

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT : ELECTRONIQUE  
N° : 2017/ TS3ER 05/97/482



DOMAINE : ELECTRONIQUE  
FILIERE : GENIE ELECTRIQUE  
OPTION : TS3ER

**Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique**

**Par:**

DJAAFRI Othman

HARIZI Assam-Eddine

**Intitulé**

**Modélisation, simulation et contrôle d'une  
turbine éolienne**

**Soutenu devant le jury composé de:**

BALLOUTI Adel	Université M'sila	Président
BENHAMADOUCHE Abdelouahab	Université M'sila	Rapporteur
DJAZIA Kamel	Université M'sila	Examineur

**Année universitaire : 2016 /2017**

# *Remerciements*

*Qu'il nous soit permis ici d'exprimer toute notre gratitude envers celles et ceux qui nous ont aidé à mener à bien le présent mémoire de MASTER.*

*Tout d'abord, nous tenons à remercier particulièrement M. BENHAMADOUCHE Abdelouahab djoubair pour avoir accepté de diriger ce travail et nous avoir prodigué conseils et encouragements chaque fois que cela s'est avéré nécessaire.*

*Ensuite, nos remerciements vont également aux autres membres du corps enseignant de l'Université de MOHAMED BOUDIAF - M'sila dont les interventions ont nourri nos réflexions.*

*Enfin, nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance, d'une part, envers nos familles qui nous ont accueilli et soutenu durant cette année ; d'autre part, envers nos enseignants ami(e)s car leur soutien moral et leur appui logistique ont grandement contribué au bon déroulement de cette étude.*

**OTHMAN & ASSAM-EDDINE**

# *Dédicace*

**Merci Allah de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve et le bonheur de lever mes mains vers le ciel et de dire  
« Ya Kayoum »**

**Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à ma chère mère...**

**À mon père, école de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes les années des études, et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger.  
Que Dieu les garde et les protège.**

**À toute mes sœurs et surtout ma petite adorable KAWTHAR  
À tous mes frères MOHAMED, HAMZA, YAAKOUB  
À toute ma famille**

**À M. BENHAMADOUCHE Abdelouahab  
À mes amis, mes confrères et mes consœurs et surtout Islam,  
Walid, Ali, Abdallah , Hani, et tout le groupe S3ER  
À toute la promotion de 2016/2017  
À tous ceux qui me sont chers  
À tous ceux qui m'aiment  
À tous ceux que j'aime  
Je dédie ce travail.**

**DJAAFRI Othman.**

# *Dédicaces*

**Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce Travail , malgré toutes les difficultés rencontrées.**

**Je dédie ce modeste travail :  
A ma mère et mon père**

**A mes très chers frères et mes sœurs.  
A toute ma famille  
Surtout abdalmoniim**

**A mes chers amis  
A tous ceux que j'aime et qui m'aiment.**

**A tous ceux qui connaissent  
HARIZI ASSAM EDDINE.**

**A tout mes amis surtout Yacine et Zino,  
A tous les amis d'études surtout ceux  
D'électronique option S3ER  
Promotion 2016/2017**

