

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة البليدة 1  
Université de BLIDA 1

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Projet de Fin d'Études

Pour l'obtention du diplôme Master en Électrotechnique option Machine Electrique

présenté par

LAHMANI IBRAHIM

---

Thème

---

# Etude comparative entre la commande vectorielle directe et indirecte de la MADA

---

Proposé par : M<sup>me</sup> Guergah Manel

Année Universitaire 2016-2017

### REMERCIEMENTS

*Avant tout, je remercie DIEU le Tout-Puissant qui de m'avoir le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'études et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.*

*Ensuite, je adresse mes remerciements a mon encadreur Madame GUERGAIH qui assumé la direction de ce travail. Qu'il veuille bien trouver ici l'expression de mon connaissance pour son dévouement, sa patience sa disponibilité, ses conseils et son aide constante qu'il nous a apporté tout au long de ce travail. Je remercie les membres de jury qui ont accepté de juger ce travail et d'y apporter leur caution. J'adresse mon vif remerciement à tous les enseignants qui, par leur enseignement, leurs encouragements et leur aide, ont contribué à notre formation. Mes remerciements vont particulièrement aussi a tous ceux qui, par leur encouragements ou leur amitié, ont contribué a l'aboutissement de ce travail.*

*Enfin, je tiens également à remercier tous ceux qui ont participé directement ou indirectement à la réalisation de ce travail.*

## *DÉDÉCACE*

*Je dédie mon travail avant tout à mes chers Parents qui m'ont soutenu pendant toute la durée de ces longues études, « Que Dieux me les protègent ».*

*À Mes chers Frères et Sœurs.*

*À toute la Famille ; LAHMANI, ABBES, AHMAN*

*À tous mes amis de université "SAAD DAHLEB BLIDA" en particulier les amis de département électronique.*

*À tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce mémoire.*

*IBRAHIM*

---

## ملخص:

يقدم هذا العمل التمثيل و التحكم الشعاعي في المولد اللاتزامني مزدوج التغذية مندمج في نظام الطاقة الشمسية من أجل هذا قمنا بإنشاء نموذج توربين هوائي للتدوير المولد. الهدف هو تطبيق هذه التقنية من أجل مراقبة التحكم المنفصل للطاقة التشغيلية والتفاعلية المولدة بواسطة المولد اللاتزامني مزدوج التغذية . وفي الأخير تم اختبار أداء النظام ومقارنته عن طريق المحاكاة من حيث تتبعه المرجع ومن حيث المتانة عن طريق تبديل متغيرات المولد اللاتزامني مزدوج التغذية .

**كلمات المفاتيح:** الطاقة الهوائية - المولد اللاتزامني مزدوج التغذية - التحكم الشعاعي- آلة اللاتزامنية مضاعفة التغذية

---

### Résumé :

Ce travail présente la modélisation et la commande vectorielle d'une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) intégrée dans un système d'énergie éolienne. Pour cela, nous avons défini un modèle de la turbine éolienne pour l'entraînement de la MADA. L'objectif est d'appliquer cette technique de commande pour contrôler indépendamment les puissances active et réactive générées par la GADA. Enfin, les performances du système ont testées et comparées par simulation en termes de suivi de consignes, et la robustesse vis-à-vis aux variations paramétriques de la GADA.

**Mots clés:** MADA, GADA, commande vectorielle, régulateur PI, énergie éolienne.

---

### Abstract :

This work presents a modeling and vector control of a doubly fed induction generator (DFIG) integrated in wind energy system. For this, we defined a model of wind turbine for the training of DFIG. The objective is to apply this technique for controlling independently the active and reactive power generated by the DFIG, the performance of the system are tested and compared by simulation in terms of reference tracking, and robustness against parameters variations of the DFIG

**Keywords:** DFIM, DFIG, vector control, PI controller, wind power.

---

## Introduction générale :

L'énergie électrique est un facteur essentiel pour le développement et l'évolution des sociétés humaines que ce soit sur le plan de l'amélioration des conditions de vie, ou sur le développement des activités industrielles. Elle est devenue une forme d'énergie indispensable par sa souplesse d'utilisation et par la multiplicité des domaines d'activité où elle est appelée à jouer un rôle plus important. Ces modes de production ainsi que les moyens de production associés sont amenés à subir de profonds changements au cours des prochaines décennies [1].

Actuellement, plusieurs pays sont déjà résolument tournés vers l'énergie éolienne. Les plus avancés dans le domaine dans le monde sont respectivement : l'Allemagne, l'Espagne, les Etats-Unis, l'Inde, la Chine et le Danemark. En Algérie, on a un régime de vent modéré (2 à 6 m/s). Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les Hauts Plateaux [2].

Pour le développement des sources de production d'électricité par des systèmes éoliens, différentes machines électriques sont utilisées à savoir les machines asynchrones et les machines synchrones. La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs en Génie Electrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie. Dans ce cadre, nous présentons mémoire décrit une étude sur l'utilisation des machines de type asynchrone dans un système éolien. Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à des rappels sur les systèmes éoliens et à la définition de l'énergie éolienne et ces composants de façon générale. Par la suite, les modes de fonctionnement en vitesse fixe et variable et les différents générateurs utilisés sont présentés.

Dans le second chapitre, on a étudié l'asservissement de la chaîne éolienne pour assurer un rendement optimal et La modélisation de la turbine, l'élaboration d'une commande adéquate pour le captage du maximum de puissance possible seront faite.

Une grande partie des éoliennes installées de nos jours sont équipées de machines asynchrones à double alimentation (MADA).

Cette génératrice permet une production d'électricité à vitesse variable, ceci permet alors de mieux exploiter les ressources éoliennes pour différentes conditions de vent. Pour atteindre ces objectifs, dans le troisième chapitre notre objectif s'est orienté vers la modélisation de la machine asynchrone doublement alimentée. Il s'agit de trouver un modèle mathématique qui représente d'une manière satisfaisante le comportement dynamique de la machine, puis le simuler à travers le Matlab/Simulink est consacré aussi à l'utilisation d'une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) à vitesse, variable dans un système éolien, la topologie et les domaines d'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation ainsi la modélisation dans un repère biphasé (d, q) lié au synchronisme à l'aide de la transformation de PARK sont proposées.

Le quatrième chapitre présente une stratégie de commande vectorielle en puissances active et réactive statoriques appliquée au MADA, il sera alors possible de donner des valeurs de consignes indépendantes pour la puissance active et la puissance réactive, ceci nous offre la possibilité de régler en permanence la valeur de la puissance réactive que la machine va fournir au réseau. Différentes commandes vont être développées ici, l'une appelée commande directe qui effectue la régulation directement sur les puissances sans rendre en compte les couplages internes existants entre les puissances dans la MADA. Cette solution est simple à mettre en oeuvre et permet d'obtenir rapidement des fonctionnements convenables de l'ensemble.

Ensuite nous présentons la méthode indirecte qui s'occupe d'abord de réguler les courants rotoriques de la MADA et incorpore ensuite une boucle de régulation des puissances. Cette méthode, plus complexe, donne un fonctionnement similaire à celui de la méthode directe mais permet de maîtriser les courants rotoriques. Dans ce même chapitre nous proposons, une synthèse du régulateur proportionnel intégral (PI), ainsi que les résultats obtenus par simulation.

Nous terminerons ce présent travail par une conclusion générale et quelques perspectives.

## Liste des figures

### Chapitre 1

**Figure 1.1** : Carte de vent en Algérie

**Figure 1.2** : Conversion de l'énergie cinétique du vent

**Figure 1.3**: Principaux organes du système de conversion éolien [04].

**Figure 1.4** Différents types d'éoliennes.

**Figure 1.5**: Schémas d'une éolienne

**Figure 1.6** : Les parcs éoliens offshores (a) et onshores (b).

**Figure 1.7** : Taille des hélices en m et puissance en MW [4].

**Figure 1.8** : Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau.

**Figure 1.9** : Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone.

**Figure 1.10** : Génération à puissance électrique variable.

*(Pales fixes, décrochage aérodynamique)*

**Figure 1.11** : Génération à puissance électrique constante (pales orientables).

**Figure 1.10** : Éoliennes à vitesse variable.

**Figure 1.11** : Alternateur dans une chaîne de conversion éolienne.

**Figure 1.12** : Machine asynchrone dans une chaîne de conversion éolienne.

**Figure 1.13** : MADA dans une chaîne de conversion éolienne

### Chapitre 2

**Figure 2.1**: Schéma d'une turbine éolienne.

**Figure 2.2** : Schéma bloc du modèle de la turbine.

**Figure 2.3** : Simulation de la turbine mode sous MATLAB.

**Figure 2.4** : Caractéristique Puissance-Vitesse typique d'une éolienne à grande puissance.

**Figure 2.5** : MPPT avec asservissement de la vitesse.

---

**Figure 2.6 :** Couple de référence en fonction de la vitesse de rotation.

**Figure 2.7 :** Schéma structurel du système éolien global.

## Chapitre 3

**Figure 3.1 :** Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.

**Figure 3.2 :** Schéma de principe d'une simple MADA.

**Figure 3.3 :** Schéma de principe de deux MADA en cascade.

**Figure 3.4 :** Schéma de principe de deux machines asynchrones reliées mécaniquement et électriquement par le rotor.

**Figure 3.5 :** Fonctionnement en mode moteur hyposynchrone.

**Figure 3.6 :** Fonctionnement en mode moteur hypersynchrone.

**Figure 3.7 :** Fonctionnement en mode générateur hyposynchrone.

**Figure 3.8 :** Fonctionnement en mode générateur hypersynchrone.

**Figure 3.9 :** Schéma d'un système utilisant une MADA en moteur alimenté par un seul convertisseur.

**Figure 3.10 :** Schéma de l'alimentation de la MADA pour une application génératrice.

**Figure 3.11 :** Représentation électrique des enroulements d'une machine asynchrone triphasée à double alimentation.

**Figure 3.12 :** Modèle de PARK de la MADA.

**Figure 3.13 :** Représentation de la machine dans le repère diphasé.

**Figure 3.14 :** Les résultats de simulation de la machine en vide.

**Figure 3.15 :** Les résultats de simulation de la machine en charge.

**Figure 3.16 :** Schéma synoptique pour un fonctionnement en génératrice de la MADA.

**Figure 3.17 :** Représentation du redresseur triphasé à diodes.

**Figure 3.18 :** Représentation de la tension de sortie du redresseur.

**Figure 3.19 :** Représentation du filtre passe-bas.

**Figure 3.20 :** Tension redressée et filtrée à l'entrée de l'onduleur rotorique .

---

**Figure 3.21:** L'onduleur de tension triphasé alimentant le rotor d'une MADA.

**Figure 3.22 :** Principe de la commande MLI- intersective.

**Figure 3.23:** Schéma globale du système éolien " Turbine + MADA".

**Figure 3.24 :** Résultats de simulation de la génératrice éolienne.

## Chapitre 4

**Figure 4.1 :** Commande d'une MCC et commande vectorielle d'une MADA

**Figure 4.2 :** position du référentiel par rapport au flux.

**Figure 4.3 :** Schéma bloc du système à réguler.

**Figure 4.4 :** Schéma bloc de la commande directe.

**Figure 4.5:** Schéma bloc de la commande indirecte.

**Figure 4.6 :** Problème de commande simplifié (contrôle directe).

**Figure 4.7 :** Exemple de contrôle direct et indirect sur l'axe q.

**Figure 4.8 :** Résultats de simulation de la commande vectorielle directe.

**Figure 4.9 :** Résultats de simulation de la commande vectorielle indirecte.

**Figure 4.10:** Commande vectorielle à facteur de puissance unitaire.

**Figure 4.11 :** Influence des variations paramétriques sur la commande directe.

**Figure 4.12 :** Influence de la variation des inductances sur la commande indirecte.

## Liste des tableaux

**Tableau I.1** : classification des turbines éoliennes.

**Tableau I.2** : Echelle Beaufort.

## Listes des acronymes et abréviations

---

### Acronyme

MADA

GADA

DFIM

MAS

MS

MCC

MLI

IGBT

GTO

PI

FTBO

FTBF

MPPT

### Signification

: **M**achine **A**synchrone à **D**ouble **A**limentation.

: **G**énératrice **A**synchrone à **D**ouble **A**limentation.

: **D**oubly **F**ed **I**nduction **M**achine.

: **M**achine **A**synchrone

: **M**achine **S**ynchrone.

: **M**achine à **C**ourant **C**ontinue.

: **M**odulation de **L**argeur **d'**Impulsion

: **I**nsulated **G**âte **B**ipolar **T**ransistor

: **G**âte **T**run **O**ff.

: **P**roportionnel **I**ntégral

: **F**onction de **T**ransfert en **B**oucle **O**uverte.

: **F**onction de **T**ransfert en **B**oucle **F**ermée

: **M**aximum **P**ower **P**oint **T**racking.

### Liste des abréviations

$p$  : Operateur de LAPLACE

$\rho$  : Densité de l'air  $1.225 \text{ kg.m}^{-3}$ .

$S_{\text{éolienne}}$  : Surface balayée par le rotor de l'éolienne.

$R$  : Rayon du rotor éolien.

$G$  : Gain du multiplicateur.

$C_p$  : Coefficient de puissance de l'éolienne.

$\lambda$  : Vitesse relative de l'éolienne.

$\beta$  : L'angle de calage (l'angle de l'orientation des pales).

$P_{\text{vent}}$  : Puissance du vent.

$V_{\text{vent}}$  : Vitesse du vent.

$P_{\text{éolienne}}$  : La Puissance extraite par l'éolienne.

$C_g$  ; Couple de la génératrice.

$C_{\text{éolienne}}$  : Couple de l'éolienne (aérodynamique).

$C_f$  : Le couple résistant dû aux frottements.

$f$  : Le coefficient de frottement.

$P_{\text{nom}}$  : Puissance nominale.

---

## Listes des acronymes et abréviations

---

$C_{em-ref}$  : Couple électromagnétique de référence.

$K_{ass}$  : Régulateur de vitesse.

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

$\Omega_{turbine}$  : La Vitesse de rotation de la turbine.

$\Omega_{turbine-ref}$  : La vitesse de référence de la turbine.

$C_{pmax}$  : Le Coefficient de puissance maximale.

$C_{mec}$  : Le couple mécanique.

$C_{aér\_est}$  : Le couple aérodynamique estimé.

$V_{estimé}$  : La valeur estimée de la vitesse du vent.

$\Omega_{turbine-estimé}$  : La vitesse estimée de la turbine.

$C_p^{opt}$  : Coefficient de puissance optimale.

$S, r$  : Indice du stator, du rotor.

$d, q$  : Indice des composantes orthogonales directs et en quadrature.

$V_A, V_B, V_C$  : Tension aux phases A, B et C.

$I_{ds}, I_{qs}$  : Composant direct du stator dans le repère Park.

$g$  : Glissement d'une machine asynchrone.

$f_1, f_2$  : Fréquence statorique et rotorique.

$R_s, R_r$  : Résistance d'une phase statorique et rotorique.

$L_s, L_r$  : Inductances cycliques statorique et rotorique.

$M$  : Inductance mutuelle cyclique stator-rotor (magnétisante).

$M_s, M_r$  : Inductances mutuelles stator-stator et rotot-rotor.

$M_{sr}$  : Inductance mutuelle stator-rotor.

$\Phi_s, \Phi_r$  : Respectivement flux statorique et rotorique.

$\Phi_{ds}, \Phi_{qs}, \Phi_{dr}, \Phi_{dr}$  : Respectivement flux statorique et flux rotorique sur les axes d et q.

---

## Listes des acronymes et abréviations

---

$C_e, C_r, C_f$  : Couple électromagnétique, couple résistant et couple de frottement.

$J$  : Moment d'inertie de la machine.

$f_r$  : Coefficient de frottements visqueux de la machine.

$p$  : Nombre de paires de pôles de la MADA.

$V_s$  : Module du vecteur tension statorique.

$V_{DC}$  : Tension aux bornes de la capacité du filtre.

$V_{red}$  : Tension redressé.

$\Omega_r, \Omega_s$  : Vitesse de rotation de la machine, vitesse de synchronisme en rad/sec.

$\omega_s, \omega_r, \omega_{sl}$  : Pulsations électriques des grandeurs statoriques, rotoriques et de glissement.

$L_f$  : Inductance du filtre LC.

$C_f$  : Capacité du filtre LC.

$P_s, Q_s$  : Puissances active et réactive statoriques de la MADA.

$P_{mes}, Q_{mes}$  : Puissances électriques mesurées à la sortie du MADA.

$P_{ref}, Q_{ref}$  : Puissances électriques de références de la MADA.

$\varepsilon d, \varepsilon q$  : Perturbations représentant la somme de  $v_1$  et des résidus de couplage.

$K_p, k_i$  : Gains proportionnel et intégral du régulateur PI.

---

## Table des matières

<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1: Généralités sur les systèmes éoliens</b>	
<b>1.1 Introduction.....</b>	<b>4</b>
<b>1.2 L'énergie éolienne en quelques chiffres .....</b>	<b>4</b>
1.2.1 L'énergie éolienne pour quoi faire ?.....	4
1.2.2 La situation actuelle.....	5
<b>1.3 Définition d'un système éolien.....</b>	<b>6</b>
<b>1.4 Descriptif et qualités de l'énergie éolienne.....</b>	<b>7</b>
1.4.1 Définition de l'énergie éolienne.....	7
1.4.2 Les Différents Types des turbines éoliennes .....	8
1.4.3 Principaux composants d'une éolienne.....	10
<b>1.5 Le Principe De Fonctionnement D'une Eolienne.....</b>	<b>12</b>
<b>1.6 Emplacement des parcs éoliens.....</b>	<b>13</b>
1.6.1 Taille des aérogénérateurs.....	13
1.6.2 Quelques notions sur le vent.....	14
1.6.3 Classement des éoliennes.....	15
<b>1.7 Aperçu sur les systèmes de conversion électromécanique.....</b>	<b>18</b>
1.7.1 Systèmes utilisant la machine synchrone.....	18
1.7.2 Systèmes utilisant la machine asynchrone .....	19
<b>1.8 Conclusion .....</b>	<b>21</b>

---

## **Chapitre 2 : Modélisation de la turbine éolienne**

<b>2.1 Introduction.....</b>	<b>23</b>
<b>2.2 Modélisation de vent.....</b>	<b>23</b>
<b>2.3 Modélisation de la turbine éolienne.....</b>	<b>24</b>
2.3.1 Modélisation de la turbine.....	24
2.3.2 Modèle du multiplicateur.....	25
2.3.3 Schéma bloc du modèle de la turbine.....	26
2.3.4 Simulations et interprétations des résultats.....	27
<b>2.4 Stratégies de commande de la turbine éolienne.....</b>	<b>28</b>
<b>2.5 La commande dans la zone de fonctionnement en dessous de la puissance nominale.....</b>	<b>28</b>
2.5.1 Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse.....	29
2.5.2 Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse.....	30
<b>2.6 Conclusion .....</b>	<b>33</b>

## **Chapitre 3 : Etude et modélisation de la MADA**

<b>3.1 Introduction.....</b>	<b>35</b>
<b>3.2 Etat de l'art de la MADA.....</b>	<b>35</b>
3.2.1 Description de la machine asynchrone à double alimentation.....	35
<b>3.3 Structure de la machine.....</b>	<b>36</b>
<b>3.4 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation.....</b>	<b>36</b>
<b>3.5 Classification des machines à double alimentation.....</b>	<b>37</b>
<b>3.6 Mode de fonctionnement de la MADA.....</b>	<b>39</b>
3.6.1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.....	39

---

3.6.2	Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone .....	39
3.6.3	Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone.....	40
3.6.4	Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone.....	40
<b>3.7</b>	<b>Domaine d'application de la MADA .....</b>	<b>41</b>
3.7.1	Fonctionnement moteur dans les applications industrielles .....	41
3.7.2	Dans les systèmes d'entraînement à vitesse variable.....	42
3.7.3	Dans les systèmes de génération éolienne à vitesse variable.....	42
<b>3.8</b>	<b>Mise en équation de la MADA.....</b>	<b>43</b>
3.8.1	Hypothèses simplificatrices.....	44
3.8.2	Equations électriques de la machine.....	44
3.8.3	Transformation de PARK.....	46
<b>3.9</b>	<b>Modèle de la machine en représentation d'état.....</b>	<b>49</b>
<b>3.10</b>	<b>Simulation et interprétation des résultats.....</b>	<b>52</b>
3.10.1	Démarrage à vide.....	52
3.10.2	Introduction du couple de charge.....	53
<b>3.11</b>	<b>Alimentation de la MADA.....</b>	<b>54</b>
<b>3.12</b>	<b>Intérêt de la MADA.....</b>	<b>54</b>
<b>3.13</b>	<b>Avantages et inconvénients de la MADA.....</b>	<b>55</b>
<b>3.14</b>	<b>La chaîne de conversion.....</b>	<b>55</b>
<b>3.15</b>	<b>Modélisation du redresseur triphasé à diodes.....</b>	<b>56</b>
<b>3.16</b>	<b>Modélisation du filtre.....</b>	<b>57</b>
<b>3.17</b>	<b>Association onduleur – MADA (rotor).....</b>	<b>58</b>
3.17.1	Modèle mathématique de l'onduleur de tension .....	58

---

3.17.2	Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI).....	60
<b>3.18</b>	<b>Résultats de simulation.....</b>	<b>61</b>
<b>3.19</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>63</b>
<b>Chapitre 4 : Commande vectorielle de la MADA</b>		
<b>4.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>65</b>
<b>4.2</b>	<b>Principe de la commande vectorielle de la MADA. ....</b>	<b>65</b>
<b>4.3</b>	<b>Principe de la commande à flux orienté.....</b>	<b>66</b>
<b>4.4</b>	<b>Procède d'orientation du flux .....</b>	<b>67</b>
<b>4.5</b>	<b>La commande vectorielle directe.....</b>	<b>73</b>
4.5.1	Définition générale.....	73
4.5.2	Commande directe en puissance active et réactive de la MADA en génératrice.....	73
<b>4.6</b>	<b>Commande vectorielle indirecte.....</b>	<b>74</b>
4.6.1	Définition générale.....	74
4.6.2	Commande indirecte en puissance active et réactive de la MADA en génératrice.....	74
<b>4.7</b>	<b>Commande avec boucle de courant.....</b>	<b>75</b>
<b>4.8</b>	<b>Etude de la régulation pour la commande.....</b>	<b>75</b>
4.8 .1	Synthèse du régulateur Proportionnel-Intégral (PI).....	75
<b>4 .9</b>	<b>Simulation et interprétation des résultats.....</b>	<b>77</b>
4.9.1	Contrôle de facteur de puissance.....	80
<b>4.10</b>	<b>Robustesse de la commande.....</b>	<b>81</b>
4.10.1	Commande directe.....	81
4.10.2	Commande indirecte.....	84

---

# Table des matières

---

<b>4.11 Conclusion.....</b>	<b>86</b>
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>88</b>
<b>Annexes .....</b>	<b>90</b>
<b>Références Bibliographiques.....</b>	<b>93</b>



## **1.1 Introduction :**

Ces dernières années, l'intérêt d'utilisation d'énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne. Cette dernière sert à transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones ou asynchrones [3].

Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.

Les éoliennes de dernière génération fonctionnent à vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de diminuer les efforts mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe. C'est le développement des variateurs électroniques qui permet de contrôler la vitesse de rotation des éoliennes à chaque instant. Le vent est une grandeur aléatoire, de nature très fluctuante.

Les variations de la puissance résultante des fluctuations du vent constituent la perturbation principale de la chaîne de conversion éolienne. De ce fait, les éoliennes sont considérées comme des génératrices de puissance variable. Connectées sur un réseau électrique, les générateurs éoliens n'imposent pas l'amplitude de la tension et ne règlent pas le rapport puissance-fréquence, autrement dit, elles ne participent pas aux services systèmes, et donc perturbent d'autant plus la stabilité des réseaux que leur taux de pénétration est important. Avec l'utilisation de l'électronique de puissance, de nouvelles technologies sont apparues pour optimiser cette génération.

## **1.2 L'énergie éolienne en quelques chiffres :**

### **1.2.1 L'énergie éolienne pour quoi faire ?**

L'énergie éolienne est utilisée par l'homme depuis très longtemps déjà. Elle remplaça les rames pour faire avancer les navires, elle fut utilisée pour actionner les meules des moulins, elle permet encore le pompage d'eau pour abreuver les bêtes dans les champs.

Depuis plus de 100 ans, elle est utilisée pour produire de l'électricité, source d'énergie fondamentale dans notre société actuelle. En effet, on utilise l'électricité pour la plupart de nos activités, que ce soit dans le domaine domestique ou industriel.

L'énergie éolienne est considérée comme la plus prometteuse des énergies renouvelables à développer pour remplacer le charbon, le pétrole, le gaz et même le nucléaire.

Ainsi l'homme a souvent besoin d'énergie électrique dans des proportions faibles ou importantes selon l'utilisation qu'il en fait:

- Pour faire fonctionner des stations météo ou toutes autres installations électriques isolées à faible consommation, une éolienne de petite taille peut fournir cette énergie tout au long de l'année.
- Pour alimenter en éclairage des maisons ou villages dans des contrées isolées exposées au vent, des installations d'éoliennes de quelques mètres de diamètre sont choses courantes.
- Pour alimenter en électricité des villes tout en produisant une énergie propre, on utilise des éoliennes de plusieurs dizaines de mètres de diamètre pouvant produire jusqu'à 4.5 MW [4].

### 1.2.2 La situation actuelle

La capacité mondiale a atteint 196630 MW, dont 37642 ont été ajoutés en 2010, soit légèrement moins qu'en 2009 [37].

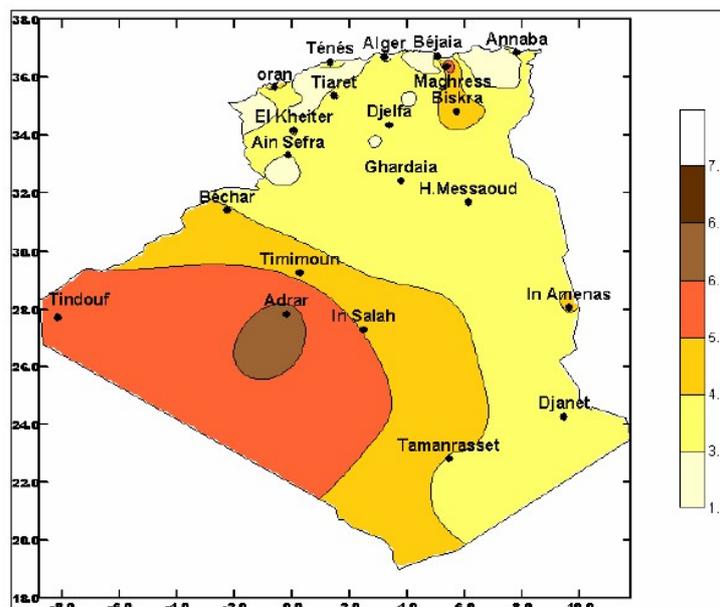
En 2010, la capacité mondiale installée a atteint 196630 MW, après 159766 MW en 2009. Les investissements dans les nouveaux équipements ont diminué dans de nombreux pays du monde. Pour la première fois depuis plus de 20 ans, le marché est inférieur à celui de l'année précédente a atteint un volume global de 37642 MW, après 38312 MW en 2009 [37].

Le Maroc produit **140 MW** par an (2007), cette production va s'accroître dans les années à venir. Le Maroc est le premier producteur d'énergie éolienne en Afrique.

Dans notre pays, les énergies renouvelables n'ont pas connu le développement que permet leur disponibilité, et qu'impose leur importance pour le développement économique et social. L'énergie éolienne en Algérie est exploitée seulement pour le pompage de l'eau,

première expérience du pompage d'eau avec une éolienne en Afrique a été effectuée à Adrar en 1957 à ksar Sidi-Aïssa pour l'irrigation de 50 Hectares [6].

L'Algérie a un régime de vent modéré à (6 m/s), selon la carte des vents présentée sur la **figure 1.1**

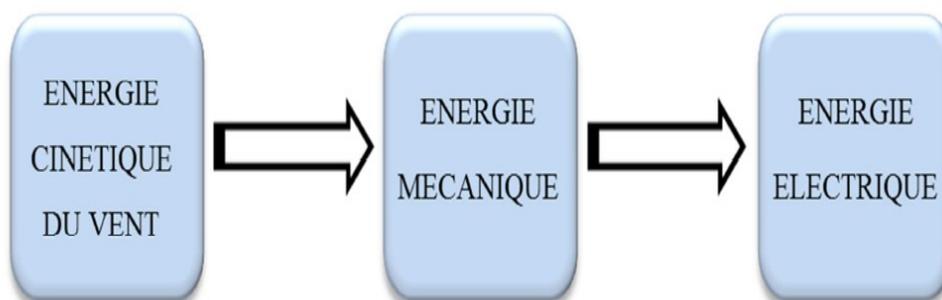


**Figure 1.1** : Carte de vent en Algérie.

Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les Hauts Plateaux et le Sahara. Le potentiel énergétique est énorme sachant que la région d'Adrar se trouve dans un couloir de vent de 6 m/s et se prolongent jusque à 20 m/s tandis que pour In Amenas le régime n'excède pas 14 m/s [7]. Les turbines éoliennes qu'on peut utiliser pour le développement du sud Algérien sont de petite échelle, où l'installation et l'entretien sont faibles et de coût abordable. Plusieurs éoliennes sont installées actuellement à Adrar pour le pompage d'eau [6].

