

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique**

**BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY**  
**UNIVERSITE BADJI-MOKHTAR-**  
**ANNABA**



**جامعة باجي مختار - عنابة**

**Faculté des Sciences de l'Ingénieur**  
**Département de l'Electronique**

**Année 2018**

# **Mémoire**

**Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master**

**Modélisation et dispositif de commande d'un système éolien  
à base de machine asynchrone à double aimantation.**

**Option**

**Automatique Et Informatique Industriel**

**Par**

**BOUAMEUR Meriem**

**Devant le Jury :**

<b>Mr.R.LAKEL</b>	<b>Université Badji Mokhtar Annaba</b>	<b>Encadreur</b>
<b>Mr.H.KHERFAN</b>	<b>Université Badji Mokhtar Annaba</b>	<b>Co-Encadreur</b>
<b>Mr.M.BENOUARTH</b>	<b>Université Badji Mokhtar Annaba</b>	<b>Président</b>
<b>Mr.M.RAMDANI</b>	<b>Université Badji Mokhtar Annaba</b>	<b>Examineur</b>

## **Dédicaces**

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mon père et ma mère*

*Mon mari et mon fils Yahya*

*Mes frères et mes sœurs*

*Tous mes proches*

*Tous mes amis*

*Toute la promotion 2018 d'électronique.*

*Meriem*

## **Remerciements**

*Avant toute chose, je remercie **Dieu** le tout puissant de m'avoir donnée courage, patience et force durant toutes ces années d'étude.*

*Je remercie vivement Mr R.Lakel l'Encadreur de ce mémoire qui m'a accordé sa confiance, son aide et sa compréhension.*

*Je remercie également Mr H.Kherfan qui ma beaucoup aidé a ce travail.*

*J'adresse mes sincères remerciements aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail*

*Annaba, le 20 /06 /2018*

*Bouameur Meriem*

# SOMMAIRE

Glossaire.....	VI
Nomenclature.....	VII
Introduction générale.....	IX

## Chapitre 01

### *Généralités sur les systèmes éoliens*

1.1. Introduction.....	1
1.2. Etat de l'art sur l'énergie éolienne.....	1
1.2.1. Définition de l'énergie éolienne.....	1
1.2.2. Développement de l'énergie éolienne.....	2
1.2.3. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	3
a. Avantages.....	3
b. Inconvénients.....	3
1.2.4. Différentes types d'aérogénérateurs.....	3
1.2.4.1. Aérogénérateur à axe verticale.....	3
1.2.4.2. Aérogénérateur à axe horizontale.....	4
1.3. Aperçu sur les systèmes de conversion électromécanique.....	4
1.3.1. Eoliennes à Vitesse Fixe.....	5
1.3.2. Eoliennes à Vitesse Variable.....	6
1.3.3. Eolienne à vitesse variable à base de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) –structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.....	8
1.3.3.1. Description du Fonctionnement de la MADA.....	8
a. Structure de la Machine.....	8
b. Modes de Fonctionnement de la MADA.....	9
c. Fonctionnement en Mode Moteur Hypo-Synchrone.....	9
d. Fonctionnement en Mode Moteur Hyper-Synchrone.....	9
e. Fonctionnement en Mode Générateur Hypo-Synchrone.....	10
f. Fonctionnement en Mode Générateur Hyper-Synchrone.....	10
1.3.3.2. Configurations de l'Association MADA/Convertisseur de Puissance.....	11
a. Fonctionnement en Moteur avec un Seul Convertisseur.....	11
b. Fonctionnement en Moteur avec Deux Convertisseurs.....	12
c. Fonctionnement en Générateur avec convertisseurs MLI.....	12
1.3.3.3. Avantages et inconvénients de la MADA.....	13
a. Avantages de la MADA.....	13
b. Inconvénients de la MADA.....	13
1.4. Conclusion.....	13

## Chapitre 02

### *Modélisation et dispositif de commande d'un système éolien à base de machine asynchrone à double alimentation*

2.1. Introduction.....	14
2.2. Modélisation globale de la chaîne de conversion de l'éolienne basée sur une MADA.....	14
2.2.1. Description du système éolien.....	14
2.2.2. Modèle de la turbine.....	15
2.2.2.1. Modèle aérodynamique.....	15
2.2.2.2. Modèle des pales.....	15
2.2.2.3. Modèle du multiplicateur de vitesse.....	17
2.2.2.4. Modèle de l'arbre mécanique.....	18
2.3. Technique d'extraction du maximum de puissance (MPPT).....	18
2.3.1. Résultats de simulation de la stratégie de commande MPPT.....	19
2.4. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation.....	22

# SOMMAIRE

---

2.4.1. Equations des tensions.....	23
2.4.2. Equations des flux.....	23
2.4.3. Equation mécanique.....	24
2.4.4. Modèle diphasé de la MADA.....	24
2.4.4.1. Transformation de Park.....	24
2.4.4.2. Equations des tensions.....	25
2.4.4.3. Equation des flux.....	25
2.4.4.4. Equation du couple électromagnétique.....	26
2.5. Stratégie de commande en puissance active et réactive de la MADA.....	26
2.5.1. Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques.....	28
2.5.2. Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques.....	28
2.6. Commande vectoriel directe en puissance active et réactive de la MADA.....	30
2.6.1. Calcul des paramètres du régulateur PI.....	30
2.6.2. Résultats de simulation de la commande du MADA.....	32
2.7. Conclusion.....	33

## Chapitre 03

### *Etude d'un simulateur physique d'aérogénérateur (émulateur éolien)*

3.1. Introduction.....	34
3.2. L'Emulateur Turbine Eolienne.....	34
3.3. Modélisation d'un émulateur éolien.....	35
3.3.1. Modélisation de la turbine.....	35
3.4. Commande PI de la machine à courant continu.....	36
3.4.1. Modèle de la machine à courant continu.....	36
3.4.2. Stratégie de commande de la machine à courant continu.....	37
3.4.3. Contrôle en vitesse du moteur à courant continu.....	38
3.5. Mise en œuvre et résultats du simulateur.....	39
3.5.1. Résultats des modèles de la turbine et de la machine à courant continu.....	40
3.6. Conclusion.....	43
Conclusions Générales et Perspectives.....	44
Annexes.....	46
Bibliographiques.....	47

# SOMMAIRE

---

## Liste des figures

Figure 1.1. Conversion de l'énergie cinétique du vent .....	2
Figure 1.2. Graphique de la capacité totale de puissance fournie par les éoliennes dans le monde (MW) Tirée de WWEA (2012) [16].....	2
Figure 1.3. Aérogénérateur à axe verticale, [21].....	3
Figure 1.4. Aérogénérateur à axe horizontale, [21].....	4
Figure 1.5. Evolution de la configuration électrique .....	5
Figure 1.6. Eolienne à vitesse fixe basé sur la machine asynchrone à cage.....	5
Figure 1.7. Eolienne à vitesse variable basé sur la machine asynchrone à cage.....	6
Figure 1.8. Eolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone .....	6
Figure 1.9. Eolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double stator .....	7
Figure 1.10. Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne.....	7
Figure 1.11. Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA.....	8
Figure 1.12. Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA .....	8
Figure 1.13. Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone .....	9
Figure 1.14. Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone.....	10
Figure 1.15. Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone.....	10
Figure 1.16. Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone .....	11
Figure 1.17. Schéma d'un système utilisant une MADA en moteur alimenté par un seul convertisseur.....	11
Figure 1.18. Schéma d'un système utilisant une MADA en moteur alimenté par deux convertisseurs.....	12
Figure 1.19. Schéma d'un système utilisant une MADA en générateur alimenté par un seul convertisseur.....	12
Figure 2.1. Système de conversion éolienne à base de la MADA.....	15
Figure 2.2. Schéma explicatif de la turbine éolienne.....	15
Figure 2.3. Coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative .....	17
Figure 2.4. Modèle mécanique simplifié de la turbine.....	17
Figure 2.5. Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne .....	18
Figure 2.6. Schéma bloc de la stratégie MPPT sans mesure de la vitesse du vent .....	19
Figure 2.7. Schéma de simulation de la stratégie MPPT sans mesure de la vitesse du vent .....	20
Figure 2.8. Profil du vent appliqué à la turbine pendant 1000 secondes .....	20
Figure 2.9. Vitesse de la turbine.....	21
Figure 2.10. Vitesse mécanique de l'arbre rapide .....	21
Figure 2.11. Puissance mécanique transmise à la MADA .....	21
Figure 2.12. Coefficient de puissance $C_p$ .....	21

# SOMMAIRE

---

Figure 2.13. Rapport de vitesse $\lambda$ .....	22
Figure 2.14. Couple Aérodynamique et couple électromagnétique de référence de la MADA .....	22
Figure 2.15. Représentation spatiale de la machine asynchrone dans le repère triphasé .....	22
Figure 2.16. Représentation de la machine dans le repère diphasé .....	25
Figure 2.17. Couplage de puissance active et réactive de la MADA .....	27
Figure 2.18. Couplage de puissance active et réactive de la MADA .....	29
Figure 2.19. Schéma bloc de la MADA à réguler .....	30
Figure 2.20. Schéma block du système de régulation .....	31
Figure 2.21. Puissance active de la commande directe de la MADA .....	32
Figure 2.22. Puissance réactive de la commande directe de la MADA .....	33
Figure 2.23. Tension et courant d'une phase statoriques de la MADA .....	33
Figure 3.1. Evolution du coefficient de puissance de l'éolienne (angle de calage fixe) .....	35
Figure 3.2. Génération d'une vitesse de référence à partir du modèle de l'éolienne .....	36
Figure 3.3. Modèle électrique de la machine à courant continu à excitation séparée .....	36
Figure 3.4. Schéma bloc du modèle de la MCC .....	38
Figure 3.5. Schéma fonctionnel du contrôle de la vitesse .....	38
Figure 3.6. Schéma synoptique du simulateur .....	40
Figure 3.7. Schéma de simulation du modèle de turbine associé à la MCC .....	40
Figure 3.8. Vitesse du vent, vitesse de rotation de référence et vitesse effective de la MCC .....	41
Figure 3.9. Consigne de vitesse et vitesse réelle mesurée .....	41
Figure 3.10. Vitesse du vent, courant et tension de la MCC .....	42

## **Liste des Tableaux**

Tableau A.1. Paramètre de l'éolienne de 1.5 MW .....	49
Tableau A.2. Paramètre de la MCC de 100 W .....	50

# GLOSSAIRE

---

## Acronymes

GWEC	Global Wind Energy Council c'est le conseil mondial pour l'énergie éolienne.
IEA	L'Agence d'Énergie Internationale.
MADA	Machine asynchrone à double alimentation.
MPPT	Maximum power point tracking c'est la poursuite du point de puissance maximale.
WWEA	World Wind Energy Association c'est la association international de l'énergie éolienne.
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor c'est le transistor bipolaire à gâchette isolée.
MAS	Machine asynchrone à cage.
MS	Machine synchrone.
MLI	Modulation de largeur d'impulsions.
DC	Direct Current, c'est le courant continu.
AC	Alternatif Current, c'est le courant alternatif.
FTBO	Fonction de transfert en boucle ouverte.
NL	Régulateur non linéaire.
MCC	Machine à courant continu.
DSP	Digital Signal Processor.
ADC	Analogic to Digital Converter.

# NOMENCLATURE

---

## Symboles

$P_n$	Puissance nominale de la turbine [W].
$V_n$	Vitesse de vent nominale [m/s].
$V_m$	Vitesse de vent maximale [m/s].
$\beta$	Angle de calage des pales [°].
$R$	rayon de l'aérogénérateur ou la longueur des pales [m].
$G$	Gain du multiplicateur de vitesse.
$P_v$	Puissance du vent [W]
$\rho$	Masse volumique de l'air [approximativement 1,225 kg/m]
$S$	Surface décrite par les pales de l'éolienne en rotation [m <sup>2</sup> ]
$\lambda$	Rapport de vitesse.
$\Omega_t$	Vitesse de rotation de la turbine [rad/s].
$C_p$	Coefficient de puissance.
$P_{aer}$	Puissance aérodynamique extraite par la turbine [W].
$C_t$	Couple aérodynamique [N.m].
$J_t$	Moment d'inertie de la turbine [Kg.m <sup>2</sup> ].
$J_m$	Moment d'inertie de la MADA [Kg.m <sup>2</sup> ].
$f_v$	Coefficient dû aux frottements visqueux de la MADA [N.m/rad/s].
$C_m$	Couple mécanique sur l'arbre de la MADA [N.m].
$\Omega_m$	Vitesse de rotation de la MADA [rad/s].
$J$	Inertie totale [Kg.m <sup>2</sup> ].
$C_{em}$	Couple électromagnétique de la MADA [N.m].
$v_{est}$	Vitesse du vent estimé [m/s].
$V_s$	Tension statorique [V].
$V_r$	Tension rotorique [V].
$\Phi_s$	Flux statorique [Wb].
$\Phi_r$	Tension rotorique [Wb].

## NOMENCLATURE

---

$I_s$	Courant statorique [A].
$I_r$	Courant rotorique [A].
$R_s$	Résistance statorique [Ohm].
$R_r$	Résistance rotorique [Ohm].
$l_s$	Inductance cyclique statorique [mH].
$l_r$	Inductance cyclique rotorique [mH].
$M_{sr}$	Inductance mutuelle stator-rotor [mH].
$M_s$	Inductance mutuelle entre phases statorique [mH].
$M_r$	Inductance mutuelle entre phases rotorique [mH].
$p$	Nombre de paires de pôles.
$\theta$	Angle de transformation de Park.
$V_{ds}, V_{qs}$	Composantes diphasées des tensions statoriques [V].
$V_{dr}, V_{qr}$	Composantes diphasées des tensions rotoriques [V].
$I_{ds}, I_{qs}$	Composantes diphasées des courants statoriques [A].
$I_{dr}, I_{qr}$	Composantes diphasées des courants rotoriques [A].
$\Phi_{ds}, \Phi_{qs}$	Composantes diphasées des flux statoriques [Wb].
$\Phi_{dr}, \Phi_{qr}$	Composantes diphasées des flux rotoriques [Wb].
$\omega_s$	Pulsation du champs statorique [rad/s].
$\omega_r$	Pulsation du champs rotorique [rad/s].
$s$	Opérateur de Laplace.
$P_s$	Puissance active statorique de la MADA [W].
$Q_s$	Puissance reactive statorique de la MADA [Var].
$K_p$	Gain proportionnel.
$K_i$	Gain intégral.

# *INTRODUCTION GENERALE*

L'Agence d'Énergie Internationale (IEA) prévoit qu'avant 2030, les besoins d'énergie dans le monde seront presque soixante pour cent plus élevés que maintenant [7]. Le deux-tiers de cette augmentation concerne la Chine, l'Inde et dans d'autres économies en voie de développement; ces pays représenteront presque la moitié de consommation d'énergie globale avant 2030. Face à cette demande, et loin de l'utilisation des énergies fossiles polluantes (pétrole et gaz), et de façon à limiter l'emploi de centrales nucléaires, plusieurs pays sont tournés vers une nouvelle forme d'énergie dite "renouvelable". En effet, un véritable challenge mondial est pris au sérieux aujourd'hui, aussi bien sur la politique de réduction des émissions de gaz à effet de serre, en les ramenant à leur niveau de 1990, que sur celui de l'exploitation des ressources d'énergie renouvelable [8]. Ceci a été recommandé à la 3<sup>ème</sup> Conférence des Parties de la Convention – Cadre des nations unies sur les changements climatiques qui s'est tenue à Kyoto en décembre 1997.

Cette évolution a engendré une accélération d'insertion de production décentralisée d'électricité dans les réseaux de distribution et parmi ces productions, le marché mondial de l'énergie éolienne progresse plus rapidement que celui de toute autre source d'énergie renouvelable. Le total mondial, qui ne dépassait pas 4800 MW en 1995, a atteint 318 000 MW en 2013, après 158 505 MW en 2009, 74 052 MW en 2006 et 93 835 MW en 2007 et 120 297 MW en 2008, D'après les prévisions 2011 du GWEC, la capacité mondiale devrait s'élever à 493 330 MW fin 2016. En 2020, leur scénario prévoit environ 832 000 MW de puissance installée [6][7].

De nos jours, la forme la plus connue et utilisée de technologie éolienne est l'aérogénérateur; i.e. une machine qui obtient de l'énergie à partir du vent pour générer un courant électrique [9]. La taille de ces turbines éoliennes modernes va de quelques watts jusqu'à plusieurs mégawatts. La majorité des systèmes commerciaux actuels sont des turbines éoliennes à axe horizontal (HAWT) avec des rotors à trois pales (tripales) [3]. Les turbines peuvent transférer de l'énergie électrique à un réseau de puissance à travers des transformateurs, lignes de transport et sous-stations associés. L'utilisation de ces aérogénérateurs présente des avantages importants. En effet, ils sont pour l'instant l'un des moyens les plus écologiques d'obtenir de l'électricité et cette source est inépuisable. Cependant le coût de l'énergie éolienne est encore trop élevé pour concurrencer les sources traditionnelles.

De nombreux travaux de recherche sur le contrôle et la commande d'éoliennes ont été menés. Grâce à ces travaux, et grâce au progrès de l'électronique de puissance les dernières générations d'éoliennes fonctionnent avec une vitesse variable et disposent d'une régulation pitch. Il est ainsi possible de modifier la vitesse de rotation et l'angle de calage de chacune des pales, permettant alors d'améliorer la production de l'aérogénérateur. Néanmoins, il reste encore à introduire plus d'intelligence dans le fonctionnement des aérogénérateurs.

# INTRODUCTION GENERALE

---

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) est un type d'aérogénérateur qui a fait l'objet de nombreuses études ces dernières années. Il existe de nombreuses raisons pour l'utilisation d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) pour une éolienne à vitesse variable [10]; comme la production de puissance élevée en fonctionnement à vitesse variable, tout en réduisant le dimensionnement des convertisseurs statiques, la réduction du bruit et la possibilité du contrôle des puissances active et réactive.

Le système éolien utilisant une MADA et un convertisseur « back-to-back » qui relie le rotor de la génératrice et le réseau, présente de nombreux atouts. L'un des avantages de cette structure est que les convertisseurs de puissance utilisés, sont dimensionnés pour faire transiter une fraction de la puissance totale du système. Ce qui permet la réduction des pertes dans les composants d'électronique de puissance.