**HARIZI ASSAM-EDDINE.**

# Sommaire

<b>Introduction général</b> .....	1
<b>CHAPITRE I : Etat de l'Art sur la conversion éolienne</b>	
<b>I.1 Introduction</b> .....	3
<b>I.2.Capacité mondiale des éoliennes</b> .....	3
<b>I.3.Capacité des éoliennes en Algérie</b> .....	4
<b>I.4.Généralités sur les éoliennes</b> .....	5
I.4.1. Définition de l'énergie éolienne .....	5
I.4.2. Production d'une éolienne .....	6
I.4.3. Inconvénients et avantages de l'énergie éolienne .....	6
I.4.4.Types des éoliennes .....	7
I.4.4.1.Eoliennes à axe vertical.....	7
I.4.4.2. Eoliennes à Axe Horizontal .....	7
I.4.5 Principaux composants d'une éolienne .....	8
<b>I.5.Modélisation et conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique</b> .....	9
I.5.1 Loi de BETZ .....	9
I.5.2 Modèle de la turbine d'éolienne .....	11
I.5.2.1 Le coefficient de puissance $C_p$ .....	11
I.5.2.2 L'équation dynamique de la turbine .....	12
I.5.2.3 Hypothèses simplificatrices .....	13
<b>I.6. Modélisation du système d'orientation des pales</b> .....	14
I.6.1 Fonctionnement selon type de vitesse.....	14
I.6.1.1 Fonctionnement à vitesse fixe .....	14
I.6.1.2. Fonctionnement de vitesse variable .....	15
I.9.2 Systèmes utilisant la machine synchrone .....	15
I.9.3 Systèmes utilisant la machine asynchrone.....	16
<b>I.7 conclusion</b> .....	17
<b>CHAPITRE II :Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation (GADA)</b>	
<b>II.1 INTRODUCTION</b> .....	19
<b>II.2 STRUCTURE DE LAMADA</b> .....	19
II.2.1 MADA à rotor bobiné.....	19
II.2.2 MADA sans balais.....	19
II.2.3 MADA en cascade.....	20
<b>II.3 MODE DE FONCTIONNEMENT</b> .....	20
II.3.1 Fonctionnement en mode moteur hyposynchrone.....	21

II.3.2	Fonctionnement en mode moteur hypersynchrone .....	21
II.3.3	Fonctionnement en mode génératrice hyposynchrone .....	22
II.3.4	Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone .....	22
<b>II.4</b>	<b>LES DIFFERENTES CONFIGURATIONS DE LA MADA A ROTOR BOBINE .....</b>	<b>23</b>
II.4.1	Configuration pour application génératrice .....	23
II.4.1.1	MADA à énergie rotorique dissipée .....	23
II.4.1.2	Structure de Kramer .....	24
II.4.1.3	Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur .....	25
II.4.1.4	Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI .....	25
<b>II.5</b>	<b>AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LAMADA .....</b>	<b>26</b>
II.5.1	Avantages de la MADA .....	26
II.5.2	Inconvénients de la MADA .....	27
<b>II.6</b>	<b>MODELISATION DE LA MADA .....</b>	<b>28</b>
II.6.1	HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES : .....	28
II.6.2	EQUATIONS MATHEMATiques DE LA MADA DANS LE REPERE( <b><i>a, b, c</i></b> ) : .....	29
II.6.2.1	EQUATIONS ELECTRIQUES : .....	29
II.6.2.2	EQUATIONS MAGNETIQUES : .....	29
II.6.2.3	EQUATION MECANIQUE : .....	30
II.6.3	EQUATIONS MATHEMATiques DE LA MADA DANS LE REPERE( <b><i>d, q</i></b> ) : .....	31
<b>II.7</b>	<b>Conclusion : .....</b>	<b>32</b>
 <b>CHAPITRE III : Commande Vectorielle des Puissances Active et Réactive</b>		
<b>III.1</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>34</b>
<b>III.2</b>	<b>Principe de la commande vectorielle .....</b>	<b>34</b>
<b>III.3</b>	<b>Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique .....</b>	<b>35</b>
III.3.1	Choix du référentiel pour le modèle diphasé .....	35
III.3.2	Relation entre les courants statoriques et les courants rotoriques : .....	36
III.3.3	Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques : .....	36
III.3.4	Relations entre les tensions rotoriques et les courants rotoriques .....	37
<b>III.4</b>	<b>Types de Commande de la MADA : .....</b>	<b>39</b>
III.4.1	Commande vectorielle directe : .....	39
III.4.2	Commande vectorielle indirecte : .....	40
III.4.2.1	Commande indirecte sans boucle de puissance : .....	40
III.4.2.2	Commande indirecte avec boucle de puissance : .....	41
III.4.3	Synthèse de régulateur PI .....	42
<b>III.5</b>	<b>Prise en compte de l'onduleur côté rotor .....</b>	<b>43</b>
<b>III.6</b>	<b>Modulation de largeur d'impulsion MLI .....</b>	<b>43</b>