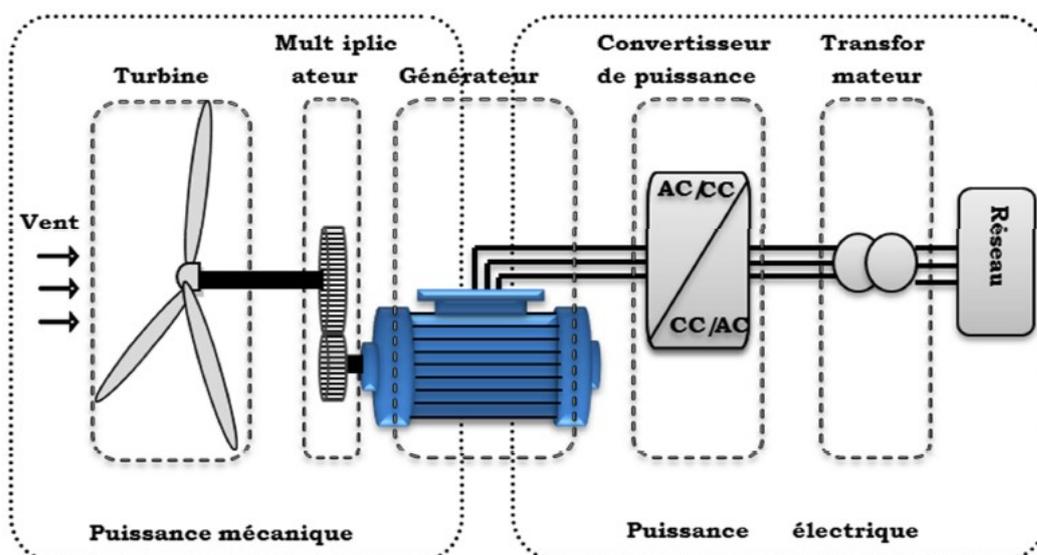
### 1.3 Définition d'un système éolien

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [6].



**Figure 1.2 :** Conversion de l'énergie cinétique du vent [6].

Le SCE (Système de Conversion Eolien) est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique. Selon la figure 1.2 [5].



**Figure1.3 :** Principaux organes du système de conversion éolien [8].

## 1.4 Descriptif et qualités de l'énergie éolienne

### 1.4.1 Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en L'énergie corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des

vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales des grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [38].

Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (nacelle, mât, pales et multiplicateur notamment) doivent être technologiquement avancés et sont par conséquent onéreux. L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière.

#### 1.4.2 Les Différents Types des turbines éoliennes :

Les turbines éoliennes sont classées selon leur puissance délivrée et aussi selon leur structure :

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

**Tableau 1.1** : Classification des turbines éoliennes.

##### ***a Classement selon la puissance délivrée :***

Les turbines éoliennes sont classées en 3 catégories : les petites éoliennes, les moyennes et puis les grandes éoliennes. Le tableau-I-1 présente une classification des turbines éoliennes selon leur taille ainsi que leur puissance délivrée.

**b Classement selon la structure :**

**Figure1.4** : Différents types d'éoliennes.

Il existe deux types de structure d'éoliennes :

**B.1 . LES EOLIENNES A AXE VERTICAL :**

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles et il s'agit d'une turbine à axe vertical de forme cylindrique qui peut facilement être installée sur le toit d'une maison moderne et dont les avantages sont :

- Faible impact visuel,
- Pratiquement pas de bruit
- Très grande tolérance aux vents forts.

Il existe des systèmes grâce auxquels les ailes se décalent plus ou moins pour augmenter l'étendue des vitesses d'action. Si la vitesse du vent est basse, les ailes sont complètement déployées, si la vitesse est trop forte, les ailes sont complètement fermées et l'éolienne forme un cylindre.

Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées voire actuellement abandonnées.

### B.2 LES EOLIENNES A AXE HORIZONTALE :

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion.

Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité.

### **1.4.3 Principaux composants d'une éolienne**

Une éolienne (ou aérogénérateur) est une machine qui transforme l'énergie cinétique du Vent (déplacement d'une masse d'air) en énergie électrique. Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins une « éolienne » classique est généralement constituée de :

#### **A. Le mât :**

Généralement en métal, supporte l'ensemble des équipements permettant de produire l'électricité (nacelle + rotor). Il est fixé sur une fondation implantée dans le sol, une lourde semelle en béton qui assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne. Le mât des éoliennes atteint au jour d'hui 80 m de haut pour les plus puissantes (exceptionnellement jusqu'à 100 m). Les éoliennes sont si haut perchées car le vent souffle plus fort à quelques dizaines de mètres de hauteur, où il n'est pas perturbé par l'effet des obstacles : relief, arbres, maisons...

**B. Un rotor :**

Un rotor est composé de plusieurs pales (en général 3) et du nez de l'éolienne. Les pales sont aujourd'hui faites de matériaux composites à la fois légers et assurant une rigidité et une résistance suffisantes : polyester renforcé de fibre de verre et/ou fibre de carbone. Leur longueur atteint actuellement entre 30 et 55 mètres, soit un diamètre du rotor compris entre 60 et 110 mètres. La puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par ses pales (un cercle), donc au carré de son diamètre rotor.

- **Les rotors à vitesse fixe** sont souvent munis d'un système d'orientation de la pale permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ce système allie ainsi simplicité et faible coût.
- **Les rotors à vitesse variable** sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié voire supprimé. Toutefois, une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées actuellement, les matériaux composites tels la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone est très utilisée car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique.

**C. Une nacelle :**

Une nacelle est montée au sommet du mât et abritant les composants mécaniques et pneumatiques et certains composants électriques et électroniques nécessaires au bon fonctionnement de l'éolienne. Le transport de l'électricité produite dans la nacelle jusqu'au sol est assuré par des câbles électriques descendant à l'intérieur du mât de l'éolienne.

Les différents composants d'une nacelle:

1. **Frein** : il sert à arrêter l'éolienne en cas d'urgence, ou pour effectuer des réparations.
2. **La génératrice** : La génératrice est un alternateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. Elle peut être synchrone ou asynchrone

3. **Le multiplicateur** Le multiplicateur relie l'arbre (primaire) de la turbine éolienne à l'arbre (secondaire) de la génératrice électrique. Il permet de transformer une puissance à couple élevé et à vitesse lente en une puissance à couple faible et vitesse rapide.
4. **Convertisseur électronique de puissance** : il permet le traitement des signaux générés par la génératrice.
5. **Divers dispositifs de refroidissement** (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau ou d'huile.

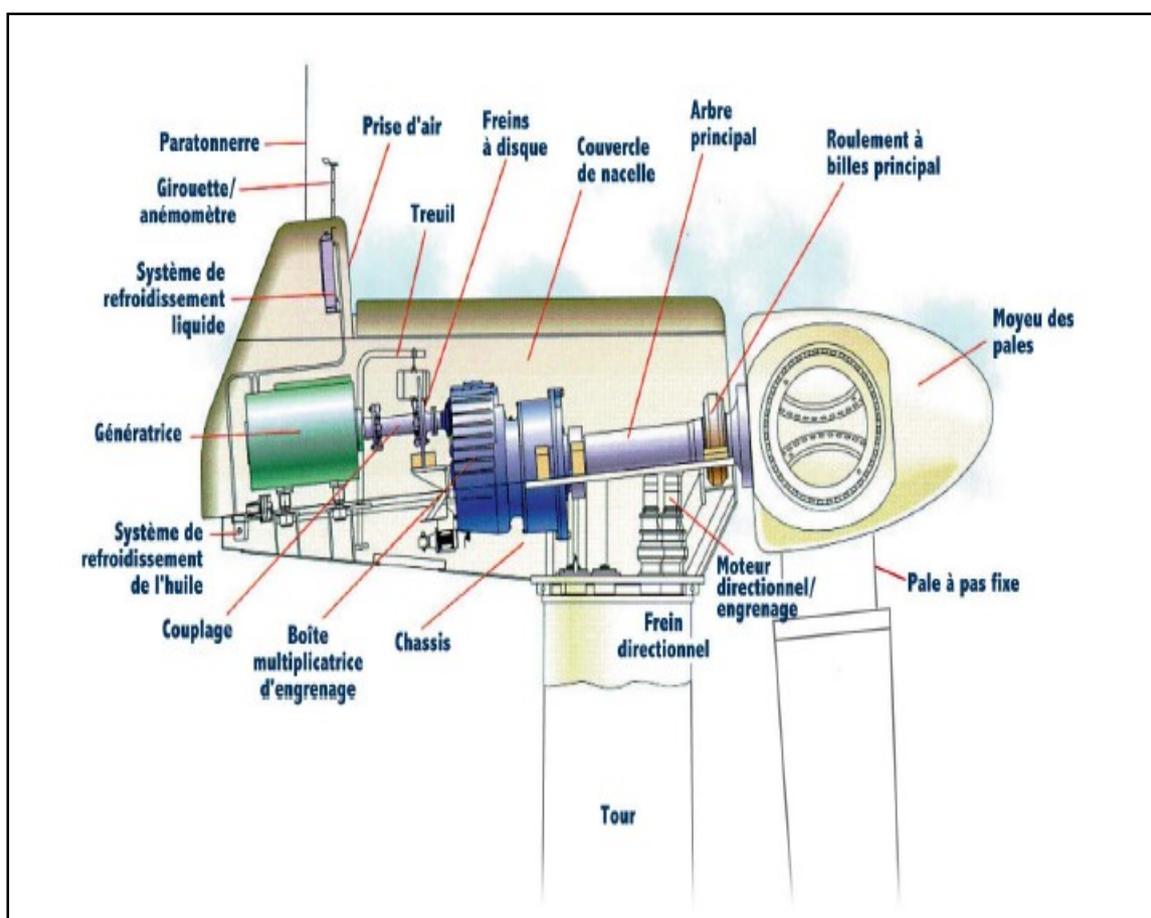


Figure1.5 : Schémas d'une éolienne.

## 1.5 Le Principe De Fonctionnement D'une Eolienne

Un système éolien a pour rôle d'extraire une partie de l'énergie cinétique du vent et la convertir en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. Cette conversion se fait en deux étapes [38],[9] :

- ✚ Au niveau de la turbine, qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent pour la convertir en énergie mécanique. Cette dernière est transmise à la génératrice au moyen d'un arbre de transmission et un éventuel réducteur de vitesse.
- ✚ Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

L'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécaniques, électriques ou d'automatique. [10]

## 1.6 Emplacement des parcs éoliens

Les parcs éoliens se situent naturellement là où il y a un niveau de vent suffisant tout au long de l'année pour permettre une production maximale. Les côtes, les bords de mers et les plateaux offrent des conditions intéressantes en termes de vent mais il faut aussi tenir compte de l'impact sur le paysage. Pour ces raisons, lorsque c'est possible, des parcs éoliens offshore sont construits (540 MW offshore installés en Europe fin 2003). Ces derniers comportent des dizaines d'éoliennes comme on peut le voir sur **la figure 1.6**.

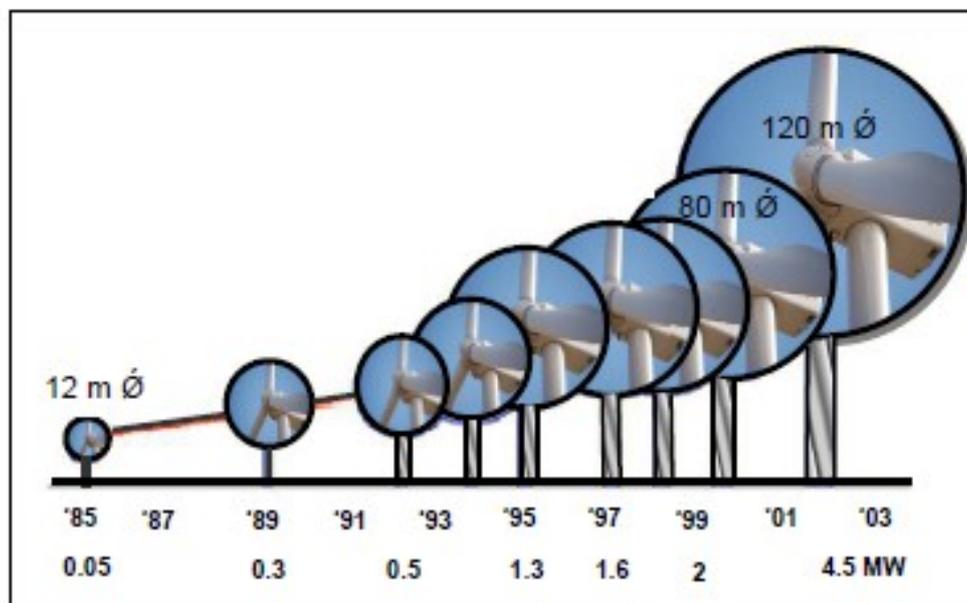


**Figure 1.6.** Les parcs éoliens offshore (a) et onshores (b).

### 1.6.1 Taille des aérogénérateurs

Avec le développement récent et le besoin de fournir des puissances croissantes au réseau, les constructeurs et les chercheurs mettent au point des éoliennes de plus en plus puissantes et donc plus grandes, ce que présente **la figure 1.7**. Pour utiliser le maximum de la force du vent, on cherche à ce que l'hélice balaie une surface où le vent est maximum.

Pour cela les éoliennes sont très haut perchées pour ne pas subir les effets de sol qui freinent le vent.



*La Figure 1.7* : Taille des hélices en m et puissance en MW [4].

Les plus grandes éoliennes commercialisées actuellement possèdent une hélice de plus de 100 mètres de diamètre. Cette hélice est perchée à plus de 100 mètres de hauteur pour produire jusqu'à 4.5 MW [1].

### 1.6.2 Quelques notions sur le vent

La vitesse du vent varie selon les zones géographiques et les saisons, elle est surtout élevée pendant la période d'hiver et au niveau des mers. Le vent est défini par sa direction et sa vitesse. Le vent souffle en principe des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions. Aux latitudes moyennes et aux grandes latitudes, sa direction est cependant modifiée du fait de la rotation de la terre. Le vent devient alors parallèle aux isobares au lieu de leur être perpendiculaire. Dans l'hémisphère nord, le vent tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre autour des aires cycloniques et dans le sens direct autour des zones anticycloniques. Dans l'hémisphère sud, les sens sont inversés par rapport aux précédents.

La vitesse du vent est mesurée avec des anémomètres. Il en existe plusieurs types classés en deux catégories principales (les anémomètres à rotation et les anémomètres à pression).

Une graduation a été établie, selon l'échelle Beaufort qui divise les vents en en fonction de leurs vitesses en 17 catégories dont nous citons quelques-unes au **Tableau 1.2**.

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

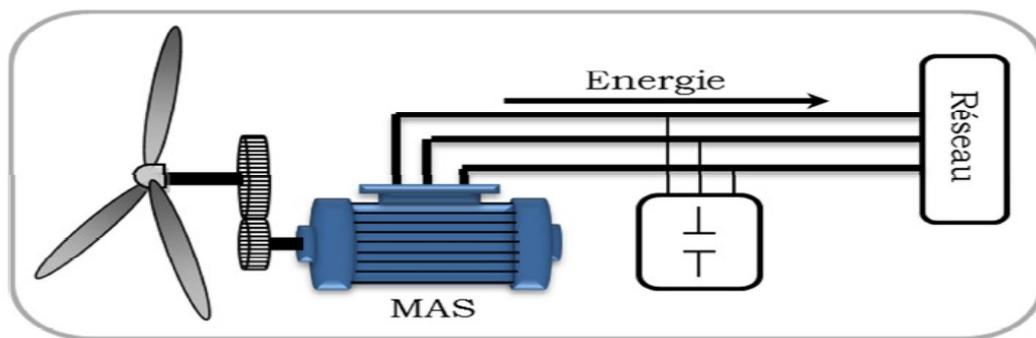
**Tableau 1.2** : Echelle Beaufort.

### 1.6.3 Classement des éoliennes

Il existe essentiellement deux technologies d'éoliennes, celles dont la vitesse est constante et celles dont la vitesse est variable. La partie suivante décrit d'une manière assez générale le fonctionnement de ces deux procédés.

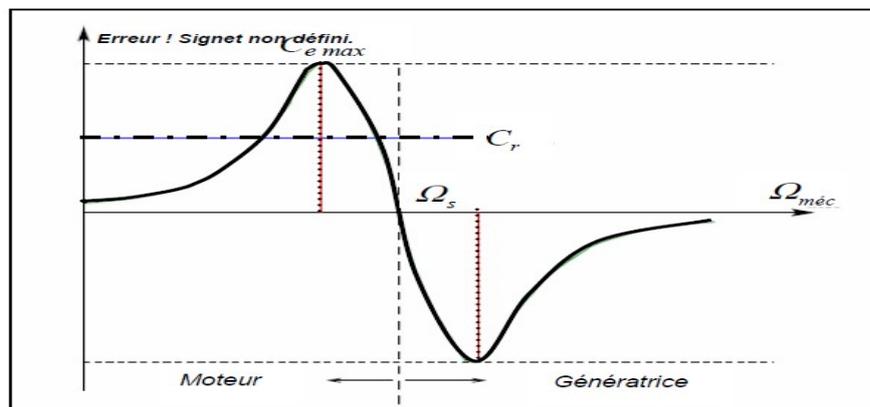
#### **a. Les éoliennes à vitesse fixe**

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau. Sa vitesse  $\Omega_{mec}$  est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice.



**Figure 1.8 :** Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau.

Le couple mécanique entraînant (produit par la turbine) tend à accélérer la vitesse de la génératrice. Cette dernière fonctionne alors en hyper-synchrone et génère de la puissance électrique sur le réseau. Pour une génératrice standard à deux paires de pôles, la vitesse mécanique ( $\Omega_{mec}$ ) est légèrement supérieure à la vitesse du synchronisme  $\Omega_s = 1500 \text{ tr/min}$  ce qui nécessite l'adjonction d'un multiplicateur pour adapter la génératrice à celle du rotor de l'éolienne **figure1.9** [12].

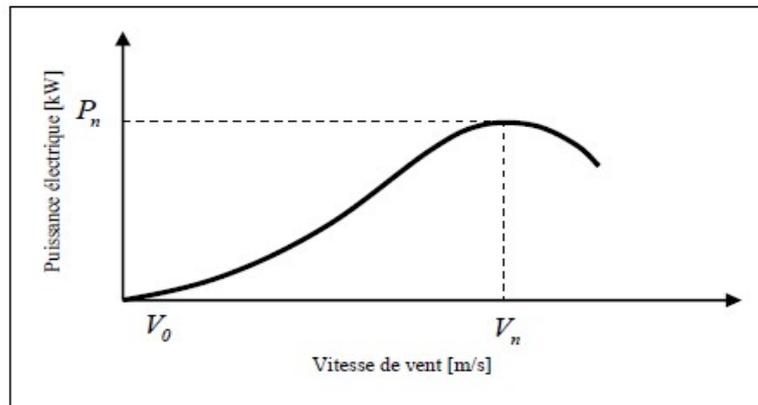


**La Figure 1.9 :** Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone.

On peut distinguer deux technologies d'éoliennes à vitesse fixe : Les éoliennes à décrochage aérodynamique et les éoliennes à pales orientables.

### **a.1. Les éoliennes à décrochage aérodynamique**

Les éoliennes à décrochage aérodynamique (stall) génèrent une puissance électrique variable dont la valeur maximale correspond en général à la puissance nominale de la machine. En dessous de cette valeur, la puissance fournie croît avec la vitesse du vent. Au-delà, la puissance fournie décroît avec la vitesse du vent **figure 1.10** [12].



**Figure 1.10 :** Génération à puissance électrique variable.

(Pales fixes, décrochage aérodynamique)

$P_n$  : La puissance nominale de l'éolienne.

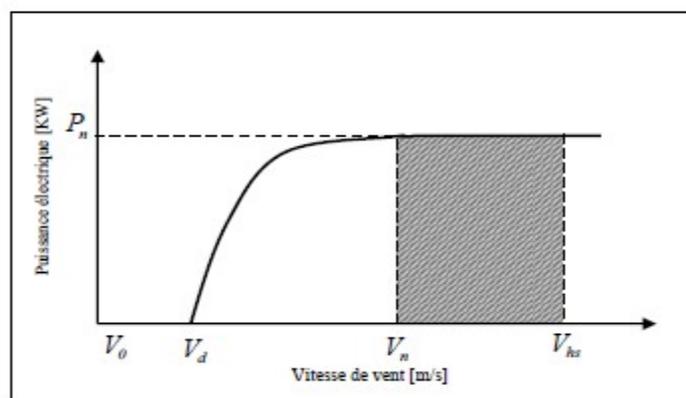
$V_0$  : La valeur de vitesse pour laquelle le rotor de la turbine commence à tourner.

$V_n$  : La valeur de vitesse pour laquelle la puissance nominale est atteinte.

Pour obtenir cette caractéristique de puissance, les pales (fixes) sont conçues avec un profil qui permet d'obtenir une décroissance brusque de la portance à partir d'une vitesse donnée pour laquelle la puissance doit être diminuée. Au-delà de cette vitesse de vent, la puissance diminue très rapidement et un fonctionnement à puissance nominale constante n'est donc pas possible.

### **a.2. Les éoliennes à pales orientables**

L'utilisation d'un système d'orientation des pales permet, par une modification aérodynamique, de maintenir constante la puissance de la machine en fonction de la vitesse du vent et pour une vitesse de vent supérieure à  $V_n$  **figure 1.11** [12].



**Figure 1.11 :** Génération à puissance électrique constante (pales orientables).

Avec

$V_d$  : la vitesse pour laquelle le générateur démarre.

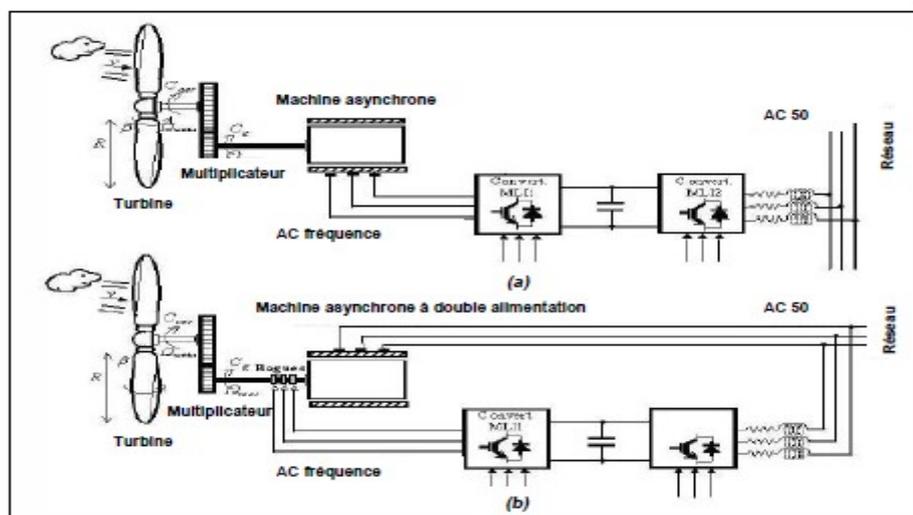
$V_n$  : la vitesse pour laquelle le générateur commence à fournir de la puissance.

$V_{hs}$  : la valeur de la vitesse pour laquelle la machine doit être arrêtée.

## ***b. Les éoliennes à vitesse variable***

### **b.1 Principe de fonctionnement**

Les deux structures existantes des éoliennes à vitesse variable sont présentées sur la **Figure 1.10**



**La Figure1.12:** Éoliennes à vitesse variable.

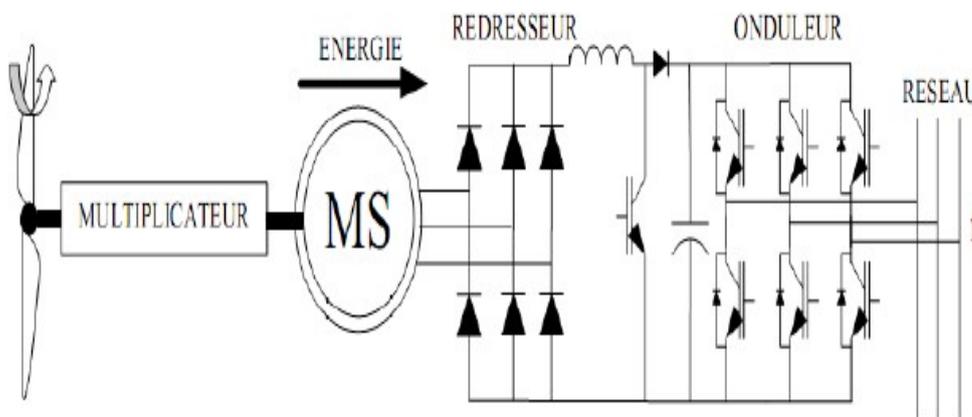
La configuration de la **figure 1.12.a**, est basée sur une machine asynchrone à cage, pilotée au stator de manière à fonctionner à vitesse variable, par des convertisseurs statiques. La configuration de la **figure 1.12.b**, est basée sur une machine asynchrone à double alimentation et à rotor bobiné. La vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance, situés au circuit rotorique.

## **1.7 Aperçu sur les systèmes de conversion électromécanique**

### **1.7.1 Systèmes utilisant la machine synchrone**

La caractéristique (couple-vitesse) d'une machine synchrone utilisée en alternateur exige la maîtrise du synchronisme entre les deux forces électromotrices rotorique et statorique, elles doivent tourner à la même vitesse, ce qui pose un problème dans l'intégration de cette machine dans un système de production d'énergie éolienne.

Une interface électronique entre le stator de la machine et le réseau est systématiquement insérée. Dans la plupart des cas, le stator de l'alternateur est à base des aimants permanents qui sont plutôt coûteux, surtout ceux qui sont à base des terres rares, et risquent de perdre ses caractéristiques magnétiques à cause des fortes variations des couples électromagnétiques. De plus, le convertisseur statique est conçu pour supporter la totalité de la puissance envoyée au réseau. Donc il nous faut des composants de puissances plus performant voire spéciaux.



La Figure 1.13 : Alternateur dans une chaîne de conversion éolienne.

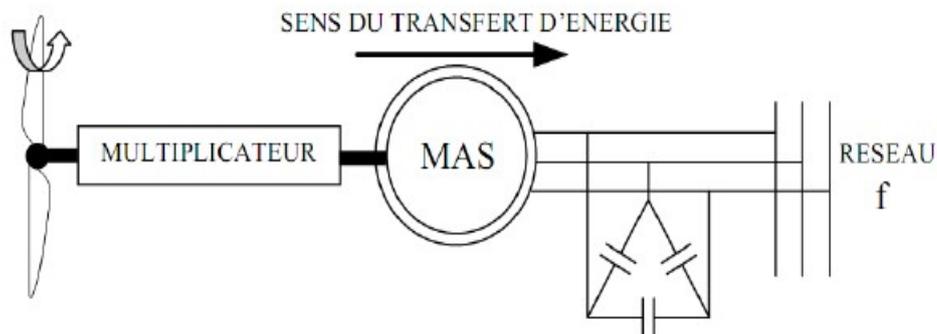
### 1.7.2 Systèmes utilisant la machine asynchrone

Les génératrices asynchrones, à cage d'écureuil ou à double alimentation, équipent actuellement la majorité des éoliennes dans le monde. Contrairement à l'habitude d'utiliser la machine asynchrone à cage d'écureuil comme moteur, cette machine est toute à fait réversible et peut répondre aux exigences extrêmes que présente l'énergie éolienne à cause de sa robustesse, son faible coût ainsi que l'absence du système collecteur-balais ou les systèmes de contact glissant.

Par contre, pour s'assurer qu'on est dans la zone stable de fonctionnement de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil on doit travailler aux faibles glissements (autour de synchronisme (point  $g=0$ )). Le nombre des paires de pôles de la machine est fixe, donc on doit fonctionner sur une plage très serrée (glissements inférieur à 2%).

Si le glissement devient important, les courants statoriques augmentent en présentant des pics qui peuvent être destructifs car le stator de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil est connecté directement au réseau (éolienne à vitesse fixe) **figure 1.14**.

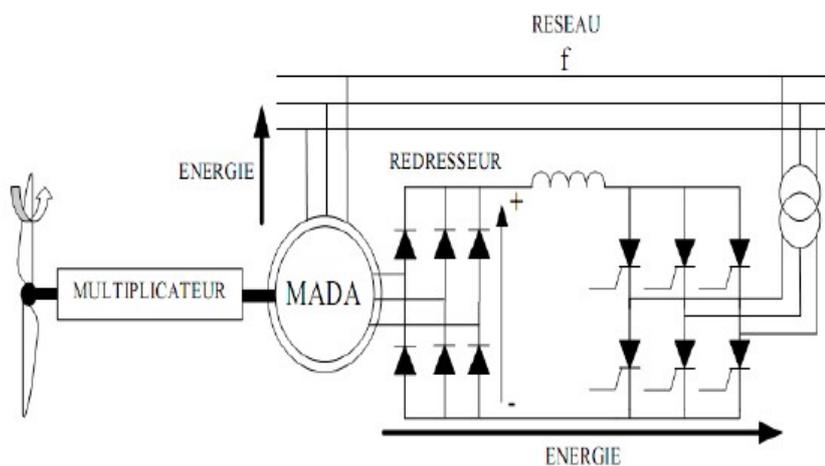
De plus, ce type de convertisseur électromécanique est consommateur de l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance du réseau.



