant les équations des courants  $i_{qs}, i_{ds}$  dans l'équation (III.12) On obtient les expressions de puissance en fonction des courants rotoriques :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} \cdot i_{qr} \\ Q_s = V_s \cdot \frac{\Phi_s}{L_s} - \frac{V_s \cdot M}{L_s} \cdot i_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

En tenant compte de l'approximation  $\Phi_s = \frac{V_s}{\omega_s}$ , l'équation de puissance réactive devient :

$$Q_s = \frac{V_s^2}{L_s \cdot \omega_s} - \frac{V_s \cdot M}{L_s} i_{dr} \quad (\text{III.13})$$

La répartition des puissances actives entre le stator et le rotor est une exigence dans la stratégie de contrôle à adopter, en effet dans notre travail nous avons choisie de faire fonctionner la GADA avec un glissement égale à -1, donc en négligeant les termes résistifs de la machine.

$$\frac{P_s}{P_r} = \frac{\omega_s}{-\omega_r} = 1 \Rightarrow \omega_s = \omega_r \quad (\text{II.14})$$

Et d'après la loi d'autopilotage :

$$\Omega_r = \omega_s - \omega_r = 2\omega_s = -\omega_r \quad (\text{II.15})$$

La relation d'autopilotage montre que la loi de répartition des puissances active permet de faire fonctionner la GADA avec une vitesse de rotation mécanique égale à deux fois à la valeur absolue des pulsations des courants statoriques ou rotoriques.

### III.3. Synthèse du régulateur PI classique

Le régulateur proportionnel intégral (PI), utilisé pour commander la MADA en génératrice, est simple et rapide à mettre en œuvre tout en offrant des performances acceptables.

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) avec les régulateurs s'écrit de la manière suivante :

$$FTBO = \frac{P + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{P}{K_p}} + \frac{\frac{M \cdot V_s}{L_s \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)}}{P + \frac{L_s \cdot R_r}{L_s \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)}} \quad (III.16)$$

Nous choisissons la méthode de compensation de pôle pour la synthèse du régulateur afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert. Ceci conduit à l'égalité suivante :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{L_s \cdot R_r}{L_s \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)} \quad (III.17)$$

Notons toutefois ici que la compensation des pôles n'a d'intérêt que si les paramètres de la machine sont conçus avec une certaine précision car les gains des correcteurs dépendent directement de ces paramètres. Si ce n'est pas le cas, la compensation moins performante.

Si l'on effectue la compensation, on obtient la FTBO suivante :

$$FTBO = \frac{K_p \cdot \frac{M \cdot V_s}{L_s \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)}}{P} \quad (III.18)$$

Ce qui nous donne la boucle fermée :

$$FTBF = \frac{1}{1 + \tau_r \cdot P} \quad (III.19)$$

Avec

$$\tau_r = \frac{1}{K_p} \cdot \frac{L_s \cdot \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{M \cdot V_s} \quad (\text{III.20})$$

Ou  $\tau_r$  le temps de réponse du système que l'on fixe de l'ordre 10ms

On peut désormais exprimer le gain des correcteurs en fonction de paramètres de la machine et du temps de réponse :

$$K_p = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{L_s \cdot \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{M V_s} \quad (\text{III.21})$$

$$K_i = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{R_r \cdot L_s}{M \cdot V_s} \quad (\text{III.22})$$

#### III.4. Gestion d'énergie éolienne

Le système étudié est composé d'une éolienne, convertisseur AC/DC, des batteries de stockages, des convertisseurs DC/AC, une charge et d'un module de gestion.

Ce module de gestion est fait pour gérer l'énergie généré par l'éolienne et l'énergie provenant du stockage suivant la demande de la charge.

Nous proposons un algorithme de gestion d'une source éolienne autonome, cet outille doit :

- Empêcher les décharges profondes de la batterie
- Empêcher les surcharges de la batterie
- Déconnexion de la charge dans le cas de l'insuffisance de la production et décharges profond de la batterie

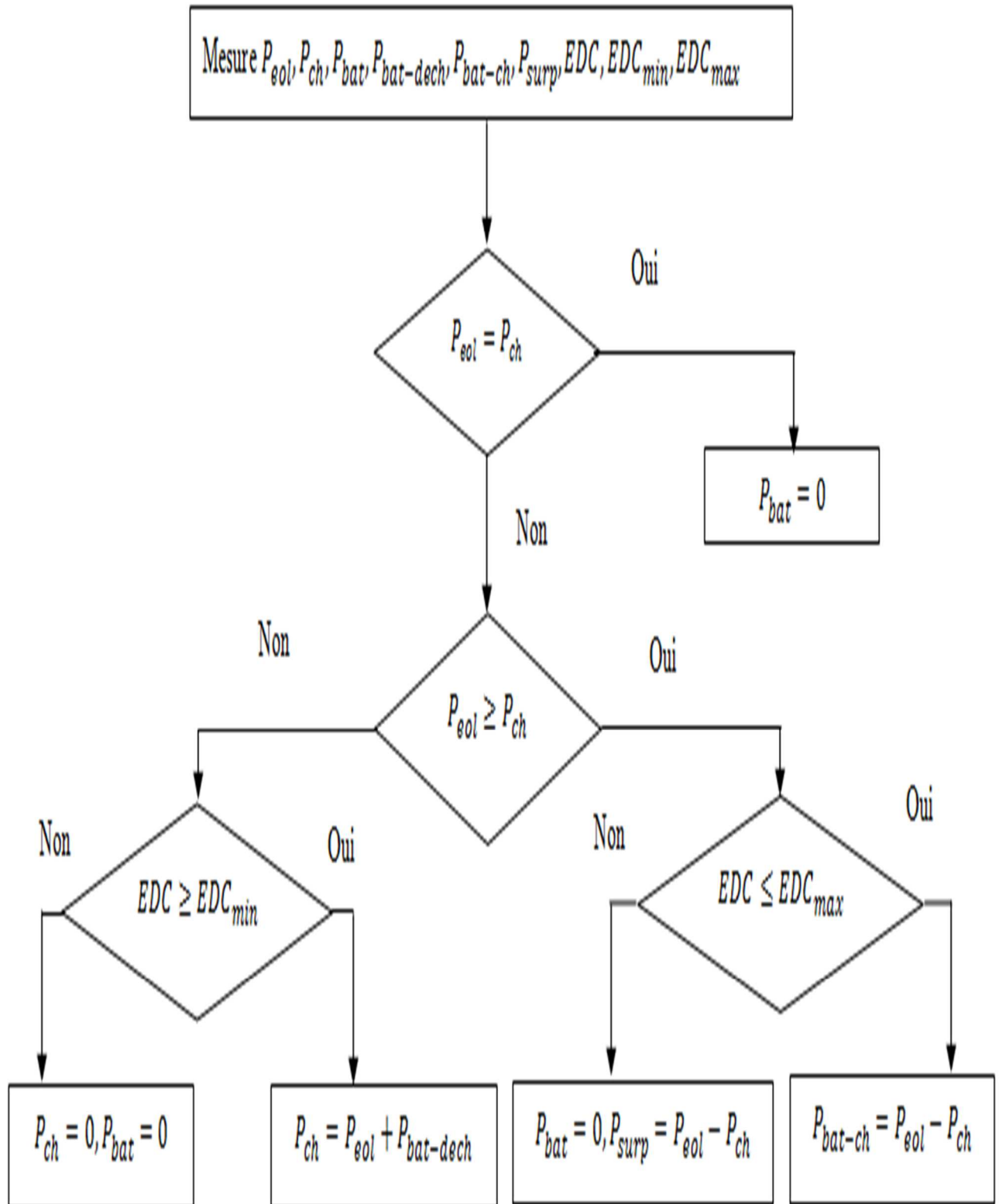


Figure III.2: organigramme fonctionnelle

### III.5. Les modes de fonctionnements d'organigramme

**Mode1** : quand la puissance fournie par la génératrice est égale à la puissance demandée par la charge, ce qui va conduire à l'alimentation directe de la charge.