<b>III.7. Convertisseur coté réseau (redresseur à diodes)</b> .....	44
<b>III.8 Conclusion</b> .....	45
<b>CHAPITRE IV : Résultats et simulation</b>	
<b>VI.1 INTRODUCTION</b> .....	47
<b>VI.2 Architecture du système</b> .....	47
<b>IV.3 Simulation du système sans turbine</b> .....	48
IV.3.1 Résultat de simulation sans redressement .....	48
IV.3.2 Résultat de simulation avec redressement .....	51
<b>IV.4 Simulation du système avec turbine</b> .....	56
IV.4.1 avec commande direct .....	56
IV.4.1.1 à vitesse du vent fixe .....	56
IV.4.1.2 à vitesse du vent variable .....	59
IV.4.2 Résultat de simulation avec commande indirect sans boucle de puissance .....	62
IV.4.2.1 à vitesse du vent fixe .....	62
IV.4.2.2 à vitesse du vent variable .....	64
<b>IV.5 Conclusion</b> .....	67
<b>Conclusion général</b> .....	68

## Liste des figures

### Chapitre I

---

- Figure. 1.1 :** Evolution mondiale de la capacité installée des éoliennes .
- Figure I.2:** Carte annuelle des vents à 10 m du sol pour les 87 points de mesure(m/s).
- Figure I.3 :** Conversion de l'énergie cinétique du vent.
- Figure. I.4:** Eoliennes à axe vertical.
- Figure I.5:** Éolienne à axe horizontal.
- Figure I.6 :** Eléments constituant une éolienne.
- Figure I.7 :** Tube de courant d'air autour d'une éolienne.
- Figure I .8 :** Variations du coefficient de puissance .
- Figure I .9:** Schéma Modèle de la turbine.
- Figure I.10:** coefficient de puissance  $C_p$  en fonction  $\lambda$  et  $\beta$
- Figure I.11 :** Modèle de la turbine.
- Figure I.12 :** Modèle simplifié de la turbine.
- Figure I.13:** Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne .
- Figure. I.14:** Aérogénérateur à vitesse fixe.
- Figure. I.15 :** Aérogénérateur à vitesse variable.
- Figure I.16 :** Alternateur dans une chaîne de conversion éolienne.
- Figure I.17 :** Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à vitesse fixe.
- Figure I.18:** MADA dans une chaîne de conversion éolienne .

### Chapitre II

---

- Figure II-1 :** Schéma du rotor de la MADA à rotor bobiné
- Figure II-2 :** Structure de la MADA sans balais
- Figure II-3 :** Structure en cascade de deux machines asynchrones
- Figure II-4 :** Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.
- Figure II-5 :** Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.
- Figure II-6 :** Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone.
- Figure II-7 :** Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone.
- Figure II-8 :** MADA à énergie rotorique dissipée.
- Figure II-9 :** MADA à structure de Kramer.