**Figure 1.14 :** Machine asynchrone dans une chaîne de conversion éolienne.

Par conséquent, la MADA a trouvé la voie libre pour s'émerger en puissance dans le domaine de la production de l'énergie éolienne. Cette machine possède la caractéristique primordiale pour un bon fonctionnement d'un système éolien : travailler sur une grande plage de variation de vitesse, en s'appuyant sur sa structure en double alimentation. La configuration la plus simple est de connecter le stator de la MADA directement au réseau (Avec un système de protection évidemment) et le rotor au réseau aussi mais à travers un convertisseur statique.

Dans cette configuration, le convertisseur statique est dimensionné (à une fraction de la puissance nominale de l'éolienne) uniquement pour faire transiter la puissance destinée à la magnétisation de la machine et il est donc moins coûteux **figure1.15**.



**Figure.1.15 :** MADA dans une chaîne de conversion éolienne.

## 1.8 Conclusion

Ce chapitre représente un état de l'art sur les systèmes de conversion éolien qu'on a essayé de les présenter d'une façon générale les différentes structures existantes : les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal, et leurs avantages et inconvénients les uns par rapport aux autres.

A la fin de ce chapitre, on a donné un aperçu sur les systèmes de conversion électromécanique et les différentes génératrices utilisées dans les éoliennes récentes tout en mettant en valeur l'intérêt de l'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation dans les aérogénérateurs

## 2.1 Introduction:

La turbine éolienne permet la conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique transmise à l'ordre de la génératrice. Les différents éléments constituant une éolienne sont conçus pour maximiser la conversion énergétique. L'objectif est d'avoir un bon compromis entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice. Pour satisfaire cela, l'éolienne doit comporter deux systèmes qui permettent de la contrôler mécaniquement et électriquement.

On s'intéresse dans ce chapitre à la modélisation de la turbine éolienne ainsi qu'à son contrôle.

## 2.2 Modélisation de vent

L'énergie cinétique continue dans le vent est transformée en partie en énergie mécanique par la turbine, puis en énergie électrique par le générateur. C'est donc une variable importante à modéliser car la précision des simulations dépendra de la qualité de son modèle. Le choix géographique d'un site éolien est primordial dans un projet de production d'énergie. [13]

Les caractéristiques du vent vont déterminer la quantité de l'énergie qui pourra être effectivement extraite du gisement éolien, de nombreux travaux sur la modélisation du vent ont été réalisés, l'un des principes retenus consiste à générer l'allure temporelle du vent à partir d'un bruit blanc sur lequel on applique une fonction de transfert à déterminer. Les paramètres de cette fonction de transfert dépendent des grandeurs caractéristiques du site et de la nature du vent. [13]

Donc la vitesse du vent va être décomposée en deux composantes :

$$V(t) = V_0 + V_T(t) \quad (2.1)$$

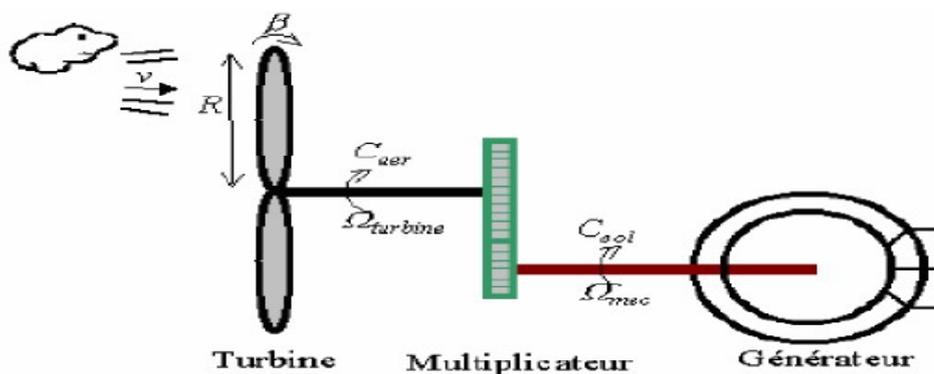
- ✓ Une composante turbulente du vent  $V_T(t)$  est un processus aléatoire stationnaire (Ne varie pas avec la vitesse moyenne du vent).
- ✓ Une composante lente  $V_0$ ; c'est la moyenne de la vitesse du vent variant régulièrement sur de plus longues périodes dans un site donné. [13]

## 2.3 Modélisation de la turbine éolienne :

La turbine qui sera modélisé comporte trois pales de longueur  $R$ , fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse  $turbine \Omega$ , qui entraînera une génératrice (MADA) à travers un multiplicateur de vitesse de gain  $G$ .

### 2.3.1 Modélisation de la turbine :

La **figure 2.1** montre le schéma d'une turbine éolienne



**Figure 2.1:** Schéma d'une turbine éolienne.

#### a La puissance d'une éolienne

La puissance cinétique du vent à travers un disque éolien de rayon  $R$ , est donnée par la relation suivante [12] :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} S_{éolienne} \rho V_v^3 \quad (2.2)$$

$S_{éolienne}$ : La surface balayée par l'éolienne.

$\rho$ : La masse volumique de l'air ( $1.225 \text{ Kg/m}^3$ ).

$V_v$ : La vitesse du vent.

#### b La puissance aérodynamique

Toutefois, toute l'énergie ne peut être captée, car la vitesse du vent n'est pas nulle après l'éolienne. On introduit alors un coefficient  $C_p$  appelé coefficient de performance, qui dépend des caractéristiques aérodynamiques des pales. Ce coefficient correspond au rendement du rotor de l'éolienne [1], [5], [12].

La puissance sur l'arbre du rotor ou la puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit :

$$P_{aer} = C_p P_v = C_p(\lambda, \beta) \frac{1}{2} S_{\text{éolienne}} \rho V_v^3 \quad (2.3)$$

$\beta$ : Est l'Angle d'orientation des pales.

$\lambda$ : Est le rapport de vitesse.

$C_p$ : Est le coefficient de performance ou coefficient de puissance.

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.44 - 0.0167 - \beta) \sin\left(\frac{\pi(\lambda-3)}{15-0.3\beta}\right) - 0.00184 (\lambda - 3) \beta \quad (2.4)$$

$\lambda$  : est le rapport de vitesse défini par :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_{\text{turbine}}}{V_v(t)} \quad (2.5)$$

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

$$C_{aéro} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{\text{turbine}}} = C_p(\lambda, \beta) \frac{1}{2} S_{\text{éolienne}} \rho V_v^3 \cdot \frac{1}{\Omega_{\text{turbine}}} \quad (2.6)$$

### **c Le coefficient de puissance**

Le représente le rapport de la puissance récupérée sur la puissance récupérable ce coefficient présente un maximum de 16/27 soit 0,59 [5] [14] .C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative.

### **2.3.2 Modèle du multiplicateur**

Le multiplicateur est modélisé mathématiquement comme suit :

Avec :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (2.7)$$

$C_g$  : Couple issu du multiplicateur.

$C_{aer}$  : Couple aérodynamique.

$G$  : gain du multiplicateur.

Pour la vitesse, on aura :

$$\Omega_{\text{turbine}} = \frac{\Omega_{\text{méc}}}{G} \quad (2.8)$$

**a Equation dynamique de l'arbre**

La modélisation de la transmission mécanique se résume donc comme suit :

$$J \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = \sum \text{des couples} = C_{méc} \quad (2.9)$$

$J$  = C'est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice

$C_{méc}$  = C'est le couple mécanique, ce dernier prend en compte :

- Le couple électromagnétique produit par la génératrice  $C_{em}$  .
- Le couple de frottement visqueux  $C_{vis}$  .
- Le couple issu du multiplicateur  $C_g$ .

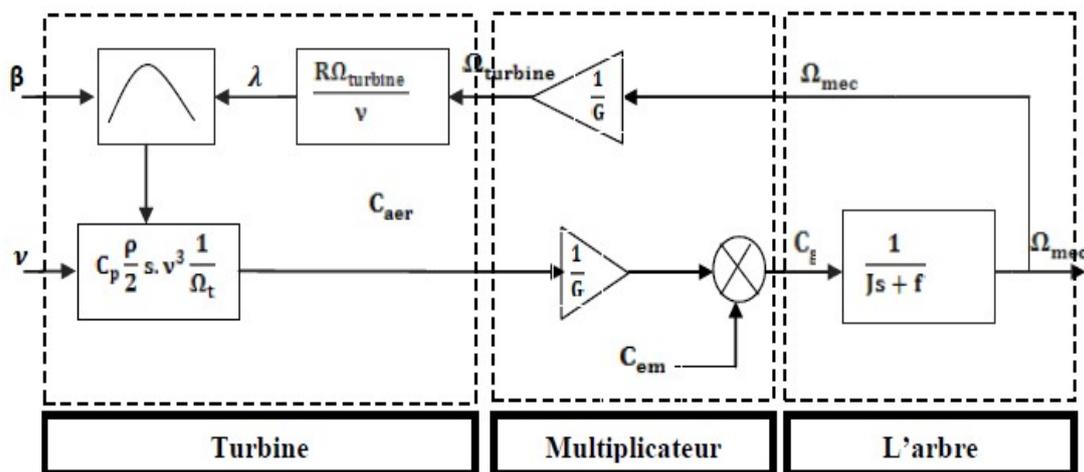
$$C_{méc} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (2.10)$$

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

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{méc} \quad (2.11)$$

**2.3.3 Schéma bloc du modèle de la turbine**

La **figure 2.2** montre le schéma bloc du modèle de la turbine [13].



**Figure. 2.2** : Schéma bloc du modèle de la turbine.

La turbine génère le couple aérodynamique (équation (2.6)) qui est appliquée au multiplicateur.

Les entrées de la turbine sont :

$V$  : La vitesse du vent.

$\beta$ : L'angle d'orientation des pales.

$\Omega_{\text{turbine}}$  : La vitesse de rotation de la turbine.

Le multiplicateur transforme la vitesse mécanique et le couple aérodynamique respectivement en vitesse de la turbine et en couple de multiplicateur (équation (2. 5), (2. 6)) Le modèle de l'arbre d'écrit la dynamique de la vitesse mécanique il a donc deux entrées ;

- Le couple du multiplicateur.
- Le couple électromagnétique fourni par la génératrice.

La vitesse de la turbine peut être contrôlée par action sur deux entrées :

- L'angle de la pale.
- Le couple électromagnétique de la génératrice.

La vitesse du vent est considérée comme une entrée perturbatrice à ce système.

### 2.3.4 Simulations et interprétations des résultats :

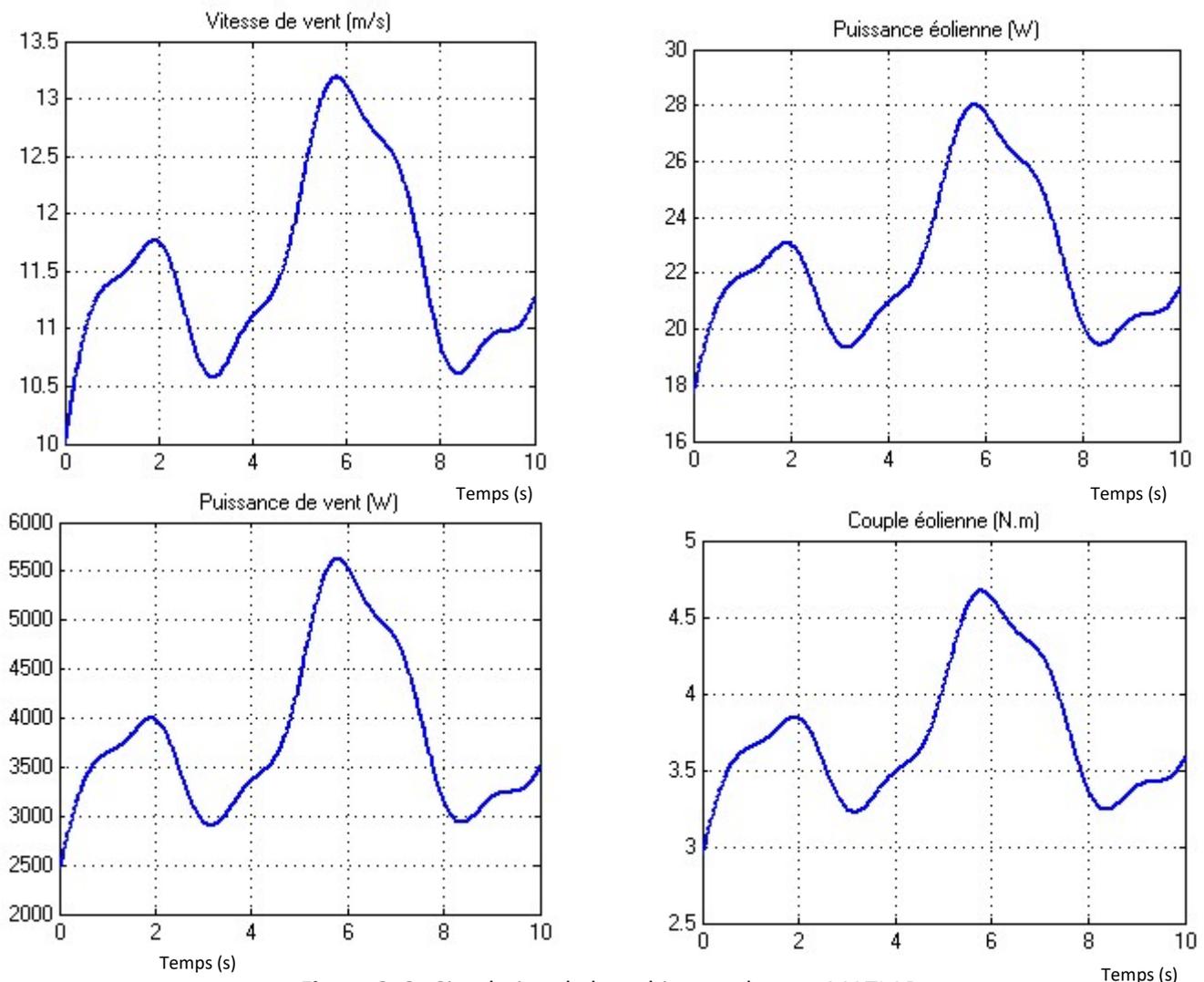


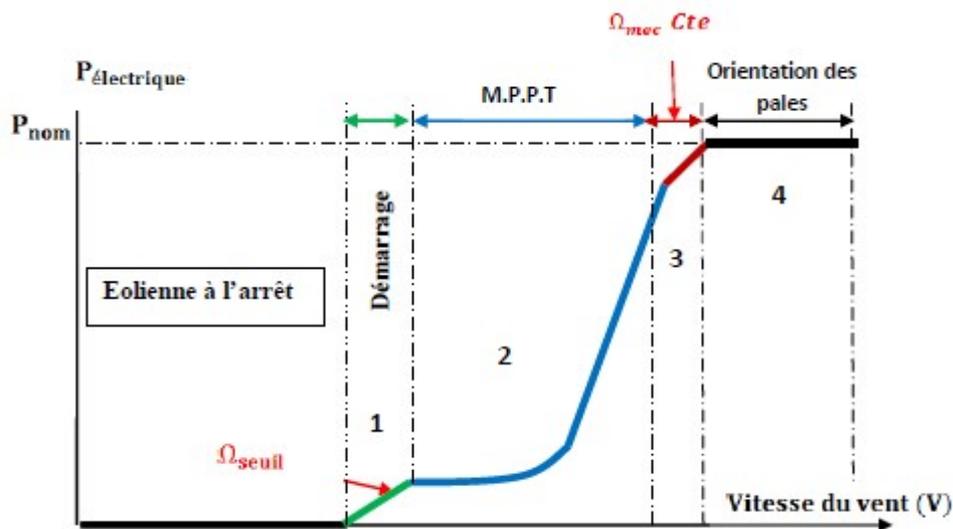
Figure 2. 3 : Simulation de la turbine mode sous MATLAB.

La **figure 2.3** montre que la puissance au niveau de la turbine dépend de la variation de la vitesse du vent, et on a présenté le vent qui est appliqué pour la turbine de l'éolienne pour voir les changements de la vitesse et la puissance de la turbine par rapport au vent.

## 2.4 Stratégies de commande de la turbine éolienne

Dans le domaine de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable, on distingue deux régions: en dessous et au dessus de la vitesse nominale du vent. La vitesse de la turbine peut être contrôlée par action sur deux entrées : l'angle de la pale et le couple électromagnétique de la génératrice. Il est alors important d'étudier le rôle et les effets du système de commande en fonctionnement à charge partielle, c'est à dire en dessous de la puissance nominale. [16]

## 2.5 La commande dans la zone de fonctionnement en dessous de la puissance nominale



**Figure 2.4** : Caractéristique Puissance-Vitesse typique d'une éolienne à grande puissance.

- **Zone 1** : C'est la zone de démarrage de la machine ; elle commence lorsque la vitesse mécanique est supérieure à une certaine vitesse  $\Omega$ . (C'est la vitesse mécanique de la génératrice pour laquelle éolienne a démarré).
- **Zone 2** : Lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale du vent est appliqué « MPPT » (Maximum Power Point Tracking). Pour extraire le maximum de puissance, l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale ( $\beta=2^\circ$ ) afin d'obtenir un  $C_p$  maximal.

Dans cette zone, la vitesse mécanique varie et peut atteindre une valeur proche de la vitesse nominale.

- **Zone 3** : Au-delà, l'éolienne fonctionne à vitesse constante. Dans cette zone, la puissance de la génératrice atteint des valeurs plus importantes, jusqu'à **90%** de la puissance nominale  $P_{nom}$ .
- **Zone 4** : Arrivée à la puissance nominale  $P_{nom}$ , une limitation de la puissance générée est effectuée à l'aide d'un système d'orientation des pales : Le Pitch contrôle. Par sécurité, si la vitesse du vent devient trop importante et risque d'endommager l'éolienne, l'angle de calage des pales se fixe à  $90^\circ$ . C'est la mise en drapeau qui met fin au fonctionnement de l'éolienne jusqu'à ce que la vitesse du vent devienne moins importante.

### 2.5.1 Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse

La nature fluctuante du vent engendre des perturbations dans le système de conversion éolien, et crée des variations continues de puissance. De cet effet, il est supposé que le couple électromagnétique développé par la machine est égal à sa valeur de référence quel que soit la puissance générée.

$$C_{em} = C_{em-ref} \quad (2.12)$$

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

$$C_{em-r} = K_{ass}(\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (2.13)$$

$K_{ass}$ : Régulateur de vitesse.

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

Selon l'équation (2.5), la vitesse de rotation de la turbine est égale à :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\lambda V_v}{R} \quad (2.14)$$

La vitesse de référence de la turbine correspond à la vitesse spécifique  $\lambda_{opt}$  et le coefficient de puissance maximale  $C_{pmax}$  peut se déduire de (2.15) :

$$\Omega_{turbine-ref} = \frac{\lambda_{opt} V_v}{R} \quad (2.15)$$

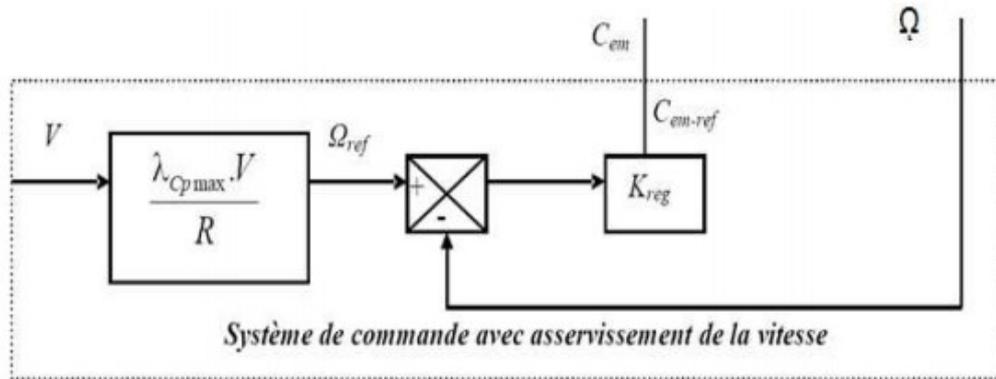


Figure 2.5 : MPPT avec asservissement de la vitesse.

## 2.5.2 Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse

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

Cette méthode est basée sur l'hypothèse que la vitesse du vent, et par conséquent la vitesse de rotation de la turbine, varient très peu en régime permanent.

Ceci, nous conduit à déduire que :

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

Le comportement dynamique de la turbine est décrit donc par l'équation statistique :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_f = C_g - C_{em} \quad (2.16)$$

Equation (2.17) donne :

$$C_{em} = C_g = \frac{C_{aér}}{G} \quad (2.17)$$

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

$$C_{em\_ref} = \frac{C_{aér\_est}}{G} \quad (2.18)$$

Le couple aérodynamique estimé est déterminé par l'expression :

$$C_{aér\_est} = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot S \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine\_estimé}} V_{estimé}^3 \quad (2.19)$$

$\Omega_{turbine\_estimé}$  : est la vitesse estimée de la turbine, elle est calculée à partir de la mesure de la vitesse mécanique.

$$\Omega_{turbine\_estimé} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (2.20)$$

$V_{estimé}$  : est la valeur estimée de la vitesse du vent, elle peut être donnée par l'expression (2.21)

$$V_{estimé} = \frac{\Omega_{turbine\_estimé} \cdot R}{\lambda} \quad (2.21)$$

En utilisant les formules du (2.21) au (2.18), on obtient une expression globale du couple électromagnétique de référence :

$$C_{em\_ref} = \frac{1}{2} \frac{C_p}{\lambda^3} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad (2.22)$$

Pour que la puissance extraite soit maximale, on associe à la grandeur  $\lambda$  sa valeur  $\lambda_{opt}$  optimale correspond au maximum du coefficient de puissance  $C_{pmax}$  la valeur du couple électromagnétique de référence est alors réglée à la valeur maximale de la manière suivante :

$$C_{em\_ref} = \frac{1}{2} \frac{C_{pmax}}{\lambda_{opt}^3} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad (2.23)$$

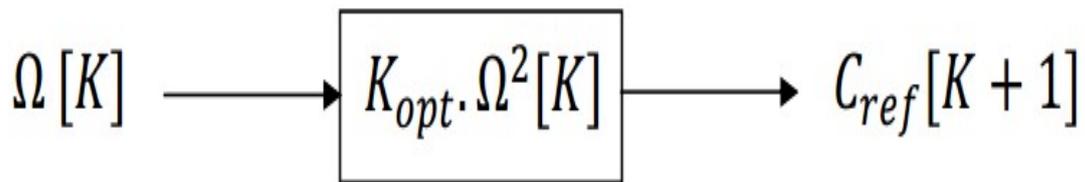
En mettant :

$$k_{opt} = \frac{1}{2} \frac{C_{pmax}}{\lambda_{opt}^3} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot \frac{1}{G^3} \quad (2.24)$$

L'expression(2. 23) peut s'écrire sous la forme :

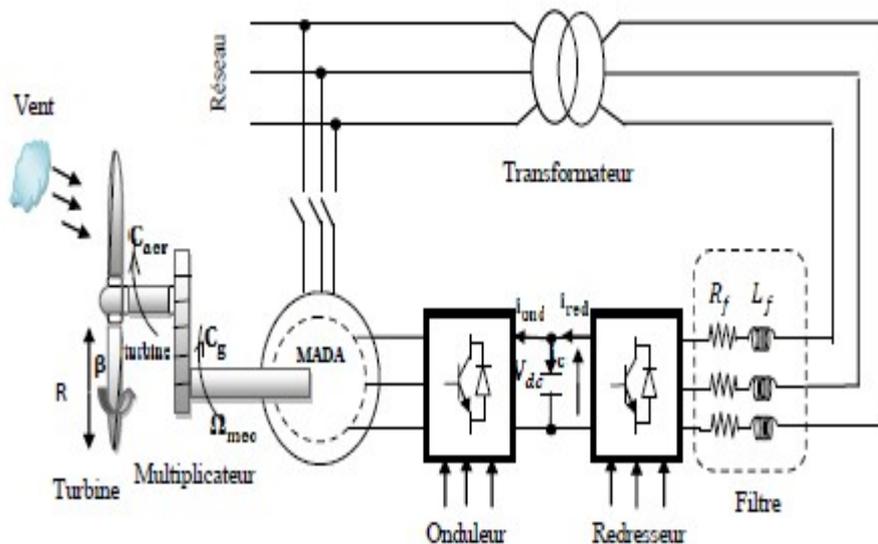
$$C_{em\_ref} = k_{opt} \cdot \Omega_{mec}^2 \quad (2.25)$$

L'algorithme **MPPT** contrôlé à l'aide de la vitesse de rotation mesurée dans l'étape K, détermine le couple de référence dans l'étape K+1 de la façon montrée sur la **figure 2.6**



**Figure. 2.6 :** Couple de référence en fonction de la vitesse de rotation.

La structure globale du système constituée d'une MADA entraînée par une turbine éolienne et présente sur la **figure 2.7:**



**Figure 2.7 :** Schéma structurel du système éolien global.

## 2.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par la turbine (Loi de Betz), et nous avons établi un modèle mathématique de la turbine à partir de ses équations caractéristiques, par la suite nous avons associée à un système de conversion d'énergie constitué d'une machine asynchrone à double alimentation.

Et enfin La modélisation et la simulation de la turbine éolienne a montré que la variation de la vitesse du vent influe considérablement sur la puissance électrique fournie du fait que l'énergie produite varie proportionnellement au cube de cette vitesse. Après on a présenté les différentes zones de fonctionnement d'une éolienne, nous avons détaillé la zone particulière, où la maximisation de l'énergie extraite du vent est effectuée.

### **3.1 Introduction :**

L'objectif de ce chapitre est de mener une étude théorique sur la machine asynchrone à double alimentation concernant son principe de fonctionnement, les différentes stratégies de commande, et évaluer les performances apportées par cette machine. On présentera aussi sa modélisation dans le repère de Park avec ses deux alimentations, l'une alimente le stator avec un couplage direct au réseau et l'autre alimente le rotor à fréquences variables.

### **3.2 Etat de l'art de la MADA**

#### **3.2.1 Description de la machine asynchrone à double alimentation**

La machine asynchrone double alimentation (MADA) en anglo-saxon "doubly-fed induction machine (DFIM)" est, comme son nom l'indique, une machine triphasée à courant alternatif avec deux enroulements triphasés accessibles, dans lesquels la puissance peut être fournie ou extraite de la machine à travers ces enroulements [31].

Ce type de machine nécessite une seule source d'alimentation alternative qui peut alimenter les deux cotés de la machine et ceci constitue un avantage principale surtout dans les domaines d'entraînement et de génération à vitesse variable, dont le glissement peut être modifié au moyen de l'association des convertisseurs de puissance du coté statorique ou rotorique ou bien les deux à la fois. Ceci dépend essentiellement du facteur technoéconomique de constriction [20].

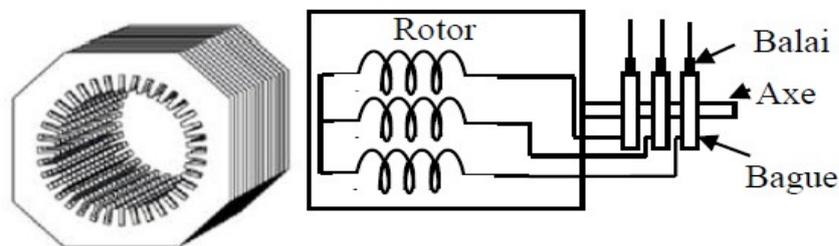
La machine asynchrone à double alimentation se compose principalement de deux parties. Le stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classique), et le rotor tourne à l'intérieur de la cavité de la machine et séparé du stator par un entrefer.

En principe les circuits électriques du stator sont constitués de trois enroulements identiques couplés en étoile (ou en triangle) à la seule différence est que celui du rotor est relié aux bagues sur lesquelles glissent des balais. Cette machine peut fonctionner comme générateur ou moteur. Le stator de la MADA connecté directement au réseau et le rotor et connecté à un convertisseur de puissance [20].

### 3.3 Structure de la machine :

Une MADA a un stator identique à celui (d'une machine asynchrone à cage ou d'une machine synchrone). C'est le rotor qui diffère radicalement car il n'est pas composé d'aimants ou d'une cage d'écureuil mais d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques.

On peut voir sur la **figure 3.1** que les enroulements rotoriques sont connectés en étoile et les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants (balais-bagues collectrices) permettant d'avoir accès aux tensions et courants du rotor [4].



**Figure 3.1** : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.

Il existe plusieurs technologies de la machine asynchrone à double alimentation et plusieurs dispositifs d'alimentation sont envisageables. Chaque structure a ses inconvénients et ses avantages.

### 3.4 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation

Pour un fonctionnement normal de la machine asynchrone en régime établi, il faut que les vecteurs des forces magnétomotrices du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre. Et du moment que le vecteur résultant de FMM des enroulements statoriques tourne dans l'espace avec une vitesse angulaire  $\omega_s = 2\pi f_s$ . Et le rotor tourne avec la vitesse  $\omega_r$  ; alors pour que cette condition soit vérifiée, il faut que le vecteur des FMM des enroulements rotoriques tourne par rapport au rotor avec une vitesse  $\omega_{gl}$  telle que [36] :

$$\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r = \omega_s \cdot g$$

Où :  $g$  est le glissement et  $\omega_{gl}$  est la vitesse angulaire de glissement.