**Mode2** : quand la puissance éolienne est supérieur à la puissance demandée par la charge, et que l'état de charge de la batterie est inférieur à EDCmax, on alimente la charge et on charge la batterie.

**Mode3** : quand la puissance éolienne est supérieure à la puissance demandée par la charge et que l'état de charge de la batterie est supérieur à EDCmax, on déconnecte la batterie et la charge sera alimenté par un générateur éolien, et le système d'orientation des pales (Pitch control) vas maximiser la puissance et faire changer l'orientation des pales de l'éolienne.

**Mode4** : dans ce cas la puissance éolienne est inférieur à la puissance demandée par la charge, donc le manque de puissance sera compensé par la batterie étant donné que l'état de charge de la batterie est supérieur à EDCmin.

**Mode5** : ce cas représente la situation ou la puissance éolienne est insuffisante pour alimenter la charge, et l'état de charge de la batterie est inferieure EDCmin, donc on déconnecte la batterie, et vu que la demande de la charge n'est pas satisfaite, cette dernière vas aussi se déconnecter, de que cela arrive la batterie se reconnecte à nouveau pour emmagasiner le peu de puissance disponible.

### III.6. Les résultats de simulation :

Nous avons procédé à la simulation du système d'énergie éolienne en fonctionnement autonome à pas fixe pendant 10s qui correspond réellement à des heures avec le changement d'échelle.

Nous avons obtenu les résultats suivant :