**Figure II-10** : Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.

**Figure II-11** : Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.

**Figure II-12** : Représentation simplifié de la MADA.

**Figure II-13** : Schémas de Transformation des variables statoriques et rotoriques.

## Chapitre III

---

**Figure III-1** : Principe de la commande vectorielle.

**Figure III-2**: Orientation de l'axe d sur le flux statorique.

**Figure III-3**: Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances (système interne).

**Figure III-4** : La commande directe du Modèle de la GADA pour le contrôle des puissances.

**Figure III-5** : Commande indirecte sans boucle de puissance.

**Figure III-6** : Commande indirecte avec boucle de puissance.

**Figure III-7** : Système régulé par un PI

**Figure III-8** : Représentation d'un onduleur à deux niveaux

**Figure III-9** : Représentation d'un redresseur à diodes.

## Chapitre IV

---

**Figure IV-1**: Architecture d'un système de génération éolienne.

**Figure IV-2**: Schéma block du model sans turbine et sans redressement par Matlab/Simulink.

**Figure IV-3**: la vitesse rotorique(rad/s).

**Figure IV-4** :Courant rotorique dans le repère abc

**Figure IV-5**:Les courant rotorique quadrature et directe

**Figure IV-6**:Courant statorique dans le repère abs.

**Figure IV-7**:Les courant statorique quadrature et directe

**Figure IV-8**:Les puissance active statorique (Pref) et (Pmes)

**Figure IV-9**:les puissance réactive statorique (Qref) et (Qmes).

**Figure IV-10**:Schéma block du model sans turbine et aves redressement par Matlab/Simulink

**Figure IV-11**: Vitesse rotorique (rad/s)

**Figure IV-12:** La tension de bus contenu (V).

**Figure IV-13:** Les courant rotorique dans le repère abc (A).

**Figure IV-14:** Les courant statorique dans le repère abc (A).

**Figure IV-15:** Les courant rotorique directe et quadrature (A).

**Figure IV-16:** Les courant statorique directe et quadrature (A).

**Figure IV-17:** La puissance active de référence (W).

**Figure IV-18:** La puissance active mesurée (W) .

**Figure IV-19:** La puissance réactive de référence (VAR).

**Figure IV-20 :** La puissance réactive mesurée (VAR).

**Figure IV-21 :** Couple mécanique(N.m)

**Figure IV-22 :** Vitesse rotorique (rad/s).

**Figure IV-23 :**Tension de bus contenu (V).

**Figure IV-24:** Puissance active de référence (Pref) (W).

**Figure IV-25:** Puissance active mesurée (Pmes) (W).

**Figure IV-26:** Puissance réactive de référence (Qref) (VAR).

**Figure IV-27:** Puissance réactive mesurée (Qmes) (VAR).

**Figure IV-28:** Le profile de la vitesse du vent

**Figure IV-29:** Couple mécanique(N.m)

**Figure IV-30:** Vitesse rotorique (rad/s).

**Figure IV-31 :**La tension de bus contenu(V).

**Figure IV-32 :**Les puissance active (Pref)

**Figure IV-33:**Les puissance active (Pmes)

**Figure IV-34:** La puissance réactive de référence ( VAR).

**Figure IV-35:** La puissance réactive mesurée ( VAR)

**Figure IV-36 :**L'erreur entre (Qref ) et (Qmes)

**Figure IV-37 :**Le couple mécanique (N.m)

**Figure IV-38 :**La vitesse rotorique (rad/s).

**Figure IV-39 :**La puissance active de référence (W).

**Figure IV-40** :La puissance active mesurée (W).

**Figure IV-41** :La puissance réactive de référence (VAR).

**Figure IV-42** :La puissance réactive mesurée (VAR).

**Figure IV-43** : le profile de la vitesse du vent.

**Figure IV-44** :Le couple mécanique(N.m).

**Figure IV-45** :La vitesse rotorique(rad/s).

**Figure IV-46** :La puissance active de référence (W)

**Figure IV-47** :La puissance active mesurée (W)

**Figure IV-48** :La puissance réactive de référence (VAR).

**Figure IV-49** :La puissance réactive mesurée (VAR).

# Liste des symboles et abréviations

## Abréviations

<b>MADA</b>	Machine Asynchrone à Double Alimentation
<b>GADA</b>	Générateur Asynchrone à Double Alimentation
<b>MLI</b>	Modulation de largeur d'impulsion
<b>PWM</b>	Pulse-Width Modulation .
<b>FTBO</b>	Fonction de Transfer en Boucle Ouverte.
<b>FTBF</b>	Fonction de Transfer en Boucle Fermée.