Si la vitesse de la machine est inférieure à la vitesse de synchronisme, les sens de rotation des deux vecteurs sont identiques ; dans le cas contraire, quand la vitesse est supérieure à la vitesse de synchronisme les sens seront opposés [36].

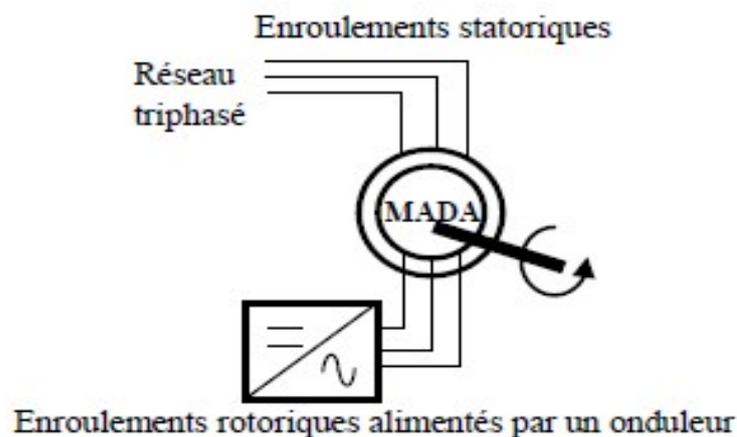
Pour que la rotation du vecteur résultant des FMM par rapport au rotor se réalise, le courant dans l'enroulement doit avoir une fréquence  $f_r$ , définie à partir de

$$\omega_{gl} = 2. \pi. f_r ; \text{ C'est à dire : } f_r = g. f_s$$

### 3.5 Classification des machines à double alimentation

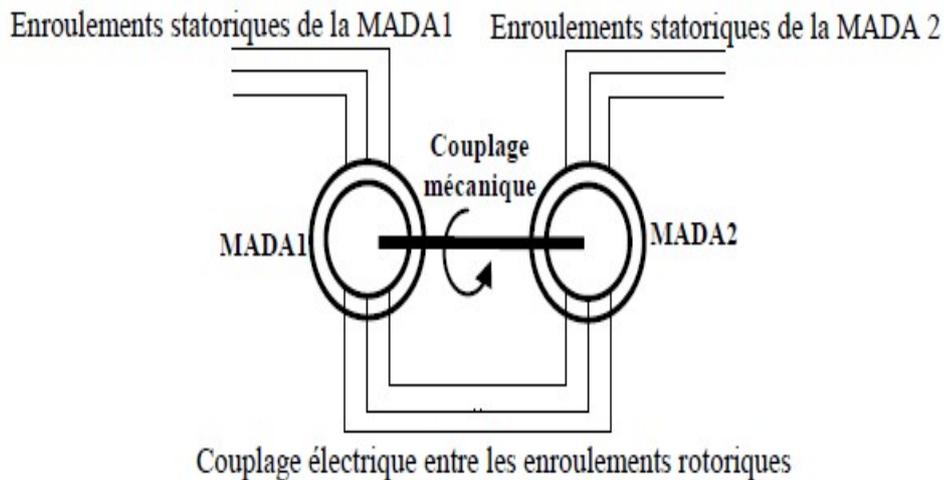
En effet, la dénomination Machine à double alimentation concerne aussi bien le fonctionnement en mode générateur que le fonctionnement en mode moteur et peut s'adresser à une multitude de configurations. Nous pourrions trouver un recensement de certains travaux où les MADA sont classées suivant leur architecture. On ne citera ici que les six grandes classes qu'ils distinguent [21]:

**a. MADA simple** dont les enroulements statoriques sont connectés à un réseau triphasé, le rotor est relié à son propre onduleur. La **figure 3 .5** présente un schéma de principe de cette catégorie de MADA.



**Figure 3 .2** : Schéma de principe d'une simple MADA.

**b. MADA en "cascade, deux MADA** dont les rotors sont couplés électriquement et mécaniquement, la **figure 3 .6**: présente le schéma de principe de deux machines asynchrones à rotor bobiné permettant d'obtenir un système à double alimentation. Les enroulements statoriques sont reliés à deux sources de tensions triphasées.

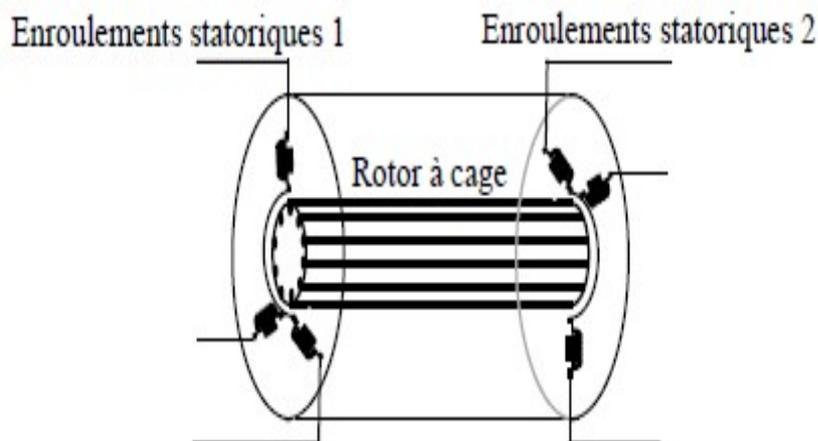


**Figure 3 .3:** Schéma de principe de deux MADA en cascade.

**c. MADA cascadée à un repère**, il s'agit de deux machines à cage dont l'axe rotorique est identique. Les barres rotoriques sont croisées entre les deux machines. Une machine a son stator relié au réseau, l'autre à un onduleur.

**d. MADA sans balai**, machine très proche de la précédente sauf que cette fois si, les deux enroulements statoriques appartiennent à un circuit magnétique commun.

Le rotor est commun et à cage d'écureuil. Nous présentons sur la **figure 3.7** un schéma de principe de ce type de machine.



**Figure 3 .4:** Schéma de principe de deux machines asynchrones reliées mécaniquement et électriquement par le rotor.

**e. MADA à réluctance**, machine utilisant le principe d'un rotor de moteur à réluctance variable.

**f. MADA "tandem"**, machine possédant un rotor à cage et deux enroulements statoriques.

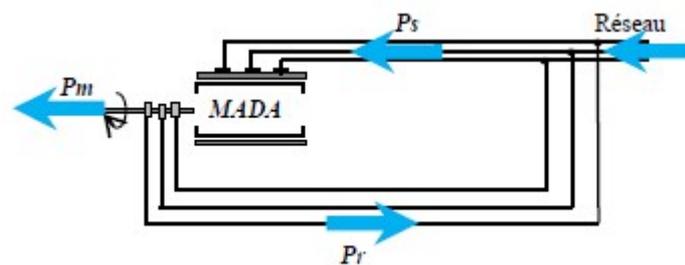
### 3.6 Mode de fonctionnement de la MADA:

Comme la machine asynchrone classique, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur mais la grande différence réside dans le fait que la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur.

Effectivement, une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et en dessus pour être en générateur. Ici, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper ou hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. Nous allons présenter successivement ces différents modes de fonctionnement [22] :

#### 3.6.1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone :

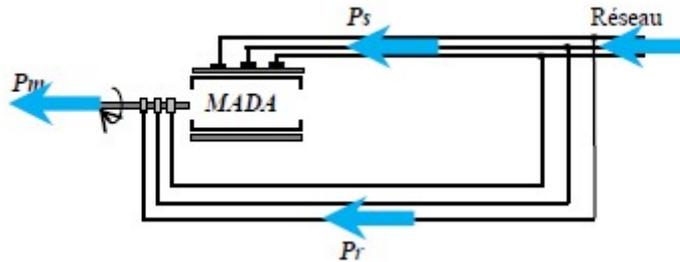
La **figure 3.5** montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement moteur en dessous de la vitesse de synchronisme. Ce régime est généralement connu comme mode de récupération de l'énergie de glissement.



**Figure 3 .5:** Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.

#### 3.6.2 Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone :

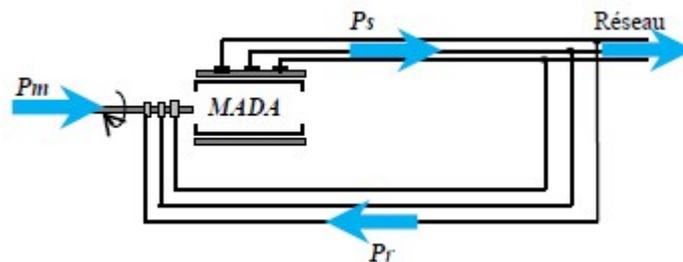
La **figure 3 .6** montre que la puissance est fournie par le réseau au stator, la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor, on a donc un fonctionnement moteur au dessus de la vitesse de synchronisme.



**Figure 3 .6:** Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.

### 3.6.3 Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone :

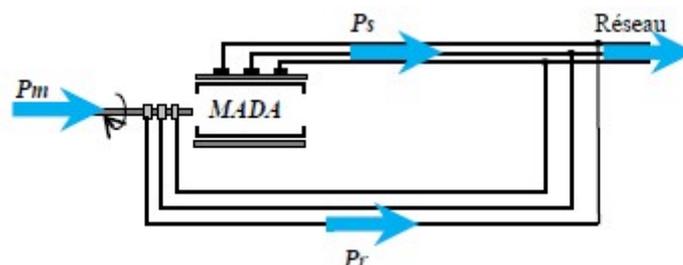
La **figure 3.7** montre que la puissance est fournie au réseau par le stator .La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme.



**Figure 3 .7:** Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone

### 3.6.4 Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone :

La **figure 3 .8**montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au dessus de la vitesse de synchronisme.



**Figure 3 .8:** Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone.

### 3.7 Domaine d'application de la MADA :

#### 3.7.1 Fonctionnement moteur dans les applications

##### industrielles :

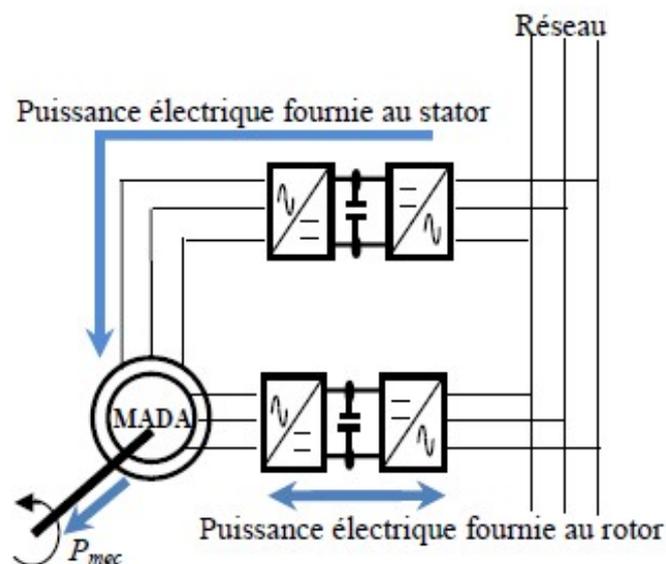
La machine asynchrone à double alimentation été conçue pour fonctionner en moteur sur une grande plage de variation de vitesse comme première application.

L'utilisation d'une MADA permet de varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques, ce dispositif sera donc économique quand on place les convertisseurs entre le rotor et le réseau en réduisant leurs tailles d'environ 70% [23].

##### *a* Fonctionnement en moteur avec deux convertisseurs :

Ce type d'alimentation peut prendre différentes formes :

- ✓ Deux onduleurs alimentés par leurs propres redresseurs conformément à la **figure 3.9**
- ✓ Deux onduleurs alimentés en parallèle par un redresseur commun, Deux cyclo-convertisseurs.



**Figure 3.9** : Schéma d'un système utilisant une MADA en moteur alimenté par un seul convertisseur.

### 3.7.2 Dans les systèmes d'entraînement à vitesse variable

Les systèmes d'entraînement électriques transforment l'énergie électrique en énergie mécanique pour des applications utiles. Dans ce cas, le moteur électrique est le composant noyau d'un tel système d'entraînement électrique. Généralement, Il y a trois critères essentiels pour la sélection des moteurs électriques pour les applications dans les systèmes d'entraînement à vitesse variable :

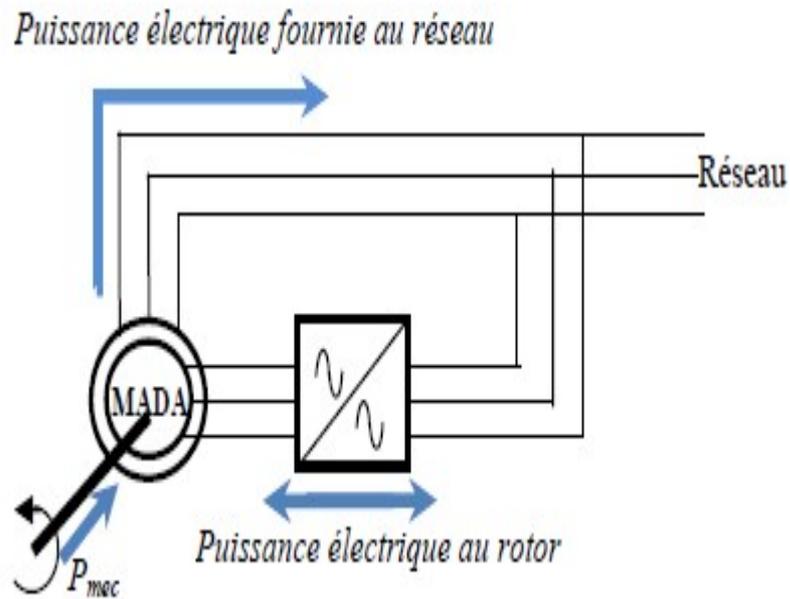
- Rendement énergétique.
- Exigence de la commande en vitesse ou en position.
- Amélioration de la réponse en régime transitoire.

Le moteur asynchrone à rotor bobiné offre des nombreux avantages par rapport au moteur asynchrone et synchrone surtout en ce qui concerne la gamme de la vitesse opérationnelle et de la puissance d'entraînement. De plus, il présente un comportement souple à la commande, ce qui lui permet de trouver un domaine d'application très vaste tel que le laminoir, la traction ferroviaire, la propulsion des navires, le véhicule électrique, le ventilateur et la pompe d'eau.

### 3.7.3 Dans les systèmes de génération éolienne à vitesse variable

Une éolienne à vitesse variable a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique avec un rendement optimisé. Par conséquent les différents éléments du système éolien sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique et d'une manière générale une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable. Dans les systèmes éoliens de production de l'énergie électrique à vitesse variable, il existe une solution nouvelle et originale, utilisant la machine asynchrone à rotor bobiné. Cette solution est plus attractive pour toutes les applications où les variations de vitesse sont limitées autour de celle de synchronisme dont l'objectif d'avoir un convertisseur de puissance dimensionné à une fraction de 20-30 % de toute la puissance du système, et qui permet de minimiser les pertes et réduire le coût de celui-ci [24]. La configuration, largement répandue dans les systèmes éoliens à vitesse

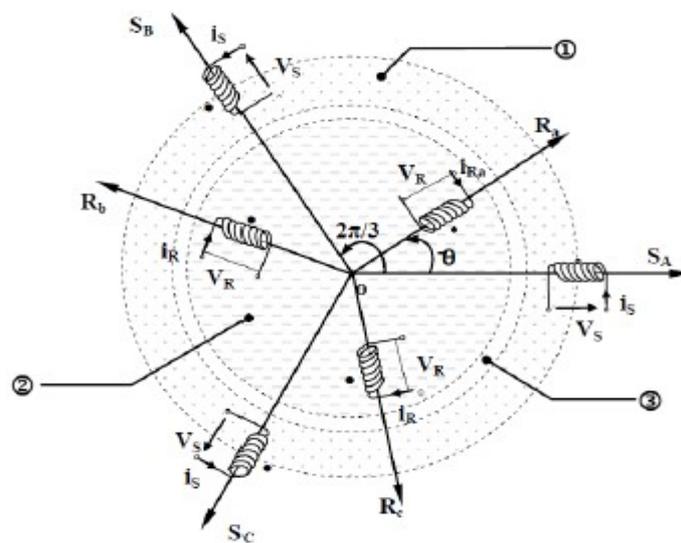
variable avec MADA, est représentée par la **figure 3 .10**. Elle consiste à alimenter le rotor par un convertisseur et à lier le stator directement au réseau [25].



**Figure 3 .10** : Schéma de l'alimentation de la MADA pour une application génératrice.

### 3.8 Mise en équation de la MADA

La modélisation des machines électriques consiste en élaboration des modèles mathématique qui permettent de prédire le comportement de la machine dans différents régimes de fonctionnement, en prévoyant ainsi les points qui risquent de provoquer des perturbations.



**Figure 3.11**: Représentation électrique des enroulements d'une machine asynchrone triphasée à double alimentation.

### 3.8.1 Hypothèses simplificatrices

La modélisation de la machine asynchrone sera établie sous les hypothèses Simplificatrices suivantes [26].

- L'entrefer est supposé d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoches négligeable.
- La saturation magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- Les résistances des enroulements sont constantes et l'effet de peau négligeable.
- On admet que la f.é.m. créée par chacune des phases des deux armatures est répartition sinusoïdale.
- La machine est symétrique, par conséquent, la somme des courant et des tensions est égale à zéro.

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses on peut citer :

- ❖ L'additive des flux,
- ❖ La constance des inductances propres,
- ❖ La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements du stator et du rotor en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

En utilisant l'approche des circuits couplés magnétiquement, la loi d'Ohm et la loi de Faraday et en tenant compte des hypothèses cités ci-dessus, le comportement dynamique la MADA peut être décrit par le système d'équations différentielles suivant [26].

### 3.8.2 Equations électriques de la machine

Avec les hypothèses citées ci-dessus, les équations des tensions des phases statoriques et rotoriques qui décrivent le fonctionnement de la machine s'écrivent comme suit :

**Au stator**

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \quad (3.1)$$

**Au rotor**

$$[V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r] \quad (3.2)$$

$$[V_r] \neq 0$$

Les flux sont donnés par :

$$\begin{cases} [\Phi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \\ [\Phi_r] = [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s] \end{cases} \quad (3.3)$$

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}; [I_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}; [V_r] = \begin{bmatrix} v_{Ar} \\ v_{Br} \\ v_{Cr} \end{bmatrix}; [I_r] = \begin{bmatrix} i_{Ar} \\ i_{Br} \\ i_{Cr} \end{bmatrix} \quad (a)$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (b)$$

$R_s, R_r$  : Résistances des enroulements statoriques et rotoriques.

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (c)$$

$l_s, l_r$  : Inductances de fuites des statoriques et rotoriques.

$M_s, M_r$  : Inductances mutuelles.

La matrice des inductances mutuelles (matrice de couplage rotor-stator) s'écrit :

$$[M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + 2\frac{\pi}{3}) & \cos(\theta - 2\frac{\pi}{3}) \\ \cos(\theta - 2\frac{\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta + 2\frac{\pi}{3}) \\ \cos(\theta + 2\frac{\pi}{3}) & \cos(\theta - 2\frac{\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (*)$$

Avec :

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^t \quad (**)$$

En remplaçant (3.3) dans (3.1) et (3.2) on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt}([L_{ss}] \cdot [I_s]) + \frac{d}{dt}([M_{sr}] \cdot [I_r]) \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt}([L_{rr}] \cdot [I_r]) + \frac{d}{dt}([M_{rs}] \cdot [I_s]) \end{cases} \quad (3.4)$$

### 3.8.3 Transformation de PARK

Les transformations utilisées doivent conservées la puissance instantanée et la réciproité des inductances mutuelles. Parmi les transformations utilisées, on cite celle de Park.

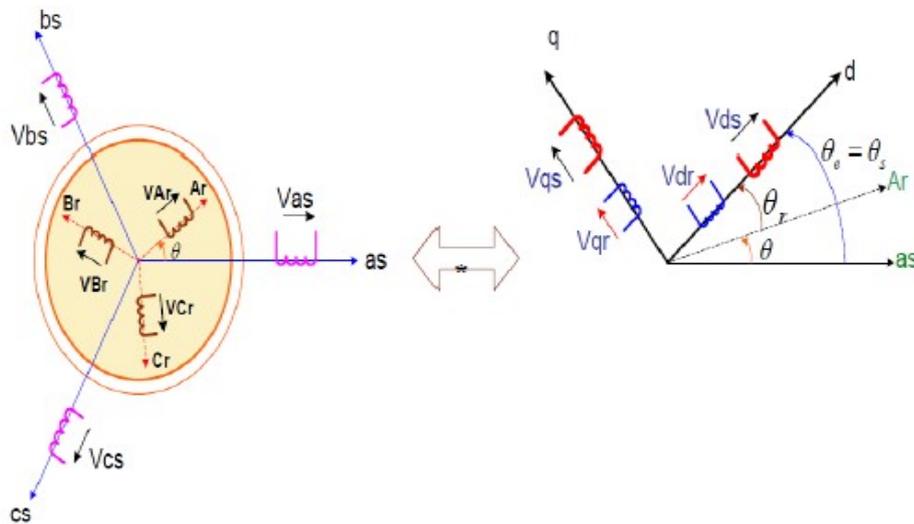


Figure 3 .12: Modèle de PARK de la MADA.

La machine asynchrone est une machine fortement couplée, sa représentation dans le système triphasé est par conséquent particulièrement complexe. Pour mieux représenter le comportement d’une machine asynchrone, il est nécessaire de faire appel à un modèle précis et suffisamment simple.

Le modèle diphasé (d-q) donné par la transformation de Park est alors utilisé. Le nouveau modèle est obtenu en multipliant les équations des flux et des tensions par la matrice de Park qui s’exprime par [40] :

$$P(\alpha) = 2/3 \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\alpha) & -\sin(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (***)$$

L'angle  $\alpha$  est au choix de l'utilisateur et peut dépendre du temps. Le fait que  $[P(\alpha)]$  soit orthonormée implique que son inverse est égale à sa transposée

$$[P(\alpha)]^{-1} = [P(\alpha)]^t \quad (1)$$

$$\text{Pour } \theta = \theta_s \quad (2)$$

Les vitesses angulaires de rotation sont obtenues telles que :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \quad (a)$$

$$\frac{d\theta_{sl}}{dt} = \omega_{sl} \quad (b)$$

$$\omega_s = \omega_{sl} + \omega_r \quad (c)$$

**a Modélisation de la MADA dans le repère de PARK**

Les tensions, courants et les flux se transforment de la manière suivante :

$$\begin{cases} [V_{s,dq}] = [P(\theta_s)] \cdot [V_{s,abc}] \\ [V_{r,dq}] = [P(\theta_s - \theta)] \cdot [V_{r,abc}] \end{cases} \quad (3.5)$$

$$\begin{cases} [i_{s,dq}] = [P(\theta_s)] \cdot [i_{s,abc}] \\ [i_{r,dq}] = [P(\theta_s - \theta)] \cdot [i_{r,abc}] \end{cases} \quad (3.6)$$

$$\begin{cases} [\Phi_{s,dq}] = [P(\theta_s)] \cdot [\Phi_{s,abc}] \\ [\Phi_{r,dq}] = [P(\theta_s - \theta)] \cdot [\Phi_{r,abc}] \end{cases} \quad (3.7)$$

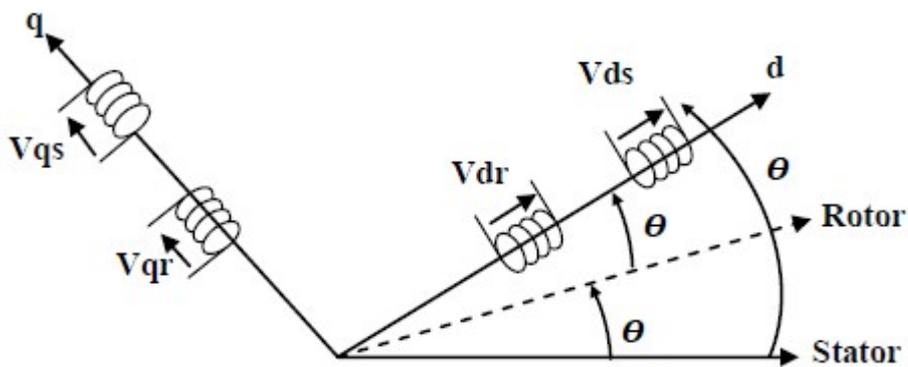


Figure 3 .13 : Représentation de la machine dans le repère diphasé.

Après l'application de transformation de Park pour l'équation (3.1) du stator et l'équation (3.2) du rotor, l'expression des tensions statorique et rotorique suivant l'axe (d, q) sont données par:

**A. Les équations des tensions :****Au stator :**

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + \omega_s \Phi_{ds} \end{cases} \quad (3.8)$$

**Au rotor :**

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (3.9)$$

On applique aussi la transformation de Park pour l'équation (3.3) du flux statorique et flux rotorique on obtient les expressions suivant :

**B. Les équations des flux :****Au stator :**

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (3.10)$$

**Au rotor :**

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} \end{cases} \quad (3.11)$$

$L_s = l_s - M_s$  Inductance cyclique statorique.

$L_r = l_r - M_r$  Inductance cyclique rotorique.

$M = \frac{3}{2} M_{sr} = \frac{3}{2} M_{rs}$  Inductance Mutuelle cyclique entre rotor-stator.

### b Equation mécanique

Afin d'obtenir le modèle complet de la machine asynchrone doublement alimentée, il faut qu'on tienne compte de l'équation mécanique. En appliquant les relations fondamentales de la dynamique à la machine, l'équation mécanique est :

$$\frac{P}{J} \frac{d(\omega_r)}{dt} = (C_e - C_r - C_f) \quad (3.12)$$

Où :

$J$  : Moment d'inertie des parties tournantes (du moteur avec la charge) ;

$C_r$ : Couple résistant ;

$C_f$ : Couple de frottement ;

Le couple de frottement est donné par :

$$C_f = \frac{f_r}{P} \omega_r = f_r \Omega \quad (3.13)$$

Avec :

$f_r$  = Coefficient de frottement visqueux.

Enfin l'équation mécanique peut être formulée par :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = \left( \frac{P}{J} \frac{d(\omega_r)}{dt} \right) = \frac{3}{2} P \frac{M}{L_s} (\Phi_{dr} i_{qs} - \Phi_{qr} i_{ds}) - C_r - f_r \Omega \quad (3.14)$$

## 3.9 Modèle de la machine en représentation d'état

La représentation d'état de la MADA dépend du repère et du choix des variables d'état pour les équations électriques. On écrit les équations dans le repère  $(d, q)$  car c'est la solution la plus générale.

Le choix des variables d'état, dépend des objectifs soit pour la commande soit pour l'observation, pour le modèle complet  $C_e$  est un variable d'état, pour les quatre variables électriques, notre choix pour la modélisation est le vecteur d'état suivant :

$$[i_{ds}, i_{qs}, \Phi_{dr}, \Phi_{qr}]^T$$

**Remarque :** Cette représentation d'état n'est pas unique pour la MADA. Nous pouvons envisager un vecteur d'état formé des flux au stator et des courants au rotor, des quatre courants au stator ou au rotor ou même des quatre flux au stator ou au rotor et aucune des représentations ne présente un avantage particulier par rapport aux autres [27].

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{dr} = \frac{1}{L_r} \Phi_{dr} - \frac{M}{L_r} i_{ds} \\ i_{qr} = \frac{1}{L_r} \Phi_{qr} - \frac{M}{L_r} i_{qs} \\ \Phi_{ds} = L_s \sigma i_{ds} + \frac{M}{L_r} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s \sigma i_{qs} + \frac{M}{L_r} \Phi_{qr} \end{array} \right. \quad (3.15)$$

Avec :

$$\sigma = \left( 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \right) : \text{Coefficient de dispersion de Blondel.}$$

En remplaçant  $\Phi_{ds}$  et  $\Phi_{qs}$  en fonction de  $\Phi_{dr}$  et  $\Phi_{qr}$  dans le système (3.8), on aboutit aux équations suivants :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + L_s \sigma \frac{di_{ds}}{dt} + \frac{M}{L_r} \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - w_s \left[ L_s \sigma i_{qs} + \frac{M}{L_r} \Phi_{qr} \right] \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + L_s \sigma \frac{di_{qs}}{dt} + \frac{M}{L_r} \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + w_s \left[ L_s \sigma i_{ds} + \frac{M}{L_r} \Phi_{dr} \right] \end{array} \right. \quad (3.16)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} \Phi_{dr} = -R_r i_{dr} + (w_s - w_r) \Phi_{qr} + V_{dr} \\ \frac{d}{dt} \Phi_{qr} = -R_r i_{qr} - (w_s - w_r) \Phi_{dr} + V_{qr} \end{array} \right. \quad (3.17)$$

On écrit le modèle de la machine utilisée pour la commande sous forme d'un système d'équations d'état :

$$\frac{dX}{dt} = AX + BU \quad (3.18)$$

$$Y = CX \quad (3.19)$$

Avec :

$X$ : Vecteur d'état du système  $[i_{ds}, i_{qs}, \Phi_{dr}, \Phi_{qr}]^T$

$A$  : matrice d'état du système.

$B$  : matrice de commande.

$U$  : vecteur de commande  $[V_{ds}, V_{qs}, V_{dr}, V_{qr}]^T$

$Y$  : vecteur de sortie.