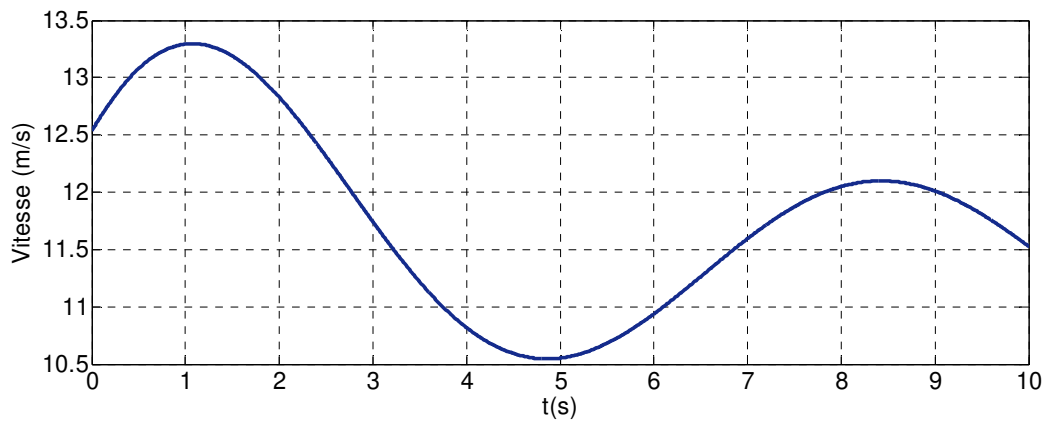


Figure III.3: Allure de la vitesse du vent

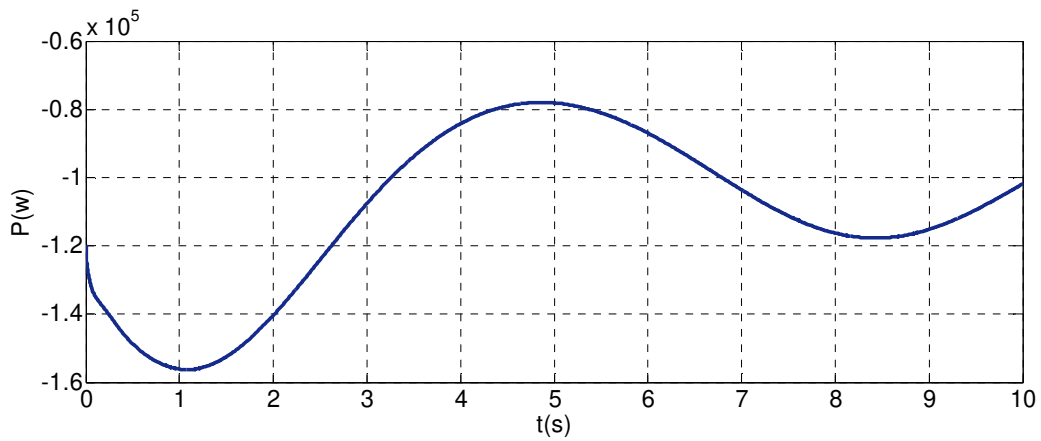


Figure III.4: Allure de la Puissance du vent

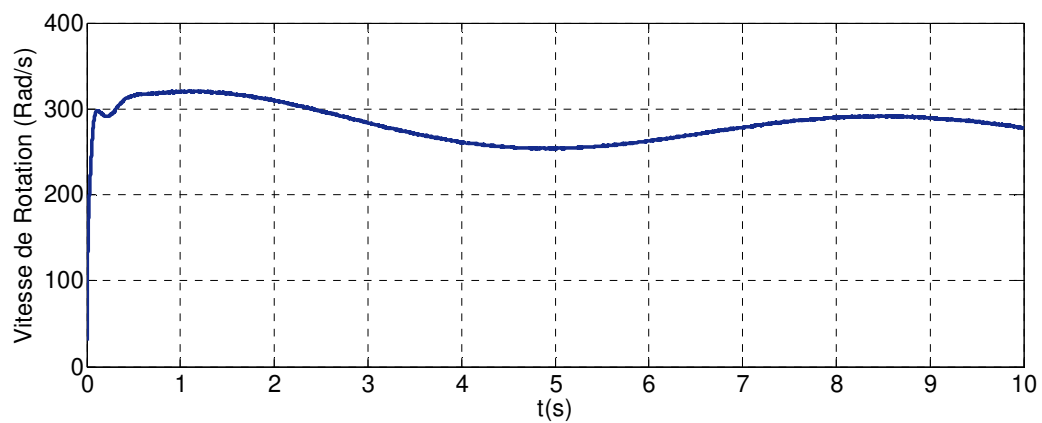


Figure III.5: Allure de la vitesse de rotation de la GADA

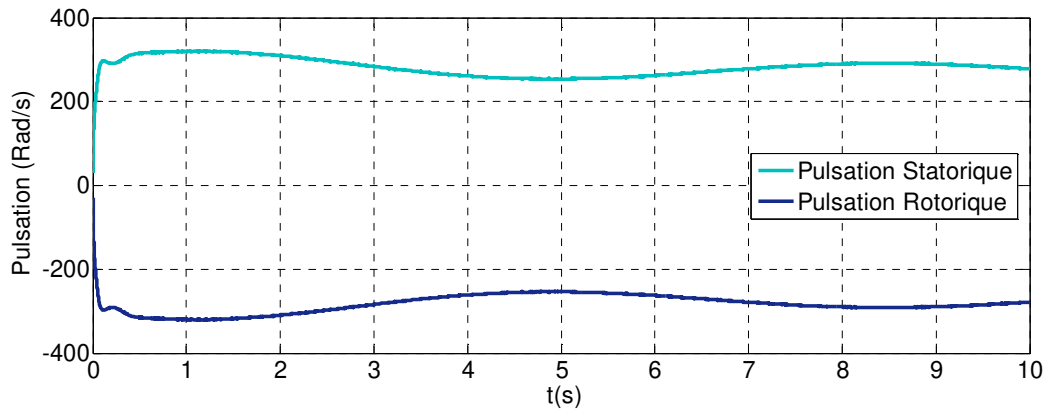