## Des symboles

$p$	Le nombre de paires de pôles.
$g$	La vitesse de glissement.
$f$	Le coefficient des frottements visqueux totaux de l'
$V$	La vitesse moyenne du vent.
$P_{\theta}$	La matrice de la transformation de PARK.
$P$	La puissance de l'éolienne.
$J$	L'inertie totale de l'éolienne.
$G$	Le rapport du multiplicateur de vitesse.
$\rho$	La densité de l'air.
$\lambda$	La vitesse spécifique de la turbine.
$\beta$	L'angle de calage des pales.
$\omega_s$	La pulsation statorique.
$\omega_r$	La pulsation rotorique.
$\omega$	La pulsation mécanique.
$\varphi_s \varphi_r$	Les flux statorique et rotorique respectivement.
$\varphi_{ds} \varphi_{qs}$	Les flux statoriques direct et en quadrature.
$\varphi_{dr} \varphi_{qr}$	Les flux rotoriques direct et en quadrature.
$\lambda_{opt}$	La vitesse spécifique optimale de la turbine.
$\Omega_T \Omega_g$	La vitesse de la turbine et la vitesse du générateur.
$C_r$	Le couple résistant.
$C_T C_g$	Le couple de la turbine respectivement du générateur.

$f_T f_g$	Le coefficient des frottements visqueux de la turbine et celui du générateur.
$V_s V_r$	La tension simple statorique et rotorique respectivement.
$V_{ds} V_{qs}$	La tension statorique directe et en quadrature.
$V_{dr} V_{qr}$	La tension rotorique directe et en quadrature.
$U_a U_b U_c$	La tension composée des phases a, b et c respectivement.
$R_s R_r$	La résistance par phase statorique et rotorique respectivement.
R	Le rayon des pales de la turbine.
$P_s Q_s$	Les puissances actives et réactive statoriques.
$P_r Q_r$	Les puissances actives et réactive rotorique
$M_{sr} M_{rs}$	Inductances mutuelles stator-rotor.
$M_s M_r$	La mutuelle Inductance entre les enroulements statoriques, respectivement rotorique.
$L_s L_r$	L'inductance propre statorique et rotorique respectivement.
$J_T J_g$	L'inertie de la turbine et celle du générateur.
s	Operateur de LAPLACE
$\theta$	L'abscisse angulaire entre la phase statorique (A) et la phase rotorique (A) .
$\theta_s$	L'abscisse angulaire du référentiel de Park par rapport à l'axe de la phase . statorique (A).
$\theta_r$	L'abscisse angulaire du référentiel de Park par rapport à la phase rotorique (A)
$\dot{I}_s I_r$	Les courants de phase statorique et rotorique.
$I_{ds} I_{qs}$	Le courant statorique directe et en quadrature dans le repère de PARK.
$I_{dr} I_{qr}$	Les courant rotorique directe et en quadrature dans le repère de PARK.
Kp	Gain de l'action proportionnel du régulateur PI.
Ki	Gain de l'action intégrale du régulateur PI.

## Introduction générale:

---

L'énergie électrique est un élément crucial pour tout développement socio-économique. Elle est devenue dans la vie quotidienne des populations, notamment dans les pays développés, une forme d'énergie dont on ne peut se passer.

Aujourd'hui, l'énergie éolienne se développe à un rythme très croissant et cela grâce au niveau important de la puissance produite des éoliennes, ainsi qu'aux incitations financières importantes des différents pays largement participant à son essor, les avantages de l'énergie éolienne sont indéniables et le coût de leur déploiement est maîtrisable.