$C$  : matrice d'observation.

$$A = \begin{bmatrix} -\gamma & w_s & \frac{K}{T_r} & w_r K \\ -w_s & -\gamma & -w_r K & \frac{K}{T_r} \\ \frac{M}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & w_{sl} \\ 0 & \frac{M}{T_r} & -w_{sl} & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Avec :  $T_r = \frac{L_r}{R_r}$  ;  $T_s = \frac{L_s}{R_s}$  ;  $\gamma = \frac{1}{\sigma T_r}$  ;  $K = \frac{M}{\sigma L_s L_r}$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & K & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & K \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

La décomposition des équations d'état nous donne :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_{ds} = -\gamma i_{ds} + w_s i_{qs} + \frac{K}{T_r} \Phi_{dr} + w_r K \Phi_{qr} + \frac{1}{\sigma L_s} V_{ds} + K V_{dr} \\ \frac{d}{dt} i_{qs} = -w_s i_{ds} - \gamma i_{qs} - w_r K \Phi_{dr} + \frac{K}{T_r} \Phi_{qr} + \frac{1}{\sigma L_s} V_{qs} + K V_{qr} \end{cases} \quad (3.22)$$

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \Phi_{dr} = \frac{M}{T_r} i_{ds} - \frac{1}{T_r} \Phi_{dr} + w_{sl} \Phi_{qr} + V_{dr} \\ \frac{d}{dt} \Phi_{qr} = \frac{M}{T_r} i_{qs} - w_{sl} \Phi_{dr} - \frac{1}{T_r} \Phi_{qr} + V_{qr} \end{cases} \quad (3.23)$$

L'équation mécanique régissant la partie tournante de la machine est donnée par :

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{3}{2} P \frac{M}{J L_s} (\Phi_{dr} i_{qs} - \Phi_{qr} i_{ds}) - \frac{C_r}{J} - \frac{f_r}{J} \Omega \quad (3.24)$$

$$C_e = \frac{3}{2} P \frac{M}{L_s} (\Phi_{dr} i_{qs} - \Phi_{qr} i_{ds}) \quad (3.25)$$

Notons que dans le cas d'un fonctionnement en génératrice, celui-ci possède une valeur négative. Notons aussi que ce couple représente le couple résistant pour la turbine éolienne.

### 3.10 Simulation et interprétation des résultats :

Afin de simuler la machine, on a fait appel au logiciel MATLAB/ SIMULIK. Les paramètres de la machine sont donnés en annexe. Le stator de la machine étant alimenté à partir du réseau avec le rotor en court circuit ; c'est-à-dire que la machine fonctionne en moteur.

#### 3.10.1 Démarrage à vide

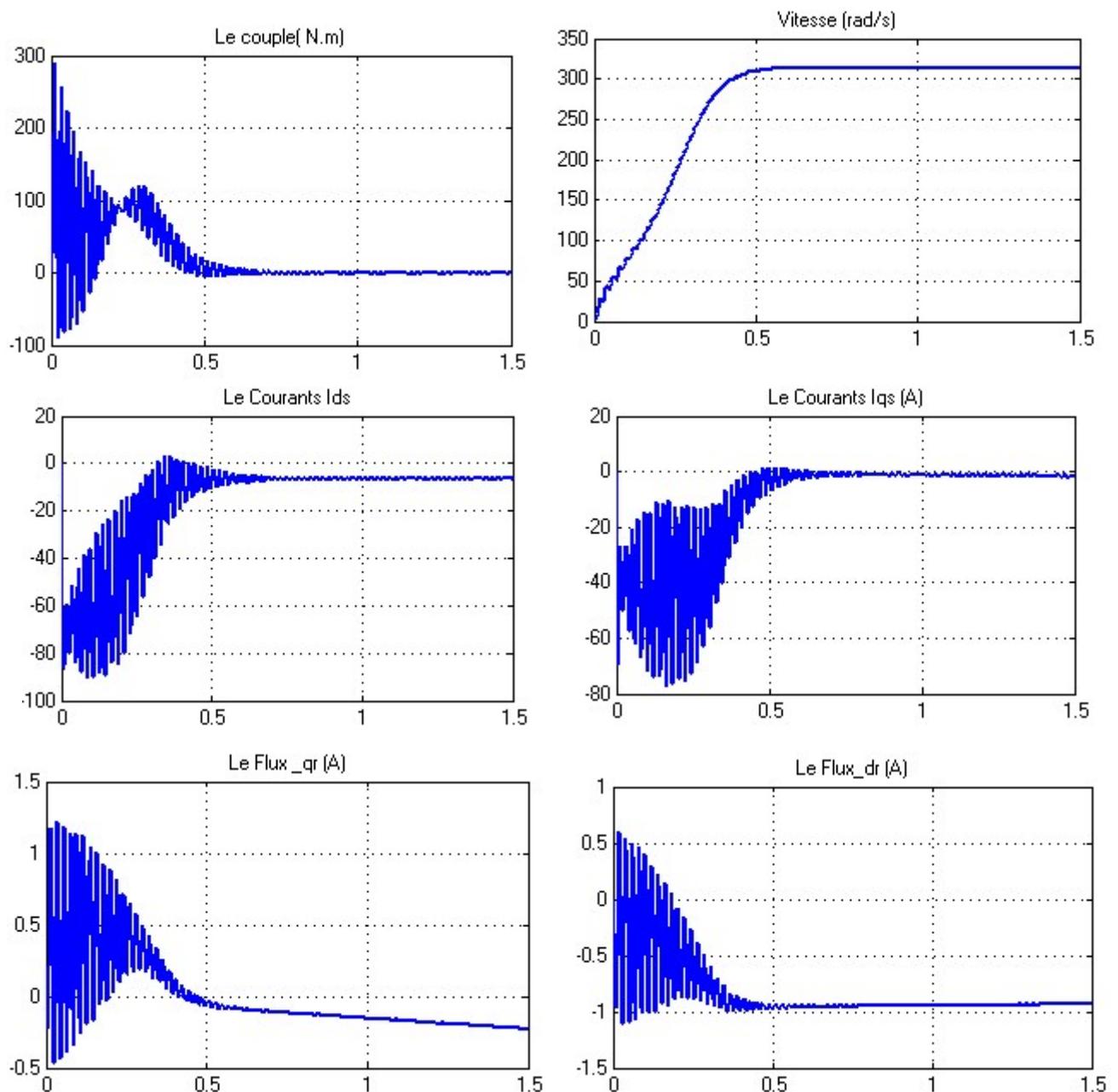


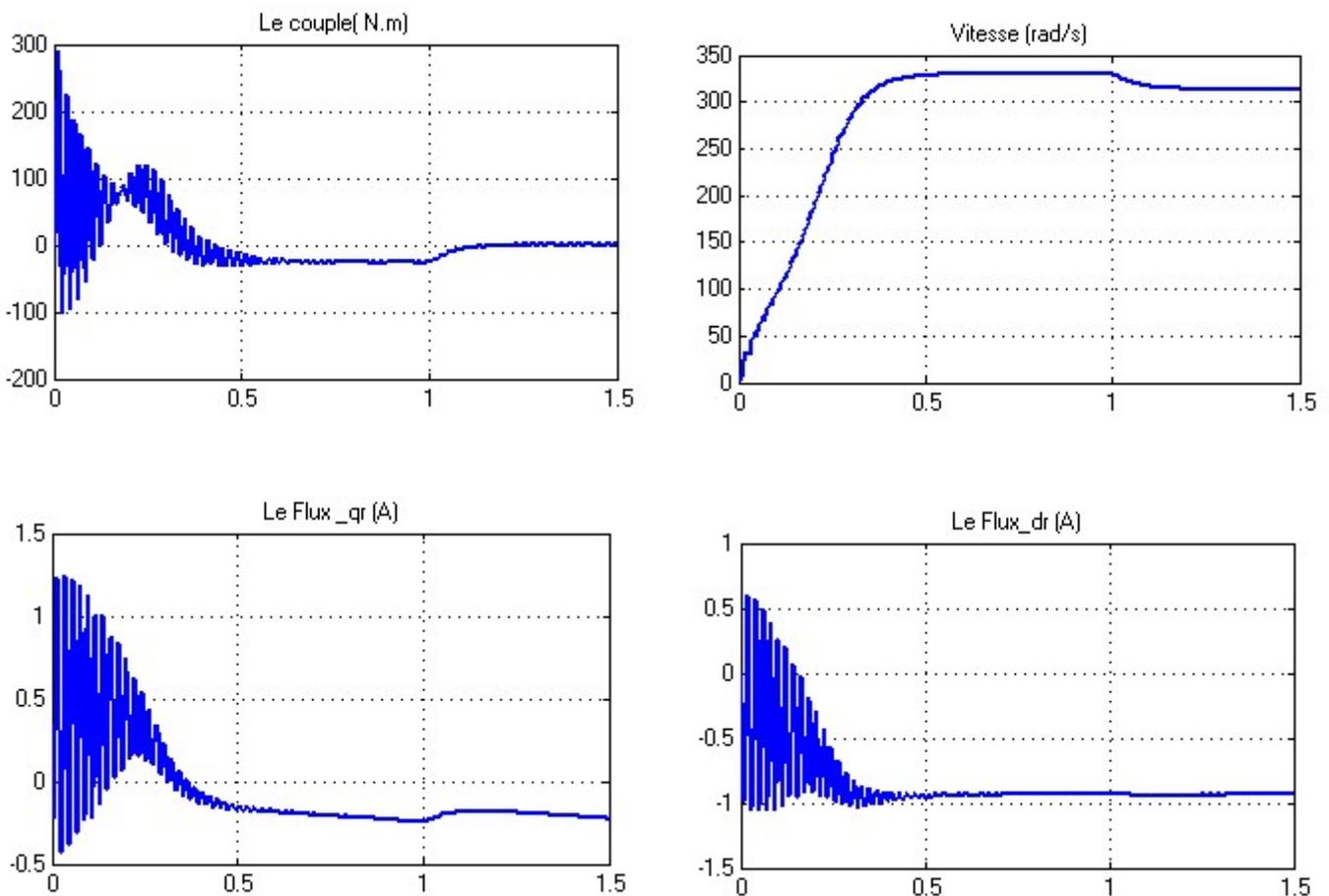
Figure 3.14 : Les résultats de simulation de la machine en vide.

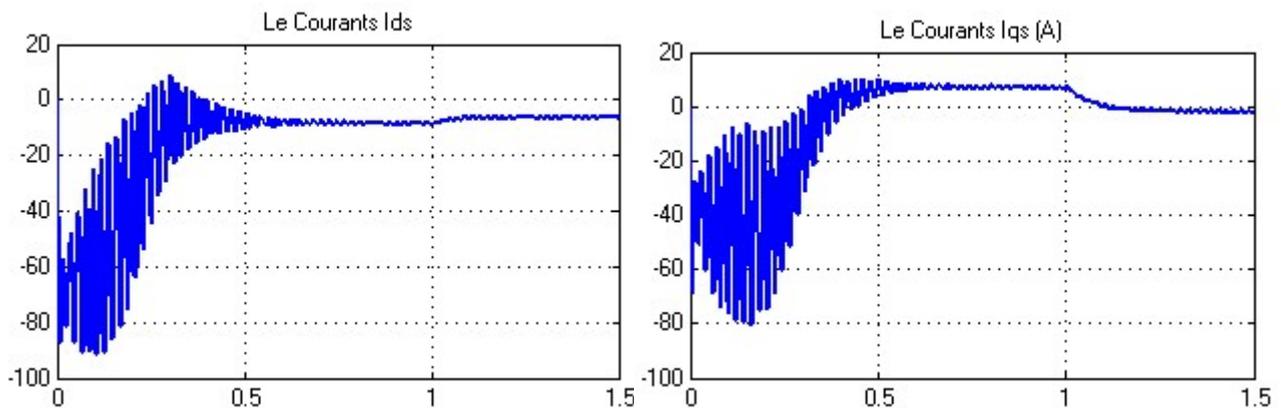
Lors du démarrage à vide, l'oscillation du couple électromagnétique est l'élément marquant de cette figure (régime transitoire). L'amplitude du couple électromagnétique atteint une valeur voisine de (289 N.m) pendant le démarrage puis diminue et se stabilise en régime établi. Les oscillations du couple électromagnétique se font évidemment ressentir sur l'évolution de la vitesse de rotation qui oscille légèrement en régime transitoire avant de se stabiliser à environ (330 rd/s) en régime permanent au bout d'un temps de réponse de 0.6 s environ.

Pendant le démarrage, les courants statoriques sont fortement oscillatoires ; la valeur de ( $I_{ds}$ ) dépasse (-90.51A), tandis que ( $I_{qs}$ ) dépasse (-77.4A). En régime permanent, ces courants tendent vers des valeurs proches de (-6.4A) et (-1.50A).

Les courbes représentant l'évolution des flux rotoriques ( $\Phi_{dr}$  et  $\Phi_{qr}$ ) montre que ces flux atteignent respectivement durant la phase transitoire des valeurs avoisinant les (-1.11 Wb) et (-0.46Wb), puis tendent vers (1.21Wb) et (0.6 Wb) au bout d'un temps  $t=0.6s$ .

### 3.10.2 Introduction du couple de charge





**Figure 3.15** : Les résultats de simulation de la machine en charge.

L'introduction d'un couple de charge de 25N.m à l'instant ( $t = 1s$ ), provoque une diminution de la vitesse de (330rd/s) à (313.40 rd/s) environ, traduite par une augmentation du glissement de la machine. Le couple électromagnétique tend à augmenter pour compenser le couple résistant.

D'après les courbes représentant les flux rotoriques en charge, on peut faire des remarques comme suit : pendant le régime à vide, les flux entrent en régime permanent au bout d'un temps  $t=0.6s$ . En charge, ces flux se stabilisent au-delà d'un temps  $t=1s$ .

En observant les caractéristiques des courants statoriques, on constate que ces courants passent par trois phases : leurs amplitudes lors de la phase transitoire sont importantes tendent vers zéro, entre 0.6s et 1s puis deviennent à nouveau remarquables.

### 3.11 Alimentation de la MADA

Pour la structure de commande, il faut intégrer un onduleur de tension au niveau des bobines du rotor ; ce dernier qui est contrôlé par une technique de modulation de large impulsion (MLI) permet le réglage simultanément de la fréquence et la tension.

L'objectif de l'utilisation de la commande MLI est de réduire ou de minimiser les oscillations sur la vitesse, le couple et les courants [6].

### 3.12 Intérêt de la MADA

Le principal avantage de la MADA est la possibilité de fonctionner à vitesse variable. Les machines asynchrones à vitesse fixe doivent fonctionner au voisinage de la vitesse de synchronisme car la fréquence est imposée par le réseau. La vitesse du rotor est quasi constante.

Le système de la MADA permet de régler la vitesse de rotation du rotor en fonction de la vitesse du vent. En effet la MADA permet un fonctionnement en génératrice hypo synchrone et hyper synchrone. On arrive ainsi à extraire le maximum de puissance possible. L'intérêt de la vitesse variable pour une éolienne est de pouvoir fonctionner sur une large plage de vitesses de vent, et de pouvoir en tirer le maximum de puissance possible, pour chaque vitesse de vent [28] [29].

### 3.13 Avantages et inconvénients de la MADA

Nous allons aborder dans ce paragraphe quelques avantages et inconvénients de la machine asynchrone à double alimentation lors de son fonctionnement à vitesse variable.

#### Avantages

- La possibilité de fonctionner à couple constant au de là la vitesse nominale.
- La mesure des courants au stator et rotor, donnant ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- Le partage des fréquences entre le stator et le rotor: en effet, dans le cas d'une double alimentation, il est possible et recommandé de partager la fréquence de rotation du rotor entre les deux convertisseurs alimentant la machine, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement [30].

#### Inconvénients

- ✓ Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine cage.
- ✓ Machine plus volumineuse que celle à cage, à causes des balais [30].
- ✓ Toutefois, malgré la présence de contacts glissants qui doivent être entretenus et remplacés périodiquement, la conception de cette machine est plus conventionnelle et plus simple que les autres types de MADA.

### 3.14 La chaîne de conversion

Le fonctionnement avec convertisseur statique est effectué en utilisant un seul convertisseur au rotor composé d'un redresseur à diodes, un filtre passe bas et d'un onduleur à (IGBTs Transistors bipolaires à gâchette isolée) alors que le stator est relié directement au source triphasé. La modulation par largeur d'impulsion (MLI) utilisée est régulière, triangulaire, symétrique, **figure 3.16**.

Les IGBTs sont choisis en raison de la simplicité de leur commande et de rapidité de leur commutation, malgré un coût supérieur des thyristors.

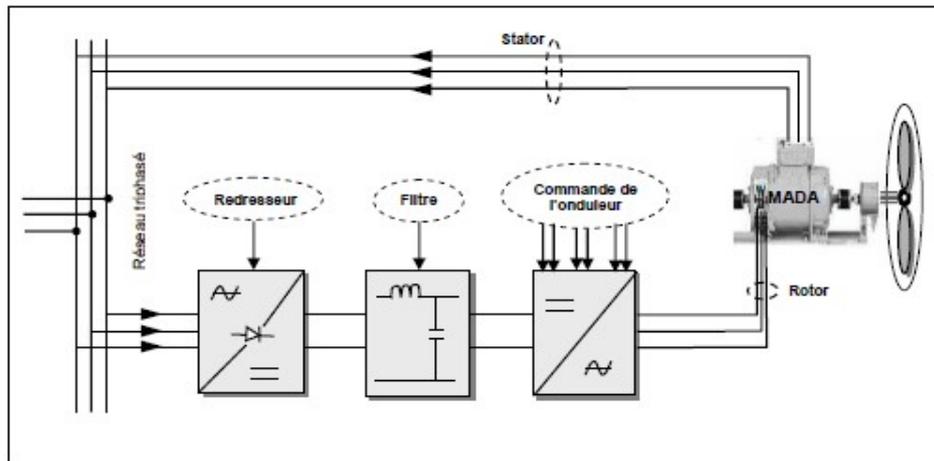


Figure 3.16 : Schéma synoptique pour un fonctionnement en génératrice de la MADA.

### 3.15 Modélisation du redresseur triphasé à diodes

Le redresseur est un convertisseur « alternatif / continu ». Une conversion d'énergie électrique permet de disposer d'une source de courant continu à partir d'une source alternatif et il est représenté par la figure 3.17.

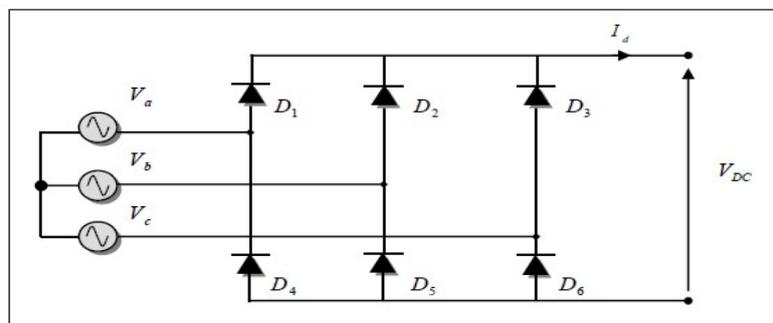


Figure 3.17: Représentation du redresseur triphasé à diodes.

Ce redresseur comporte trois diodes ( $D_1, D_2, D_3$ ) à cathode commune assurant l'allée du courant  $I_d$  et trois diodes ( $D_4, D_5, D_6$ ) à anode commune assurant le retour du courant  $I_d$ . Si on suppose que le redresseur est alimenté par un réseau triphasé équilibré tension :

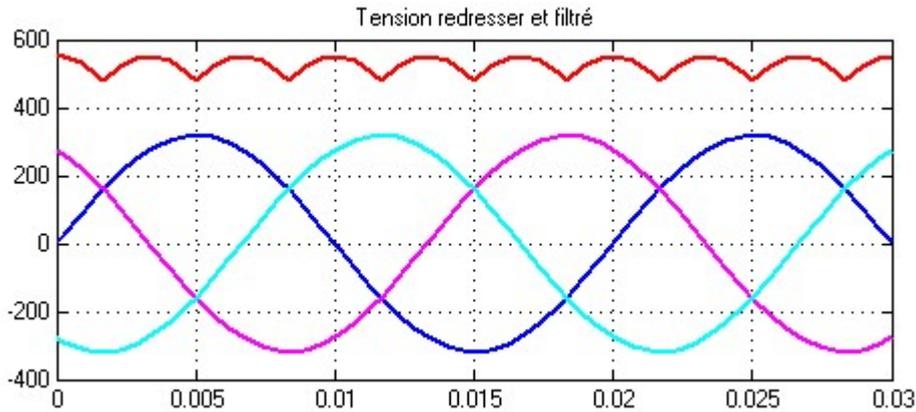
$$\begin{cases} V_a(t) = V_m \sin(2\pi ft) \\ V_b(t) = V_m \sin\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_c(t) = V_m \sin\left(2\pi ft + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (a)$$

Et si on néglige l'effet d'empiétement, la tension de sortie du redresseur sera définie

Comme suite :

$$V_{rd}(t) = \max [V_a(t), V_b(t), V_c(t)] - \min [V_a(t), V_b(t), V_c(t)] \quad (b)$$

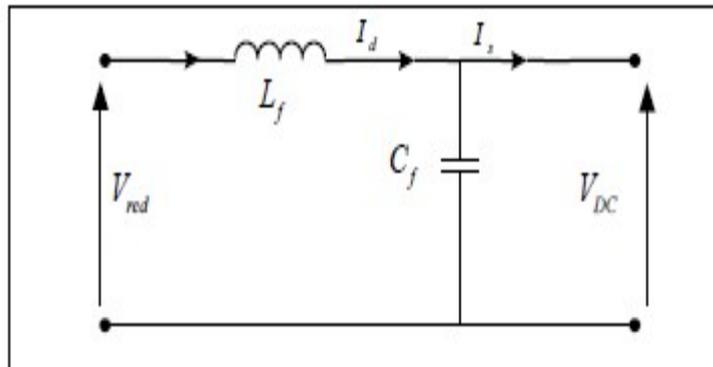
Cette tension est représentée par la **figure 3.18**.



**Figure 3.18** : Représentation de la tension de sortie du redresseur.

### 3.16 Modélisation du filtre

On utilise un filtre passe bas « LC », pour éliminer les hautes fréquences. Ce filtre est schématisé par la **figure 3.19**



**Figure 3.19** : Représentation du filtre passe –bas.

Le modèle du filtre est défini par le système d'équations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI}{dt} = \frac{V_{red}-V_{dc}}{L_f} \\ \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{I_d-I_s}{C_f} \end{array} \right. \quad (c)$$

Calcul des paramètres du filtre :(Annexe)

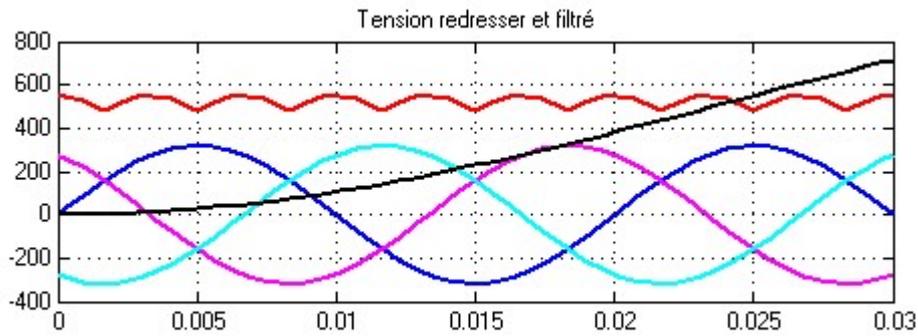


Figure 3.20: Tension redressée et filtrée à l’entrée de l’onduleur rotorique.

### 3.17 Association onduleur – MADA (rotor)

L’onduleur de tension assure la conversion de l’énergie continue vers l’alternatif (DC/AC). Cette application est très répandue dans le monde de la conversion d’énergie électrique aujourd’hui. L’onduleur de tension à MLI permet d’imposer au la machine des ondes de tensions à amplitude set fréquences variables à partir du réseau standard 225/389V, 50Hz. Après redressement, la tension filtrée  $V_{DC}$  est appliquée à l’onduleur.

#### 3.17.1 Modèle mathématique de l’onduleur de tension

L’état des interrupteurs, supposés parfaits peut être défini par trois grandeurs Booléennes de commande  $S_i$  ( $i = a, b, c$ ):

- $S_i = 1$  : le cas où l’interrupteur de haut est fermé et celui d’en bas ouvert.
- $S_i = 0$  : le cas où l’interrupteur de haut est ouvert et celui d’en bas fermé.

Dans ces conditions on peut écrire les tensions  $v_{i0}$  en fonction des signaux de commande  $S_i$  et en tenant compte du point fictif « 0 » représenté sur la figure 3.21.

$$v_{i0} = V_{dc} \left( S_i - \frac{1}{2} \right)$$

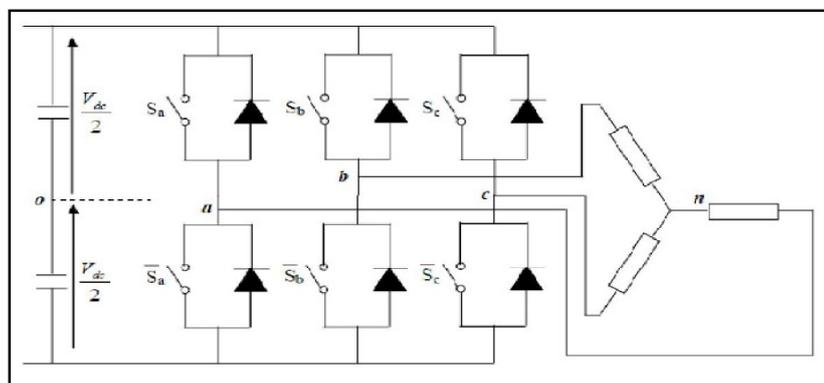


Figure 3.21: L’onduleur de tension triphasé alimentant le rotor d’une MADA.

Les tensions composées sont obtenues à partir des sorties de l'onduleur :

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{ab} = V_{an0} - V_{bn0} \\ U_{bc} = V_{bn0} - V_{cn0} \\ U_{ca} = V_{cn0} - V_{an0} \end{array} \right. \quad (3.26)$$

Les tensions simples des phases de la charge issues des tensions composées ont une somme nulle, donc :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{an} = (1/3)[U_{ab} - U_{ca}] \\ V_{bn} = (1/3)[U_{bc} - U_{ab}] \\ V_{cn} = (1/3)[U_{ca} - U_{bc}] \end{array} \right. \quad (3.27)$$

Elles peuvent s'écrire à partir des tensions de sorties de l'onduleur en introduisant la tension du neutre de la charge par rapport au point de référence  $n_0$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{an} + V_{nn0} = V_{an0} \\ V_{bn} + V_{nn0} = V_{bn0} \\ V_{cn} + V_{nn0} = V_{cn0} \end{array} \right. \quad (3.28)$$

Donc, on peut déduire que :

$$V_{an} = \frac{1}{3}[V_{an0} + V_{bn0} + V_{cn0}]$$

L'état des supposés parfaits  $\Leftrightarrow$  Si (1ou 0) [i=a, b, c] on a interrupteurs :

$$V_{ino} = S_i U_0 - \frac{U_0}{2}$$

On a donc :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ano} = (S_a - 1/2)U_0 \\ V_{bno} = (S_b - 1/2)U_0 \\ V_{cno} = (S_c - 1/2)U_0 \end{array} \right. \quad (3.29)$$

En remplaçant (3.25) dans (3.26), on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{an0} - \frac{1}{3}V_{bn0} - \frac{1}{3}V_{cn0} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{an0} + \frac{2}{3}V_{bn0} - \frac{1}{3}V_{cn0} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{an0} - \frac{1}{3}V_{bn0} + \frac{2}{3}V_{cn0} \end{cases} \quad (3.30)$$

En remplaçant (3.28) dans (3.29), on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}U_0 \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

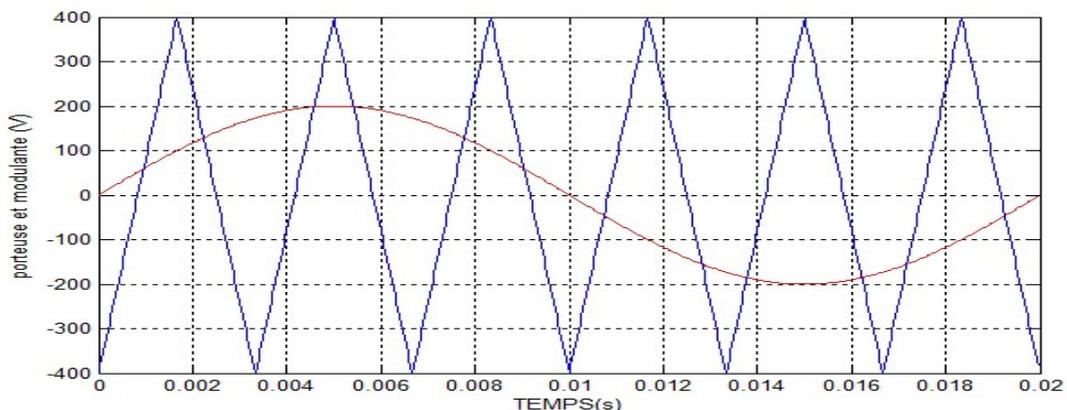
### 3.17.2 Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI)

La modulation triangulo-sinusoidale est appelée également modulation de largeur d'impulsion intersective puisque son principe repose sur l'intersection d'une onde modulante basse fréquence, dite tension de référence, généralement sinusoidale, avec une onde porteuse haute fréquence de forme, généralement, triangulaire, d'où l'appellation triangulo-sinusoidale. Le résultat de la comparaison de ces deux signaux sert à commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance [31]. Deux paramètres caractérisent cette commande si la référence est sinusoidale :

- L'indice de modulation  $m$  qui définit le rapport entre la fréquence  $f_p$  de la porteuse et la fréquence  $f_r$  de la référence.  $m = \frac{f_p}{f_r}$
- Le coefficient de réglage  $r$  qui donne le rapport de l'amplitude de la modulante  $V_r$  crête  $V_p$  de la porteuse:

$$r = \frac{V_p}{V_r}$$

Le schéma de principe est donné par la figure 3.22



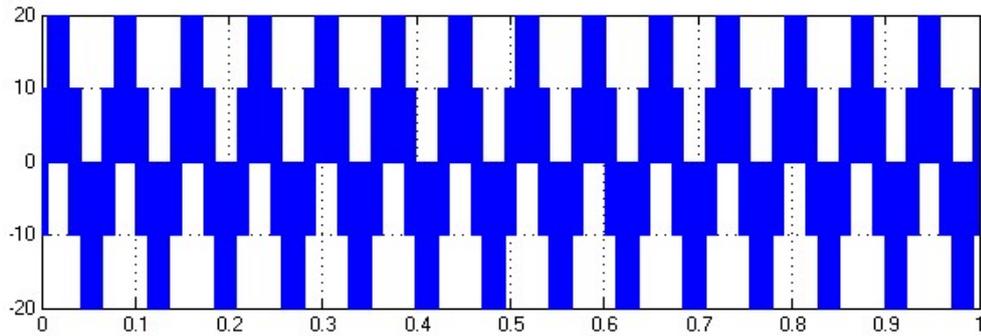


Figure 3.22 : Principe de la commande MLI- intersective.