Dans ce contexte, l'apport envisagé avec ce travail de mémoire est de collaborer à la conception optimale d'un système de conversion de l'énergie éolienne utilisant une génératrice asynchrone à double alimentation; ainsi qu'à l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique en compensant la puissance réactive présent sur le réseau électrique sans forcément nécessiter un surdimensionnement de la MADA et des convertisseurs.

Ainsi l'objectif principal de notre travail de mémoire est d'étudier les techniques de commande de la MADA afin d'améliorer les performances et d'optimiser la production d'une éolienne. Pour ce faire, le mémoire est organisé en trois chapitres.

## **Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes éoliens.**

Le premier chapitre est consacré aux notions générales sur l'énergie éolienne sous une forme assez descriptive. Nous exposerons quelques statistiques sur le développement de l'énergie éolienne au cours des dernières années. Ensuite, à travers une revue de la littérature disponible nous dresserons un état de l'art des différentes technologies éoliennes ainsi que les différents composants constituant l'aérogénérateur seront brièvement présentés. Les différentes machines électriques utilisées pour la conversion éolienne en détaillant leurs configurations seront étudiées afin de montrer les avantages inégalés de la machine asynchrone à double alimentation surtout en grande puissance et en vitesse variable.

## **Chapitre 2 : Modélisation et dispositif de commande d'un système éolien à base de machine asynchrone à double alimentation (MADA).**

Dans le deuxième chapitre, la modélisation et la commande du système de conversion éolienne basé sur une MADA a été présenté où les différents éléments de ce système sont représentés en schémas blocs et ses équivalents sous l'environnement Matlab/Simulink. C'est aussi dans ce chapitre que le contrôle du système éolien sera présenté en utilisant la stratégie MPPT (Maximum

# INTRODUCTION GENERALE

---

Power Point Tracking). La commande vectorielle découplée des puissances active et réactive statorique permet un réglage de celles-ci selon des consignes déterminées au préalable par le gestionnaire de réseau. Des résultats de simulation seront présentés dans l'objectif de vérifier et valider les stratégies de contrôle.

**Chapitre 3 :** Etude et mise au point d'un simulateur physique d'aérogénérateur.

Le troisième chapitre consiste en la réalisation physique d'un simulateur de turbine éolienne. Celui-ci est basé sur une machine à courant continu commandée de façon à reproduire le comportement mécanique d'une éolienne. La turbine est modélisée et les variations de vitesse qu'elle génère sont appliquées à cette machine à courant continu. Ce simulateur est destiné à accueillir les génératrices dont le fonctionnement est étudié dans un contexte éolien.

Enfin, nous clôturons ce travail par une conclusion générale qui portera des perspectives pour la continuité de ce travail dans le futur.

## Chapitre 1

### *Généralités sur les systèmes éoliens*

#### **1.1. Introduction**

L'énergie éolienne a été longtemps oubliée alors qu'elle était déjà exploitée depuis l'antiquité avec l'utilisation des moulins à vent. Cependant, elle connaît depuis environ 42 ans un essor sans précédent notamment après la crise pétrolière de 1973 qui a alerté les états producteurs d'énergie fossile. En effet, après l'an 2000, le contexte fluctuant des énergies fossiles, l'explosion de la demande mondiale en électricité et les prises de conscience environnementale, ont accentué le besoin de l'énergie propre et durable ou l'éolien occupe une place privilégiée. Fort de son potentiel mondial, celui-ci a ainsi attiré différents acteurs du monde économique et surtout de l'énergie. Ceci s'est traduit par une profonde réorganisation et mutation du marché de l'éolien [1] pour lequel les aérogénérateurs ont atteint une certaine maturité technique. Ces aérogénérateurs, généralement à axe horizontal, fonctionnent à vitesse variable permettant l'augmentation de la puissance produite. Le développement des convertisseurs statiques et leur commande a permis le contrôle des puissances produites par ces aérogénérateurs.

Dans ce présent chapitre, les technologies d'éoliennes ainsi que les différents composants constituant l'aérogénérateur seront brièvement présentés. Ensuite, les différentes associations machines électriques-convertisseurs statiques, utilisées pour la conversion éolienne seront étudiées. Vu les avantages incontestés de la machine asynchrone à double alimentation pour la conversion éolienne, elle sera particulièrement présentée en détail dans ce chapitre.

#### **1.2. Etat de l'art sur l'énergie éolienne**

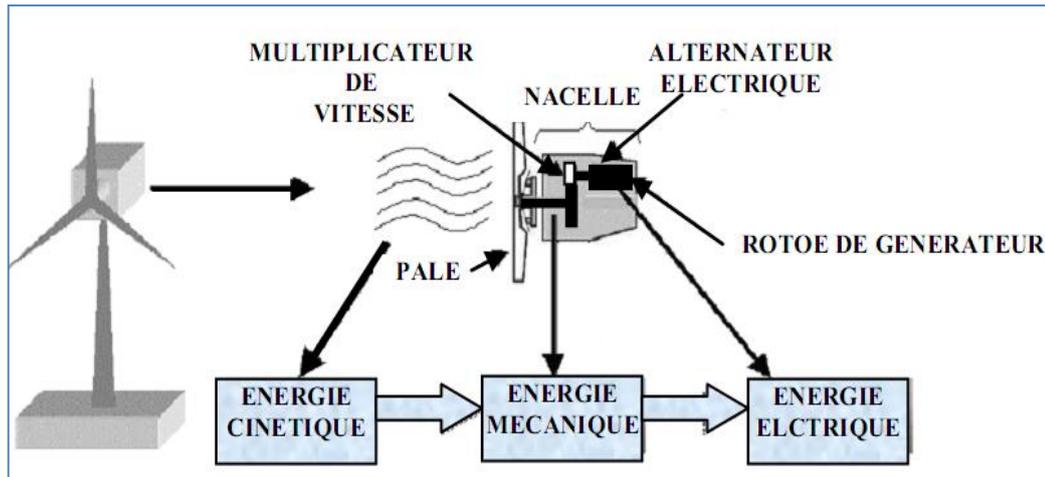
##### **1.2.1. Définition de l'énergie éolienne**

L'énergie éolienne est l'énergie du vent et plus spécifiquement, l'énergie tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent. Cette énergie est « renouvelable » c'est-à-dire non dégradé. De plus, c'est une énergie verte car elle produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif.

# GENERALITES SUR LES SYSTEMES EOLIENS

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure 1.1).

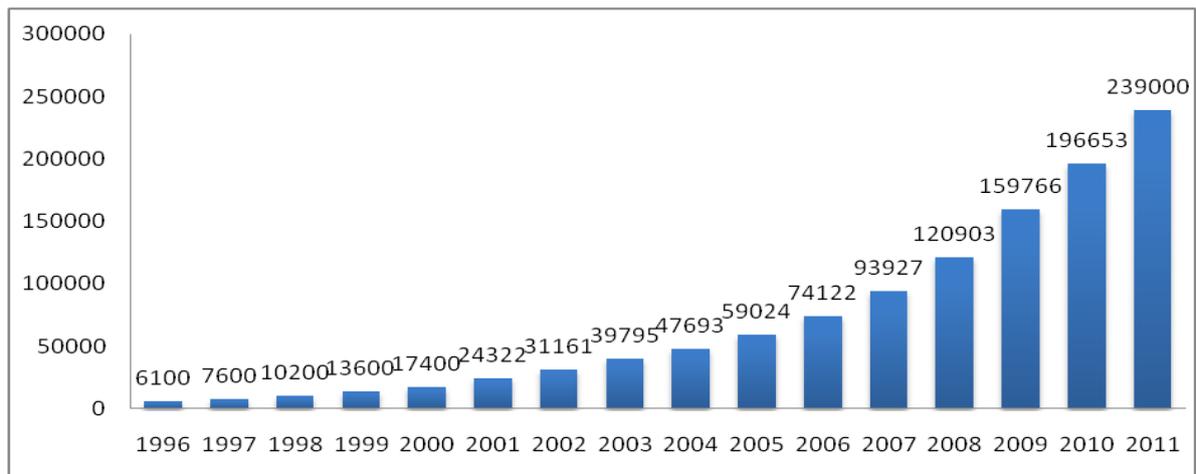
D'un premier regard, le processus paraît simple mais si on se concentre plus, on peut immédiatement découvrir qu'il s'agit d'un domaine très vaste qui représente un champ d'interaction de nombreuses disciplines scientifiques et du savoir faire de la météorologie à l'écologie.



**Figure 1.1.** Conversion de l'énergie cinétique du vent

## 1.2.2. Développement de l'énergie éolienne

La production de l'électricité par l'énergie éolienne s'est considérablement développée dans le monde ces dernières années (Figure. 1.2). Ceci est dû aux avantages cités ci-dessus,



**Figure 1.2.** Graphique de la capacité totale de puissance fournie par les éoliennes dans le monde (MW) Tirée de WWEA (2012) [11]

## 1.2.3. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des inconvénients qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

### a. Avantages

- L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement;
- L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas d'émission de CO<sub>2</sub>;
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie de risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs;
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables [13]
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu, on peut facilement l'arrêter, contrairement aux autres procédés continus thermiques ou nucléaires ;
- La période de haute productivité se situe en hiver (vent plus forts), ce qui correspond à la période de l'année où la demande en électricité est plus forte.

### b. Inconvénients

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques inconvénients qu'il faut citer :

- Le bruit aérodynamique lié à la vitesse de rotation du rotor;
- La perturbation de la réception des ondes hertziennes, ce qui provoque la distorsion des images télévisées [14];
- C'est une source coûteuse à rendement faible dans les sites moins ventés [14].

## 1.2.4. Différentes types d'aérogénérateurs

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles :

### 1.2.4.1. Aérogénérateurs à axe vertical

Ce type représente la première structure des aérogénérateurs. L'adjectif vertical signifie que son arbre est vertical au sol, plusieurs structures ont vu le jour mais seulement deux structures ont été industrialisées : le rotor de Savonius et le rotor de Darrieus.



Figure 1.3. Aérogénérateur à axe verticale, [15]

## 1.2.4.2. Aérogénérateurs à axe horizontale

Ce type d'aérogénérateur est le plus répandu dans l'industrie des éoliennes à cause du positionnement du capteur éolien à quelques dizaines de mètres au dessus du sol, ce qui réduit les contraintes mécaniques et augmente l'efficacité.



Figure 1.4. Aérogénérateur à axe horizontale, [15]

## 1.3. Aperçu sur les systèmes de conversion électromécanique

Il y a encore quelques années, pratiquement toutes les éoliennes fonctionnaient à vitesse fixe. Elles contenaient pour la plupart un générateur asynchrone à cage d'écureuil.

L'introduction de convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine électrique. Comme on l'a indiqué sur la figure 1.5, ceci entraîne une amélioration du rendement énergétique du système. La vitesse variable permet également d'améliorer la qualité de la puissance électrique produite, en introduisant de la souplesse dans la réaction du système face aux fluctuations brusques de la vitesse du vent. L'inconvénient principal de ce genre de système est le surcoût introduit par l'incorporation des convertisseurs de puissance. Ce coût dépendant de la taille de ces convertisseurs, il devient relativement important pour les éoliennes de grande taille. De plus les performances des composants électroniques utilisés par ces convertisseurs tels que les IGBT diminuent à partir d'une certaine puissance.

Avec l'utilisation des machines asynchrones à rotor bobiné, la plus grande partie de la puissance est directement distribuée au réseau par le stator et moins de 25% de la puissance totale passe par les convertisseurs de puissance à travers le rotor. Ceci donne l'occasion d'utiliser des convertisseurs plus petits et donc moins coûteux. L'inconvénient de ce système est la présence de balais au rotor, ce qui demande un travail de maintenance plus important.

Aujourd'hui, 80% des nouveaux aérogénérateurs contiennent des machines asynchrones doublement alimenté (MADA). C'est le type de machine choisi pour l'étude de recherche menée dans cette mémoire. Cette machine est également étudiée par exemple dans [12].

# GENERALITES SUR LES SYSTEMES EOLIENS

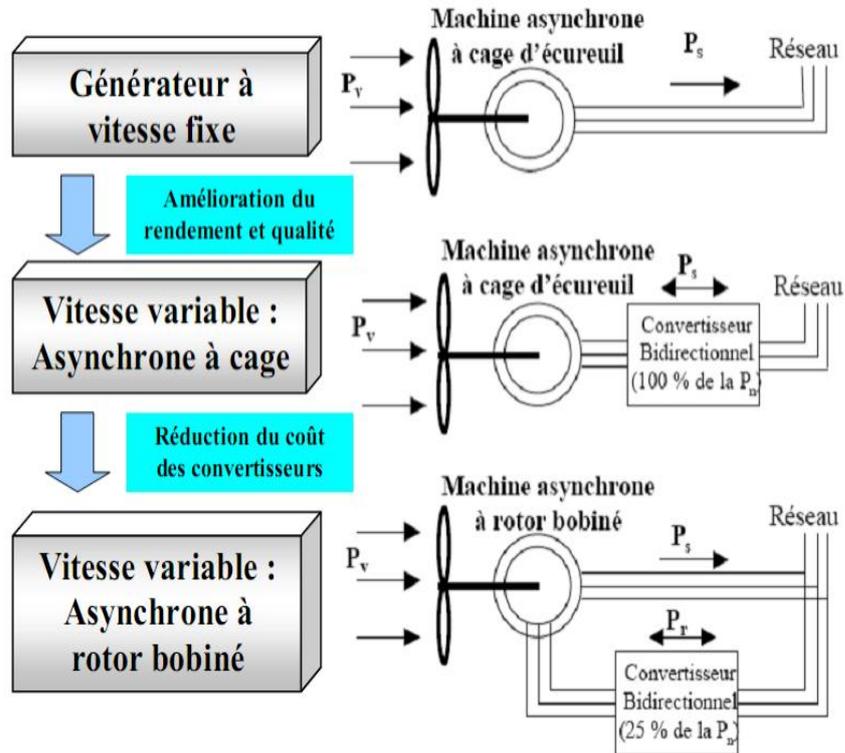


Figure 1.5. Evolution de la configuration électrique

## 1.3.1. Eoliennes à Vitesse Fixe

Dans le premier cas (Figure 1.6), le générateur tourne à vitesse fixe ou varie très légèrement en jouant sur le glissement de la machine asynchrone (seules les générateurs asynchrones sont utilisés dans ce cas). Deux générateurs asynchrones sont souvent utilisés dans ce type d'éoliennes. Un générateur dimensionné pour des faibles puissances correspondant à des vitesses de vent faibles et un générateur dimensionné pour des fortes puissances correspondant à des vitesses de vent plus élevés. Cette disposition permet également de proposer deux régimes de rotation l'un rapide en journée et l'autre plus lent la nuit permettant de diminuer le bruit [16].

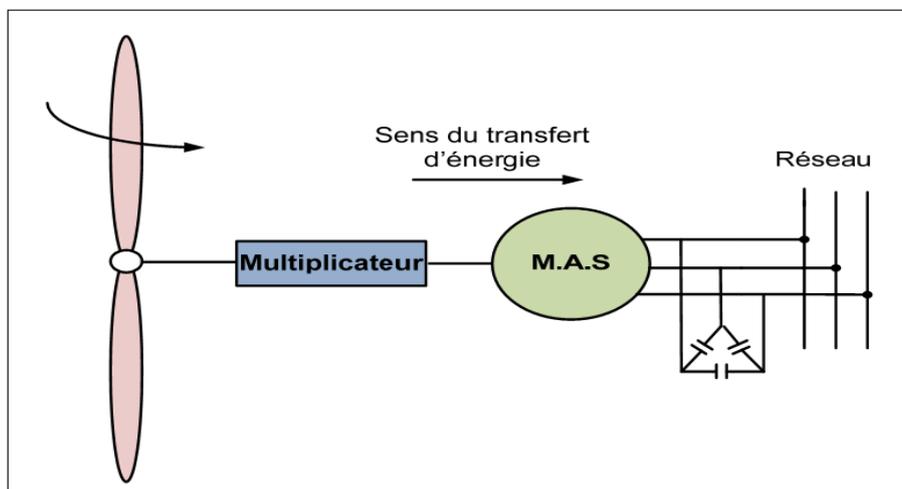


Figure 1.6. Eolienne à vitesse fixe basé sur la machine asynchrone à cage

# GENERALITES SUR LES SYSTEMES EOLIENS

## 1.3.2. Eoliennes à Vitesse Variable

Dans le deuxième cas (Figure 1.7), une interface de puissance adapte la fréquence des courants du générateur à celle réseau et permet ainsi de fonctionner à vitesse variable. Autrement dit, l'introduction de convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine électrique [16].