Figure III.6: Allures des pulsations statorique et rotorique

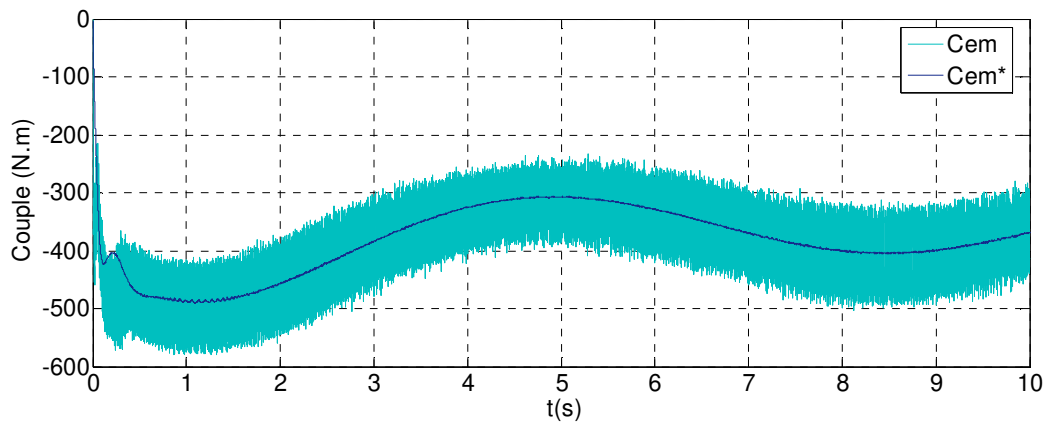


Figure III.7: Allures des couples électromagnétiques

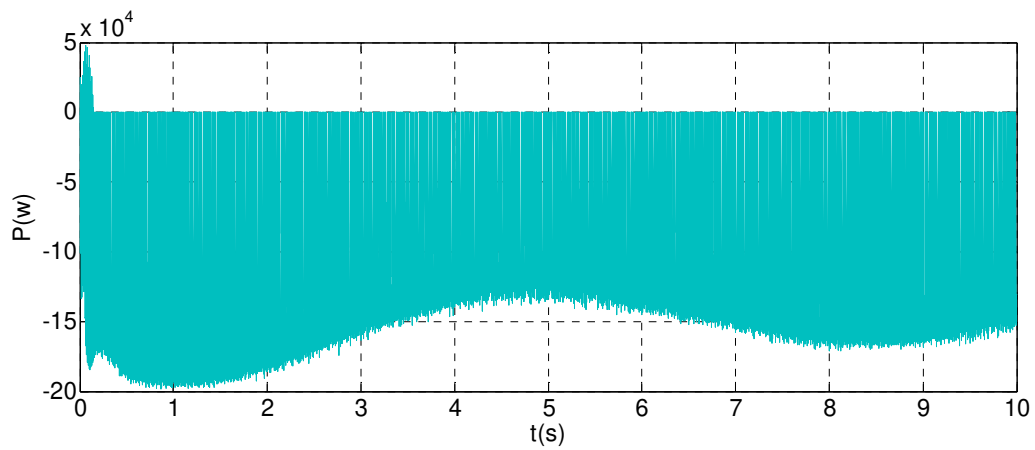
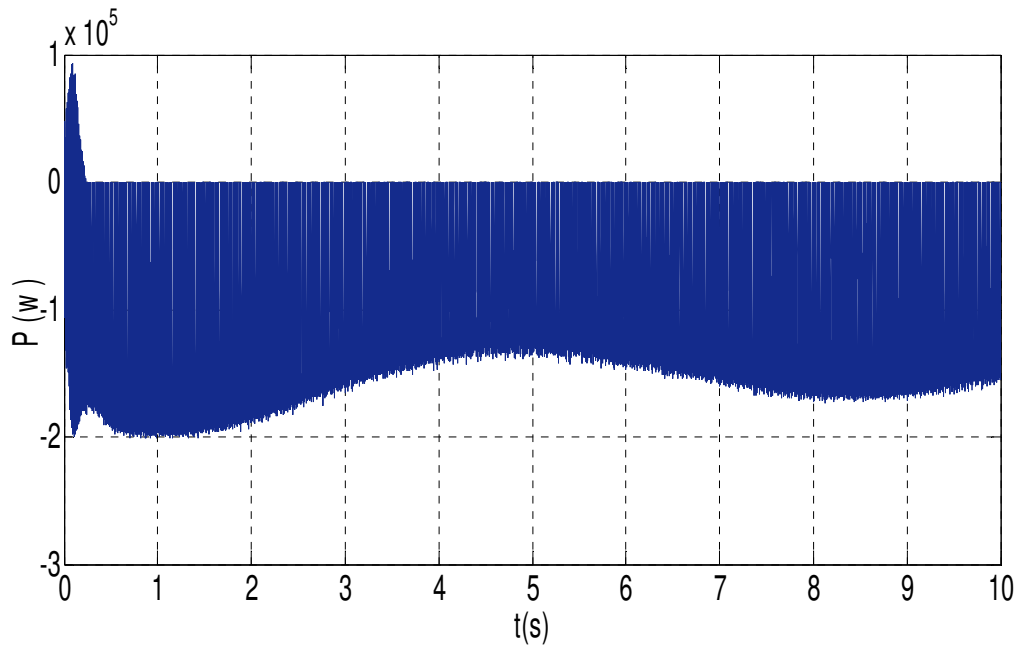
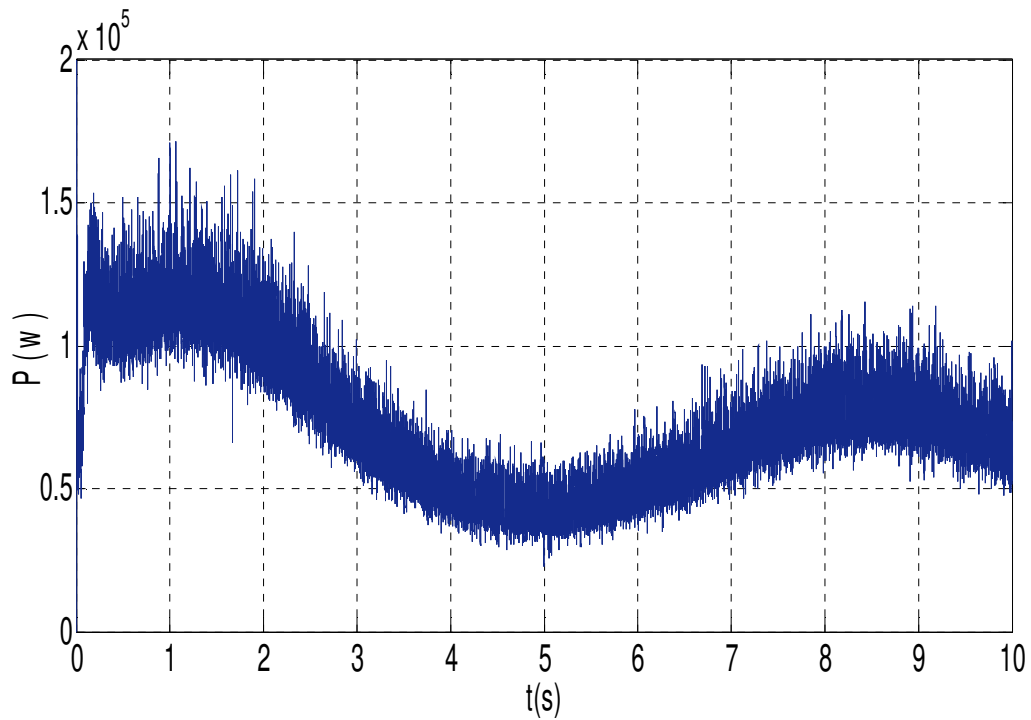