### 3.18 Résultats de simulation

Le schéma bloc global du système étudié sous MATLAB/SIMULINK est donné à la figure 3.2 3. La turbine éolienne couplée avec la machine asynchrone à double alimentation (MADA); le stator de la machine est connecté directement au réseau triphasé (398/690 V/ 50 Hz), le rotor alimenté par un onduleur triphasé à deux niveaux commandé par MLI.

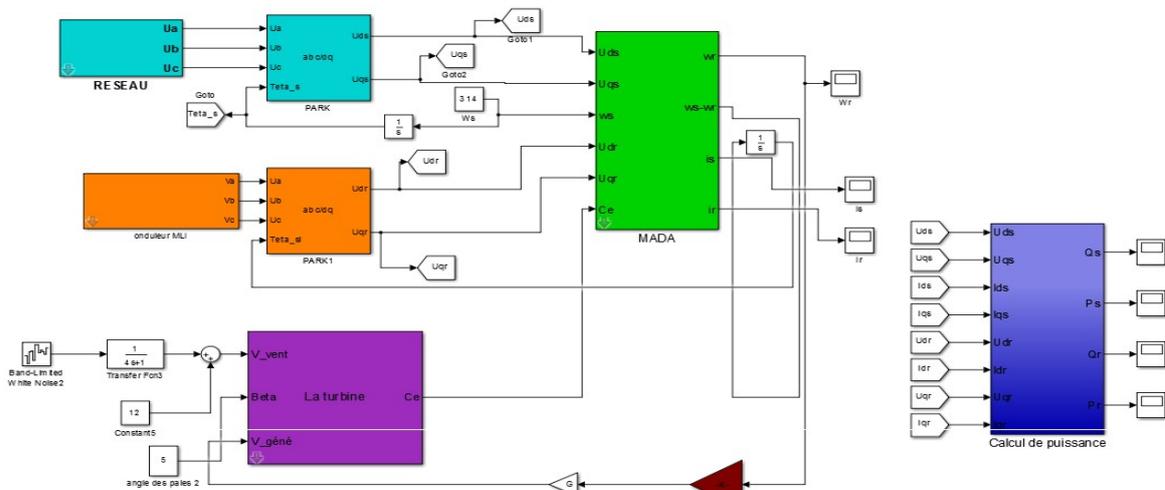
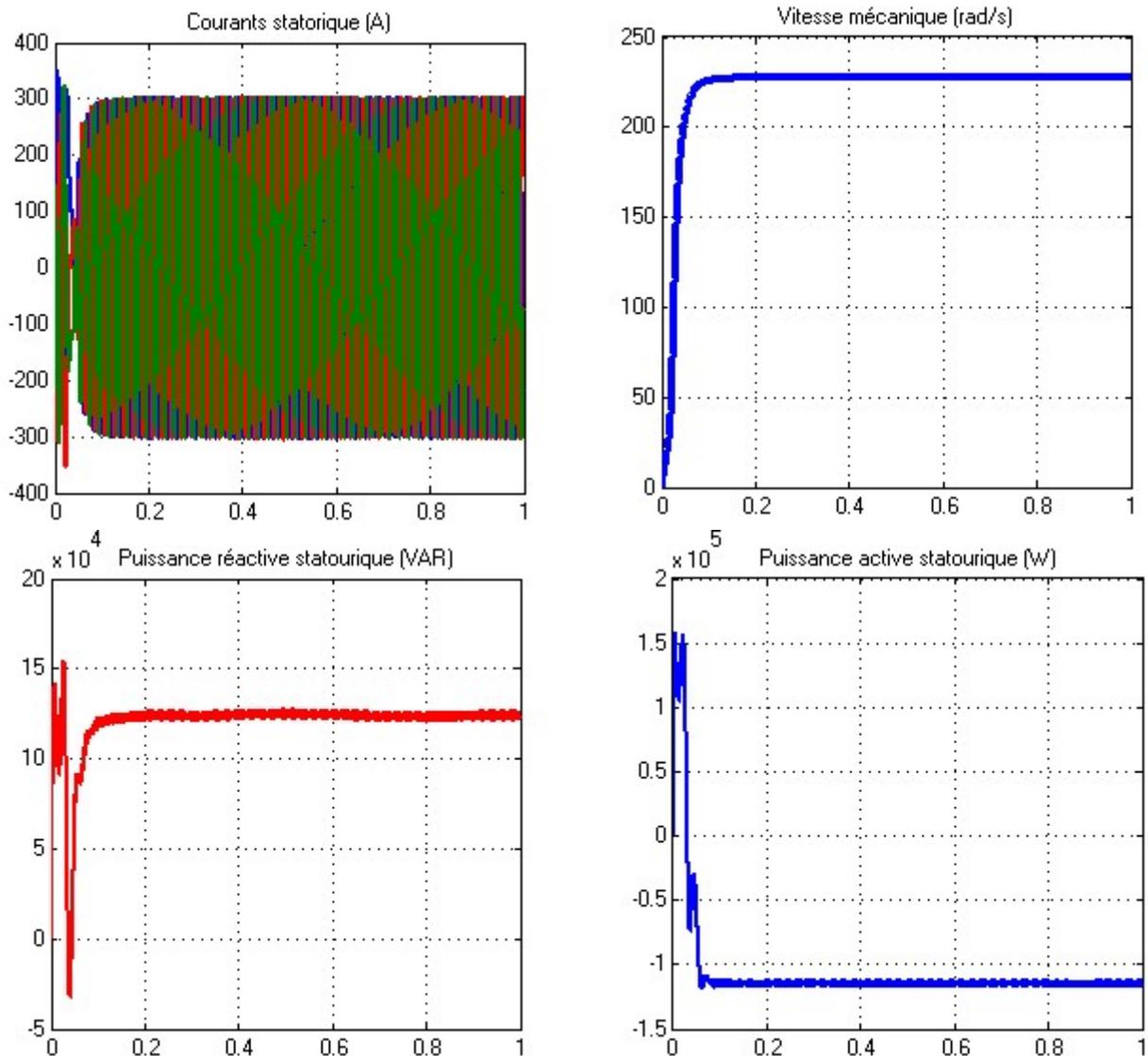


Figure 3.23: Schéma globale du système éolien " Turbine + MADA"

La figure 3.24 présente les résultats de simulation de la génératrice couplée à la turbine éolienne.

**Conditions d’essai :**

- Vitesse du vent moyenne est de 16 m / s
- Angle de calage des pales  $\beta$  est de 5°.
- Tension coté rotor est de 100 V.
- Fréquence de modulation est de 2500Hz.



**Figure 3.24** : Résultats de simulation de la génératrice.

Les résultats de simulation obtenus montrent bien la réponse dynamique rapide de la vitesse (0.015 s). Cette dernière atteint une valeur supérieure à la vitesse du synchronisme (230 rad / s) ça dépend de plusieurs paramètres, principalement à la vitesse du vent, l'angle de calage  $\beta$  et la tension rotorique.

Des fluctuations sont présentées au niveau des puissances dues à la technique MLI à cause de la commutation des interrupteurs de l'onduleur.

Notons aussi que la machine génère plus de l'énergie réactive que l'énergie active ce qui donne un facteur de puissance un peu loin de l'unité ( $\cos\phi= 0.70$ ) et détériore le facteur de puissance global du réseau.

### 3.19 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté une brève étude sur la machine asynchrone à double alimentation, sa structure, son principe de fonctionnement ainsi que ses domaines d'application. On a aussi présenté le modèle de la machine dans le repère (a, b, c) auquel on a appliqué la transformation de Park pour le rendre linéaire et plus adapté à la commande.

Les résultats obtenus en simulation montrent des fluctuations au niveau des puissances dues à la technique MLI (naturelle) à cause de la commutation des interrupteurs. Sachant que le modèle de la MADA est fortement couplé et le facteur de puissance statorique est détérioré, il est utile de trouver une méthode de commande permettant de rendre le contrôle de la puissance active et réactive indépendant en fonctionnement génératrice et qui permet de faire fonctionner la machine à facteur de puissance unitaire au stator. Ainsi, le chapitre suivant fera l'objet du découplage des puissances actives et réactive par la commande vectorielle directe et indirecte basées sur la technique d'orientation du flux statorique et qui permettent un fonctionnement à facteur de puissance unitaire.

## 4.1 Introduction :

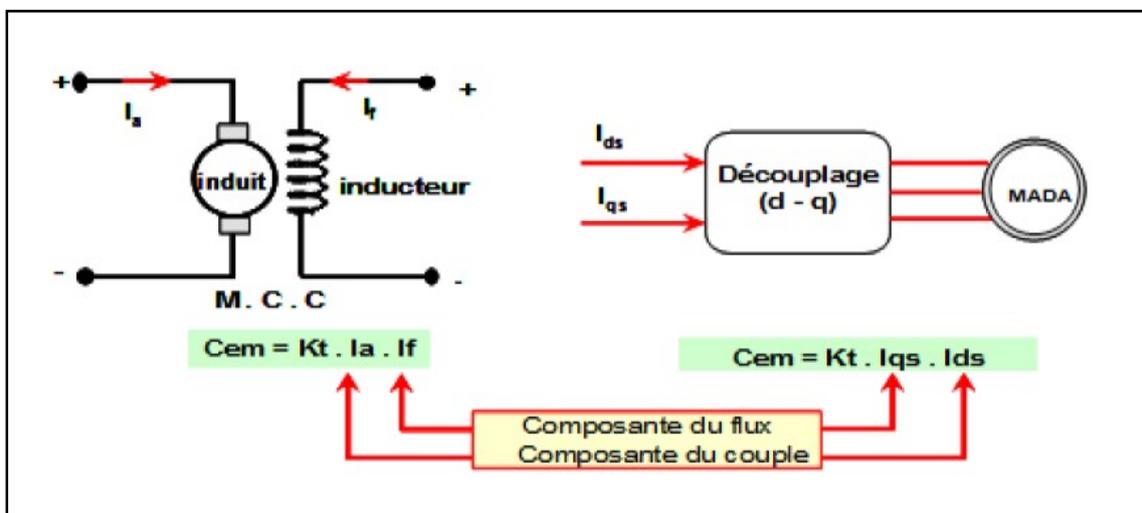
Pour pouvoir contrôler facilement la production d'électricité de l'éolienne, nous allons réaliser un contrôle indépendant des puissances actives et réactives en établissant une commande vectorielle par orientation du flux statorique.

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 machine asynchrone double alimentée aussi bien en fonctionnement générateur que moteur [32].

Dans cette optique, nous avons proposé une loi de commande pour la MADA basée sur l'orientation du flux statorique, utilisée pour la faire fonctionner en génératrice. Cette dernière met en évidence les relations entre les grandeurs statoriques et rotoriques. Ces relations vont permettre d'agir sur les signaux rotoriques en vue de contrôler l'échange de puissance active et réactive entre le stator de la machine et le réseau [12].

## 4.2 Principe de la commande vectorielle de la MADA

Dans la commande vectorielle, la MADA est contrôlée d'une façon analogue à la machine à courant continu à excitation séparée. Cette analogie est représentée par la **figure 4 .1**.



**Figure 4.1 :** Commande d'une MCC et commande vectorielle d'une MADA.

Couple électromagnétique de la machine à courant continu:

$$\begin{cases} C_{em} = K \Phi_f \cdot I_a \\ \Phi_f = K \cdot I_f \end{cases}$$

Cette relation rappelle la relation du couple électromagnétique de la MCC à excitation séparée donc le fonctionnement de la MADA est similaire à celui de la MCC (Machine à Courant Continu).

### 4.3 Principe de la commande à flux orienté

La commande par flux orienté (commande vectorielle) est une expression qui apparaît de nos jours dans la littérature traitant les techniques de contrôle des moteurs électriques, et dont l'étymologie nous ramène à une notion élémentaire mais très importante de l'électromagnétisme. A savoir la force exercée sur un conducteur parcouru par un courant et placé dans une région où règne un champ, il en résulte évidemment une force d'amplitude maximale pour des intensités de courant et de champ données quand le vecteur courant devient perpendiculaire au vecteur champ.

Appliquée au moteur électrique, cette propriété est utilisée pour obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants. Si le principe est naturellement appliqué pour les MCC, ce n'est pas le cas pour les machines à courant alternatif; par conséquent, le contrôle par flux orienté des machines à courant alternatif est une commande par orientation de ces deux grandeurs.

De nombreuses variétés ont été présentes dans les littérateurs, que l'on peut classier :

#### **Suivant la source d'énergie:**

- Commande en tension.
- Commande en courant.

#### **Suivant l'orientation du repère:**

- Le flux rotorique.
- Le flux statorique.
- Le flux d'entrefer.

#### **Suivant la détermination de la position du flux :**

- Directe par mesure ou observation de vecteur flux (module, phase).
- Indirecte par contrôle de la fréquence du glissement.

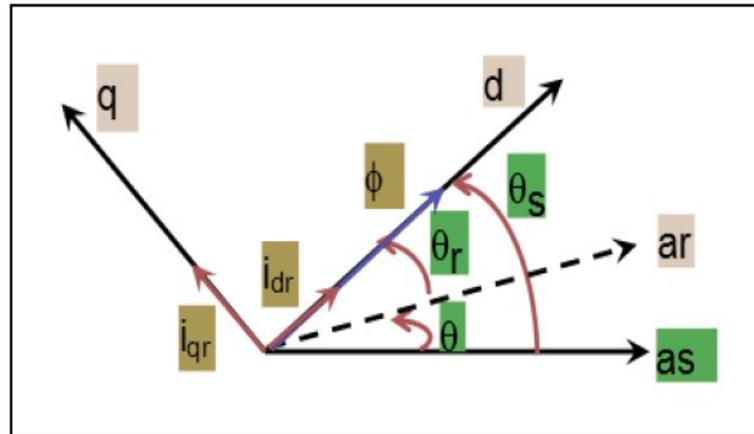


Figure.4.2 : position du référentiel par rapport au flux.

#### 4.4 Procède d'orientation du flux :

La méthode du flux orienté est basée sur le choix du repère de référence. Par le choix du repère lié au champ tournant, il découle que le flux à orienter statorique, rotorique ou d'entrefer doit coïncider avec l'axe « **d** ». Afin d'obtenir un couple maximal, nous devons imposer l'une des conditions suivantes [33] :

➤ **Orientation du flux rotorique :**

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = \Phi_r \\ \Phi_{qr} = 0 \end{cases} \quad (*)$$

➤ **Orientation du flux statorique :**

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = \Phi_s \\ \Phi_{qs} = 0 \end{cases} \quad (**)$$

➤ **Orientation du flux magnétisant :**

$$\begin{cases} \Phi_{dm} = \Phi_m \\ \Phi_{qm} = 0 \end{cases} \quad (***)$$

On utilise dans notre étude la commande vectorielle en puissance active et réactive de la génératrice asynchrone à double alimentation avec orientation du repère (d, q) suivant le flux statorique.

**a L'équation du flux statorique :**

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (4.1)$$

**b L'équation du flux rotorique :**

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} \end{cases} \quad (4.2)$$

**c L'équation de la tension :**

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + \omega_s \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - (\omega_s - \omega) \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + (\omega_s - \omega) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (4.3)$$

**d L'équation du couple électromagnétique :**

$$\begin{aligned} C_{em} &= -\frac{3}{2} p \frac{M}{L_s} (\Phi_{dr} i_{qs} - \Phi_{qr} i_{ds}) \\ &= -\frac{3}{2} p \frac{M}{L_s} (\Phi_{ds} i_{qr} - \Phi_{qs} i_{dr}) \end{aligned} \quad (4.4)$$

On appliquant la technique d'orientation du flux statorique sur le modèle de la machine les équations (4.1), (4.3) et (4.4) deviennent:

$$C_{em} = -\frac{3}{2} p \frac{M}{L_s} \Phi_{ds} \cdot i_{qr} \quad (4.5)$$

Rappelons que ce couple représente une perturbation pour la turbine éolienne et prend une valeur négative.

Dans l'hypothèse où le flux est maintenu constant (ce qui est assuré par la présence d'un réseau stable connecté au stator) et si l'on néglige la résistance du bobinage statorique  $R_s$ , ce qui est une hypothèse assez réaliste pour les machines de forte puissance utilisées pour la production éolienne.

$$\begin{cases} V_{ds} = \frac{d\phi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = \omega_s \phi_s \end{cases} \quad (4.6)$$

**e Les équations des tensions statoriques se réduisent à:**

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \phi_{ds} \end{cases} \quad (4.7)$$

**f Les équations des flux statorique :**

$$\begin{cases} \phi_s = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \\ 0 = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (4.8)$$

A l'aide de l'équations (4.8) on peut établir le lien entre les courants statoriques et rotoriques:

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{\phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} \cdot i_{dr} \\ i_{qs} = -\frac{M}{L_s} \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (4.9)$$

Les puissances active et réactive statoriques d'une MADA s'écrivent:

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} \cdot i_{ds} + V_{qs} \cdot i_{qs} \\ Q_s = V_{qs} \cdot i_{ds} - V_{ds} \cdot i_{qs} \end{cases} \quad (4.10)$$

En appliquant les hypothèses simplificatrices à l'équation (4.10) on obtient:

$$\begin{cases} P_S = V_S \cdot i_{qS} \\ Q_S = V_S \cdot i_{dS} \end{cases} \quad (4.11)$$

En remplaçant  $i_{dS}$  et  $i_{qS}$  par leurs expressions (4.9) dans l'équation (4.11) on obtient:

$$\begin{cases} P_S = -V_S \frac{M}{L_S} i_{qr} \\ Q_S = V_S \frac{\Phi_S}{L_S} - V_S \frac{M}{L_S} i_{dr} \end{cases} \quad (4.12)$$

En approximant  $\Phi_S$  par  $\frac{V_S}{\omega_s}$ , l'expression de la puissance réactive  $Q_S$  devient alors:

$$Q_S = \frac{1}{\omega_s L_S} V_S^2 - V_S \frac{M}{L_S} i_{dr} \quad (4.13)$$

Afin de pouvoir contrôler correctement la machine, il est nécessaire d'établir la relation entre les courants et les tensions rotoriques qui seront appliqués à la machine.

En remplaçant dans l'équation des flux de flux de model de la MADA les courants statoriques par l'expression (4.9) on obtient:

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = \left( L_r - \frac{M^2}{L_S} \right) i_{dr} - \frac{M \cdot V_S}{\omega_s \cdot L_S} \\ \Phi_{qr} = \left( L_r - \frac{M^2}{L_S} \right) i_{qr} \end{cases} \quad (4.14)$$

En remplaçant l'expression des flux rotoriques de l'équation précédente (4.14) par leurs expressions dans l'équation (4.3) on obtient :

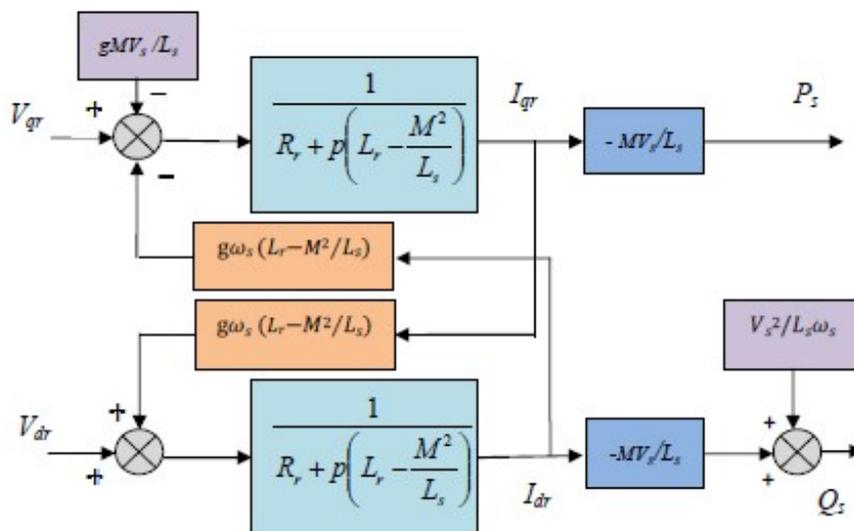
$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_S} \right) \frac{di_{dr}}{dt} - g \cdot \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_S} \right) i_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_S} \right) \frac{d}{dt} i_{qr} + g \cdot \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_S} \right) \cdot i_{dr} + g \cdot \omega_s \cdot \left( \frac{M \cdot V_S}{\omega_s \cdot L_S} \right) \end{cases} \quad (4.15)$$

$V_{dr}$  et  $V_{qr}$  sont les composantes déphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus ;

$\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)$  : est le terme de couplage entre les deux axes ;

$\left[g \cdot \omega_s \cdot \left(\frac{M \cdot V_s}{\omega_s \cdot L_s}\right)\right]$  : représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation ;

La représentation sous forme de schéma-blocs de la MADA est donnée par la figure ci-dessous **figure 4.3** .



**Figure. 4.3** : Schéma bloc du système à réguler

On remarque que les puissances et les tensions sont liées par une fonction de transfert du premier ordre. De plus, du fait de la faible valeur du glissement  $g$ , il sera possible d'établir sans difficulté une commande vectorielle car les influences des couplages resteront faibles et les axes d et q pourront donc être commandés séparément avec leurs propres régulateurs. Ainsi, il apparaît deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette machine :

- La première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. Cette méthode sera appelée **méthode directe** car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine [39].

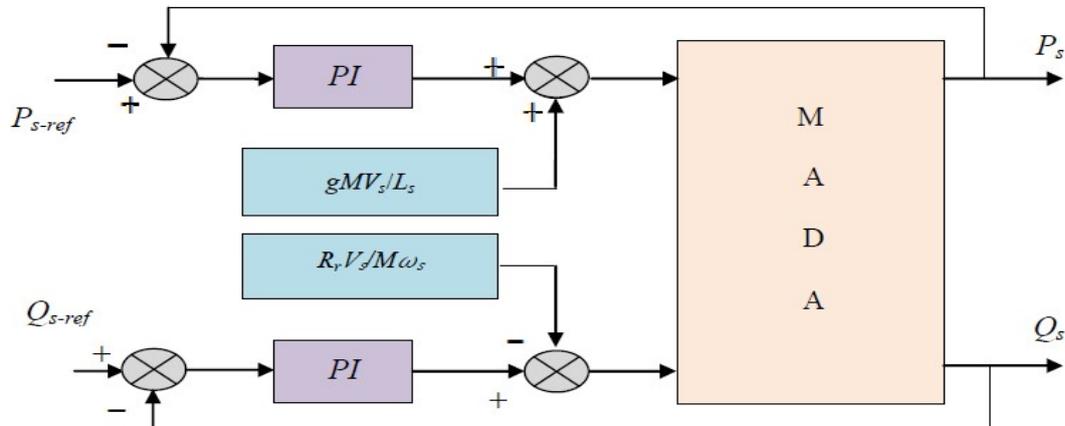


Figure 4.4 : Schéma bloc de la commande directe.

➤ La deuxième méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques. Cette méthode appelée **méthode indirecte** découle directement des équations (4.13) et (4.11).

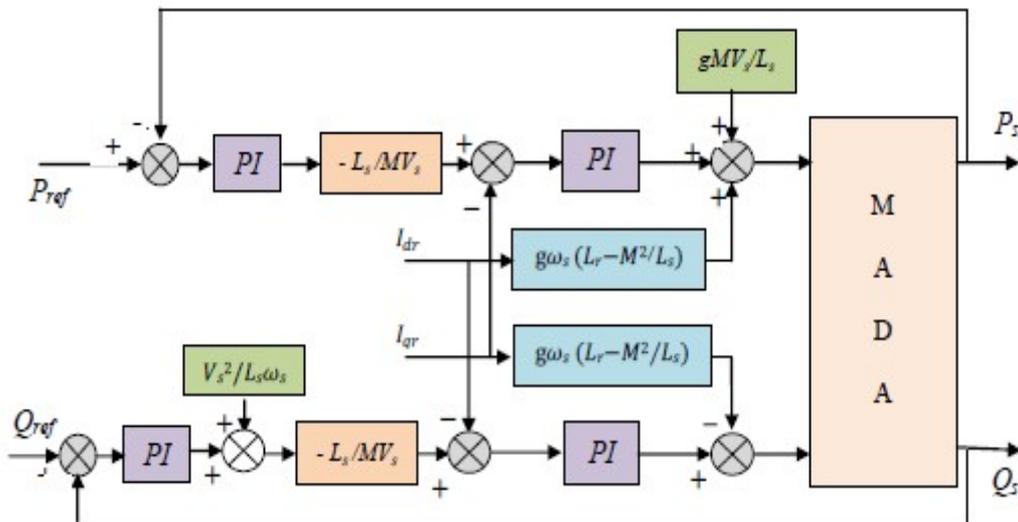


Figure 4.5: Schéma bloc de la commande indirecte.

Ces deux méthodes vont être étudiées et simulées dans la suite de ce chapitre.

L'intérêt que présente la méthode directe est que sa mise en œuvre est simple, par contre la méthode indirecte a l'avantage de contrôler les courants rotoriques ce qui permettra de faire une protection de la machine en limitant ces courants.

## 4.5 La commande vectorielle directe

### 4.5.1 Définition générale

Cette méthode de commande a été proposée par **Blaschke**. Dans ce cas, la connaissance du module de flux et de sa phase est requise pour assurer un découplage entre le couple et le flux quelque soit le régime transitoire effectué. En effet, dans ce cas, le flux est régulé par une contre réaction, donc il doit être mesuré ou estimé à partir des signaux de tensions statoriques et de courants. Afin d'accéder à l'information concernant l'amplitude et la phase du flux. L'avantage de cette technique est qu'elle dépend moins des variations paramétrique. Cependant, l'inconvénient de cette méthode est que les capteurs sont mécaniquement fragiles et ne peuvent pas travailler dans des conditions sévères telles que les vibrations et les échauffements excessifs.

### 4.5.1 Commande directe en puissance active et réactive de la MADA en génératrice

Dans cette section, nous présentons la régulation indépendante des puissances actives et réactives de la machine en utilisant les remarques faites au paragraphe précédent. Il a été mis en évidence le lien entre, d'une part la puissance active et la tension  $V_{qr}$  et d'autre part la puissance réactive et la tension  $V_{dr}$  **figure 4.4**.

Si l'on regarde la relation qui lie les courants rotoriques aux puissances statoriques, on voit apparaître le terme  $\frac{M.V_s}{L_s}$ . Dans notre étude, nous avons considéré que l'éolienne était raccordée à un réseau de forte puissance et stable, donc ce terme est constant. Nous ne placerons donc pas des régulateurs entre les courants rotoriques et les puissances.

Pour simplifier la commande de la MADA, nous considérons que la tension du réseau est stable, ce qui nous permet d'utiliser une seule boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur indépendant.

## 4.6 Commande vectorielle indirecte

### 4.6.1 Définition générale

La commande indirecte est basée sur le principe à ne pas mesurer (ou estimer) l'amplitude de flux mais seulement sa position, l'idée est proposée par **Hasse**. Elle consiste à estimer la position du vecteur de flux, et régler son amplitude en boucle ouverte. Les tensions ou les courants assurant l'orientation du flux et le découplage sont évalués à partir d'un modèle de la machine en régime transitoire [34], [35]. Cette méthode a été favorisée par le développement des microprocesseurs, elle est très sensible aux variations paramétriques de la machine. Il est important de souligner que la méthode indirecte est la plus simple à réaliser et la plus utilisée que la méthode directe, mais le choix entre les deux méthodes varie d'une application à l'autre [35], [36].

### 4.6.2 Commande indirecte en puissance active et réactive de la MADA en génératrice

En se basant sur les équations régissant le fonctionnement de la machine défini dans la modélisation; tout en gardant les mêmes hypothèses.