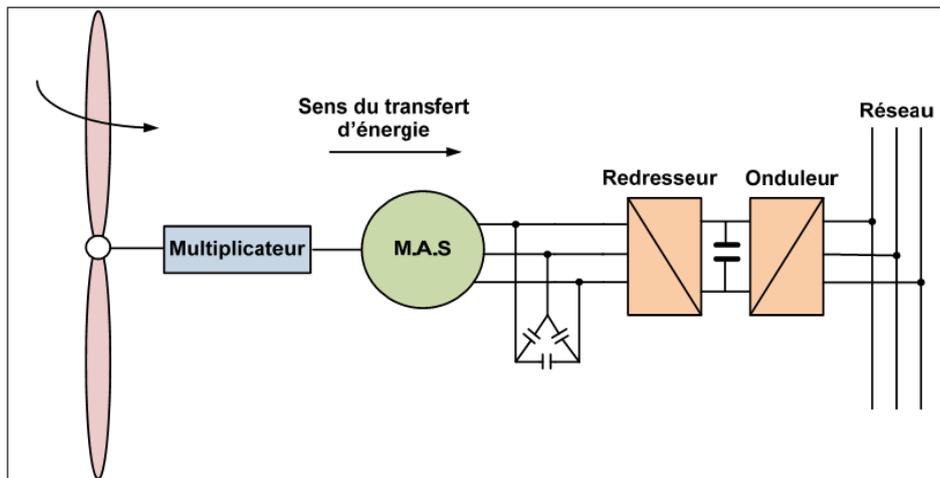


Figure 1.7. Eolienne à vitesse variable basé sur la machine asynchrone à cage

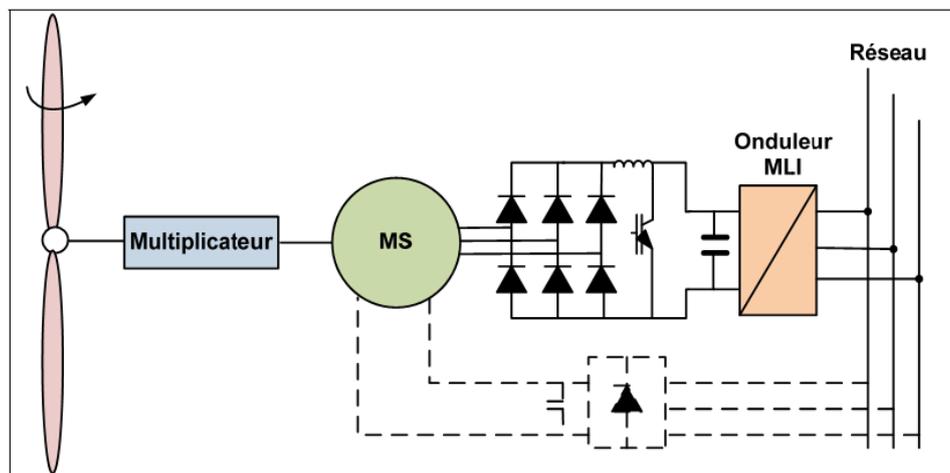
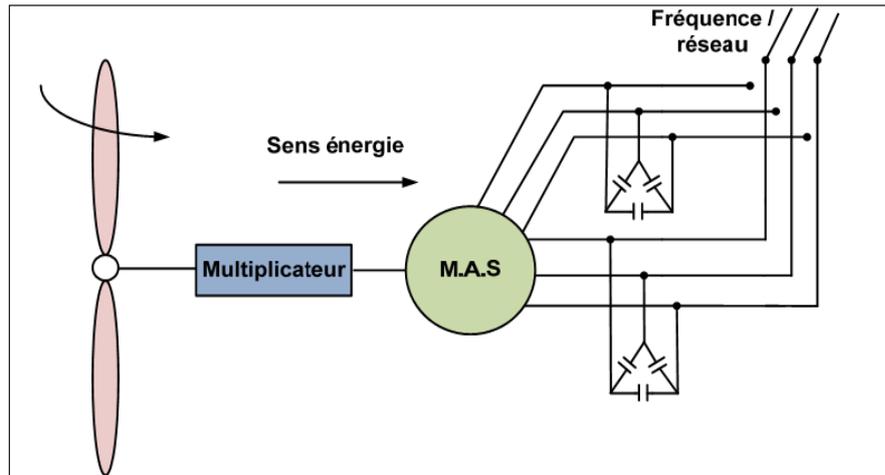


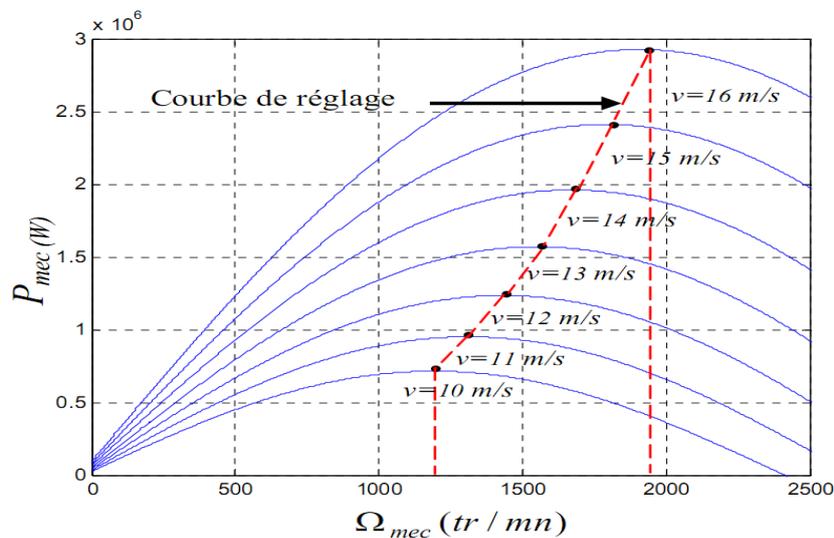
Figure 1.8. Eolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone

## GENERALITES SUR LES SYSTEMES EOLIENS



**Figure 1.9.** Eolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double stator

L'ensemble des caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent est illustrée sur la figure 1.10. À partir de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si le générateur est entraîné à une vitesse fixe les maxima théoriques des courbes de puissance ne seraient pas exploités. Pour cela, et afin de pouvoir optimiser le point de fonctionnement en termes de puissance extraite, il y a lieu de pouvoir ajuster la vitesse de rotation de l'arbre de la génératrice en fonction de la vitesse du vent.



**Figure 1.10.** Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne

Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1500 tr/min sur la figure 1.10) les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités. Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse de vent, la machine devra pouvoir fonctionner entre 1100 et 1900 tr/min pour cet exemple [17].

## 1.3.3. Eolienne à vitesse variable à base de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) – structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

Pour les éoliennes utilisant la MADA, le stator de celle-ci est directement couplé au réseau alors que son rotor est connecté au réseau à travers une interface composée de deux convertisseurs statiques (convertisseur coté MADA et convertisseur coté réseau), (Figure 1.11).

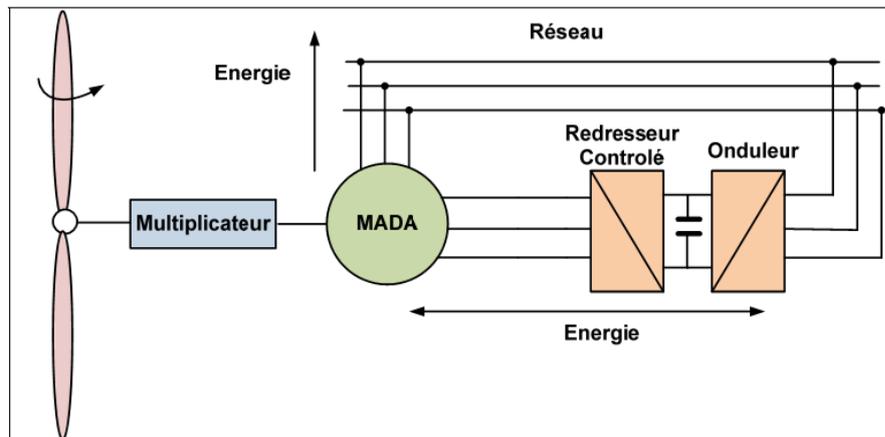


Figure 1.11. Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA

### 1.3.3.1. Description du Fonctionnement de la MADA

#### a) Structure de la Machine

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasés classiques (asynchrone à cage ou synchrone), constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées, munies d'encoches dans les quelles viennent s'insérer les enroulements [17]. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne (Figure1.12)

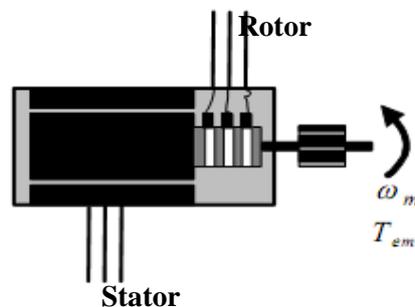


Figure 1.12. Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA

## b) Modes 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 pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur [15].

Effectivement, une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au 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 [18].

## c) Fonctionnement en Mode Moteur Hypo-Synchrone [18]

La figure 1.13 montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement moteur en dessous de la vitesse de synchronisme.

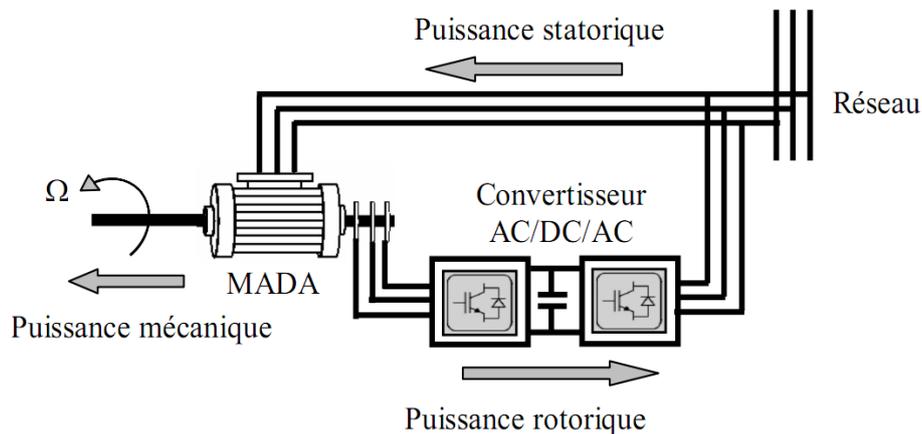
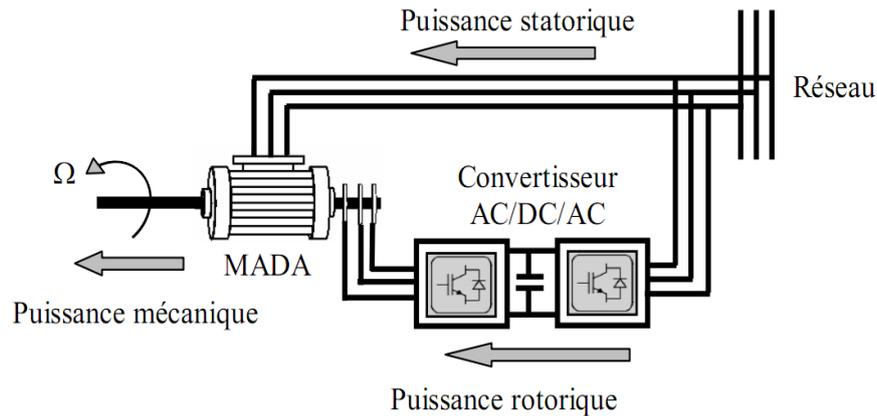


Figure 1.13. Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone

## d) Fonctionnement en Mode Moteur Hyper-Synchrone [18]

La figure 1.14 montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et 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.

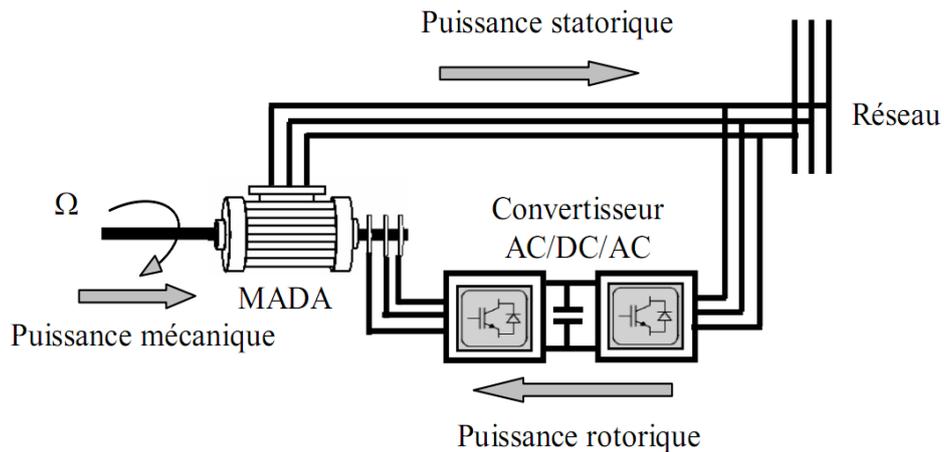
## GENERALITES SUR LES SYSTEMES EOLIENS



**Figure 1.14.** Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone

### e) Fonctionnement en Mode Générateur Hypo-Synchrone [18]

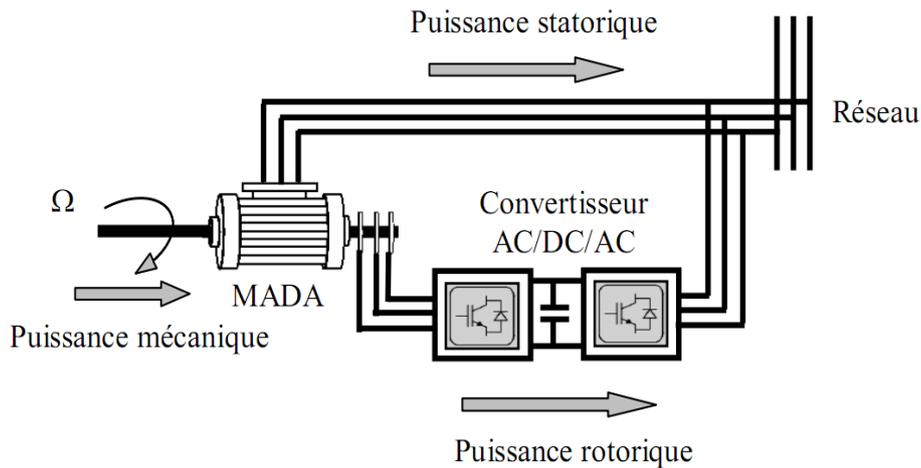
La figure 1.15 montre que la puissance est fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est alors absorbée par le rotor. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme.



**Figure 1.15.** Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone

### f) Fonctionnement en Mode Générateur Hyper-Synchrone [18]

La figure 1.16 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 1.16.** Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone

### 1.3.3.2. Configurations de l'Association MADA/Convertisseur de Puissance

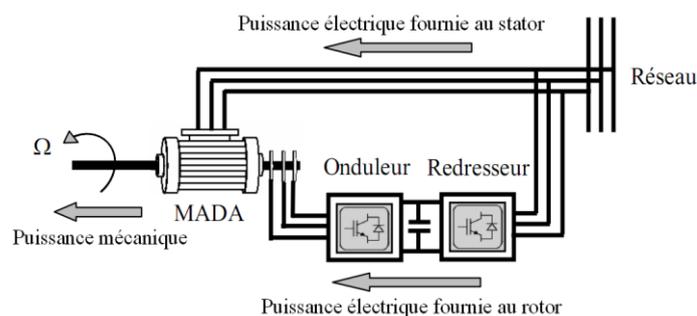
La MADA et grâce à sa double alimentation offre plusieurs possibilités de reconfiguration. Dans ce qui suit, nous présentons les travaux significatifs consacrés à la MADA.

Pour chacun d'entre eux, nous mentionnerons l'application visée de la MADA, la stratégie de commande adoptée ainsi que le type de convertisseur utilisé et leur stratégie de commande. Dans ce cas, nous nous intéresserons seulement aux travaux concernant la configuration avec un seul convertisseur lié au rotor qui constitue le but de notre travail. Cet axe de recherche est très riche aux travaux des chercheurs, vu l'intérêt porté aux énergies renouvelables et plus précisément l'énergie éolienne.

D'après la littérature, on peut distinguer les configurations suivantes :

#### a. Fonctionnement en Moteur avec un Seul Convertisseur

Dans ce type de fonctionnement, le stator est relié au réseau à fréquence et tension constantes, tandis que le rotor est relié à son propre convertisseur qui peut être un cycloconvertisseur ou un onduleur-redresseur. Cette solution permet de réduire fortement la puissance du convertisseur. La figure 1.17 présente le schéma de principe de cette catégorie de MADA.



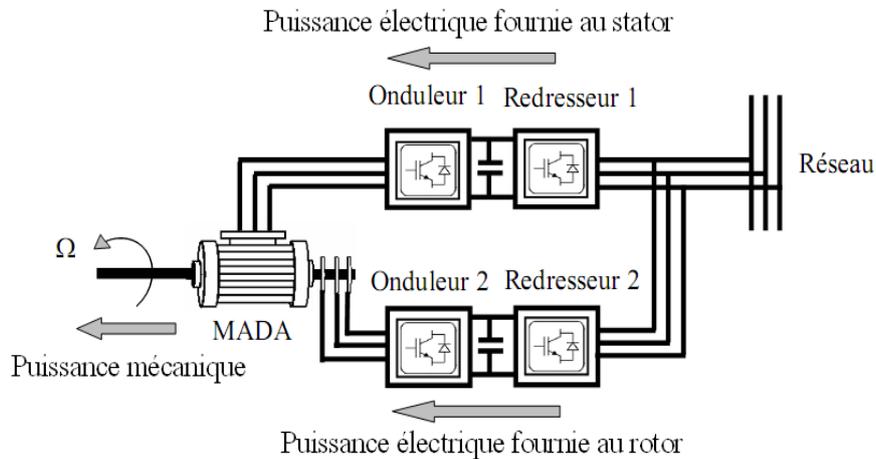
**Figure 1.17.** Schéma d'un système utilisant une MADA en moteur alimenté par un seul convertisseur

# GENERALITES SUR LES SYSTEMES EOLIENS

## b. 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 1.18;
- Deux cycloconvertisseurs.

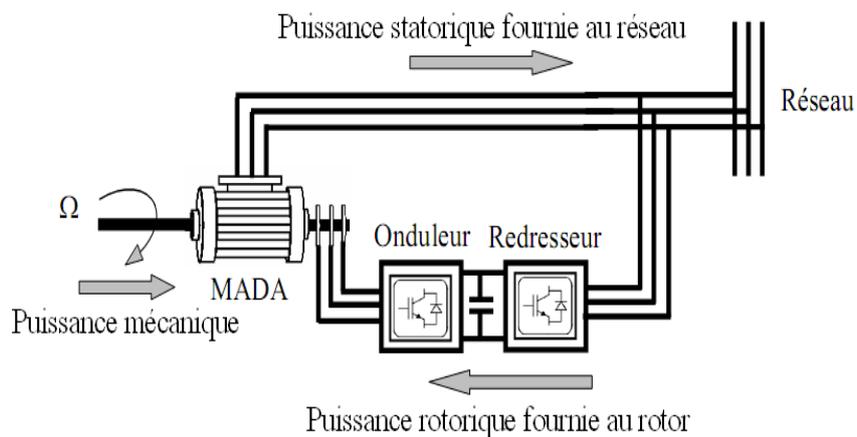


**Figure 1.18.** Schéma d'un système utilisant une MADA en moteur alimenté par deux convertisseurs

## c. Fonctionnement en Générateur avec convertisseurs MLI

Cette configuration qui est l'objectif de notre travail, est largement répandue dans les applications à vitesse variable. Elle consiste à connecter le stator de la MADA directement au réseau, alors que le rotor est alimenté par un convertisseur AC/DC/AC (Figure 1.19).

En plus, cette dernière offre la possibilité d'avoir une commande découplée de la puissance active et réactive, de même qu'elle a un coût d'investissement réduit par rapport aux autres configurations [19].



**Figure 1.19.** Schéma d'un système utilisant une MADA en générateur alimenté par un seul convertisseur

### 1.3.3.3. Avantages et inconvénients de la MADA

Nous introduisons brièvement dans ce paragraphe les avantages et les quelques inconvénients de la Machine Asynchrone à Double Alimentation lors de son fonctionnement à vitesse variable.