Figure III.8: Allure de la puissance Statorique de la GADA

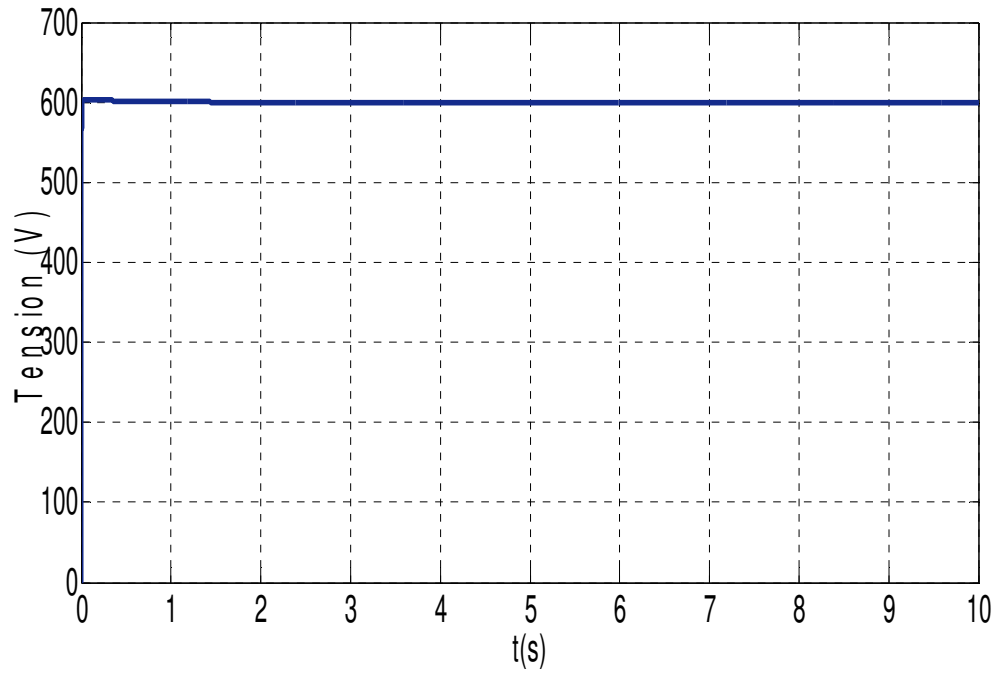


**Figure III.9: Allure de la puissance Rotorique de la GADA**

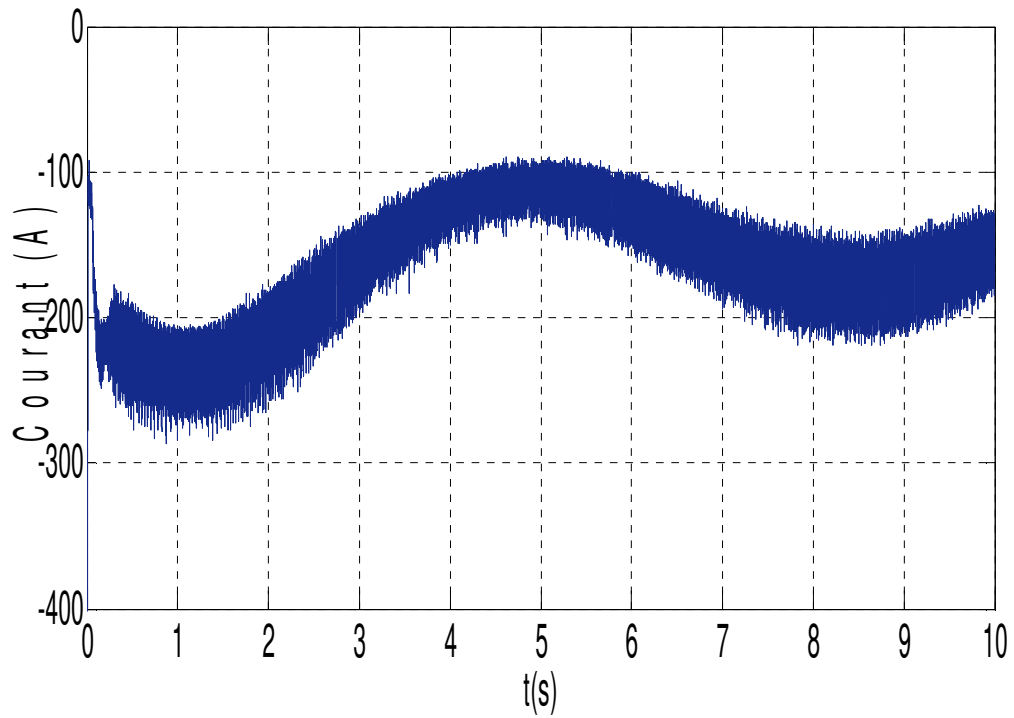
Afin de montrer l'efficacité du système de gestion dans les différents cas possibles, on fait varier le profil de la charge ainsi que la vitesse du vent. Les figures suivantes définissent les différents profils utilisés pour la simulation.