En combinant les différentes équations des flux, des tensions rotoriques, des courants et des puissances, nous pouvons exprimer les tensions en fonction des puissances. On reproduit ainsi le schéma bloc du système en sens inverse en aboutissant à un modèle qui correspond à celui de la machine mais dans l'autre sens et qui contient tous les éléments du schéma bloc de la MADA.

On part donc de la puissance statorique en fonction des courants rotoriques et des expressions des tensions rotoriques en fonction des courant rotoriques et on trouve:

$$\begin{cases} V_{dr} = g \cdot w_s \frac{(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{V_s M} \cdot P_s - \left( \frac{R_r + (L_r - \frac{M^2}{L_s})}{V_s M} P \right) \cdot Q_s + \left( \frac{R_r V_s}{w_s L_s} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{V_s}{w_s M} P \right) \\ V_{qr} = - \left( \frac{R_r + (L_r - \frac{M^2}{L_s})}{V_s M} P \right) \cdot P_s - g \cdot w_s \frac{(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{V_s M} \cdot Q_s + g \cdot w_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{V_s}{w_s M} \end{cases} \quad (4.16)$$

## 4.7 Commande avec boucle de courant

Dans le but d'améliorer la commande directe, nous allons introduire une boucle de régulation supplémentaire au niveau des courants afin d'éliminer l'erreur statique tout en préservant la dynamique du système. Nous aboutissons au schéma bloc présenté à la **figure 4.5** sur lequel on distingue bien les deux boucles de régulation pour chaque axe, l'une contrôlant le courant et l'autre la puissance. Ce type de régulation donne une dynamique satisfaisante et une erreur statique nulle.

L'asservissement des courants joue un rôle très important dans la commande. En effet, plus cet asservissement est efficace plus la puissance rotorique (active, réactive) produite par la machine est proche de celle désirée.

Pour cela, pour conserver l'orientation du flux exigé par la commande vectorielle, on doit étudier une boucle de régulation de courant. Ainsi, nous allons mettre en place une boucle de régulation en puissance indépendante, tout en compensant les termes de

perturbations  $\left(g \frac{M.V_s}{L_s} \text{ et } \frac{V_s^2}{\omega_s.L_s}\right)$  afin d'obtenir un bon fonctionnement avec amélioration des performances du système.

## 4.8 Etude de la régulation pour la commande

Nous avons utilisé des régulateurs de type Proportionnel-Intégral (PI) en raison de leur performance et de leur rapidité de calcul. Leur tâche est non seulement de comparer les valeurs réelles mesurées avec les valeurs de référence, mais aussi de stabiliser le système à réguler. Ainsi, au cours de la synthèse de ces régulateurs, nous ferons en sorte d'obtenir une dynamique électrique du système aussi rapide que l'autorise la fréquence de la MLI du convertisseur rotorique, ceci dans l'optique de l'insertion du dispositif dans un système éolien à vitesse variable ou dans un autre système utilisant la MADA en génératrice.

### 4.8.1 Synthèse du régulateur Proportionnel-Intégral (PI)

Le régulateur utilisé pour commander la MADA en génératrice est un régulateur de type proportionnel-Intégral (PI) qui permet d'avoir une bonne précision, une rapidité et stabilité du système. La fonction de transfert du régulateur est donnée par :  $R(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$

La détermination des paramètres  $K_p$  et  $K_i$  du régulateur fait intervenir des méthodes classiques de calcul des régulateurs continus. Cette stratégie permet l'application de l'ensemble des outils de l'automatique linéaire au problème de régulation.

La première simplification consiste à introduire deux nouvelles perturbations sur les grandeurs de commande ( $\varepsilon_d$  et  $\varepsilon_q$ ) qui représentent les résidus de découplage et les perturbations. Nous avons également choisi de mesurer la perturbation  $v$  pour améliorer le comportement des régulateurs sur l'axe  $d$ . Les deux axes sont ainsi considérés comme découplés.

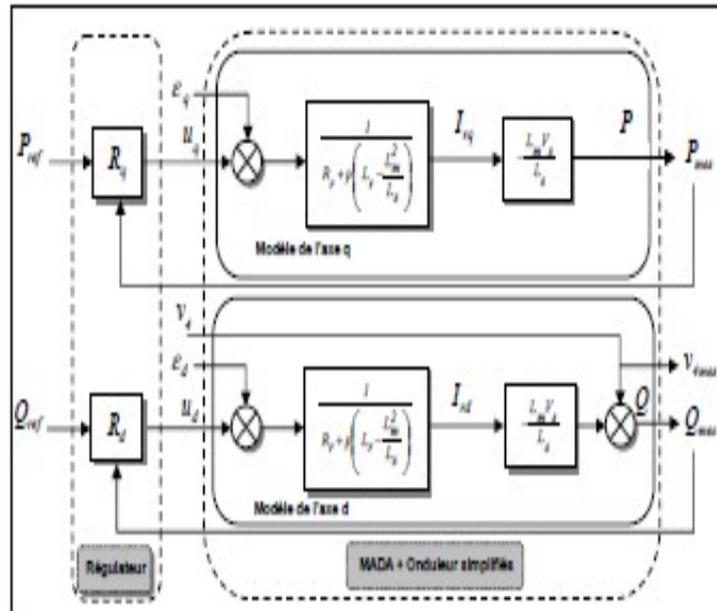


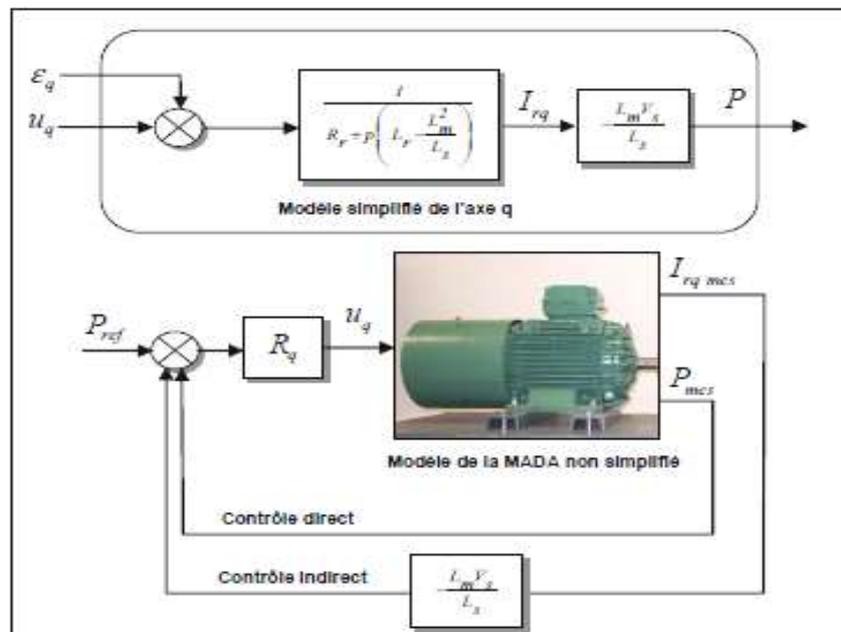
Figure.4.6 : Problème de commande simplifié (contrôle directe).

La deuxième simplification considère le terme constant  $V_4$  comme une perturbation qui devra être rejetée par la loi de commande.

Le rôle des régulateurs de chaque axe est d'annuler l'écart entre les puissances actives et réactives de référence et les puissances actives et réactives mesurées. Rappelons que la synthèse des régulateurs sera effectuée sur la base du modèle simplifié de la figure 4.6 (C'est à dire celui établi en négligeant la résistance d'une phase statorique) et non pas sur le modèle réel de la machine.

$$\begin{cases} P_S = -V_S \cdot \frac{M}{L_S} \cdot i_{qr} \\ Q_S = \frac{1}{\omega_S \cdot L_S} V_S^2 - V_S \frac{M}{L_S} \cdot i_{dr} \end{cases} \quad (4.15)$$

Une deuxième solution consisterait alors à asservir non plus les puissances mais plutôt indirectement les courants rotoriques en n'utilisant non plus les puissances mesurées comme retour sur le comparateur mais les courants rotoriques d'axe  $d$  et  $q$  utilisés dans le contexte des équations ci dessous **figure 4.7**.



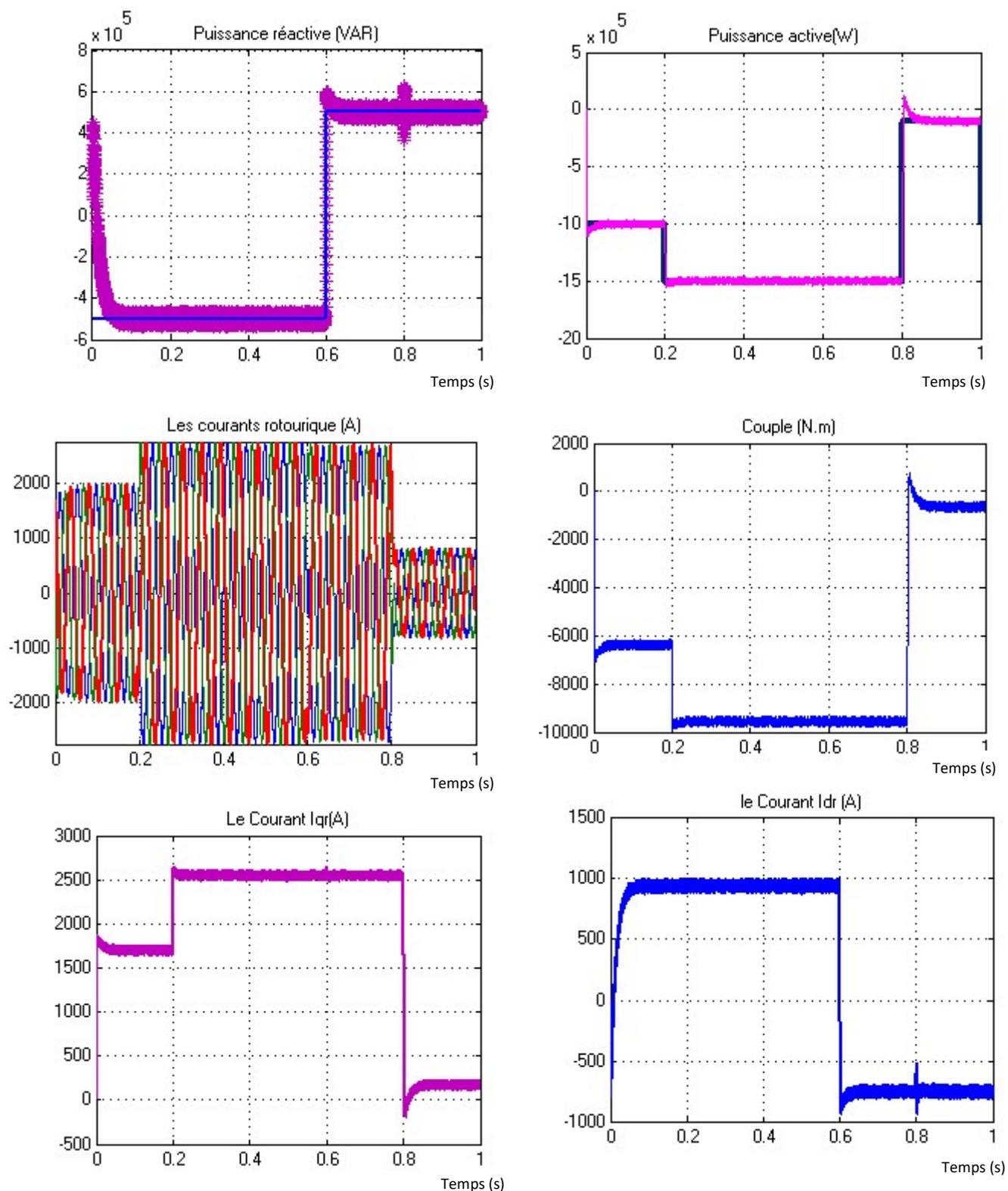
**Figure.4.7** : Exemple de contrôle direct et indirect sur l'axe q.

## 4.9 Simulation et interprétation des résultats

La simulation est réalisée à l'aide du logiciel Matlab/Simulink. Nous avons donc soumis ce système à des échelons de puissance active et réactive afin d'observer le comportement de sa régulation. Les **figures 4.8** et **figure. 4.9** représentent respectivement les résultats de simulation de la commande vectorielle directe et indirecte de la génératrice asynchrone à double alimentation.

Une puissance active statorique de référence (échelon) d'une valeur 1MW entre l'instant  $t = [0, 0.2s]$  et 1.5MW entre l'instant  $t = [0.2, 0.8s]$  et 0.1MW entre l'instant  $t = [0.8, 1s]$  respectivement est appliqué sur la machine.

Une puissance réactive statorique de référence d'une valeur de -0.5MVar entre les instants  $[0, 0.6s]$  et 0.5MVar entre les instants  $[0.6, 1s]$  respectivement appliqué sur la machine.



**Figure.4.8 :** Résultats de simulation de la commande vectorielle directe.

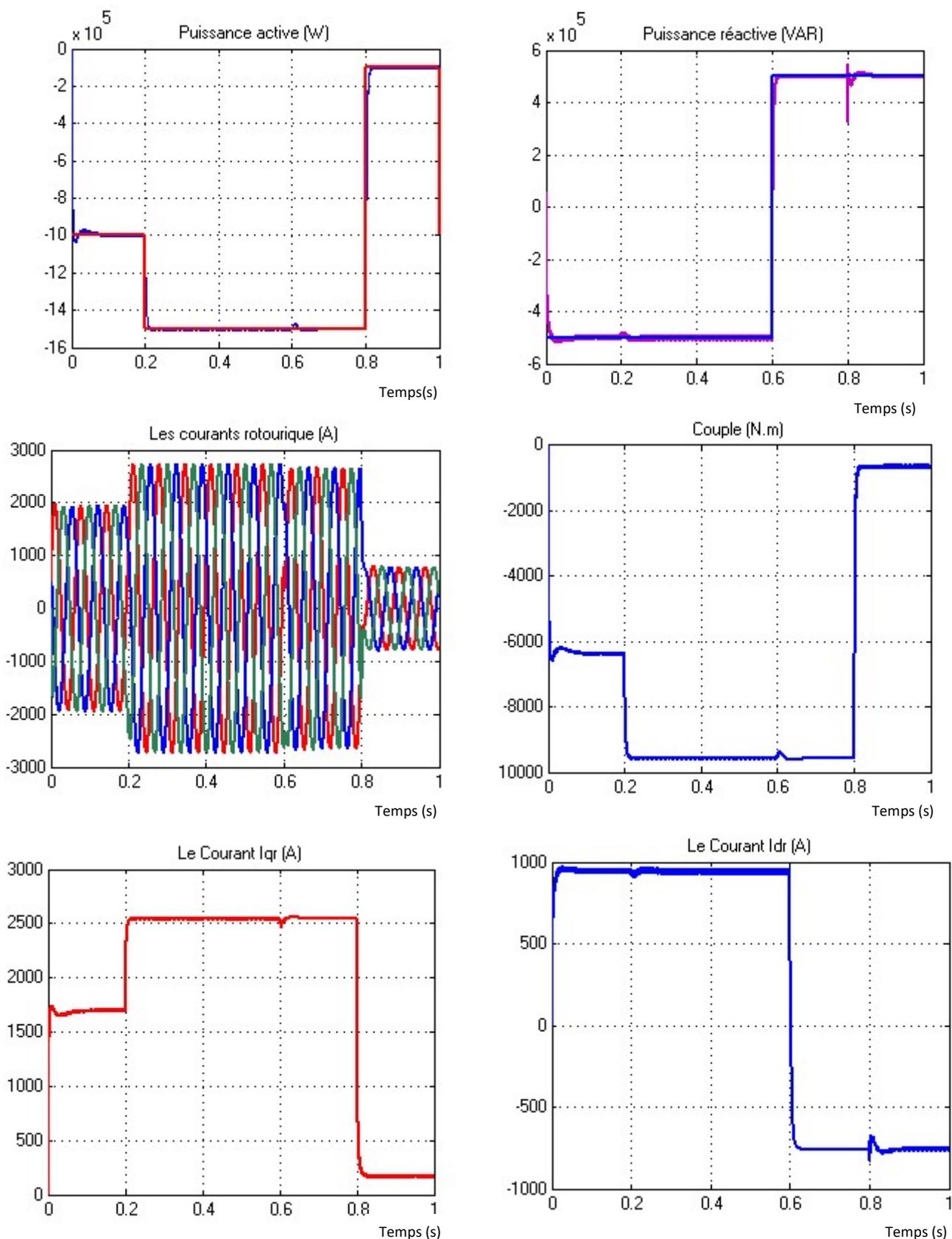


Figure. 4.9 : Résultats de simulation de la commande vectorielle indirecte.

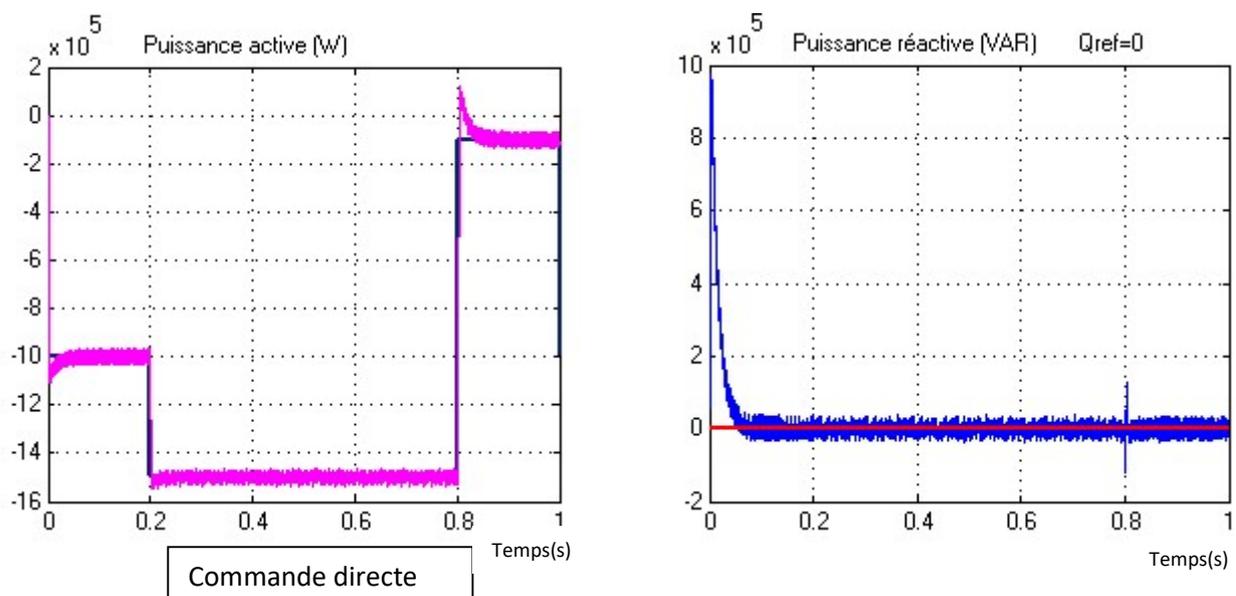
Pour la **figure 4.8**, On peut remarquer que les échelons de puissance sont bien suivis par la génératrice aussi bien pour la puissance active que pour la puissance réactive. On voit bien aussi que la puissance active statorique  $P_s$  dépend du courant rotorique en quadrature  $I_{qr}$  et que la puissance réactive statorique  $Q_s$  dépend du courant rotorique direct  $I_{dr}$  et là également on observe l'effet du couplage entre les deux axes de commande  $d$  et  $q$ . La puissance active du côté statorique est réactive est réglable selon les besoins du réseau. Négative ce qui signifie que le réseau dans ce cas est un récepteur de l'énergie fournie par la MADA.

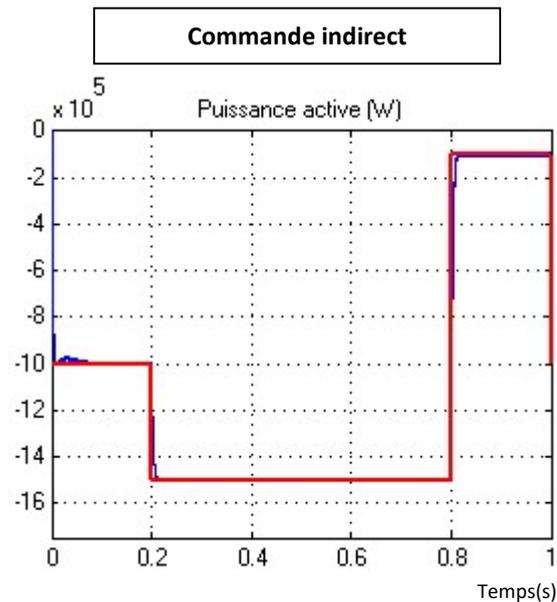
La **figure 4.9** présente les résultats de simulation de la commande indirecte de la génératrice asynchrone à double alimentation.

Que ce soit pour la puissance active ou réactive, on observe une dynamique qui réagi rapidement, les échelons sont correctement suivis et il n'y a plus d'erreur sur les puissances. Le couplage entre les deux puissances est très faible et peu perceptible. Il ne devrait pas poser de problème pour la suite de l'exploitation du modèle de la machine.

#### 4.9.1 Contrôle de facteur de puissance

Dans cette partie la consigne de puissance réactive statorique sera maintenue nulle ( $Q_{ref} = 0$  MVAR) = pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau. La consigne de puissance active devra permettre de garder le coefficient de puissance de l'éolienne optimal **figure 4.10** [5].





**Figure 4.10:** Commande vectorielle à facteur de puissance unitaire.

On peut dire que le contrôle de la puissance active pour la génératrice éolienne est parfaitement réalisé à un facteur de puissance unitaire ( $\cos\varphi = 1$ )

## 4.10 Robustesse de la commande

La robustesse des commandes est un point important, surtout pour les systèmes comportant plusieurs entités en interaction ou les systèmes à fortes variations des paramètres. L'essai de robustesse consiste à faire varier les paramètres du modèle de la MADA utilisé.

### 4.10.1 Commande directe

Si l'on avait changé un paramètre de la machine pour la commande directe comme  $R_r$ ,  $L_s$ ,  $L_r$  ou  $L_m$  les références de la puissance active et réactive ne suivent pas parfaitement les consignes et provoquent des erreurs statiques sur les puissances. L'influence des variations des paramètres de la machine sur la commande directe est présentée à la **figure 4.11**.

- Influence de la variation de la résistance rotorique  $R_r$  de +50 % (**figure 4.11.a**).
- Influence de la variation de l'inductance statorique  $L_s$  de +10% (**figure 4.11.b**).
- Influence de la variation de l'inductance rotorique  $L_r$  de +10 % (**figure 4.11.c**).
- Influence de la variation de l'inductance mutuelle  $L_m$  de -10% (**figure 4.11. d**).

Figure (4.11.a)

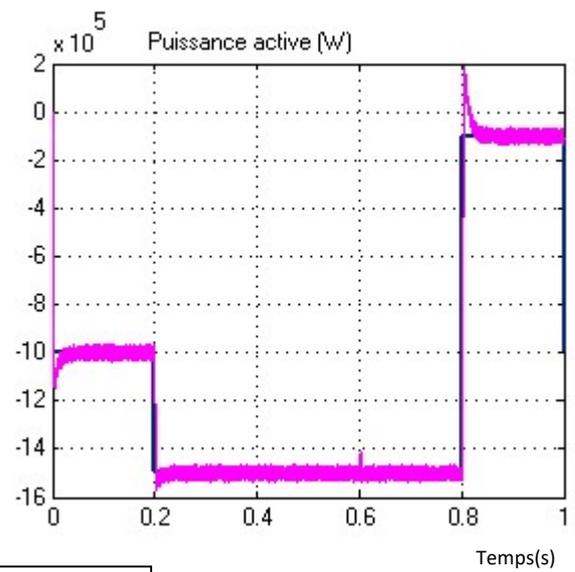
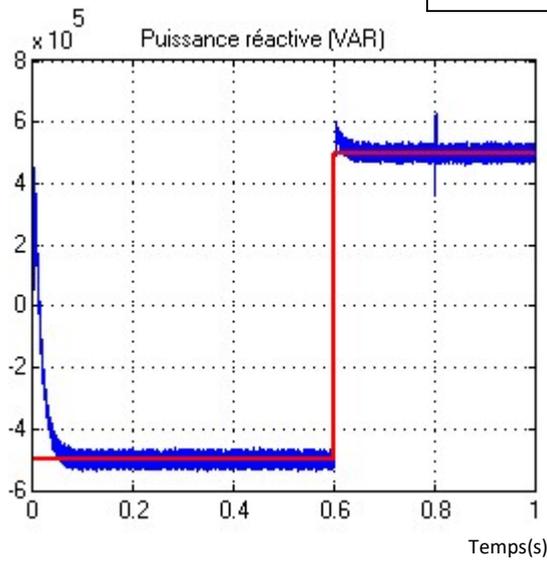


Figure (4.11.b)

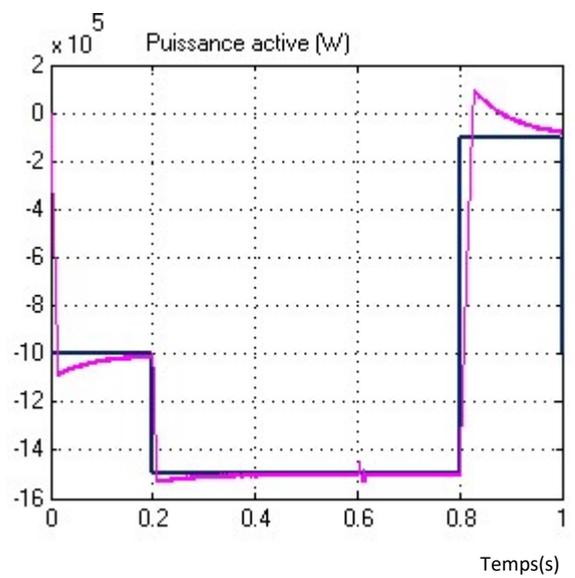
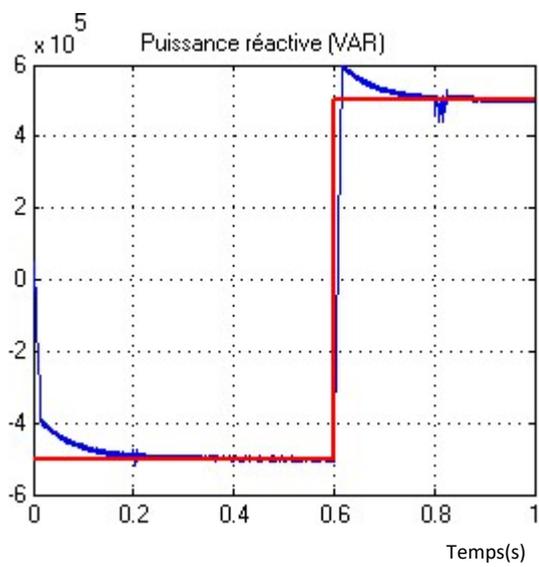


Figure (4.11.c)

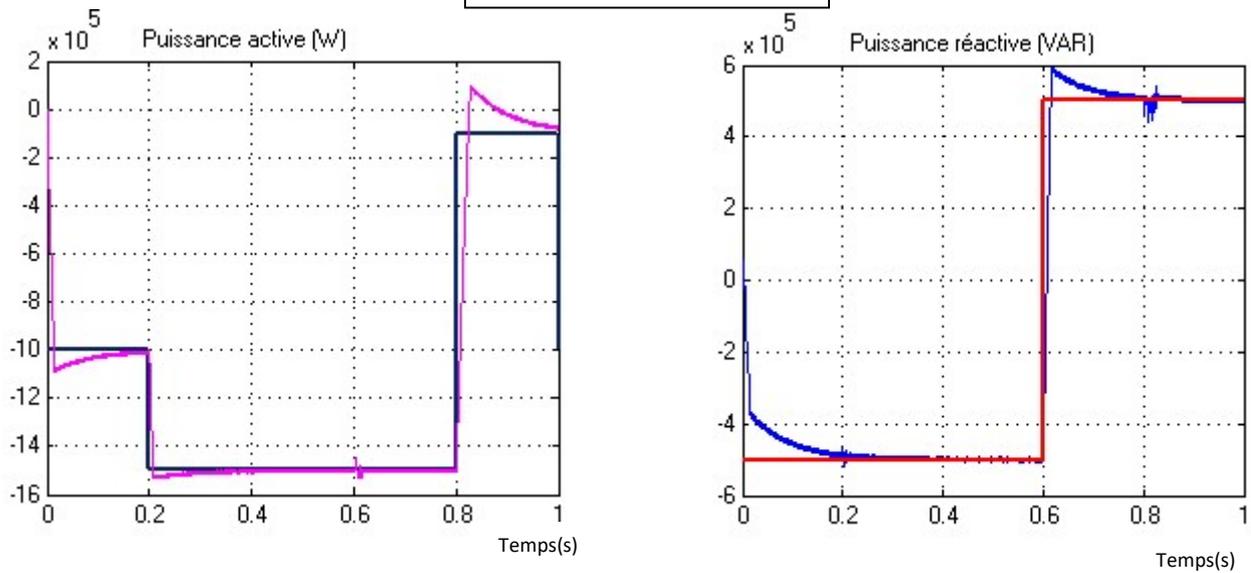
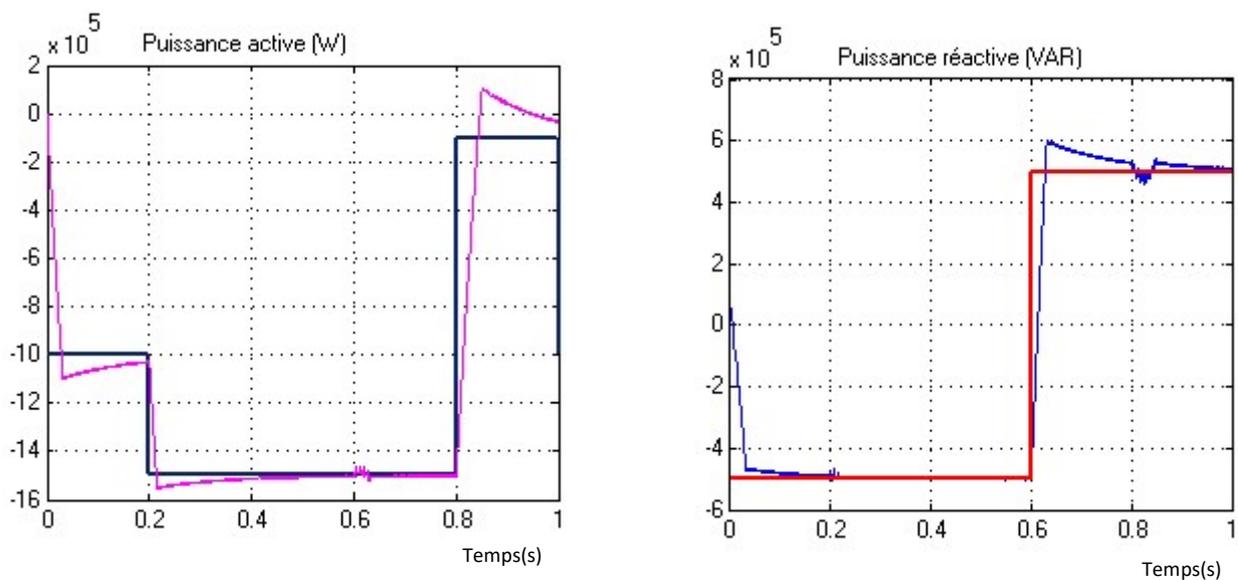


Figure (4.11.d)



**Figure 4.11 :** Influence des variations paramétriques sur la commande directe.

Pour une variation de la résistance rotorique de +50 % qui correspond au cas d'échauffement du bobinage rotorique, les puissances active et réactive viennent à suivre leurs consignes correctement. Cependant une variation de  $\pm 10\%$  sur les inductances détériore les performances de la commande directe.