#### a. Avantages de la MADA

- L'accessibilité au rotor et au stator rend la mesure des courants possible, ce qui offre une grande flexibilité et précision pour le contrôle de flux et du couple électromagnétique;
- Elle présente une puissance massique légèrement plus élevée que les autres machines de grandes puissances;
- La MADA réunit les avantages de la machine synchrone et de la machine asynchrone, à savoir:
  - Fonctionnement à vitesse de rotation variable;
  - Régulation découplée des puissances active et réactive.

#### b. Inconvénients de la MADA

- Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à causes des balais;
- Nous utilisons un nombre des convertisseurs (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) plus importants que la machine à cage (un redresseur et un onduleur) ;
- Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage.

### 1.4. Conclusion

Dans ce chapitre une synthèse bibliographique a été présentée et qui concerne les différents types d'éoliennes avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnements. Après un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, on présente les machines électriques et leurs applications ainsi que leur adaptation à un système éolien.

A la fin de ce chapitre on présente la structure de la machine asynchrone à double alimentation, son application et son intérêt.

## *Chapitre 2*

# *Modélisation et dispositif de commande d'un système éolien à base de MADA*

### **2.1. Introduction**

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement à la modélisation et à la commande du système de conversion éolienne basé sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA).

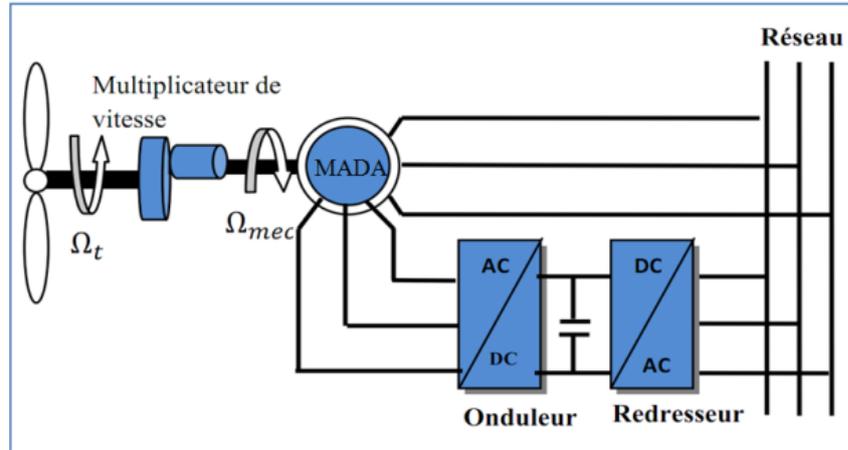
Dans un premier temps, on a modélisé chaque élément de ce système de conversion éolienne, tels que la turbine éolienne et ses parties mécaniques et ensuite la machine asynchrone à double alimentation en mode générateur. Ensuite, on a appliqué la commande vectorielle de la puissance active et réactive statorique de la machine asynchrone à double alimentation qui est entraîné par une turbine éolienne commandée par la stratégie MPPT (Maximum Power Point Tracking) pour extraire le maximum de la puissance produite par cette machine. Tous les modèles ont été développés en vue d'une exploitation par le logiciel Matlab/Simulink, qui permet de mettre en place assez rapidement des modèles ainsi que les lois de commande associées.

### **2.2. Modélisation Globale de la Chaîne de Conversion de l'Eolienne Basée sur une MADA**

#### **2.2.1. Description du système éolien**

La chaîne de conversion éolienne sur laquelle sont basés les travaux de cette mémoire est constituée d'une turbine éolienne, un multiplicateur, une machine asynchrone à double alimentation (MADA), un bus continu et deux convertisseurs statiques de puissance. La turbine éolienne entraîne la MADA à une vitesse de rotation variable à travers un multiplicateur de vitesse. Le stator de cette dernière est directement connecté au réseau électrique tandis que le rotor est connecté au réseau via deux convertisseurs statiques (Onduleur + Redresseur) mis en cascade à travers un bus continu, comme le montre la figure 2.1.

# CHAPITRE 02 MODELISATION ET DISPOSITIF DE COMMANDE D'UN SYSTEME EOLIEN A BASE DE MADA

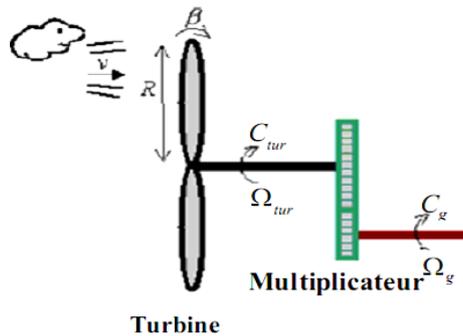


**Figure 2.1.** Système de conversion éolienne à base de la MADA

## 2.2.2. Modèle de la turbine

### 2.2.2.1. Modèle aérodynamique

Considérons une turbine éolienne munie de pales de longueur  $R$  entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain  $G$  (Figure 2.2).



**Figure 2.2.** Schéma explicatif de la turbine éolienne

### 2.2.2.2. Modèle des pales

En appliquant la théorie de la quantité de mouvement et du théorème de Bernoulli, on peut déterminer la puissance incidente (la puissance théorique), due au vent qui s'exerce sur les pales d'une éolienne par :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (2.1)$$

Où :

$\rho$ : masse volumique de l'air (approximativement  $1,225 \text{ kg/m}^3$ );

## CHAPITRE 02 MODELISATION ET DISPOSITIF DE COMMANDE D'UN SYSTEME EOLIEN A BASE DE MADA

$S$  : surface décrite par les pales de l'éolienne en rotation;

$v$  : vitesse du vent (m/s).

Le ratio de vitesse  $\lambda$  est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire de la turbine et la vitesse du vent, son expression est donnée comme suit :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{v} \quad (2.2)$$

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

$R$  : rayon de l'aérogénérateur ou la longueur des pales (m).

Dans un système éolien, à cause des différentes pertes, l'éolienne ne peut récupérer qu'une partie de la puissance du vent ( $P_v$ ). La puissance du vent et la puissance aérodynamique extraite par la turbine ( $P_{aer}$ ) peuvent s'exprimer en fonction du coefficient de puissance  $C_p$ .

$$P_{aer} = C_p P_v = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho S v^3 \quad (2.3)$$

Le coefficient de puissance  $C_p$  représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne et il dépend de la caractéristique de la turbine. Ce coefficient présente une limite théorique, appelée limite de Betz, égale à 0,593 et qui n'est jamais atteinte [17].

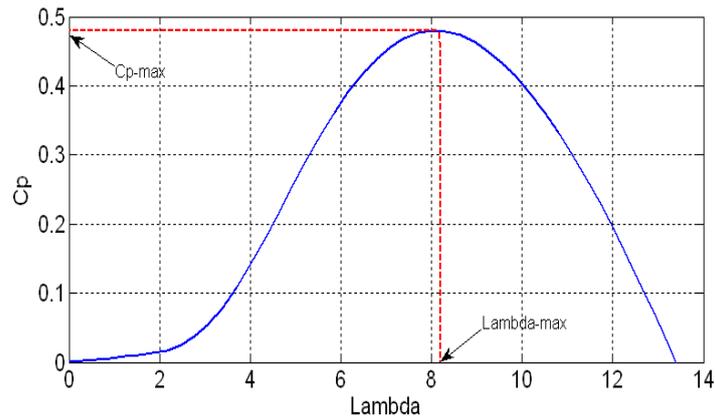
L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne. Dans notre cas (Figure 2.3), son évolution en fonction de  $\lambda$  est basée sur l'observation de données. Suite à ces observations, nous avons alors fixé sa valeur maximale à 0,47 et ses variations sont modélisées par l'approximation polynomiale suivante:

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left( \frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) \exp\left(\frac{-C_5}{\lambda_i}\right) + C_6 \lambda \quad (2.4)$$

Avec :  $C_1=0.5176$ ,  $C_2=116$ ,  $C_3=0.4$ ,  $C_4=5$ ,  $C_5=21$ ,  $C_6=0.0068$ .

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (2.5)$$

# CHAPITRE 02 MODELISATION ET DISPOSITIF DE COMMANDE D'UN SYSTEME EOLIEN A BASE DE MADA



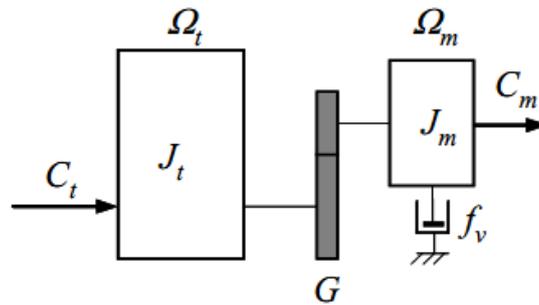
**Figure 2.3.** Coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative

La turbine permet de convertir l'énergie aérodynamique du vent en énergie mécanique. Son couple aérodynamique  $C_t$  est donné par l'expression suivante:

$$C_t = \frac{P_v}{\Omega_t} = \frac{C_p(\lambda, \beta) \rho S v^2}{2 \Omega_t} \quad (2.6)$$

### 2.2.2.3. Modèle du multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur de vitesse adapte la vitesse de rotation de la turbine (arbre lent) à la vitesse de rotation de la MADA (arbre rapide) (Figure 2.4).



**Figure 2.4.** Modèle mécanique simplifié de la turbine

Les pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles. Il s'agit d'un dispositif très complexe que nous avons modélisé très simplement par les deux équations suivantes :

$$C_m = \frac{C_t}{G} \quad (2.7)$$

$$\Omega_m = G \Omega_t \quad (2.8)$$

# CHAPITRE 02 MODELISATION ET DISPOSITIF DE COMMANDE D'UN SYSTEME EOLIEN A BASE DE MADA

Avec :

$J_t$ : Moment d'inertie de la turbine (Kg.m<sup>2</sup>);

$J_m$ : Moment d'inertie de la MADA (Kg.m<sup>2</sup>);

$f_v$ : Coefficient dû aux frottements visqueux de la MADA (N.m/rad/s);

$C_m$  : Couple mécanique sur l'arbre de la MADA (N.m);

$\Omega_m$  : Vitesse de rotation de la MADA (rad/s).

### 2.2.2.4. Modèle de l'arbre mécanique

Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale  $J$  constituée de l'inertie de la turbine  $J_t$  reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice  $J_m$ .

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_m \quad (2.9)$$

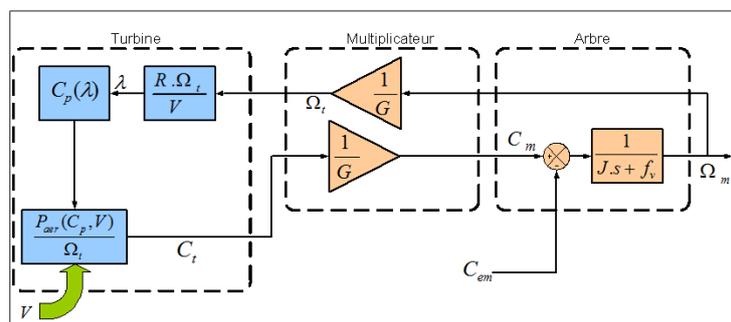
D'après la figure 2.4, nous pouvons écrire l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique de la MADA par :

$$\left( \frac{J_t}{G^2} + J_m \right) \frac{d\Omega_m}{dt} + f_v \Omega_m = C_m - C_{em} \quad (2.10)$$

Avec :

$C_{em}$ : couple électromagnétique de la MADA.

Le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine se déduit aisément à partir des équations précédentes, c'est ce qui est représenté sur la figure ci-dessus.



**Figure 2.5.** Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne

### 2.3. Technique d'extraction du maximum de puissance (MPPT)

Les techniques d'extraction du maximum de puissance consistent à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. Plusieurs dispositifs de commande

## CHAPITRE 02 MODELISATION ET DISPOSITIF DE COMMANDE D'UN SYSTEME EOLIEN A BASE DE MADA

peuvent être imaginés [20]. Dans cette section nous présenterons la stratégie de commande MPPT sans mesure de vitesse du vent.

Pour extraire le maximum de la puissance produite par le générateur éolien, nous devons fixer le ratio de vitesse à la valeur optimal  $\lambda_{optim}$  qui correspond au maximum du coefficient de puissance  $C_{p\_max}$ , la mesure de la vitesse du vent est difficile, une estimation de sa valeur pouvons être obtenus [4]:

$$v_{est} = \frac{\Omega_t R}{\lambda_{optim}} \quad (2.11)$$

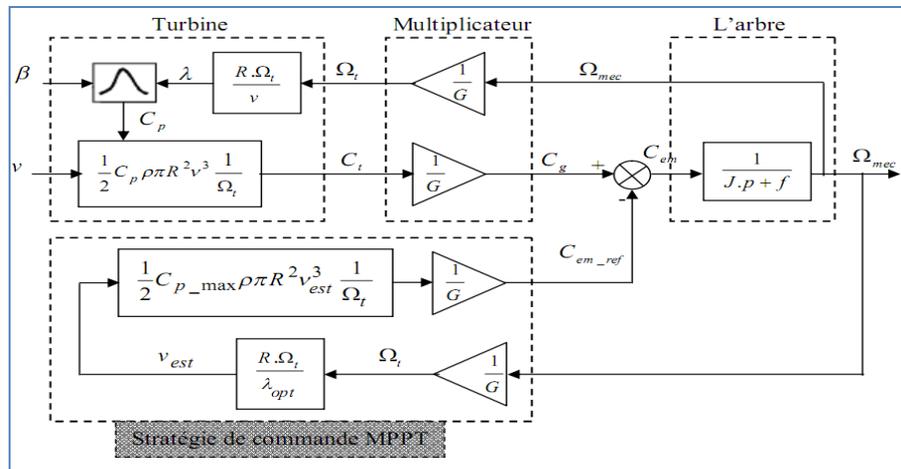
La puissance aérodynamique de référence est donc donnée par :

$$P_{aer\_ref} = \frac{1}{2} C_{p\_max} \rho S v_{est}^3 \quad (2.12)$$

Le couple électromagnétique de référence peut s'exprimer comme suit :

$$C_{em\_ref} = \frac{P_{aer\_ref}}{\Omega_t} = \frac{1}{2} C_{p\_max} \rho \pi \frac{R^5 \Omega_t^2}{\lambda_{optim}^3} \quad (2.13)$$

La figure 2.6 résume le schéma bloc de la stratégie MPPT sans mesure de la vitesse du vent.



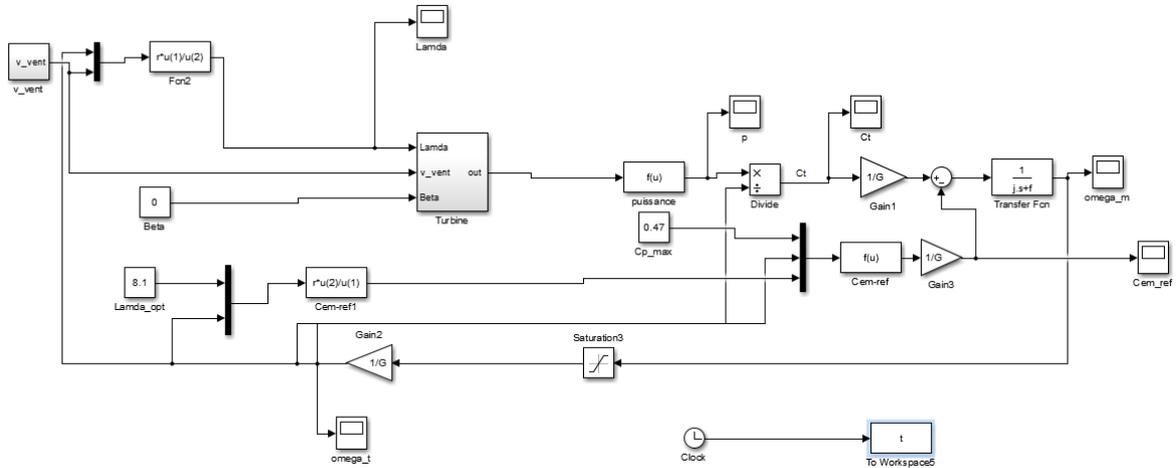
**Figure 2.6.** Schéma bloc de la stratégie MPPT sans mesure de la vitesse du vent

### 2.3.1. Résultats de simulation de la stratégie de commande MPPT

L'ensemble des modèles de la turbine, multiplicateur de vitesse et arbre mécanique ont été simulés sous MATLAB Simulink (Figure 2.7). La vitesse du vent  $v$ , l'angle d'orientation des pales  $\beta$  et le couple électromagnétique  $C_{em}$  fournis par la MADA constituent les entrées du système tandis que le couple de sortie du multiplicateur  $C_g$  et la vitesse mécanique  $\Omega_{mec}$  sont les sorties.

# CHAPITRE 02 MODELISATION ET DISPOSITIF DE COMMANDE D'UN SYSTEME EOLIEN A BASE DE MADA

L'angle d'orientation des pales est fixé à une valeur constante (égale à 0). Le couple électromagnétique de la MADA correspond à un point de fonctionnement optimal quant à la puissance générée (Maximum Power Point Tracking).

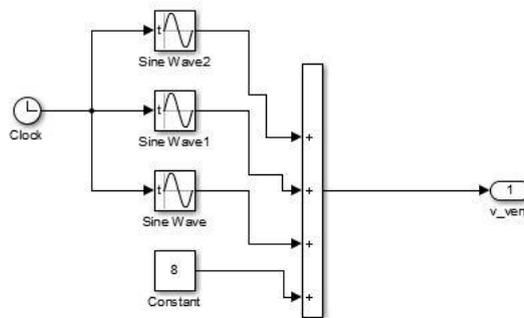


**Figure 2.7.** Schéma de simulation de la stratégie MPPT sans mesure de la vitesse du vent

Le modèle du vent utilisé dans notre étude est donné par la relation :

$$V(t)=8+0.2\sin (0.1047.t) +2\sin (0.2665.t) + 0.2\sin (3.6645.t)$$

Cette équation est modélisée sous MATLAB/SIMULINK par le schéma bloc suivant :



**Figure 2.8.** Modèle du profil du vent sous MATLAB/SIMULINK

La vitesse de la turbine et la vitesse mécanique de l'arbre sont illustrées respectivement sur les figures 2.9 et 2.10.