**Figure III.10: Allure de la puissance générée par l'éolienne**



**Figure III.11: Allure de la tension du bus continue**



**Figure III.12: Allure du courant redressé**

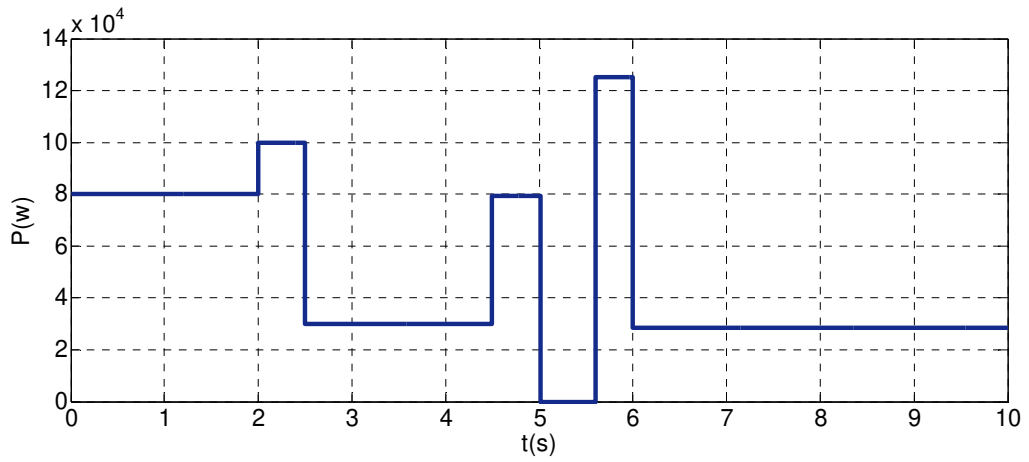


Figure III.13: Allure de la puissance demandé par la charge

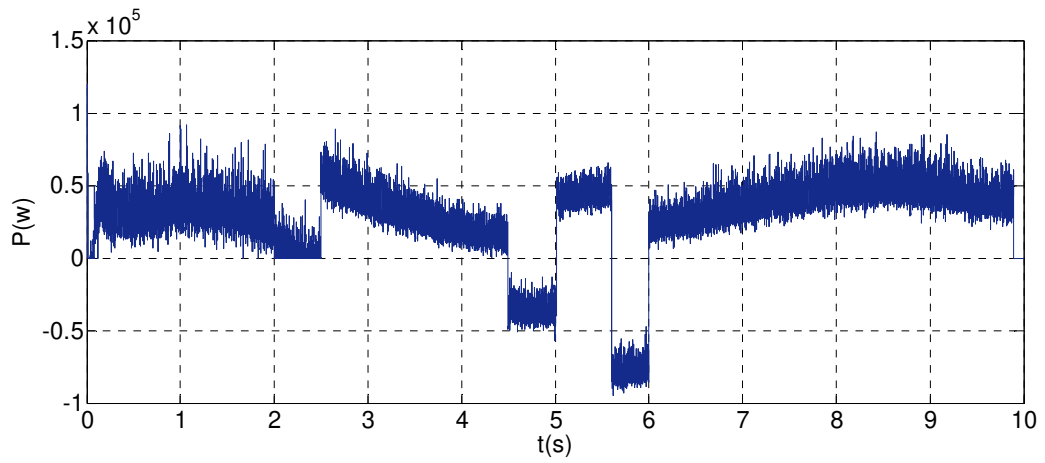


Figure III.14: Allure de la puissance des batteries

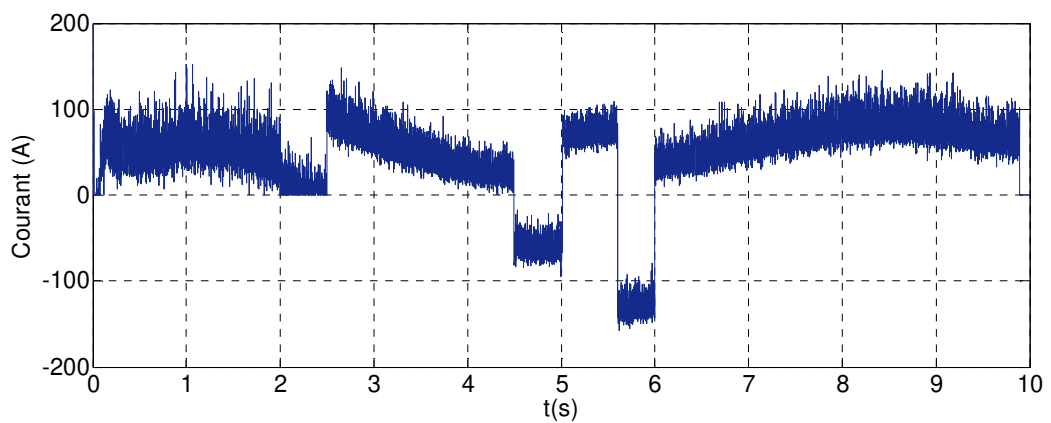


Figure III.15: Allure du courant des batteries

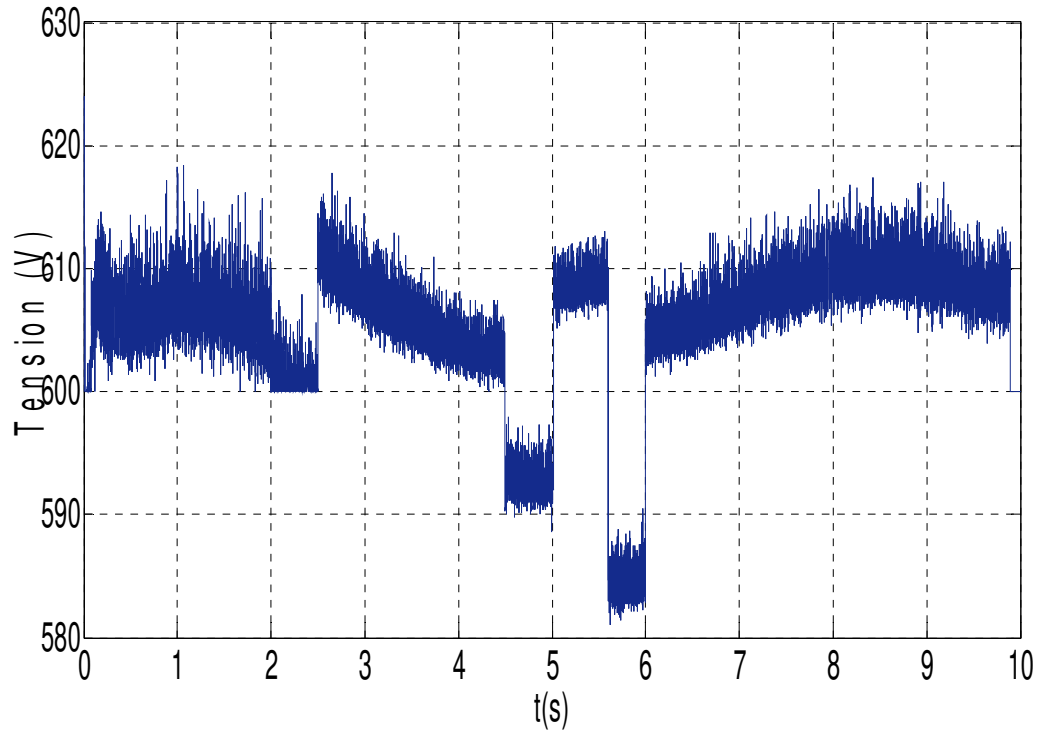


Figure III.16: Allure de la tension des batteries

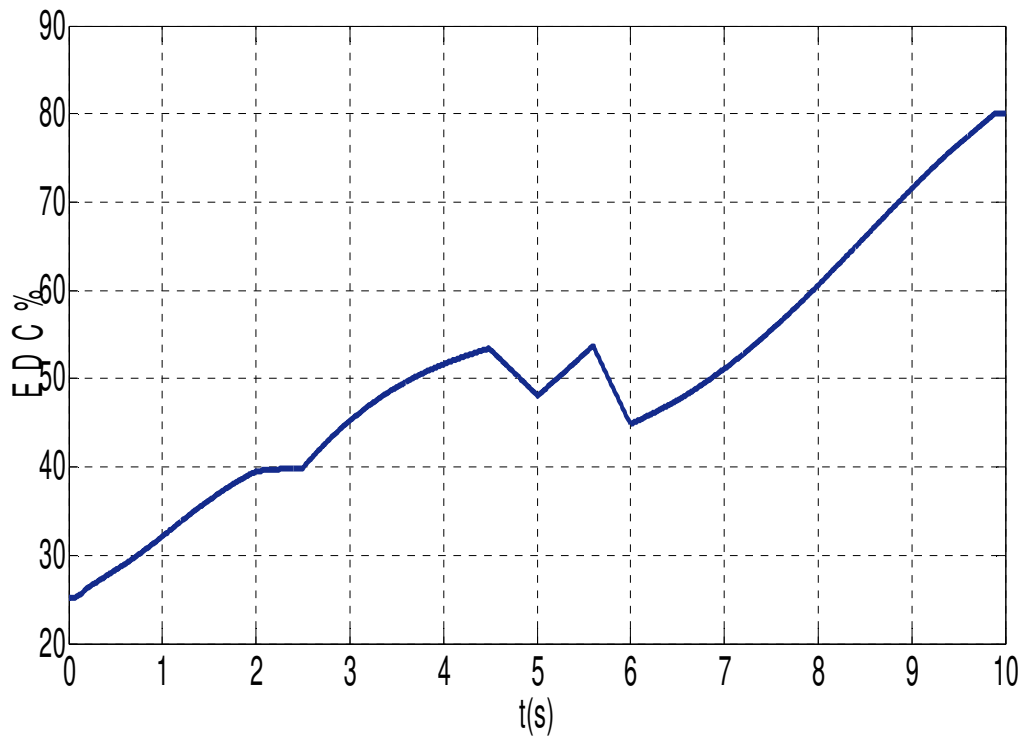
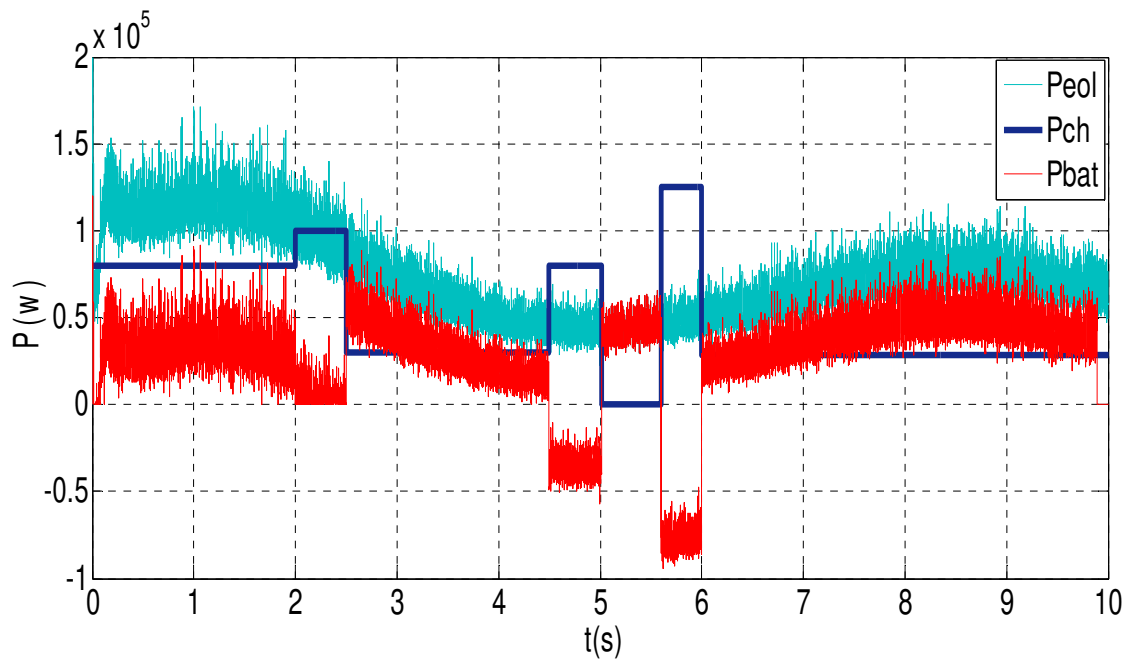


Figure III.17: Allure d'état de charge des batteries



**Figure III.18: Allures des puissances Peol, Pch, Pbat**

### III.7. Interprétation des résultats

La Figure –III.2- illustre le profil de vent en fonction du temps, et la Figure –III.3- présente la puissance de vent qui est son image mais de sens opposé.

La Figure –III.4- représentent la vitesse de rotation de la génératrice en (rad/s), on remarque elle varie en fonction de la variation de la vitesse de vent et elle est limité à [300rad/s].

La Figure-III.5- représente les pulsations Statorique et Rotorique, on remarque que la pulsation Statorique est positive et c'est l'image de la pulsation Rotorique négative, et qu'elles varient en fonction de la vitesse de rotation de la génératrice.

La Figure-III.6- illustre la variation du couple électromagnétique de référence et de couple électromagnétique généré par la turbine dans la commande PI directe, on remarque qu'ils varient en même temps sur la même plage, d'où la régulation appliqué fait généré le Cem\* pour permettre la conversion énergétique, et la valeur de signe négative qui permet d'avoir un fonctionnement générateur.

La Figure-III.7- et la Figure-III.8- illustrent les puissances satatoriques et rotorique de la génératrice on remarque qu'elles sont presque égales (le signe négatif signifie le

fonctionnement génératrice), et leurs valeurs égale à deux fois la puissance nominale de la GADA.