Pour les applications dans le domaine de l'éolienne, la génératrice asynchrone à double alimentation (MADA) est devenue une solution persévérante grâce à l'accessibilité au stator et au rotor qui offre l'opportunité d'avoir plusieurs degrés de liberté pour bien contrôler le transfert des puissances et le facteur de puissance. Un des avantages de la double alimentation est le pilotage du circuit du rotor par un convertisseur de faible puissance relativement par rapport au stator.

Notre travail consiste en la conception et la modélisation d'une chaîne de conversion éolienne, à base de génératrice MADA, où nous essayerons de tester différentes configurations avec différentes techniques de contrôle pour en tirer les meilleures performances et le maximum de puissance.

Le manuscrit présenté est composé de quatre chapitres :

Dans le chapitre premier on s'intéresse essentiellement à l'énergie du vent, ainsi qu'aux éoliennes à vitesse variable et à axe horizontal avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons la topologie et les configurations de la machine asynchrone à double alimentation en fonctionnement générateur (hypo et hyper-synchrone) et nous présenterons des généralités sur la MADA, ses applications, ses variantes de fonctionnement et ses avantages. Ainsi la modélisation de la MADA en faisant appel à la transformée de Park.

Le troisième chapitre sera consacré à la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la machine asynchrone à double alimentation intégrée dans un système éolien.

Les résultats de simulation par Matlab/Simulink seront présentés par la suite dans le quatrième chapitre.

Le mémoire se termine par une conclusion qui situe la valeur du travail effectué, et présente les projections et les perspectives futures de notre travail.

## *Chapitre I :*

### *Etat de l'Art sur la conversion éolienne*

## I.1 Introduction

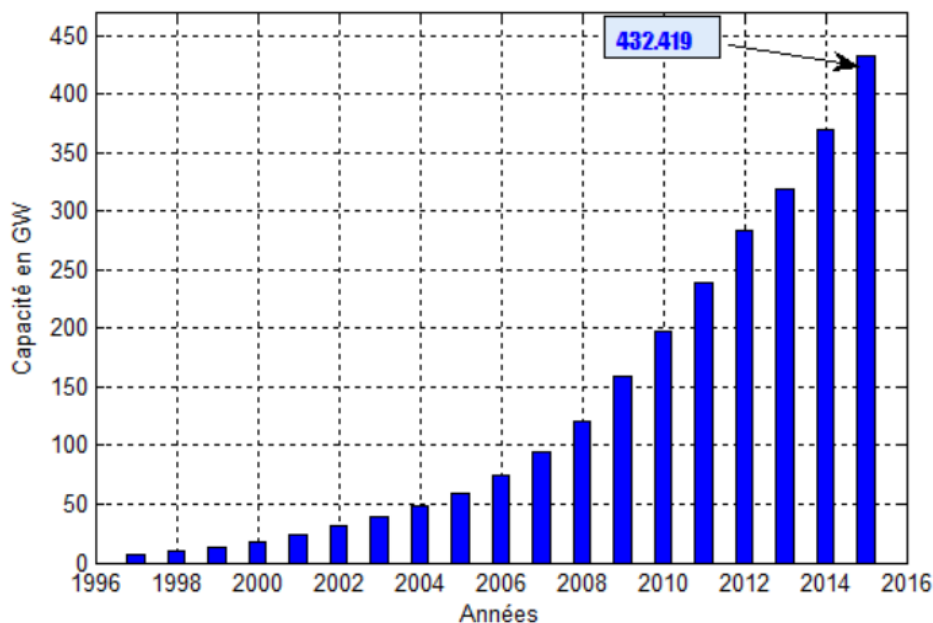
L'énergie éolienne est connue et exploitée depuis longtemps. Elle fut l'une des premières sources exploitées par l'homme après l'énergie du bois. Selon l'Observatoire des Energies Renouvelables, l'éolien est actuellement la filière énergétique des plus dynamiques dans le monde. Suite à la crise pétrolière mondiale des années 70, le développement et la commercialisation des turbines éoliennes ont été fortement encouragés. Pour utiliser le vent comme source d'énergie, il faut connaître le potentiel éolien d'une région. Toutefois, une bonne connaissance des caractéristiques du vent en tout site est importante pour une exploitation adéquate des ressources éoliennes. En ce qui concerne l'Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à un autre, ceci est dû à une topographie et un climat très diversifiés.