La figure 2.11 illustre la puissance mécanique transmise à la MADA, on peut constater la forte influence du vent sur cette grandeur, rappelons que la puissance évolue selon le cube de la vitesse du vent, le gain en énergie de cette configuration dépend évidemment du type de gisement et en particulier de la variation du vent.

# CHAPITRE 02 MODELISATION ET DISPOSITIF DE COMMANDE D'UN SYSTEME EOLIEN A BASE DE MADA

L'extraction du maximum de puissance du vent est réalisée en imposant un rapport optimal  $\lambda_{optim}$  qui garantit un coefficient de puissance maximal  $C_{p\_max}$  (rendement aérodynamique maximal) comme la montre les figures 2.12 et 2.13. On s'aperçoit que le rendement est quasiment constant que toute la plage de la vitesse du vent, néanmoins il est sensible aux faibles vitesses (le  $C_p$  subit une diminution pour les faibles vitesses contrairement à  $\lambda$ ). L'efficacité énergétique est quasi optimale pour toute la plage de vitesse.

La figure 2.14 montre que le couple électromagnétique est asservi à leur grandeur de référence.

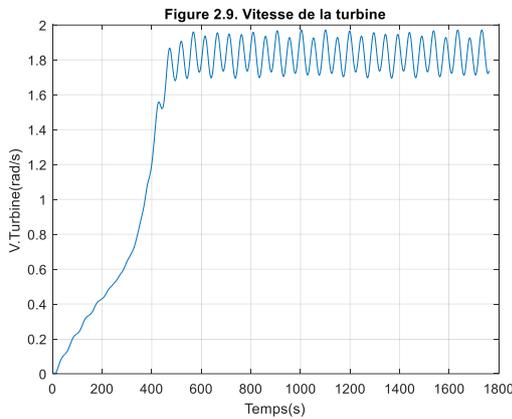


Figure 2. 9. Vitesse de la turbine

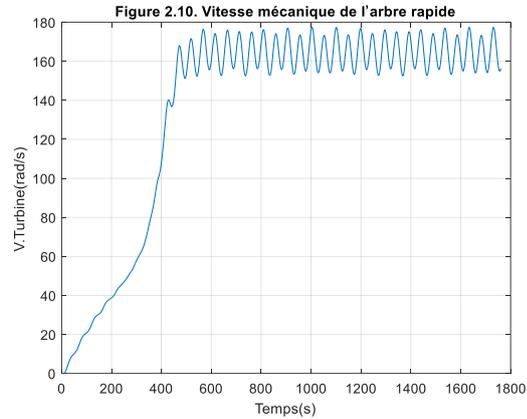


Figure 2. 10. Vitesse mécanique de l'arbre rapide

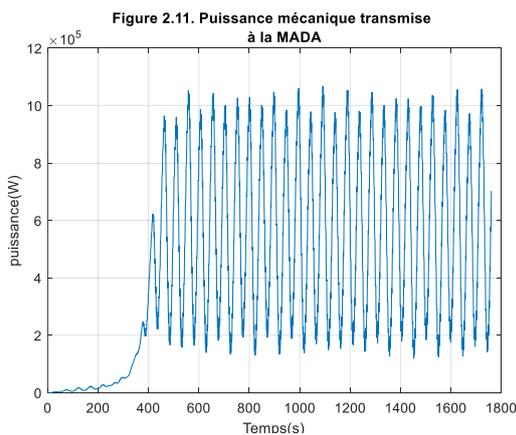


Figure 2. 11. Puissance mécanique transmise

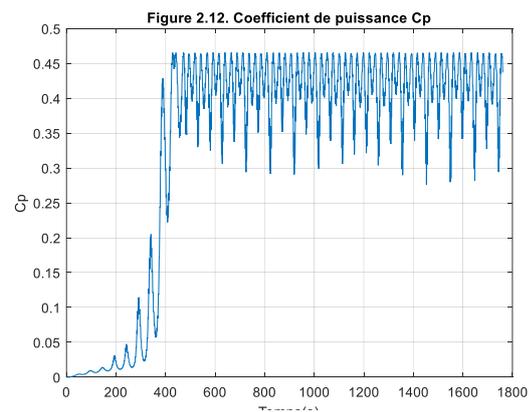
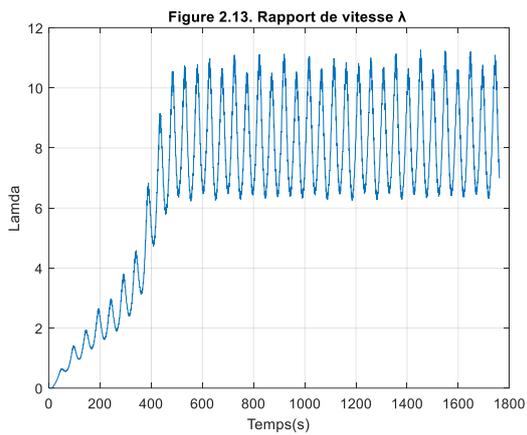
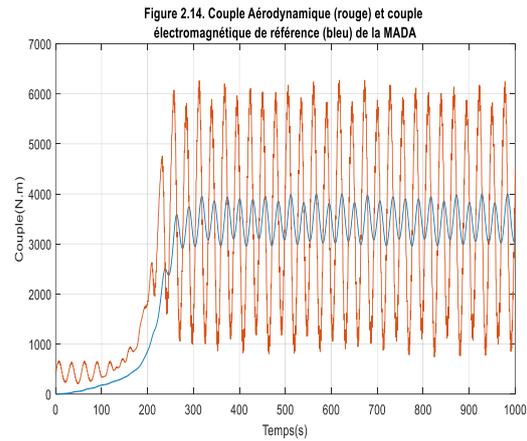


Figure 2. 12. Coefficient de puissance Cp

# CHAPITRE 02 MODELISATION ET DISPOSITIF DE COMMANDE D'UN SYSTEME EOLIEN A BASE DE MADA



**Figure 2.13.** Rapport de vitesse  $\lambda$

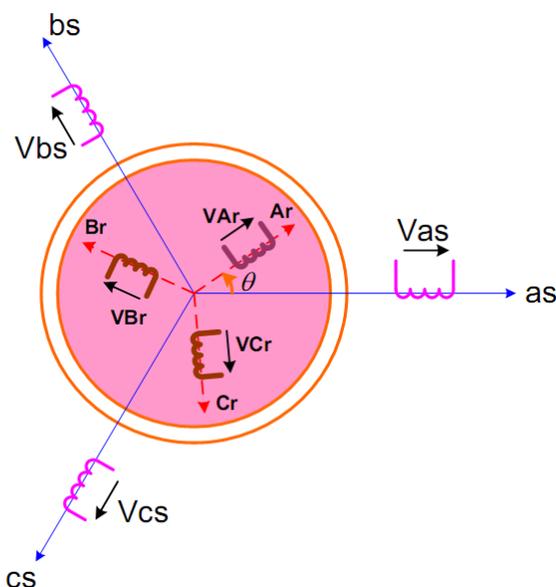


**Figure 2.14.** Couple Aérodynamique (rouge) et couple électromagnétique de référence (bleu) de la MADA

## 2.4. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

La mise de la MADA sous forme d'un modèle mathématique nous facilite largement sa commande dans les différents régimes de fonctionnement. Nous devons procéder à quelques simplifications classiques pour pouvoir la modéliser (ces modifications n'altèrent pas le fonctionnement de la MADA [21]):

- On admet une répartition spatiale sinusoïdale de l'induction magnétique à travers l'entrefer;
- Les courants induits dans le circuit magnétique sont négligés (courant de Foucault);
- La saturation magnétique n'est pas prise en compte;
- Les résistances des enroulements sont considérées constantes.



**Figure 2.15.** Représentation spatiale de la machine asynchrone dans le repère triphasé

## CHAPITRE 02 MODELISATION ET DISPOSITIF DE COMMANDE D'UN SYSTEME EOLIEN A BASE DE MADA

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 de la MADA peut être décrit par le système d'équations différentielles suivant.

### 2.4.1. Equations des tensions

Les équations des tensions statoriques, peuvent être exprimées, en utilisant la notation matricielle, par :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \quad (2.14)$$

Les équations des tensions rotoriques, peuvent être exprimées par :

$$[V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r] \quad (2.15)$$

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}; \quad [V_r] = \begin{bmatrix} V_{Ar} \\ V_{Br} \\ V_{Cr} \end{bmatrix}; \quad [I_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}; \quad [I_r] = \begin{bmatrix} I_{Ar} \\ I_{Br} \\ I_{Cr} \end{bmatrix}; \quad [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix}; \quad [\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{Ar} \\ \Phi_{Br} \\ \Phi_{Cr} \end{bmatrix};$$

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

### 2.4.2. Equations des flux

De la même manière on peut écrire les équations des flux sous la forme suivante :

$$[\Phi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \quad (2.16)$$

$$[\Phi_r] = [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{sr}]^t \cdot [I_s] \quad (2.17)$$

Tel que :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}; \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \text{ et}$$

## CHAPITRE 02 MODELISATION ET DISPOSITIF DE COMMANDE D'UN SYSTEME EOLIEN A BASE DE MADA

---

$$[M_{sr}] = [M_{rs}] = M_{\max} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta \end{bmatrix}$$

En remplaçant les relations (2.16) et (2.17) dans, respectivement les relations (2.14) et (2.15), nous obtenons les deux expressions suivantes :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + [L_{ss}] \frac{d}{dt} [I_s] + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}] \cdot [I_r] \} \quad (2.18)$$

$$[V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + [L_{rr}] \frac{d}{dt} [I_r] + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}]^t \cdot [I_s] \} \quad (2.19)$$

### 2.4.3. Equation mécanique

D'après la loi fondamentale de la dynamique nous pouvons écrire :

$$C_{em} = C_m + f_v \Omega_m + J_m \frac{d\Omega_m}{dt} \quad (2.20)$$

Où :

$C_m$  : Couple moteur appliqué sur la MADA [N.m].

$J_m$  : Moment d'inertie total de la MADA [Kg.m<sup>2</sup>].

$f_v$  : Coefficient de frottement visqueux de la MADA [N.m/rad/s].

### 2.4.4. Modèle diphasé de la MADA

#### 2.4.4.1. Transformation de Park

La transformation de Park est un outil mathématique permettant la simplification des équations des machines électriques triphasées. Elle permet de passer d'un système triphasé alternatif à un système diphasé (repère  $dqo$ ), et donc d'obtenir un système d'équation à coefficients constants ce qui simplifie sa résolution.

La matrice de transformation est définie comme suit :

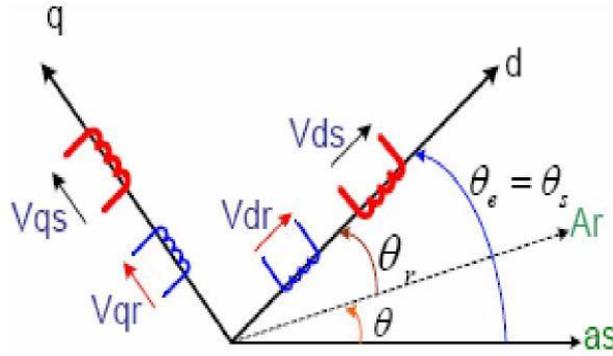
$$[P(\theta_s)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_s) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

## CHAPITRE 02 MODELISATION ET DISPOSITIF DE COMMANDE D'UN SYSTEME EOLIEN A BASE DE MADA

Il est noté par  $\theta_s$  (resp. par  $\theta_r$ ) l'angle de la transformation de Park des grandeurs statoriques (resp. rotoriques) (Figure 2.16),

La transformation de Park aboutit à une relation liant les angles  $\theta_s$  et  $\theta_r$ , celle-ci s'exprime par:

$$\theta + \theta_r = \theta_s \quad (2.22)$$



**Figure 2.16.** Représentation de la machine dans le repère diphasé

### 2.4.4.2. Equations des tensions

Appliquons la transformation de Park à l'expression (2.14) et en multipliant les deux membres de l'égalité par  $[P(\theta_s)]$  et en simplifiant, nous trouvons :

$$[V_{sdq}] = [R_s] \cdot [I_{sdq}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sdq}] + [P(\theta_s)] \frac{d}{dt} [P^{-1}(\theta_s)] \cdot [\Phi_{sdq}] \quad (2.23)$$

L'expression (2.23) devient alors :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{d\theta_s}{dt} \\ \frac{d\theta_s}{dt} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

De manière similaire, et en suivant les mêmes étapes, nous obtenons pour le rotor l'expression suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{d\theta_r}{dt} \\ \frac{d\theta_r}{dt} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

### 2.4.4.3. Equation des flux

Appliquons la transformation de Park à l'expression (2.16) :

## CHAPITRE 02 MODELISATION ET DISPOSITIF DE COMMANDE D'UN SYSTEME EOLIEN A BASE DE MADA

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sdq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P(\theta_s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} L_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P^{-1}(\theta_s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sdq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P(\theta_s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M_{sr} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P^{-1}(\theta_r) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{rdq} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

En introduisant les inductances cycliques :

$$\begin{aligned} L_s &= l_s - M_s \\ M &= \frac{3}{2} M_{sr} \end{aligned} \quad (2.27)$$

L'expression (2.26) devient alors :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

De la même manière, en appliquant la transformation de Park à l'équation du flux rotorique, et en introduisant l'inductance cyclique:

$$L_r = l_r - M_r \quad (2.29)$$

On aura :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

#### 2.4.4.4. Equation du couple électromagnétique

L'expression générale du couple électromagnétique est donnée par :

$$C_{em} = P \frac{M}{L_s} (\phi_{ds} I_{qr} - \phi_{qs} I_{dr}) \quad (2.31)$$

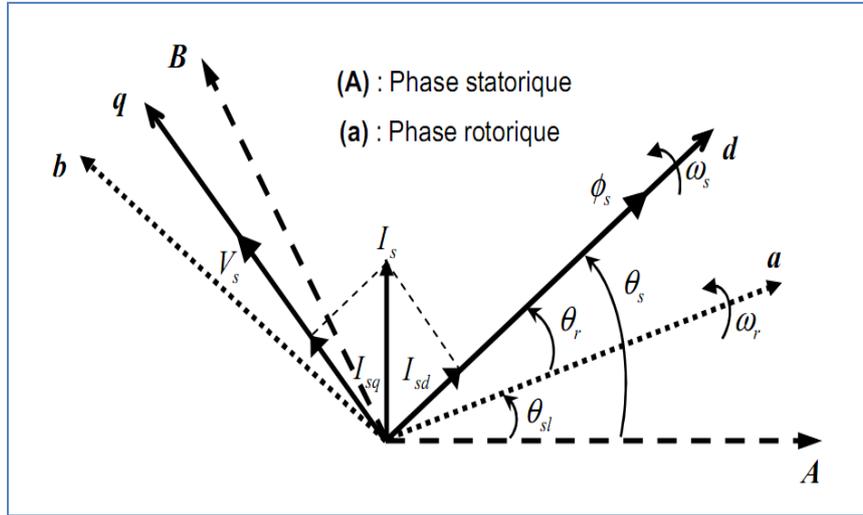
### 2.5. Stratégie de commande en puissance active et réactive de la MADA

Dans ce paragraphe, nous considérons que la MADA fonctionne en mode hypersynchrone, ce qui permet un transfert optimal de puissance en utilisant la commande vectorielle directe avec orientation du flux statorique. A cet effet nous allons, donc déterminer les équations qui lient les puissances actives et réactives statoriques aux grandeurs rotoriques sur lesquelles nous agissons pour commander la machine.

- Il s'agit d'obtenir un certain découplage entre le stator et le rotor afin que l'expression du couple soit similaire à celle du couple de la machine à courant continu. Le principe consiste à

## CHAPITRE 02 MODELISATION ET DISPOSITIF DE COMMANDE D'UN SYSTEME EOLIEN A BASE DE MADA

- orienter le flux statorique suivant l'axe  $d$  du référentiel tournant (Figure 2.17). On a donc :  $\Phi_{qs}=0$  et par suite  $\Phi_{ds}=\Phi$
- Pour les machines de moyenne et forte puissance utilisées dans les éoliennes, on peut de façon légitime négliger la résistance statorique  $R_s$  tout en considérant le flux statorique constant.



**Figure 2.17.** Couplage de puissance active et réactive de la MADA

Sous ces hypothèses, les équations (2.24) et (2.28) deviennent :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s \approx \omega_s \phi_s \end{cases} \quad (2.32)$$

$$\begin{cases} \phi_{ds} = \phi_s = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \phi_{qs} = 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \quad (2.33)$$

A partir des équations des composantes directes et quadrature du flux statoriques (équation 2.32), Nous pouvons écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques:

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (2.34)$$

# CHAPITRE 02 MODELISATION ET DISPOSITIF DE COMMANDE D'UN SYSTEME EOLIEN A BASE DE MADA

---

## 2.5.1. Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques

Dans un repère diphasé, les puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrone à double alimentation s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (2.35)$$

Sous l'hypothèse d'un flux statorique orienté ( $V_{ds} = 0, V_{qs} = V_s$ ), ce système d'équations peut se simplifier sous la forme :

$$\begin{cases} P_s = V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} \end{cases} \quad (2.36)$$

En remplaçant les courants statoriques par leurs valeurs de l'équation (2.34) dans l'équation (2.36) nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances active et réactive:

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = \frac{V_s \phi_s}{L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad (2.37)$$

En approximant  $\phi_s$  par  $\frac{V_s}{\omega_s}$ , l'expression de la puissance réactive  $Q_s$  devient alors :

$$Q_s = \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{dr} \quad (2.38)$$

Il ressort de l'expression (2.37) que le contrôle des puissances active et réactive au stator est découplé. En effet, avec une inductance magnétisante constante et un réseau électrique puissant, la puissance active sera directement proportionnelle au courant rotorique d'axe  $q$ , et la puissance réactive proportionnelle au courant rotorique d'axe  $d$  à une constante près ( $V_s^2 / \omega_s L_s$ ) imposée par le réseau [15].