### 4.10.2 Commande indirecte

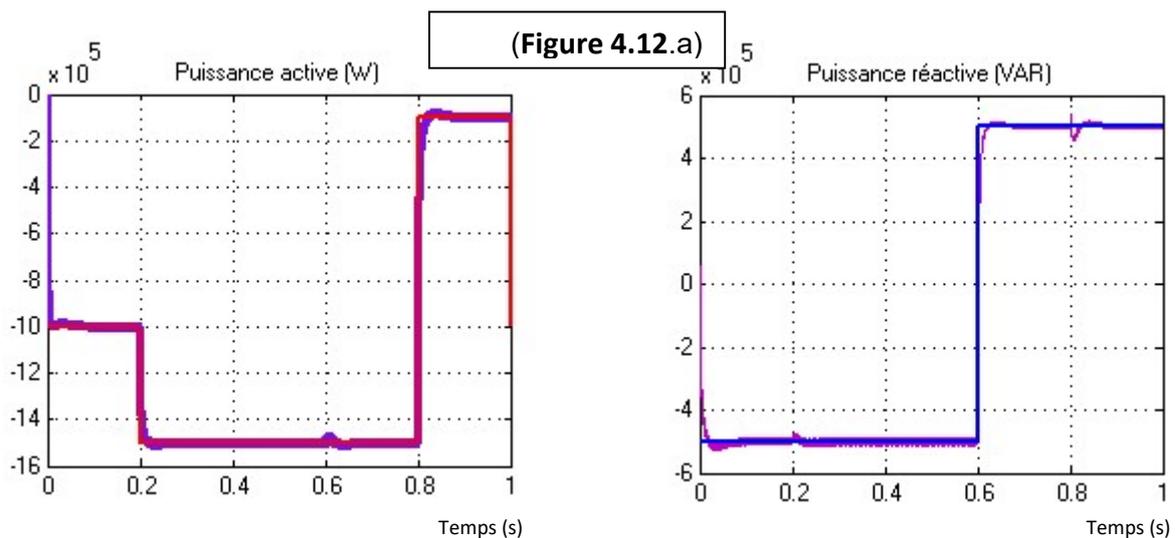
Nous avons fait plusieurs essais avec la commande indirecte sur la variation de paramètres électriques de la machine et du réseau, on note donc que la variation de la résistance rotorique  $R_r$  de +50 % de sa valeur nominale n'affecte pas le système qui parvient tout de même à garantir le contrôle de puissance.

Cette variation de la résistance rotorique n'a quasiment aucune influence sur le fonctionnement de la génératrice car les deux boucles de régulations nous permettent de rattraper les erreurs dues aux termes de compensation qui ne sont plus en rapport avec la bonne valeur de la résistance.

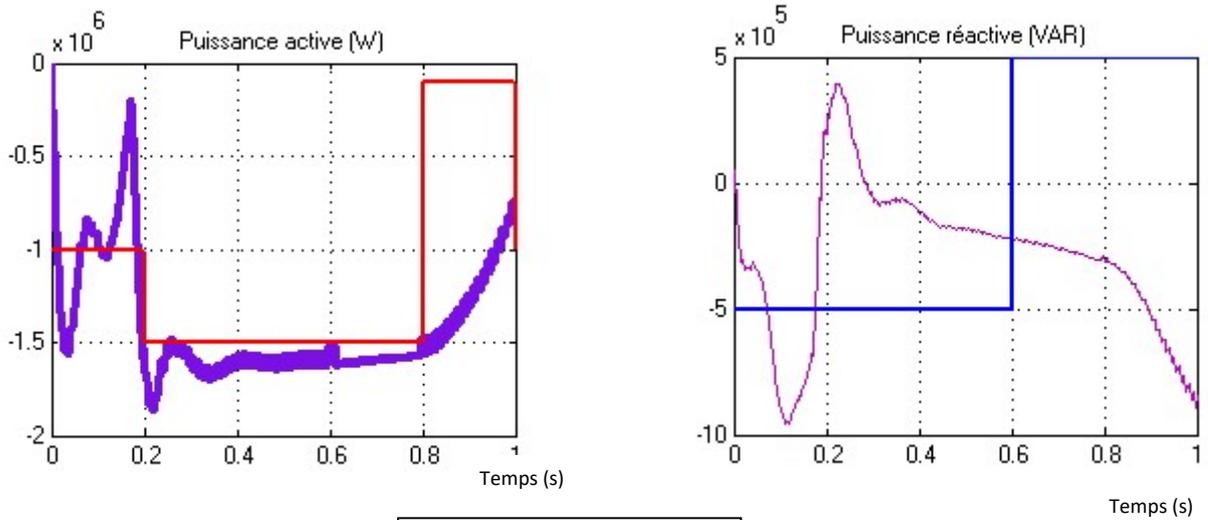
Vis-à-vis des variations des inductances la commande perd ses performances.

Les résultats des simulations obtenus sont donnés à la (figure 4. 12).

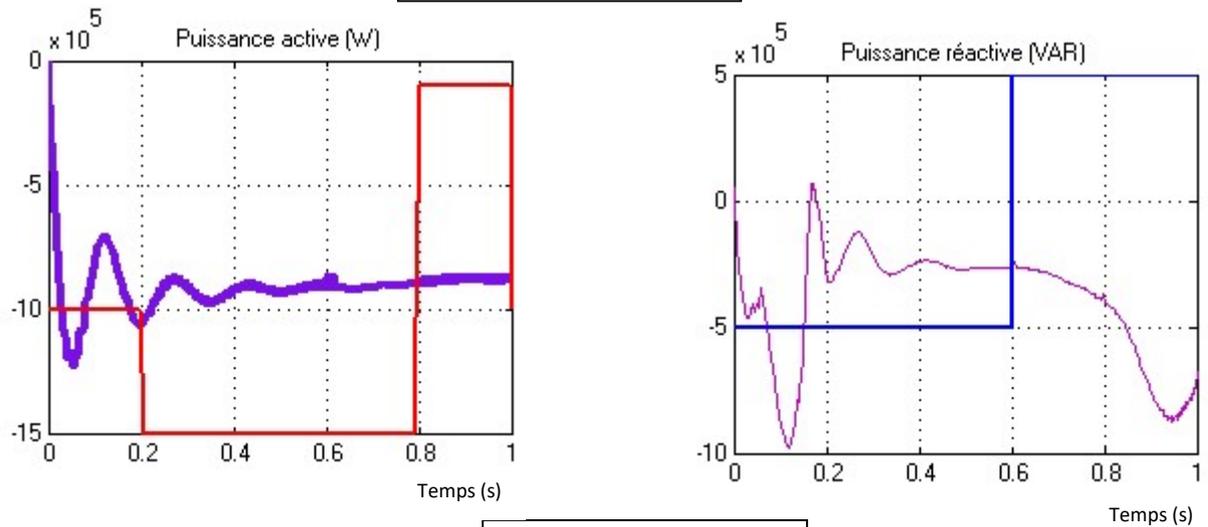
- Influence de la variation de la résistance rotorique  $R_r$  de +50 % (figure 4.12.a).
- Influence de la variation de l'inductance statorique  $L_s$  de +10% (figure 4.12.b).
- Influence de la variation de l'inductance rotorique  $L_r$  de +10 % (figure 4.12.c).
- Influence de la variation de l'inductance mutuelle  $L_m$  de -10% (figure 4.12. d).



(Figure 4.12.b)



(Figure 4.12.c)



(Figure 4.12.d)

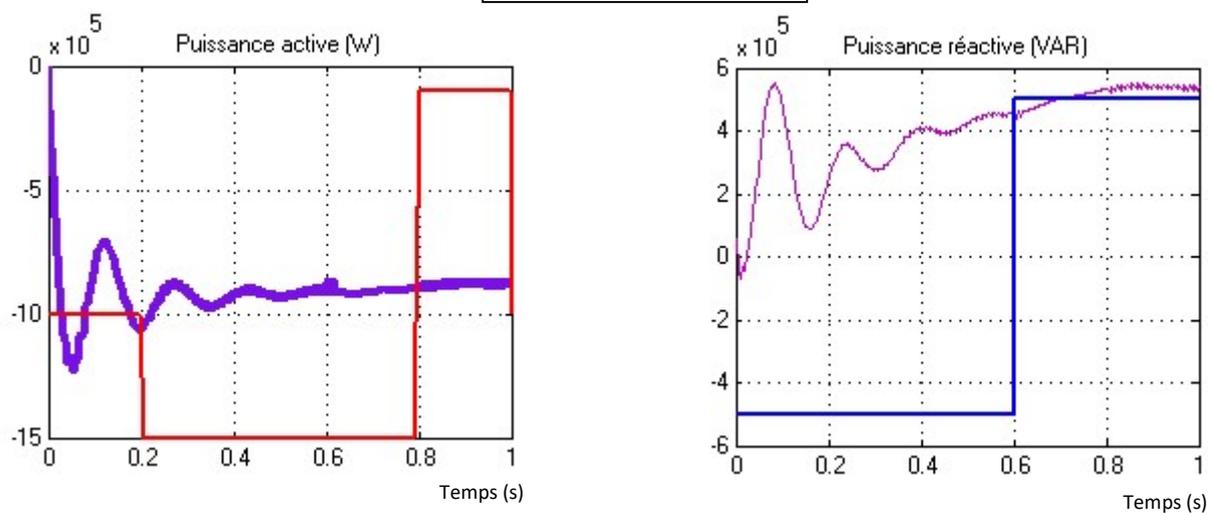


Figure 4.12: Influence de la variation des inductances sur la commande indirecte.

Le régulateur PI perd sa robustesse particulièrement face aux variations des inductances car le calcul des gains  $k_p$  et  $k_i$  du régulateur repose essentiellement sur ces paramètres (Annexes).

Si plusieurs paramètres varient en même temps dans de grandes proportions, il est sûr que les régulateurs n'arriveront plus à faire fonctionner le système convenablement.

### **4.11 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présentée une étude comparative entre la commande vectorielle directe et indirecte de la GADA intégrée à un système éolien. Tout d'abord, la modélisation de la turbine éolienne et la génératrice est réalisée afin d'appliquer la technique d'orientation du flux (FOC). Ensuite, la synthèse d'un régulateur Proportionnel-Intégral (PI) est réalisée. Ce type de régulateur reste le plus communément utilisé pour la commande, ainsi que dans de nombreux systèmes de régulation industriels.

Effectivement nous avons pu voir que la commande directe est la plus simple à mettre en œuvre, mais pas la plus performante. En revanche, la méthode indirecte nous permet, avec le bouclage en cascade, d'avoir un système un peu performant. Elle est certes plus complexe à mettre en œuvre par rapport à la commande directe, mais permettra d'avoir un fonctionnement optimal du système de génération électrique en minimisant les éventuels soucis liés aux variations paramétriques de la GADA.

## Conclusion générale

L'objectif préalablement défini de ce travail consistait à l'étude des différents systèmes de contrôle de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) qui est la plus utilisée pour ce mode de production d'énergie électrique. Dans le contexte des énergies renouvelables, un état de l'art de la génératrice éolienne est présenté dans le premier chapitre, on rappelle les concepts fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique et les différents types d'éoliennes avec les machines électriques utilisées dans cette conversion d'énergie. Ce qui nous a amené à choisir la machine asynchrone à double alimentation de par ces qualités de fonctionnement. Dans le deuxième chapitre, on a étudié l'asservissement de la chaîne turbine-MADA convertisseurs pour assurer un rendement optimal et La modélisation de la turbine et l'élaboration d'une commande adéquate pour le captage du maximum de puissance possible seront faites.

Il est noté que l'utilisation de la MADA dans les éoliennes connaît une évolution très rapide à cause de ses performances vis-à-vis des autres machines. Ainsi la majeure partie des éoliennes modernes industrielles est constituées de génératrices asynchrones à double alimentation car elles apportent non seulement des solutions aux variations incessantes du vent, mais aussi permettent un transfert optimal de la puissance au réseau.

Après ces constatations le troisième chapitre aborde une modélisation détaillée de cette machine avec une brève description de son système d'alimentation. Est axé sur la modélisation d'une éolienne de 1.5 MW de puissance fonctionnant à vitesse variable à base d'une MADA pilotée par le rotor par un onduleur MLI. Pour simplifier le modèle de la machine nous avons établi, le modèle de la machine dans un système d'axe biphasé ( $d, q$ ) lié au stator à l'aide de la transformation de PARK.

La discussion sur les avantages et les inconvénients de l'utilisation des convertisseurs statiques pour l'alimentation de la MADA nous amène à proposer deux configurations, une où la machine est alimentée par deux convertisseurs, l'un au stator et l'autre au rotor et dédiée à des applications industrielles telles le laminage ou le pompage (fonctionnement Moteur), l'autre où la machine est alimentée par un convertisseur au rotor alors que le stator est lié au réseau (fonctionnement en générateur pour une application du type éolien), notre choix est installé sur cette configuration qui remplit complètement notre objectif.

Les résultats de simulation de la génératrice asynchrone couplée à la turbine éolienne montrent un fort couplage entre la puissance active et la puissance réactive. Alors que le dernier chapitre de ce mémoire sera consacré à la commande vectorielle qui permet de découpler le modèle de la MADA afin de contrôler l'échange des puissances active et réactive entre la machine et le réseau. Deux méthodes sont envisagées: la commande directe et la commande indirecte. Nous avons effectué une synthèse du régulateur PI et comparé ses performances en suivi de consigne, face aux variations des paramètres de la machine. Le régulateur s'est montré le plus efficace dans le cas du contrôle indirect. Pour le contrôle direct, le modèle servant de base au calcul du régulateur est simplifié et même si la précision statique est meilleure, les performances transitoires du régulateur sont moins bonnes que dans le cas du contrôle indirect. Suite aux résultats obtenus dans cette étude, des perspectives intéressantes pouvant contribuer à l'amélioration du fonctionnement de la MADA est envisageables:

- ❖ Etablissement d'un modèle de la MADA prenant en compte la résistance de phase statorique et la saturation magnétique.
- ❖ Utilisation d'autres types de régulateurs plus performants dans la commande du dispositif.
- ❖ Utilisation d'un algorithme de maximisation de la puissance captée par différentes techniques : Logique floue, réseau de neurones.
- ❖ L'intégration d'un système de stockage inertiel.
- ❖ L'étude des perturbations de la production de l'énergie éolienne vis à vis des déséquilibres du réseau.

Tout cela demande autant d'études qui devraient apporter des solutions pour rendre encore plus facile l'insertion des éoliennes dans le réseau électrique afin de produire une énergie propre et durable.

## Annexe A

## Paramètres du système éolien

Nom et symbole des paramètres	Valeur numérique des paramètres
Puissance nominale $P_n$	1.5 MW
Rayon de l'éolienne $R$	35.25 m
L'angle de calage $\beta$	5
Gain du multiplicateur de vitesse $G$	90
Nombre de pale	3
Densité de l'air à 15°C $\rho$	1.225 m <sup>-3</sup>
Tension nominale statorique $V_s$	398 / 690 V
Fréquence nominale statorique $f$	50 Hz
Tension nominale rotorique $V_r$	225 / 389 V
Fréquence nominale rotorique $f_2$	14 Hz
Résistance statorique $R_s$	0.012 $\Omega$
Résistance rotorique $R_r$	0.021 $\Omega$
Inductance statorique $L_s$	0.0137 H
Inductance rotorique $L_r$	0.0136 H
Inductance mutuelle $L_m$	0.0135 H
Inertie de l'arbre $J$	1000 kg.m <sup>2</sup>
Coefficient de frottement visqueux de la MADA $f_r$	0.0024 N.m.s <sup>-1</sup>
Glissement $g$	0.03
Nombre de paires de pôles $p$	2
Les puissances de références $P_{ref}, Q_{ref}$	1000000W, -500000 VAR

## Annexe B

## Paramètre de régulateur :

kp	0.7575. 10 <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup>
ki	53.5455. 10 <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup>

## Calcul des paramètres du filtre :

La fonction de transfert du filtre est donnée par :

$$F(p) = \frac{V_{dc}(p)}{V_{red}(p)} = \frac{1}{Lf.CfP^2+1}$$

Où  $p$  est l'opérateur de LAPLACE.

Cette fonction de transfert est de deuxième ordre dont la fréquence de coupure est :

$$f_c = \frac{1}{\sqrt{L_f \cdot C_f}}$$

Pour éliminer l'harmonique d'ordre deux et les harmoniques supérieures, on doit imposer le choix suivant :

$$f_c < 2 \cdot f'$$

avec  $f' = 6f$  : fréquence de la tension redressée  $V_{red}$

Alors :

$$L_f \cdot C_f > 2.78 \cdot 10^{-6}$$

On choisit  $C_f = 600 \mu F$

D'où, nous déduisons les paramètres de filtre :

$$C_f = 600 \mu F$$

$$L_f = 400 \text{MH}$$

## Annex C

### Calcul des régulateurs

C'est un régulateur simple et rapide à mettre en œuvre. La figure 4.8 montre un système en boucle fermée corrigé par un régulateur PI. Dans notre cas la fonction de transfert  $K_p + \frac{K_i}{p}$  correspond aux régulateurs  $R_d$  et  $R_q$  de la figure IV.7. Les valeurs de A et B sont :

$$A = L_s R_r + p L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \quad \text{et} \quad B = M V_s$$

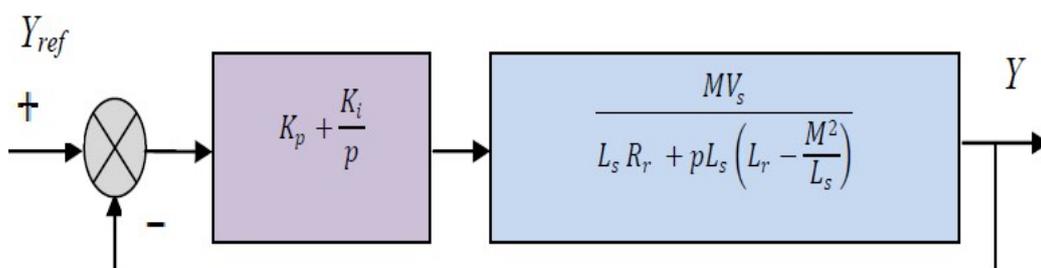


Figure : Système régulé par un PI.

$$FTBO = \frac{p + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{p}{K_p}} \cdot \frac{\frac{MV_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{p + \frac{L_s L_r}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}$$

Afin d'éliminer le zéro présent sur la fonction de transfert, nous choisissons la méthode de compensation des pôles pour la synthèse du régulateur, ce qui se traduit par l'égalité suivante:

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{L_s L_r}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}$$

Nous notons ici que l'intérêt de la compensation des pôles ne se manifeste uniquement que si les paramètres de la machine sont identifiés avec précision puisque les gains  $K_p$  et  $K_i$  sont établis en fonction de ces mêmes paramètres. Si les paramètres réels sont différents de ceux utilisés dans la synthèse, la compensation est inefficace. Si les pôles sont parfaitement compensés, la fonction de transfert en boucle ouverte devient:

$$FTBO = \frac{K_p \frac{MV_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{p}$$

La fonction de transfert en boucle fermée s'exprime alors par :

$$FTBF = \frac{1}{1+p\tau} \quad \text{avec} \quad \tau = \frac{1}{K_p} \cdot \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{MV_s}$$

Le terme  $\tau$  désigne ici le temps de réponse du système. Nous choisissons de fixer celui-ci à  $1ms$ , ce qui représente une valeur suffisamment rapide pour l'application de production d'énergie sur le réseau avec la MADA de 1,5 MW. Une valeur inférieure est susceptible d'engendrer des régimes transitoires avec des dépassements importants et ne présente pas d'intérêt particulier pour notre application. Les termes  $K_p$  et  $K_i$  sont alors exprimés en fonction de ce temps de réponse et des paramètres de la machine:

$$k_p = \frac{1}{10^{-3}} \cdot \frac{L_s L_r - M^2}{MV_s} = 0.7575 \cdot 10^{-3} s^{-1}$$

$$k_i = \frac{1}{10^{-3}} \cdot \frac{L_s L_r}{MV_s} = 53.5455 \cdot 10^{-3} s^{-1}$$

## Références Bibliographiques

- [1] **H.CAMBIONG**, « Minimisation de l'impact des perturbations d'Origine Eolienne dans la Génération d'Electricité par des Aérogénérateurs à vitesse variable », Thèse de Doctorat d'Etat en Automatique. Ecole Nationale Superior d'Arts et Métiers, 2003.
- [2] **A.GRAUEURS** « Design of direct-driven permanent-magnet generators for wind turbines », Chalers university of technology, school of electrical and computing engineering, technical report, N° 292, Goteborg, Sweden, 1996, doctoral thesis.
- [3] **B. BOUAZIZ, F. BACHA, M. GASMI**; « Modeling and control of a variable speed wind energy conversion system based on an induction machine ». Proc. International Renevable Energy Congress (IREC), Sousse, Tunisia, 2010.
- [4] **A. BOYETTE** « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne »; Thèse de doctorat en génie électrique, Université Henri Poincaré, Nancy I, 11 Décembre 2006.
- [5] **F. POITIERS** « Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne »; Thèse de doctorat en génie électrique, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, 19 Décembre 2003.
- [6] **L. KHETTACHE** « Étude et Commande d'un Système Éolien à Base d'une Machine Électrique Double Alimentée »; Mémoire de magistère en électrotechnique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université de Batna, 2007.
- [7] **N. K. MERZOUK, M. MERZOUK, B. BENYOUCEF** « Perspectives du pompage éolien dans le sud Algérien » ; Projet National de Recherche, domicilié au Centre de Développement des Énergies Renouvelables, Laboratoire d'Énergie Éolienne, Alger, 2007.
- [8] **TIR ZOHEIR** « Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade » mémoire de magister Université Ferhat Abbas de Setif, 2010.
- [9] **E. HAU**, « Wind turbines », 2nd Ed Springer, 2006.
- [10] **N. MEKKAOUI**, « Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée », thèse de doctorat, Université de Batna, Algérie, (2004)

- [11] **A. M. SIDDO & I. S. NOUHOU** « Étude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne » ; Mémoire de fin étude d'ingénieur en électrotechnique, École Nationale Polytechnique, El-Harrach, 2007.
- [12] **S. E. AIMANI** « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension » ; Thèse de doctorat en génie électrique, Université des sciences et technologies de Lille 1, (USTL), France.
- [13] **H. BOUKHARI et S.GUERMACHE**, «Étude d'une éolienne à vitesse variable avec Génératrice asynchrone pilotée par le stator », Mémoire de Master, USTHB, 2010.
- [14] **M.CHERKAOUI** « Contribution a la modélisation, à l'étude et à la commande des machines application à une machine asynchrone à double alimentation», thèse de doctorat, Polytechnique de Lorraine 1990, France.
- [15] **BOUKHARI.H et GUERMACHE.S** «Étude d'une éolienne à vitesse variable avec génératrice asynchrone pilotée par le stator »Mémoire de Master. USTHB.2010.
- [16] **ROUABHI RIYADH** « étude et commande d'une machine asynchrone à double alimentation, application : énergie éolienne », mémoire de magister en électrotechnique, université Ferhat Abbas, 2012.
- [19] **B.HOPFENSBERGER ET D. J.ATKINSON**, «Doubly-fed a.c machines classification and Comparison », European conf, Power Electronics and Applications (EPE), pp.1-17, Graz, 2001.
- [20] **DENDOUGA ABDELHAKIM**, « Contrôle des puissances active et réactive de la machine à double alimentation (DFIM) », docteur en science, en électrotechnique, université de Batna, 2010.
- [21] **PAUL-ETIENNE VIDAL**, « commande non-linéaire d'une machine asynchrone a double alimentation », thèses de doctorat, Institut polytechnique de Toulouse, 2004.
- [22] **TAMARAT AZZOUZ**, « modélisation d'une chaine de conversion basée sur une machine asynchrone à double alimentation » mémoire de magister, université de Biskra, 2009.
- [23] **FARID MERRAHI**, « alimentation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation (application à l'énergie éolienne) » mémoire de magister, école nationale polytechnique, 2007.
- [24] **AZEDDINE CHRIA**, « commande de la machine asynchrone a double alimentation par des techniques de l'intelligence artificielle », thèse de doctorat, université de Batna, 2010.

- [25] **SEJIR KHOJET EI KHIL**, « commande vectorielle d'une machine asynchrone doublement alimentée (MADA) », thèses de doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, 2006.
- [26] **B. ROBYNS, M.ESSELIN**, « Power control of an inverter. Transformer association in a Wind generator», Electromotion, vol.6, No. 1-2, 1999, pp.3-7.
- [27] **G. SALLOUM** « Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation » ; Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 13 Mars 2007.
- [28] **R.AZAIZIA**, « Etude et commande d'une machine asynchrone à double alimentation alimentée par un convertisseur multi-niveaux », Mémoire de magister en génie électrique, Université de Boumerdassi, Algérie, 2008.
- [29] [www.greenpeace.org/lebanon](http://www.greenpeace.org/lebanon)
- [30] **LILIA ABDELHAMID**, « contribution a l'étude des performances des générateurs électromagnétiques utilisés dans les systèmes éoliens » Mémoire de magister, université de Batna, 2008.
- [31] **JANAKA EKANAYAKE and NICK JENKINS** « Comparison of the Response of Doubly Fed and Fixed-Speed Induction Generator Wind Turbines to Changes in Network Frequency», IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.19, N°.4, pp. 800-802, December, 2004.
- [32] **A. MEROUFEL**. « Commande scalaire Commande vectorielle Commande directe du couple » Thèse d'ingénieur d'état, Electrotechnique, Université Djilali Liabès, Sidi Bel Abbés, 2009.
- [33] **A.CHAIBA** «Commande par la Logique Floue de la Machine Asynchrone a Double Alimentation Alimentée en Tension», Thèse de Magister, Université de Batna-2004.
- [34] **MTOUK et BOUGHERBAL.A** « Etude d'un MPPT d'une éolienne ».Mémoire d'ingénieur .U.S.T.H.B Algérie.2010.
- [35] **G. GRELLET & G. CLERC** « Actionneurs Électriques : Principes, Modèles, Commande » ; Deuxième tirage, Éditions Eyrolles, Paris, France, 1997.
- [36] **A. L. NEMMOUR** « Contribution à la Commande Vectorielle de la Machine Asynchrone à Double Alimentation » ; Mémoire de Magister en électrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2002.

- [37] **Y. ELBIA** « Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté » ; Mémoire de magister en électrotechnique, Université de Batna, 15 Juin 2009.
- [38] **WWEA** «Rapport Mondial 2010 sur l'Energie Eolienne» April 2011.
- [39] **J. MARTIN**, « Energies éoliennes », techniques de l'ingénieur, traite de génie énergétique, pp. B 8 585 1- B 8 585 21.
- [40] **H. DJEGHLOUD** « Filtrage actif de puissance »; Thèse de doctorat en électrotechnique, Université MENTOURI, Constantine, 12 Décembre 2007.