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement aux éoliennes à vitesse variable et à axe horizontal avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement, ainsi qu'aux différents types de générateurs utilisés dans cette chaîne de conversion.

## I.2 Capacité mondiale des éoliennes

Actuellement, l'énergie éolienne est bien implantée parmi les autres sources d'énergie avec une croissance très forte dans tous les pays du monde. Voir tableau 1.1 qui représente l'évolution de la capacité mondiale de production d'énergie éolienne de 1997 ~2015. C'est le secteur électrique dynamisé qui enregistre la croissance la plus forte augmentation en termes de capacité. Des installations record d'énergie éolienne dans le monde ont été effectuées en 2015.

Bien devant les installations photovoltaïques et les centrales à charbon les installations d'énergie éolienne constituent près de 44,2% du total des nouvelles capacités électriques installées dans l'Union électrique [1]. Fin 2015 (voir figure 1.1), l'énergie éolienne installée constitue près de 432.4 GW plus de 63.0 GW par rapport à l'année 2014. Avec en tête la Chine, les États-Unis et l'Allemagne, dont 33.6% en Chine, 17,2% aux États-Unis et 10,4% en Allemagne (voir le tableau 1.2). Vu que la Chine est dotée d'une loi sur les énergies renouvelables et d'un plan national d'action pour le contrôle de la pollution, ces mesures ont aidé la chine à passer de 0.352 GW de capacité éolienne en 2000 à une capacité de 120 GW en 2015.



**Figure 1-1 :** Evolution mondiale de la capacité installée des éoliennes.

### I.3 Capacité des éoliennes en Algérie

En Algérie, la première tentative de raccorder des éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique date de 1957, avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site des Grands Vents (Alger) conçu par l'ingénieur français Andreau[2]. Ce prototype avait été installé initialement à St-Alban en Angleterre. Ce bipale de type pneumatique à pas variable de 30 m de haut avec un diamètre de 25 m fut racheté par Electricité et Gaz d'Algérie. La deuxième tentative de raccorder des éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique fut en 2014 à Kaberten situé à 72 km au nord de la wilaya d'Adrar à capacité de 10.2 MW, ce parc éolien a été mis en service début juin 2014. Il est composé de 12 éoliennes, la puissance de chaque éolienne est de 850 kW et leur diamètre est de 52 mètres avec une hauteur du mât de 55 m. Les éoliennes sont implantées sur un site d'une superficie globale de 33 hectares. L'énergie électrique fournie par ce parc éolien est injectée dans le réseau MT local. Le taux de pénétration de l'énergie éolienne est de 5% par rapport au réseau local. L'Algérie prévoit d'atteindre à l'horizon 2030 près de 40% de la production nationale d'électricité de sources renouvelables.

Bien que le choix de l'énergie solaire soit prédominant, l'énergie éolienne représente le deuxième axe de production de ce programme, Selon les prévisions du groupe Sonelgaz, La capacité totale à installer à l'horizon 2030, fixée 5010 MW pour l'éolien pour la période 2015-2020, il est programmé de réaliser 1GW en éolien parmi ces projets on trouve la réalisation de deux fermes éoliennes, une de 50MW à Timimoune et l'autre de 20MW à

Khenchela. Le nouvel Atlas éolien de l'ONM a mis en évidence l'existence d'autres sites ventés dans d'autres régions du Sud. Outre Adrar, les régions de Tamanrasset, Djanet et In Salah disposeraient d'un important potentiel. Cette étude a été réalisée en 2013 par Dr. Sidi Mohammed Boudia [3] qui a réactualisé la carte des vents à 10m (voir figure 1.2).