## 2.5.2. Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques

A partir du système d'équation (2.34), les expressions des flux rotoriques peuvent être écrites sous la forme suivante :

## CHAPITRE 02 MODELISATION ET DISPOSITIF DE COMMANDE D'UN SYSTEME EOLIEN A BASE DE MADA

$$\begin{cases} \phi_{dr} = \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \phi_{qr} = \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \end{cases} \quad (2.39)$$

Ces expressions des flux rotorique d'axe  $d$  et  $q$  sont alors intégrées aux expressions des tensions rotoriques diphasées de l'équation (2.25), nous obtenons alors :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{dr}}{dt} - g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{qr}}{dt} + g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (2.40)$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent, nous pouvons donc écrire :

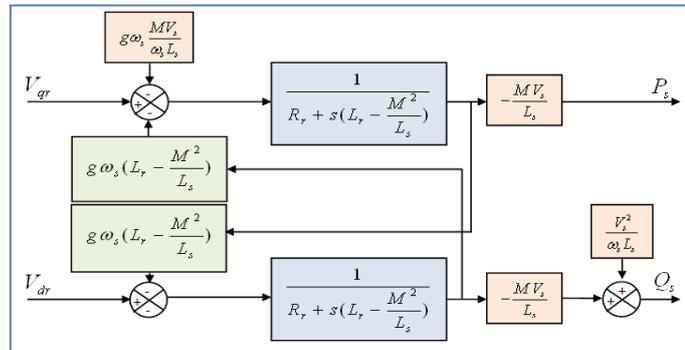
$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} - g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (2.41)$$

$V_{dr}$  et  $V_{qr}$  sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la MADA pour obtenir

les courants rotoriques désirés. L'influence des termes de couplage entre les deux axes en  $\left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$

est minime. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser.

A partir des équations précédentes nous pouvons élaborer un schéma bloc du système électrique de la MADA à réguler (Figure 2.18).



**Figure 2.18.** Couplage de puissance active et réactive de la MADA

# CHAPITRE 02 MODELISATION ET DISPOSITIF DE COMMANDE D'UN SYSTEME EOLIEN A BASE DE MADA

## 2.6. Commande vectoriel directe en puissance active et réactive de la MADA

Dans cette section, on présente la régulation indépendante des puissances actives et réactives de la MADA. 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  $V_{dr}$ .

Si l'on regarde la relation qui lie les courants rotoriques aux puissances statoriques, on voit apparaître le terme  $\left(\frac{M V_s}{L_s}\right)$ . Dans cette étude, on a considéré que l'éolienne était raccordée à un réseau de forte

puissance et stable, donc ce terme est constant. On ne placera donc pas des régulateurs entre les courants rotoriques et les puissances.

Pour simplifier la commande de la MADA, on considère que la tension du réseau est stable, ce qui permet d'utiliser une seule boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur indépendant. Toutefois, on négligera les termes de couplage entre les deux axes, qui apparaît dans la figure 2.25 à cause du faible glissement, tout en compensant aussi les perturbations ce qui donne le schéma simplifié représenté dans la figure 2.19.

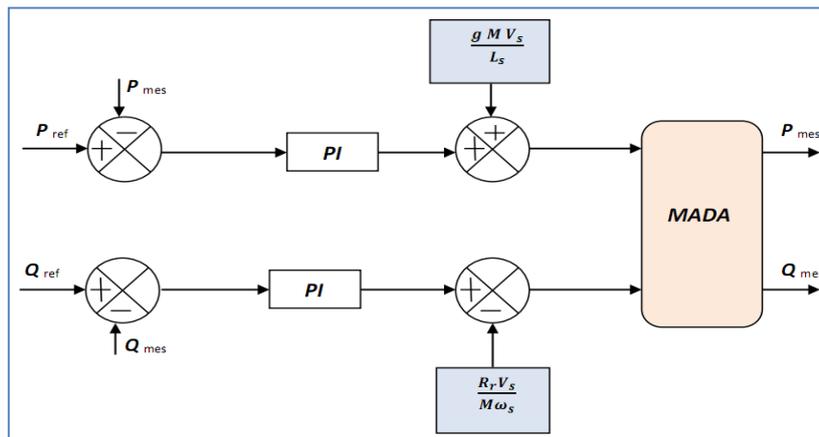


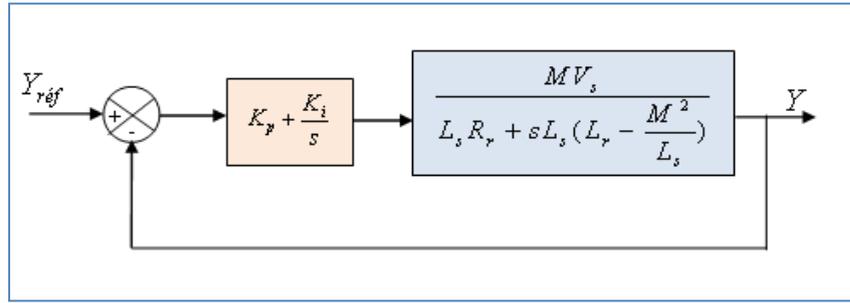
Figure 2.19. Schéma bloc de la MADA à réguler

### 2.6.1. Calcul des paramètres du régulateur PI

Le régulateur PI utilisé pour le réglage des puissances active et réactive, offre plusieurs avantages notamment la rapidité et la simplicité à mettre en œuvre, ainsi qu'il offre des performances acceptables à la régulation du système considéré.

Dans la littérature, il existe plusieurs méthodes de la conception des régulateurs PI. Dans notre travail, nous nous intéressons à la méthode de conception qui est basée sur la compensation de la constante de temps du régulateur avec celle du processus de la grandeur à réguler.

## CHAPITRE 02 MODELISATION ET DISPOSITIF DE COMMANDE D'UN SYSTEME EOLIEN A BASE DE MADA



**Figure 2.20.** Schéma block du système de régulation

La figure 2.20 montre un système de réglage de chaque puissance au niveau du stator de la MADA en boucle fermée par un régulateur PI. Dans ce cas, la fonction de transfert de chaque puissance est déduite à partir du modèle de la MADA en tenant compte de l'équation (2.41). La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) du système de régulation de la figure 2.20 s'écrit comme suit:

$$FTBF = \frac{s + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{s}{K_p}} \cdot \frac{\frac{MV_s}{L_s (L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{s + (L_r - \frac{M^2}{L_s})} \quad (2.42)$$

La méthode de compensation des pôles consiste à éliminer le zéro de la fonction de transfert et ceci nous conduit à l'égalité suivante:

$$\frac{K_i}{K_p} = L_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \quad (2.43)$$

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

Après la compensation, on obtient la FTBO suivante:

$$FTBF = \frac{K_p \cdot \frac{MV_s}{L_s (L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{s} \quad (2.44)$$

Ce qui nous donne la fonction de transfert en boucle fermée suivante:

$$FTBF = \frac{1}{1 + \tau_r s} \quad (2.45)$$

# CHAPITRE 02 MODELISATION ET DISPOSITIF DE COMMANDE D'UN SYSTEME EOLIEN A BASE DE MADA

Avec :

$$\tau_r = \frac{1}{K_p} \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{MV_s} \quad (2.46)$$

Dans ce cas, les gains des régulateurs PI sont exprimés en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse comme suit:

$$K_p = \frac{1}{\tau_r} \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{MV_s}, \quad K_i = \frac{1}{\tau_r} \frac{L_s R_r}{MV_s} \quad (2.47)$$

## 2.6.2. Résultats de simulation de la commande du MADA

La simulation de la MADA, de la partie électrique et de la commande directe a été implantée dans l'environnement MATLAB/SIMULINK afin d'effectuer des testes de régulation. On a donc soumis ce système à des échelons de puissance active et réactive afin d'observer son comportement.

On note ici que la vitesse mécanique qui entraîne le rotor du MADA est une vitesse fixe proche de la vitesse de synchronisme qui est égale à 152 rad/s (1450 tr/mn).

L'analyse par simulation effectuée, traite du système éolien permettant le contrôle des puissances active et réactive à travers la commande découplée de ces dernières. Les figures 2.21 et 2.22 montrent que les puissances active et réactive délivrées par la MADA suivent bien les références correspondantes. Ceci est dû au contrôle des composantes en quadrature et directe du courant de la MADA. Nous constatons de la figure 2.23, que le courant délivré par le système éolien est en opposition de phase par rapport à la tension. Ceci confirme que le système éolien n'injecte que la puissance active dans le réseau.

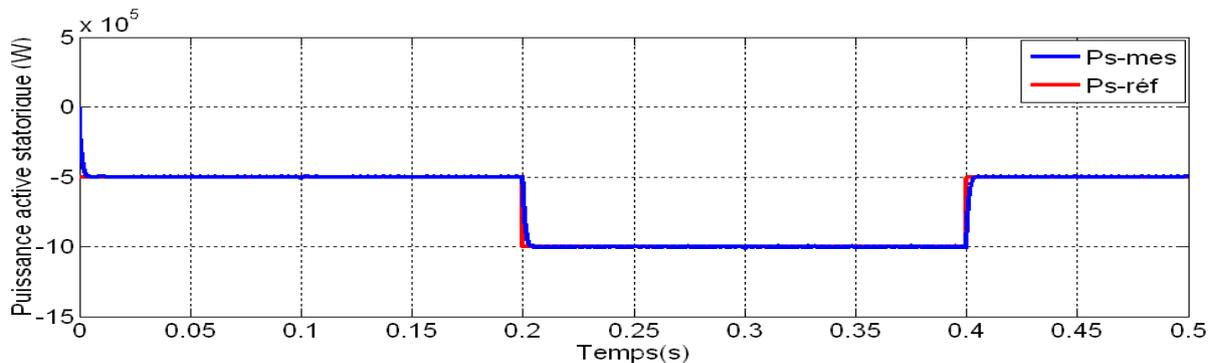


Figure 2.21. Puissance active de la commande directe de la MADA

## CHAPITRE 02 MODELISATION ET DISPOSITIF DE COMMANDE D'UN SYSTEME EOLIEN A BASE DE MADA

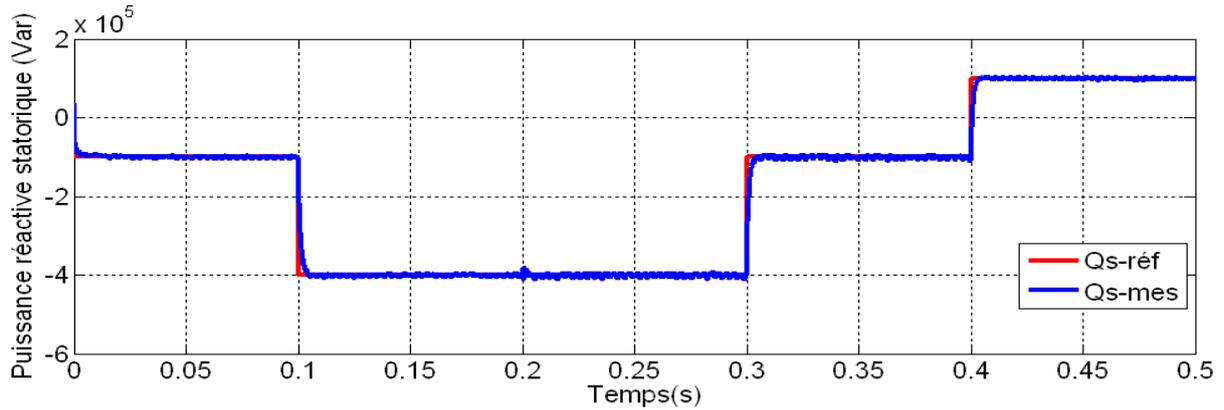


Figure 2.22. Puissance réactive de la commande directe de la MADA

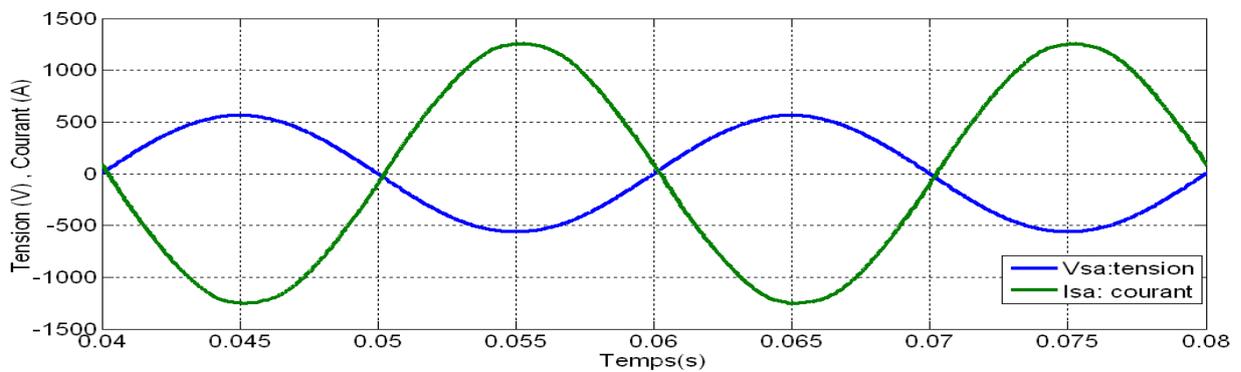


Figure 2.23 Tension et courant d'une phase statoriques de la MADA

### 2.7. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation, la simulation et l'analyse d'un système éolien basé sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA) fonctionnant à vitesse variable. En premier lieu, les modèles analytiques des différents constituants du système éolien ont été établis. Un fonctionnement stable du système éolien a été obtenu avec l'application de la stratégie d'extraction de maximum de puissance (MPPT). La commande découplée des puissances active et réactive a été élaborée dans l'objectif de réguler les puissances active et réactive fournies au réseau selon des consignes de référence bien définies et d'imposer au système éolien de fonctionner avec un facteur de puissance unitaire. Le fonctionnement global du système de l'aérogénérateur et sa commande ont été illustrés par les réponses à la commande en puissance, en régimes transitoire et permanent. Les résultats obtenus montrent clairement l'efficacité de ce mode de contrôle.

## *Chapitre 3*

# *Etude d'un simulateur physique d'aérogénérateur (émulateur éolien)*

### **3.1. Introduction**

Ce chapitre montre l'étude d'un émulateur éolien qui donne les étapes de la réalisation d'un simulateur physique de turbine éolienne. Les variations du vent sont d'abord reconstruites. Elles sont ensuite appliquées à un modèle de turbine éolienne de 100 W dont les variations de vitesse ainsi obtenues sont appliquées en référence à une machine à courant continu(MCC) ils peuvent aussi être appliqué à des moteurs synchrones ou à des moteurs asynchrones. (Cette MCC est contrôlée en vitesse grâce à une commande robuste de type PI). L'intérêt de cette étude est de pouvoir disposer d'un simulateur physique « universel » moins encombrant et moins chère auquel nous pouvons accoupler différentes génératrices électriques de façon à tester leur intégration et leur efficacité dans un système éolien et sur un réseau électrique.

### **3.2. L'Emulateur Turbine Eolienne**

L'entraînement d'une machine électrique par un système éolien constitue une chaîne de conversion complexe dans laquelle le couple mécanique présent sur l'arbre de transmission dépend uniquement de la vitesse du vent et de l'éventuelle présence d'un dispositif d'orientation des pales (pitch control). Le vent étant par nature imprévisible et présentant des variations importantes, le couple résultant présente des ondulations dont il est nécessaire de tenir compte dans l'étude de la génération d'électricité par éolienne.

Ce chapitre est un préalable à l'étude de machines fonctionnant à vitesse variable. Il présente la synthèse de la commande d'une machine à courant continu en vue de reproduire le comportement d'une éolienne à vitesse variable. A partir d'une reproduction des variations du vent suivant la caractéristique de Van der Hoven [5], un modèle simple d'une éolienne de 100 W est établi en utilisant les équations classiques du Chapitre 2. La vitesse ainsi générée est appliquée en référence à la machine à courant continu accouplée à la MADA.

# CHAPITRE 03 ETUDE D'UN SIMULATEUR PHYSIQUE D'AEROGENERATEUR (EMULATEUR EOLIEN)

## 3.3. Modélisation d'un émulateur éolien

### 3.3.1. Modélisation de la turbine

Dans le cadre des études menées sur les systèmes éoliens, nous avons donc choisi de modéliser une éolienne de 100 W pour notre simulateur. C'est un modèle tri-pale. L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne.

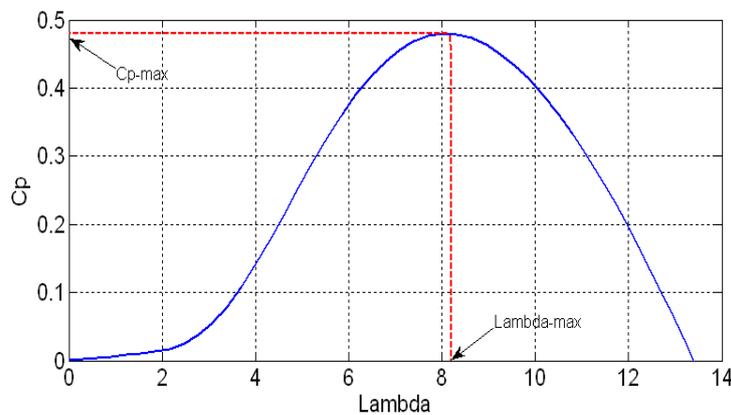
Dans notre cas, son évolution en fonction de  $\lambda$  est basée sur l'observation de données de plusieurs petites éoliennes de quelques watts. Suite à ces observations, nous avons alors fixé sa valeur maximale à 0,475 et ses variations sont modélisées par l'approximation polynomiale suivante :

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left( \frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) \exp\left(\frac{-C_5}{\lambda_i}\right) + C_6 \lambda \quad (3.1)$$

Avec :  $C_1=0.5176$ ,  $C_2=116$ ,  $C_3=0.4$ ,  $C_4=5$ ,  $C_5=21$ ,  $C_6=0.0068$ .

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (3.2)$$

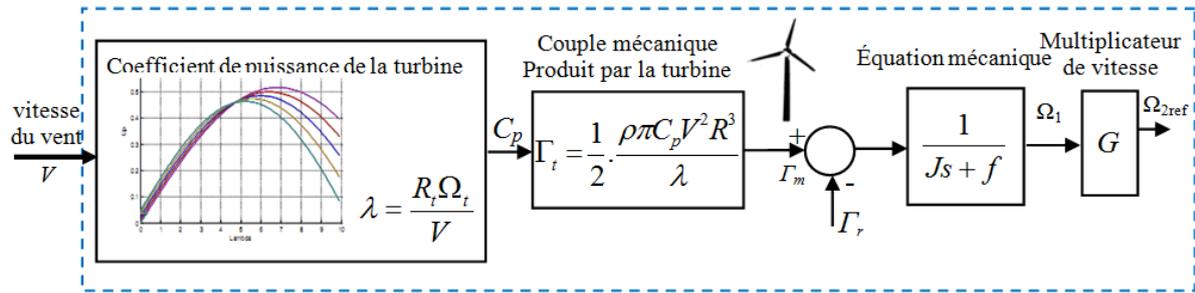
La caractéristique correspondant à ce polynôme est donnée sur la figure 3.1.