**La figure-III.9-** représente la puissance générée par le système éolien et dirigeant vers le module de gestion, on remarque qu'elle est supérieure à la puissance de la turbine éolienne et qu'elle égale à deux fois la puissance nominale de la GADA.

**La Figure-III.10-** représente la tension du bus continue, on remarque qu'après un régime transitoire, cette tension est gardée constante à une valeur de 600v.

**La Figure-III.11-** illustre le courant redressé sortant du bus continu.

**La Figure-III.12-** illustre la puissance demandée par la charge.

**La Figures-III.13-** représente la puissance totale des batteries en fonction du temps sa variation est suivant la consommation de la charge.

**La Figure-III.14-** représente le courant passant par les batteries du système.

**La Figure-III.15-** montre la tension aux bornes des batteries, elle est limitée à une valeur de [610V].

Dans **la Figure-III.16-** on peut voir l'état de charge de la batterie qui évolue de la même manière que la tension des batteries en fonctionnement du temps représentant son image.

L'ensemble de graphes représenté sur **la Figure –III.17-** représente la puissance de l'éolienne Peol, la puissance consommée par la charge Pch, et la puissance de la batterie Pbat.

A travers ses résultats on déduit les interprétations suivantes sur le fonctionnement par phases du système éolien avec l'algorithme de gestion :

- **Phase1 [0-2s] :** on remarque que l'éolienne génère une puissance d'environ 140kw comme une valeur maximale, et la charge demande une puissance 80kw ce qui fait que le surplus d'énergie passe vers le stockage pour charger les batteries  $EDC < EDC_{max}$  (80%).
- **Phase2 [2-2.5s] :** la puissance fournie par l'éolienne est inférieure à la demande de la charge alors la batterie va compenser la demande de la charge ce qui en résulte qu'elle se décharge.



- **Phase3 [2.5-4.5s]** : la charge consomme 30kw et la puissance délivrée par l'éolienne diminue à une valeur presque 70kw en cette période, donc la batterie continue à se charger  $EDC < EDC_{max}$ .
- **Phase4 [4.5 -5s]** : la puissance demandée par la charge est supérieure à celle fournie par l'éolienne donc la batterie se décharge et compense la demande de la charge.
- **Phase5 [5-5.6s]** : la production de l'éolienne continue à se diminuer et la puissance demandée par la charge est nul donc la puissance totale générée va vers les batteries  $EDC < EDC_{max}$ .
- **Phase6 [5.6-6s]** : la puissance demandée par la charge est supérieure à celle fournie par l'éolienne donc la batterie se décharge et compense la demande de la charge.
- **Phase7 [6-9.8s]** : dans cette période la puissance de l'éolienne augmente et la charge demande une puissance de 28.5kw et  $EDC < EDC_{max}$  la batterie continue à se charger.
- **Phase8 [9.8-10s]** : la production de l'éolienne est supérieure à celle de la demande de la charge et  $EDC > EDC_{max}$ , donc la batterie est complètement chargée.

### III.8. Conclusion

Ce dernier chapitre, contient l'application de la commande vectorielle directe à la machine, qui consiste en la régulation des courants de références, juste après nous avons étudié la gestion de l'énergie produite par ce système qui alimente une charge et des batteries de stockage.

Ensuite, nous avons présenté les résultats de simulation obtenue par l'étude faite sur la machine, la variation de sa vitesse de rotation les pulsations suivant la variation du vent en fonction de temps, ainsi que les résultats de système de gestion.

En fin de ce chapitre, nous avons présenté les interprétations des résultats du système global en expliquant vers la fin les différents fonctionnements de la gestion établie.



# Conclusion Générale

### Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail consiste sur l'étude, la modélisation, le contrôle, et la gestion d'un système éolien autonome à base d'une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA). Son stator et son rotor alimentés chacun par deux convertisseurs à base d'IGBT commandés en MLI, avec un stockage (batteries), auquel nous avons implanté un algorithme de gestion sous le logiciel « MATLAB » pour gérer l'énergie entre les différents composants du système globale.

Dans le premier chapitre, nous avons élaboré une présentation de l'état d'art du système éolien composé de différents types d'éoliennes existantes, ensuite nous avons présenté les modes de fonctionnement des éoliennes ainsi que l'intérêt des différentes structures de la machine asynchrone à double alimentation utilisant ce système.

Dans le deuxième chapitre, nous avons modélisé les différents éléments de la chaîne de conversion éolienne autonome qui est composée d'une turbine fonctionnant à vitesse variable, avec une génératrice asynchrone à double alimentation en utilisant le modèle de Park, qui a pour intérêt de simplifier les équations différentielles à coefficient variable et des équations de coefficient constants. Aussi, nous avons modélisé les convertisseurs d'électronique de puissance, la charge électrique et es batteries de stockages.

Ce qui nous a permet de simuler la machine et d'en déduire les lois de commande en manipulant les équations décrivant son comportement.

Dans le dernier chapitre, nous avons appliqué les lois de commande vectorielle directe par des régulateurs PI, qui contrôle indépendamment les courants statoriques et rotoriques suivant le plan (d,q), permettant de régler en permanence de la valeur de la puissance active rotorique et statorique que la machine va fournir à la charge et au stockage. Juste après nous avons présenté l'algorithme de gestion d'énergie, ensuite on a procédé à la simulation du système éolien avec stockage par batteries. Les résultats montrent la variation des vitesses de rotations de la turbine ainsi que la puissance que peut délivrer une éolienne à base d'une GADA totalement interfacées avec une charge électrique et un stockage, puis nous avons montré l'efficacité de la méthode gestion d'énergie.

Les résultats de ce travail nous permettent de dégager les perspectives suivantes :

- Etude et comparaison d'autres types de commande de la GADA (commande vectorielle indirecte)
- Etudes des différentes structures des systèmes d'énergie éolienne avec un stockage hybride (batteries+ super-condensateur) pour remédier aux problèmes de limites des batteries en présence des pics de puissance.