**Figure 3.1.** Evolution du coefficient de puissance de l'éolienne (angle de calage fixe)

La figure 3.2 montre le synoptique global du modèle de l'éolienne [22]

# CHAPITRE 03 ETUDE D'UN SIMULATEUR PHYSIQUE D'AEROGENERATEUR (EMULATEUR EOLIEN)

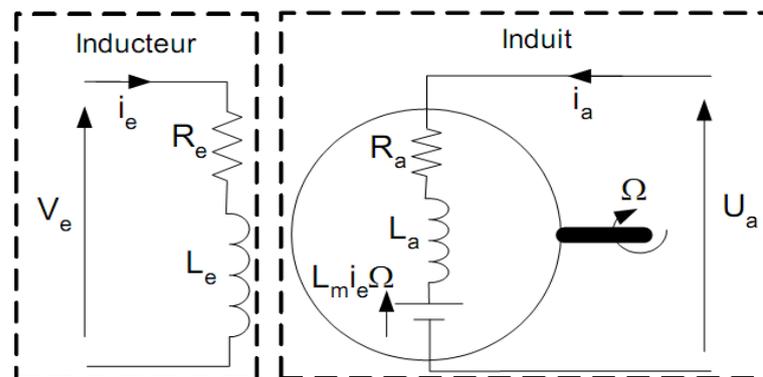


**Figure 3.2.** Génération d'une vitesse de référence à partir du modèle de l'éolienne

### 3.4. Commande PI de la machine à courant continu

#### 3.4.1. Modèle de la machine à courant continu

Le modèle électrique de la machine à courant continu à excitation séparée est donné sur la figure 3.3.



**Figure 3.3.** Modèle électrique de la machine à courant continu à excitation séparée

Les équations électriques de la machine sont :

$$V_e = R_e i_e + L_e \frac{di_e}{dt}, \quad \text{Pour l'excitation (bobinage inducteur)} \quad (3.3)$$

$$U_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + L_m i_e \Omega, \quad \text{pour l'induit} \quad (3.4)$$

L'équation mécanique :

$$J_{mcc} \frac{d\Omega}{dt} = L_m i_e i_a - f_{mcc} \Omega + \Gamma_r \quad (3.5)$$

## CHAPITRE 03 ETUDE D'UN SIMULATEUR PHYSIQUE D'AEROGENERATEUR (EMULATEUR EOLIEN)

Où :  $L_m i_e = K = C^{st}$  est une constante dite « contre électromotrice » et  $\Omega$  la vitesse de rotation du moteur.  $U_a$  représente la tension d'alimentation du circuit induit,  $R_a$  et  $L_a$  sont respectivement les valeurs de la résistance et de l'inductance du bobinage induit,  $V_e$  est la tension d'excitation,  $R_e$  et  $L_e$  sont respectivement les valeurs de la résistance et de l'inductance du bobinage inducteur.

Dans notre cas, la machine est à excitation séparée, le flux créé par le bobinage inducteur est donc constant, on a alors :

$$\phi_e = L_m i_e = K_e \quad (3.6)$$

Les équations (4.5) à (4.6) sont ainsi simplifiées et le modèle physique peut être exprimé dans l'espace d'état sous la forme [2] :

$$\left[ \dot{X} \right] = [A][X] + [B]U + [D]W \quad (3.7)$$

Avec :

$$[X] = [i_a \ \Omega]^T; [A] = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_e}{L_a} \\ \frac{K_e}{J_{mcc}} & -\frac{f_{mcc}}{J_{mcc}} \end{bmatrix}; [B] = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} \\ 0 \end{bmatrix}; [U] = U_a; [D] = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{J_{mcc}} \end{bmatrix}; [W] = \Gamma_r$$

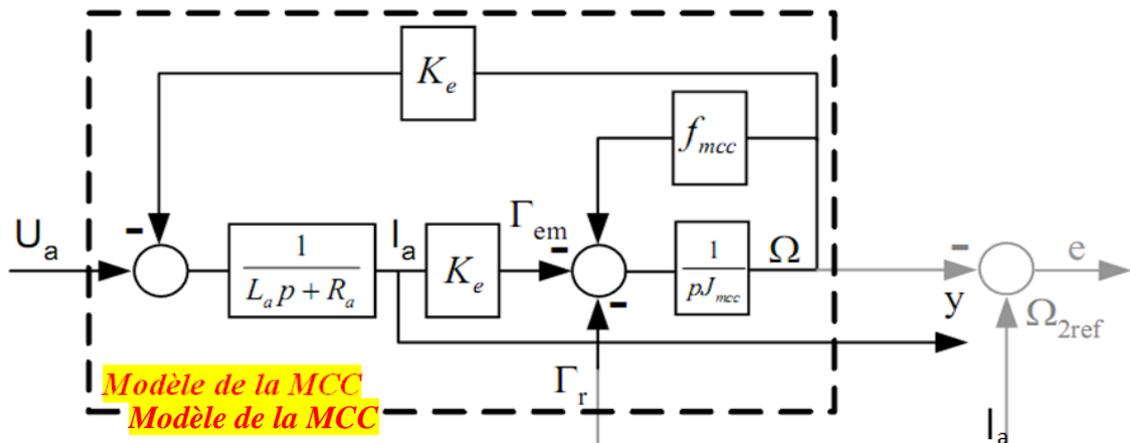
La machine à courant continu que nous allons commander est une machine de  $P_n=100 \text{ W}$ ,  $V_n=220$ ,  $\Omega_n=2000 \text{ tr/min}$ .

### 3.4.2. Stratégie de commande de la machine à courant continu

La seule grandeur mesurée est la vitesse de rotation de la machine à courant continu. Cette restriction ainsi que la simplicité du système à commander nous ont conduit à choisir une commande de type PI classique qui est, de plus, très simple et rapide à mettre en œuvre et donne un bon compromis complexité-performance.

Le modèle d'état de l'équation (3.8) est mis sous forme d'un schéma bloc présenté sur la figure 3.4.

## CHAPITRE 03 ETUDE D'UN SIMULATEUR PHYSIQUE D'AEROGENERATEUR (EMULATEUR EOLIEN)



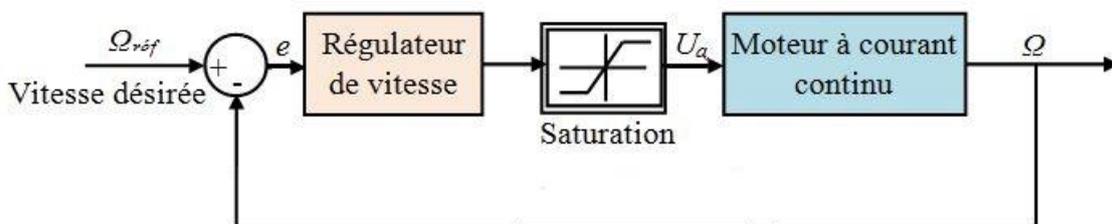
**Figure 3.4.** Schéma bloc du modèle de la MCC

Le modèle physique de la MCC est entouré en pointillés. Le couple résistant est considéré comme une perturbation constante. La variable  $\Omega_{2ref}$  provient du modèle de turbine représenté sur la figure 3.2. Elle représente la vitesse de rotation de référence à laquelle on souhaite asservir la vitesse de rotation de la MCC. La variable « e » représente l'écart entre la consigne de vitesse et la vitesse effective. L'objectif de la commande à réaliser est d'asservir la vitesse en dépit du couple résistant.

Le régulateur de vitesse peut être synthétisé au moyen de techniques classiques développées pour les systèmes linéaires.

### 3.4.3. Contrôle en vitesse du moteur à courant continu

Dans cette partie, nous mettons en œuvre le contrôle en vitesse du MCC en boucle fermée, la vitesse sera contrôlée par l'intermédiaire de la tension moyenne aux bornes de l'induit en insérant un régulateur PI qui peut aisément être déterminé à partir du modèle de la MCC. La figure 3.5 montre schématiquement la régulation de vitesse du MCC.



**Figure 3.5.** Schéma fonctionnel du contrôle de la vitesse

La fonction de transfert du régulateur de vitesse est donné par:

## CHAPITRE 03 ETUDE D'UN SIMULATEUR PHYSIQUE D'AEROGENERATEUR (EMULATEUR EOLIEN)

$$G_{PI}(s) = \frac{K_i + K_p s}{s} \quad (3.8)$$

Dans un souci de simplification, on néglige le couple résistant ainsi que l'inductance de l'induit, la fonction de transfert du processus à régulé est :

$$H_{mcc}(s) = \frac{\Omega}{U_a} = \frac{\frac{1}{K_e}}{1 + \frac{R_a J_{mcc}}{K_e^2} s} = \frac{H_0}{1 + \tau_m s} \quad (3.9)$$

Avec: le gain statique, qui vaut  $1/K_e$ , est noté ici  $H_0$ , et la constante de temps mécanique  $\tau_m = \frac{R_a J_{mcc}}{K_e^2}$ .

La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par :

$$FTBO(s) = \left( \frac{K_i + K_p s}{s} \right) \left( \frac{H_0}{1 + \tau_m s} \right) = \frac{H_0 (K_i + K_p s)}{s + \tau_m s^2} \quad (3.10)$$

Le système de régulation en boucle fermé de la vitesse est du second ordre, elle est de la forme:

$$FTBF(s) = \frac{H_0 \left( \frac{K_i + K_p s}{\tau_m} \right)}{s^2 + \left( \frac{1 + H_0 K_p}{\tau_m} \right) s + \frac{H_0 K_i}{\tau_m}} \quad (3.11)$$

La fonction de transfert est alors identifiée à une fonction du second ordre sans zéro:

$$G_{wi}(s) = \frac{K_{wi}}{s^2 + (2\xi_i \omega_{ni})s + \omega_{ni}^2} \quad (3.12)$$

L'identification des gains du régulateur est obtenue en comparant les deux dénominateurs, d'où les

paramètres du correcteur PI seront :  $K_p = \frac{2\xi_i \omega_{ni} \tau_m}{H_0} - 1$  et  $K_i = \frac{\omega_{ni}^2 \tau_m}{H_0}$

### 3.5. Mise en œuvre et résultats du simulateur

L'ensemble du simulateur est testé à l'aide du logiciel Matlab-Simulink. La référence de vitesse générée par le modèle de la turbine établi au § 3.3.2 est appliquée au modèle de la machine à courant continu et de son régulateur PI synthétisé précédemment. Dans cet essai, le modèle de l'éolienne est laissée libre puisque qu'aucun couple résistant ( $\Gamma_r$  sur la figure 3.2) ne vient perturber son fonctionnement. Le schéma synoptique du fonctionnement général du dispositif est présenté sur la figure 3.6 où  $\Gamma_r$  représente le couple résistant imposé par la génératrice entraînée.

# CHAPITRE 03 ETUDE D'UN SIMULATEUR PHYSIQUE D'AEROGENERATEUR (EMULATEUR EOLIEN)

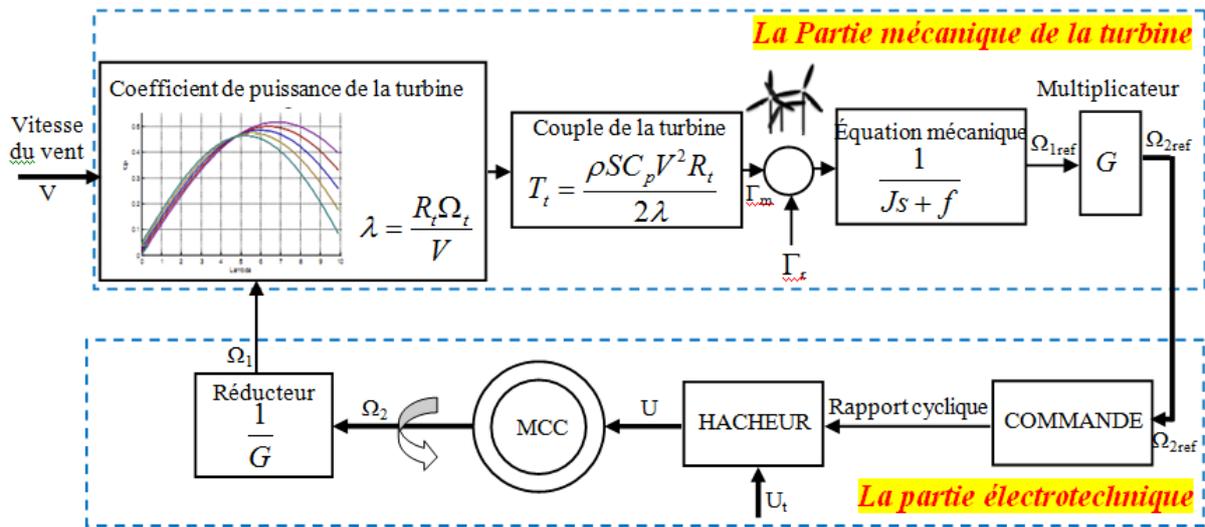


Figure 3.6. Schéma synoptique du simulateur

### 3.5.1. Résultats des modèles de la turbine et de la machine à courant continu

Les simulations présentent le fonctionnement de l'éolienne dans l'hypothèse où celle-ci est complètement libre, ce qui correspond à un fonctionnement où aucun dispositif de freinage n'est actif et où la génératrice ne débite pas de puissance. Le schéma Simulink utilisé pour la simulation est représenté sur la figure 3.7. La vitesse de référence est écrêtée à 2000 tr/min, de façon à ce que le régulateur ne voie pas une vitesse de référence trop élevée par rapport à ce que peut atteindre la MCC à vide. La tension de référence générée par le régulateur est limitée à 200V (tension nominale de la MCC).

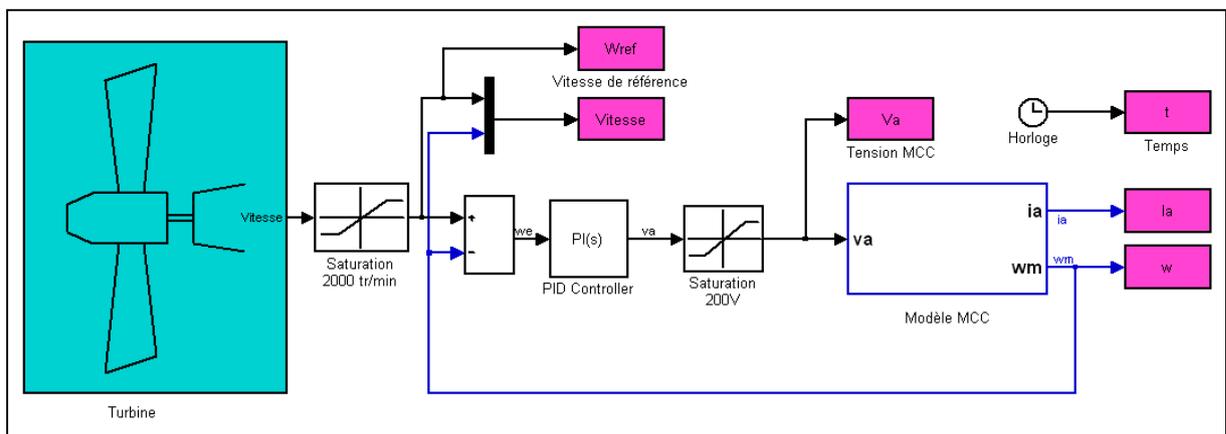


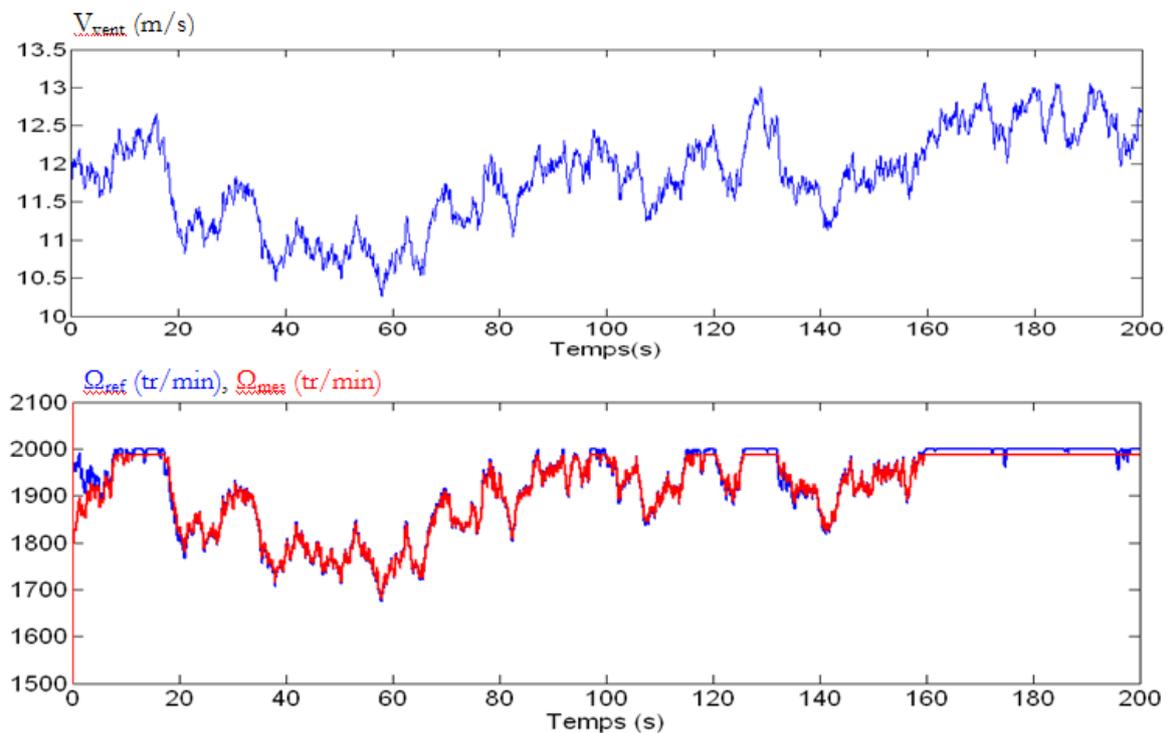
Figure 3.7. Schéma de simulation du modèle de turbine associé à la MCC

La figure 3.8 représente l'allure de la vitesse du vent reconstruite à partir de la caractéristique spectrale de Van der Hoven. Elle montre également la vitesse de référence (en trait bleu) générée par la turbine

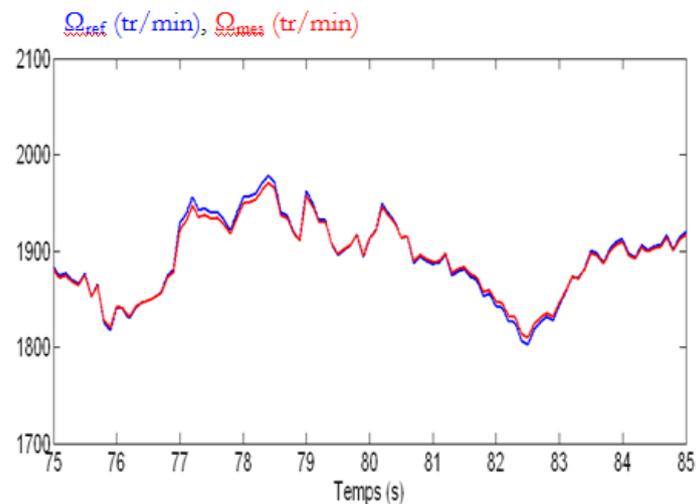
## CHAPITRE 03 ETUDE D'UN SIMULATEUR PHYSIQUE D'AEROGENERATEUR (EMULATEUR EOLIEN)

à laquelle nous avons appliqué ces variations de vent. La turbine étant libre de tout couple résistant, les variations de vitesse de rotation suivent directement les variations du vent. La vitesse réelle de la machine à courant continu est également représentée en trait rouge sur le même graphe que la référence. Ces deux courbes sont pratiquement confondues ce qui montre l'efficacité du régulateur en terme de poursuite de trajectoire.

Un zoom sur les caractéristiques de  $\Omega_{ref}$  et  $\Omega$  (Figure 3.9) permet de d'observer la faible erreur entre la référence et la mesure.



**Figure 3.8.** Vitesse du vent, vitesse de rotation de référence et vitesse effective de la MCC

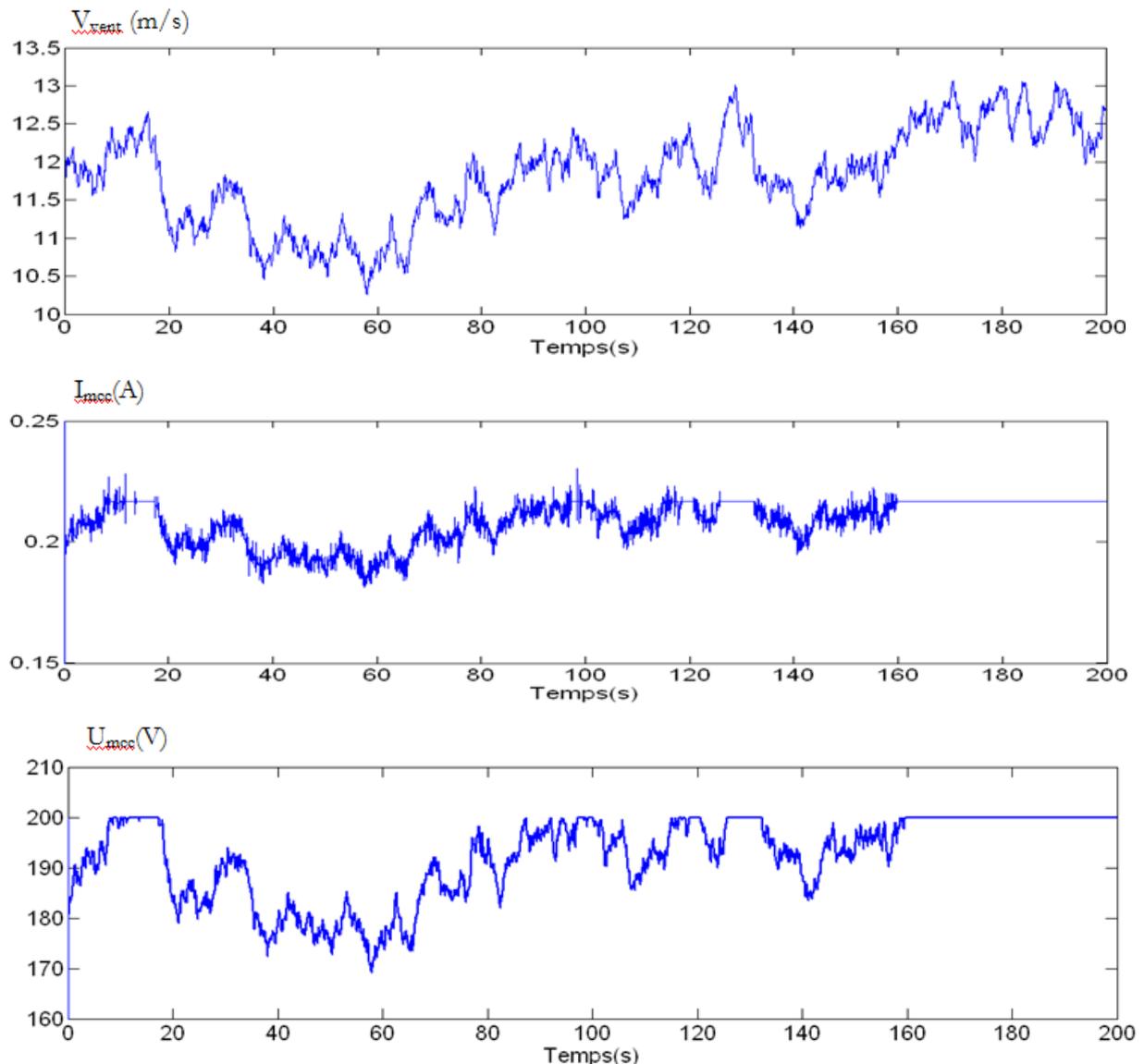


**Figure 3.9.** Consigne de vitesse et vitesse réelle mesurée

## CHAPITRE 03 ETUDE D'UN SIMULATEUR PHYSIQUE D'AEROGENERATEUR (EMULATEUR EOLIEN)

Nous avons également présenté, sur la figure 3.10, le courant dans l'induit de la MCC, ainsi que la tension à ses bornes en corrélation avec les variations de la vitesse du vent. En simulation, le modèle du hacheur n'est pas pris en compte, par conséquent, c'est la consigne de tension sortant du régulateur PI qui est directement appliquée au modèle de la MCC (cette consigne est écrêtée à 200V, ce qui correspond à la tension nominale de la machine).

Le signal observé ne fait par conséquent pas apparaître de Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI). La caractéristique du courant fait apparaître des pics (au delà de 0.1A) dus aux régimes transitoires pendant lesquels la vitesse du vent augmente brusquement. Dans ce cas, la tension imposée à la machine augmente également entraînant ces pointes de courant importantes. Dans le dispositif réel, l'utilisation du simulateur en charge nécessitera une surveillance particulière de ce courant et un refroidissement permanent de la machine.



**Figure 3.10.** Vitesse du vent, courant et tension de la MCC

## CHAPITRE 03 ETUDE D'UN SIMULATEUR PHYSIQUE D'AEROGENERATEUR (EMULATEUR EOLIEN)

---

### 3.6. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de décrire les étapes de modélisation d'une turbine éolienne dans le but d'entraîner une machine à courant continu destinée à reproduire les variations de vitesse d'une éolienne. Nous avons établi un modèle de turbine de 100W utilisant les équations de base donnant le couple éolien en fonction de la densité de l'air, du coefficient de puissance de l'éolienne, de la vitesse du vent et de la longueur d'une pale. La vitesse de rotation de l'éolienne, calculée en fonction de l'inertie et du coefficient de frottements visqueux, est alors imposée comme référence à une machine à courant continu de 100W.

Les résultats de simulation montrent l'efficacité de la commande PI utilisée pour la commande de la MCC.

Ce dispositif étant réalisé, il va permettre de placer les génératrices accouplées à la MCC dans des conditions proches de la réalité notamment en ce qui concerne le fonctionnement à vitesse variable.

L'émulateur peut être construit et vendu en série pour les laboratoires qui font des TP ou des expériences concernant les énergies renouvelables.

En conclusion on peut avoir un gain d'argent considérable et rendre l'expérimentation possible.

# *CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE*

L'objectif principal de ce mémoire est d'étudier les techniques de commande de la MADA afin d'améliorer les performances et d'optimiser la production d'une éolienne.

Dans notre travail, la configuration de la MADA utilisée est le stator de celle-ci couplé directement au réseau alors que son rotor est connecté au réseau à travers un convertisseur statique parce que cette configuration est largement répandue dans les applications à vitesse variable. De plus, le convertisseur de puissance dans cette configuration ne traite seulement qu'une fraction de 20 à 30% de toute la puissance du système et ce qui permet de réduire aussi bien les pertes que le coût de celui-ci.

Au cours du premier chapitre nous avons fait un état de l'art relatif aux systèmes éoliens, 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 présenté la modélisation des éléments de la chaîne éolienne en mode connecté au réseau constitué d'une machine asynchrone à double alimentation, dans les limites de notre travail, les convertisseurs statiques de la chaîne rotorique n'ont pas été modélisés. Celle-ci a été suivie d'une commande adaptée en vue d'atteindre les meilleures performances ; cette étape a pour rôle l'optimisation du rendement du système éolien (MPPT). Pour une gestion efficace de la production d'énergie éolienne, il était pratique de raisonner en termes de puissances pour la commande de la MADA. Pour ce la, on applique le contrôle indépendant des puissances active et réactive statoriques en partant de la commande vectorielle de la MADA à flux statorique orienté. Dans cette partie, nous avons exprimé les puissances active et réactive statoriques en fonction des tensions rotoriques afin d'envisager un pilotage de la MADA par le rotor. Plusieurs simulations sont effectuées sous Matlab/Simulink de la commande avec le régulateur PI, afin d'analyser leurs performances.

Le dernier chapitre de ce mémoire est consacré à la réalisation d'un simulateur de turbine éolienne par l'intermédiaire d'un modèle de turbine éolienne et d'une machine à courant continu commandée en vitesse. Ce simulateur constitue en fait banc expérimental destiné à étudier différentes génératrices dans les conditions proches d'un système éolien réel.

En perspectives nous pouvons envisager :

- L'établissement d'un modèle de la MADA prenant notamment en compte la résistance de phase statorique et la saturation magnétique.

## CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE

---

- L'intégration éventuelle d'un système de stockage et l'optimisation économique de la chaîne de conversion.
- L'Application d'autres techniques de commande robuste, telles que : la commande floue type 2, mode glissant d'ordre supérieur et la commande prédictive pour plus améliorer la qualité d'énergie produite et le rendement énergétique.
- L'étude des perturbations de la génératrice vis à vis des déséquilibres du réseau, des creux de tensions et des fluctuations...

## ANNEXE

### *Annexe A : Tableaux des paramètres*

Tableau A.1. Paramètres de l'éolienne de 1.5 MW

Valeur numérique du paramètre	Signification
$R = 35.25 \text{ m}$	Rayon de l'éolienne
$G = 90$	Gain du multiplicateur de vitesse
$R_s = 12\text{m}\Omega$	Resistance statorique
$R_r = 21\text{m}\Omega$	Resistance rotorique
$l_s = 0.20 \text{ mH}$	Inductance statorique de fuite
$l_r = 0.17 \text{ mH}$	Inductance rotorique de fuite
$M = 13.5 \text{ mH}$	Inductance mutuelle
$L_s = l_s + M$	Inductance statorique (mH)
$L_r = l_r + M$	Inductance rotorique (mH)
$J = 1000$	Inertie de l'arbre (kg.m <sup>2</sup> )
$\hat{f} = 0.0024 \text{ N.m/rad/s}$	Coefficient de frottement de la MADA
$\sigma = 1 - (M^2 / L_s L_r)$	Coefficient de dispersion
$P = 2$	Nombre de paires de pôles
$T_s = L_s / R_s$	Constante de temps statorique (s)
$T_r = L_r / R_r$	Constante de temps rotorique (s)

Tableau A.2. Paramètres de la MCC de 100 W

Paramètre	Valeur
$P_n$	100 W
$\Omega_n$	2000 tr /min
$V_n$	200 V
$R_a$	2.58 $\Omega$
$L_a$	0.028 H
$L_m$	0.948 H
$R_e$	281.3 $\Omega$
$L_e$	156 H
$J_{mcc}$	0.02215 kg.m <sup>2</sup>
$f_{mcc}$	0.006 N.m/s

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- **Livres :**

- [1] M. Rapin, J.M. Noël, *Energie Eolienne, Principe - Etude de cas*. Dunod, ISBN: 978-2-10-050801-3, 2010.
- [2] P. de Larminat, *Automatique, commande des systèmes linéaires*. Editions Hermes, ISBN: 2-86601-359-X.

- **Articles de journaux :**

- [3] S. Jacobsson and V. Lauber, "The Politics and Policy of Energy System Transformation—Explaining, the German Diffusion of Renewable Energy Technology," *Energy Policy*, vol. 34, no.3, 2006, pp. 256–276.
- [4] Y. Bekakra, D. Ben Attous, "Sliding mode controls of active and reactive power of a DFIG with MPPT for variable speed wind energy conversion," *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 5, no.12, 2011, pp.2274–2286.
- [5] I. Van der Hoven, "Power Spectrum of Horizontal Wind Speed in the Frequency Range from 0.0007 to 900 Cycle per Hour," *Journal of Meteorology*, Vol.14, 1957, pp.160–164.
- [6] Meyer, I. Niels, "Learning from wind energy policy in the EU: lessons from Denmark, Sweden and Spain," *European Environment*, vol.17, no.5, 2007, pp.347–362.

- **Articles de conférences :**

- [7] Rapport annuel du Global Wind Energy Council (GWEC), 2009.
- [8] Institut pour l'Innovation et la Compétitivité i7, mai 2013.
- [9] Rapport, Renewable Energy Policy Network for the 21<sup>st</sup> Century (REN21), "Les Energies Renouvelables, Rapport sur la Situation Globale," 2009.
- [10] Le développement de l'éolien dans le monde, Syndicat des énergies renouvelables, dernière révision du document: septembre 2013.
- [11] WWEA: World Wind Energy Association. Publication 2012, "World market recovers and sets a new record: 42 GW of new capacity in 2011, total at 239 GW," En ligne. <<http://www.wwindea.org/home/index.php>>.
- [12] P. Ledesma, J. Usaola, J. L. Rodríguez, J. C. Burgos, "Comparison between control systems in a doubly fed induction generator connected to an electric grid," *European Wind Energy Conference Proceedings*, Nice, 1999, pp. 869–872.

- **Mémoires / Thèses :**

- [13] A. Davigny, "Participation aux services système de formes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie," Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, France, 2007.
- [14] N. Boudrahem, "Etude et commande d'une éolienne à vitesse variable," Mémoire de magister, Université de Bejaia, Algérie, 2007.
- [15] A. BOYETTE, "Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne," Thèse doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy I, 2006.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [16] B. Beltran, "Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation: du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur," Thèse de Doctorat de l'Université de Bretagne Occidentale, Juillet 2010.
- [17] F. Poitiers, "Etude et commande des génératrices asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne: machine asynchrone à cage autonome et machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau," Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de Nantes, 12/2003.
- [18] Y. Bekakra, "Etude et commande du moteur asynchrone à double alimentation (MADA) par différentes techniques avancées," Mémoire de Magister, Centre Universitaire d'El-Oued, 2010.
- [19] A. Dendouga, "Contrôle des puissances active et réactive de la machine à double alimentation (DFIM)," Thèse de Doctorat, Université de Batna, 2010.
- [20] S. El Aimani, "Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension," Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2004.
- [21] G. Salloum, "Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation," Thèse de Doctorat, I.N.P de Toulouse, France, 2007.
- [22] C. Nichita, "Etude et Développement de Structures et Lois de Commande Numériques pour la Réalisation d'un Simulateur de Turbine Eolienne de 3kW, " Thèse de doctorat, Université du Havre, 1995.

## ملخص:

في هذه المذكرة، نركز على تطوير قانون تحكم في الطاقة الفعالة والطاقة الردية للجزء الساكن للآلة اللاتزامنية ذات التغذية المضاعفة "MADA"، والتي تشكل عنصر التوليد للطاقة الكهربائية في سلسلة توربينات الرياح ذات السرعة المتغيرة. بحيث يتم إعطاء مرجع لإشارة الطاقة الفعالة في الجزء الساكن لاستخراج الطاقة القصوى المتاحة من الرياح في ريش التوربينات وهذا أثناء تطبيق طريقة تتبع الحد الأقصى لطاقة التوربينة "MPPT" والذي لا يتطلب منا أي معرفة لسرعة الرياح. نتائج المحاكاة المحصل عليها أظهرت أنه من الممكن ضبط طاقة الجزء الساكن حتى في وجود تغيرات في العناصر، وأن طريقة "MPPT" المقترحة حققت الإنتاجية القصوى لسلسلة الرياح.

**كلمات مفتاحية:** آلة لاتزامنية ذات تغذية مضاعفة "MADA"، تتبع الحد الأقصى لطاقة التوربينة "MPPT"، تحكم في الطاقات.

## Résumé :

Dans ce mémoire, nous nous intéressons à l'élaboration d'une loi de commande de la puissance active et réactive statorique d'une machine asynchrone à double alimentation 'MADA', qui constitue la partie génératrice d'une chaîne éolienne à vitesse variable. La référence de la puissance active statorique est donnée afin d'extraire le maximum de la puissance du vent disponible au niveau des pales de la turbine tout en appliquant une méthode MPPT 'Maximum Power Point Tracking' qui ne nécessite aucune connaissance sur le vent. Les résultats obtenus ont montré qu'il est possible de régler les puissances statoriques, même en présence des variations paramétriques, et que la méthode MPPT développée permet d'atteindre un rendement maximum de la chaîne éolienne.

**Mots Clés :** MADA, MPPT, Commande des Puissances.

## Abstract:

This thesis is dedicated to elaborate a control law of stator powers of a doubly fed induction machine 'DFIG' that presents the generator element of variable speed wind turbine. The stator active power reference is given through an MPPT algorithm to extract the maximum of wind power available at the turbine pales without any knowledge of wind speed. The simulation results getting proved that it's possible to control the stator powers even the presence of parametric variations and that the developed MPPT method achieves a maximum output of wind turbine.

**Key Words:** DFIG, MPPT, Powers Control.