# Annexe

## *Annexe*

### **Paramètre de la GADA :**

$$\text{Pour : } P_n = 75Kw$$

$$U_{sn} = 380V$$

$$U_{rn} = 380V$$

$$R_s = 0.03552\Omega$$

$$R_r = 0.02092\Omega$$

$$L_s = 0.01545H$$

$$L_r = 0.01545H$$

$$M = 0.0151H$$

$$J = 0.25Kg/m^2$$

$$F = 0.0024N.m.s/rad$$

$$P = 2$$

$$G_t = 26$$

### **Paramètre de la commande :**

#### **Paramètre de régulateur PI :**

- **Suivant statorique l'axe « q » :**

$$K_i=62.7596$$

$$K_p=2.0745$$

- **Suivant rotorique l'axe « d » :**

$$K_i=106.5593$$

$$K_p=2.0745$$

- **Suivant statorique l'axe « d » :**

$$K_i=106.5593$$

$$K_p=2.0745$$

- **Suivant rotorique l'axe « q » :**

$$K_i=62.7596$$

$$K_p=2.0745$$

$$R_r = 0.02092\Omega$$

$$R_s = 0.03552\Omega$$

$$L_r = 0.01545H$$

$$L_s = 0.01545H$$

$$M = 0.0151H$$

$$P = 2$$

**Paramètre de la turbine :**

$$R_t = 8m$$

$$\rho = 1.22Kg/m^3$$

$$J = 100Kg/m^2$$

$$F = 0.0024N.m.s/rad$$

$$\beta = 0$$

**Paramètre de la batterie :**

$$C_{10} = 92\mu F$$

$$I_{10} = 9.2A$$

$$Dt = 25^\circ$$

$$E = 600V$$

$$R_b = 0.6\Omega$$

**Paramètre de la charge :**

$$R = 13\Omega$$

$$L = 0.055H$$





# Bibliographie



***Bibliographie***

[1] **M. SI BRAHIM**, « étude d'un système de conversion de l'énergie éolienne a base de la machine asynchrone », thèse doctorat, université MOULOUD MAMMERI de TIZI-OUZOU, juin 2015.

[2] **F.POITIER**, « étude et commande des génératrices asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne », thèse doctorat, université NANTES, décembre 2003.

[3] **T.DOUADI**, « étude et commande d'un système éolien à base d'une génératrice asynchrone », mémoire magister en électrotechnique, université de BATNA.

[4] **P.KRAFCZYK**, « modélisation et mise en œuvre d'une chaine de production éolienne à base de la MADA », mémoire d'ingénieur C.N.A.M, université de LORRAINE juillet 2013.

[5] **N.HAMDI**, « modélisation des génératrices éolienne », mémoire magister en électrotechnique, université MENTOURI de CONSTANTINE, janvier 2008.

[6] **F.KENDOULI**, « centrale éolienne et qualité de l'énergie électrique », thèse doctorat, université MENTOURI de CONSTANTINE, 2012.

[7] **F.ABDOUNE**, « étude et contrôle des aérogénérateurs basé sur les machines asynchrone a rotor bobiné », mémoire de magister en électrotechnique, université A.MIRA de BEJAIA, octobre 2011.

[8] **C.BENNOUR**, « simulation de la commande vectorielle par régulateur a mode glissant d'une chaine éolienne à base d'un machine asynchrone à double alimentation », mémoire magister en électrotechnique, université MOHAMED KHIEDER de BISKRA, novembre 2012.

[9] **Y.MOKHTARI**, « étude de la machine asynchrone a double alimentée (MADA) dédié a l'éolien, mémoire de magister en électrotechnique, université A.MIRA de BEJAIA, décembre 2009.

[10] **B.BENMAHREZ**, « étude des filtres actifs dans le cas de production d'énergie éolienne », mémoire de magister en électrotechnique, université A.MIRA de BEJAIA, mai 2016.

[11] **B.KELKOUL**, « étude et commande d'une turbine éolienne utilisant une machine asynchrone à double alimentation », mémoire magister API, université de TLEMCEN, juin 2011.

[12] **S.MERABET**, « commande à mode glissant de la machine asynchrone à double alimentation », mémoire de fin d'étude, université LARBI BEN M'HIDI de OUM EL BOUAGHI, juin 2017.

[13] **L.LOUZE**, « production décentralisée de l'énergie électrique modélisation et contrôle d'une génératrice asynchrone auto excitée », thèse doctorat, université MENTOURI de CONSTANTINE, juillet 2010.

[14] **S.CHEKKAL**, « évaluation des performances de l'aérogénérateur à base de la machine asynchrone double étoile connecté au réseau électrique », mémoire de magister en électrotechnique, université A.MIRA de BEJAIA, octobre 2011.

[15] **S.EL AIMANI**, « modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans le réseau de moyenne tension », thèse doctorat, université des sciences technologie LILLE, décembre 2004.

[16] **R.ROUABHI**, « étude et commande d'une machine asynchrone à double alimentation application : énergie renouvelable », mémoire de magister en électrotechnique, université FERHAT ABBAS de SETIF, 2012.

[17] **S.GHOUELBOURK**, « étude et modélisation des convertisseurs statiques dans une chaîne éolienne à base de la GADA », thèse doctorat, université BADJI MOKHTAR de ANNABA, mai 2016.

[18] **M.MAHBOUB**, « modélisation et commande d'un système éolien à base d'une génératrice double alimentée sans balais », mémoire de magister en électrotechnique, université FERHAT ABBAS de SETIF, juin 2012.

[19] **R.REDJEM**, « étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne », mémoire de magister en électrotechnique, université MENTOURI de CONSTANTINE, juillet 2009.

[20] **M.SMAILI**, « modélisation et commande d'aérogénérateur a machine asynchrone à double alimentation en vue de simulation des problèmes de cogénération », mémoire présenté

comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie, université du QUEBEC EN ABITIBI-TIMISCAMINGUE, aout 2013.

[21] **M.HASSAD**, « influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques », mémoire magister en électrotechnique, université SETIF1, SETIF 2012.

[22] **M.LETRECHE**, « commande flou de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) utilisé dans un système éolien », mémoire magister en électrotechnique, université FERHAT ABBAS de SETIF, juin 2012.

[23] **A.BOYETTE**, « contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », thèse doctorat, université HENRI POINCARÉ, NANCY 1, décembre 2006.

[24] **K.FERKOUS**, « étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne », mémoire magister en physique, université MENTOURI de CONSTANTINE, mai 2009.

[25] **A.GUASMI, S.GUELMINE** « modélisation et commande du système de conversion éolienne basé sur une GADA », mémoire de fin d'étude, université MOHEMED BOUDIAF de M'SILA, 2017.

[26] **P.VIDAL**, « commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation », thèse doctorat, institut national polytechnique de TOULOUSE, décembre 2004.

[27] **R.BABOURI**, « amélioration des performances des convertisseur électromécanique basé sur la machine asynchrone doublement alimentées », thèse doctorat, université A.MIRA de BEJAIA, 2016.

[28] **D.GOUDJIL, S.AIT ARAB** « éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation », mémoire de fin d'étude, université AMIRA de BEJAIA, 2007.

[29] **LAMIA YOUB, A. CRACIUNESCU**, « étude comparative entre la commande vectorielle à flux orienté et la commande directe du couple de la machine asynchrone », U.P.B. Sci. Bull, Série C, Vol.69, No. 2,2007.

[30] **A.S.BELFEDHAL**, « Modélisation et Commande d'une Chaîne Eolienne avec Intégration du Stockage Inertiel », mémoire de magister, école nationale Polytechnique d'ALGER, 2010.

[31] **Y.BENCHERIF**, « modélisation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation pour la production de l'énergie éolienne », mémoire de fin d'étude, école nationale polytechnique, juin 2008.

[32] **G.SEGIER, F.LABRIQUE**, « les convertisseurs de l'électronique de puissance », la conversion continue alternative, volume 4, tec et doc LAVOISIER, 2eme Edition, 1995.