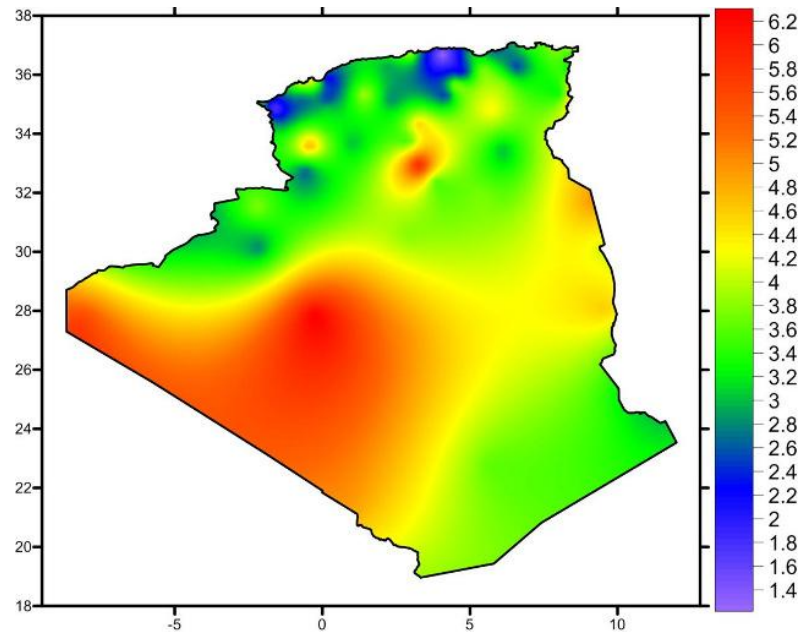


Figure I-2: Carte annuelle des vents à 10 m du sol pour les 87 points de mesure (m/s)

## I.4 Généralités sur les éoliennes

### I.4.1. Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'un générateur électrique (Figure I.3).[4]

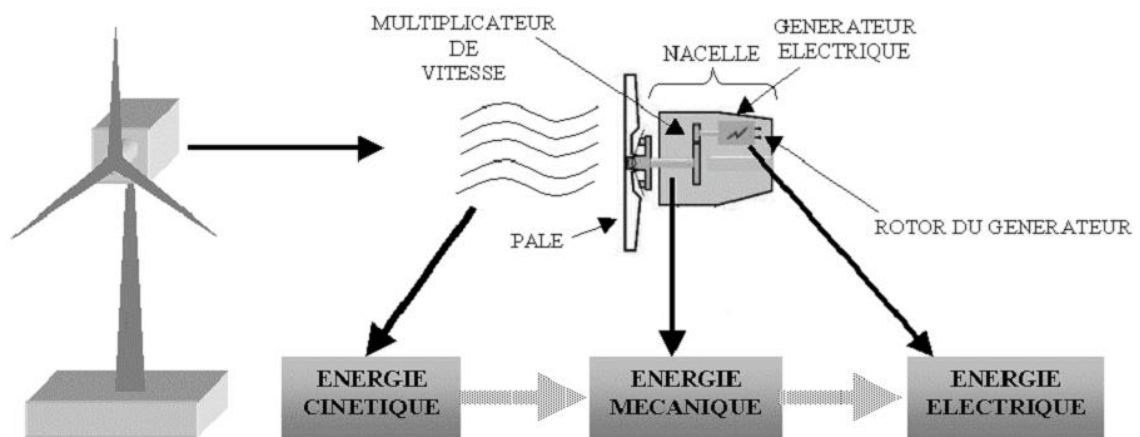


Figure I-3 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.

#### **I.4.2. Production d'une éolienne :**

L'exploitation de l'énergie électrique produite par une éolienne peut se faire de deux manières ; selon qu'elle soit connectée au réseau ou alimentant une charge isolée.

- Eolienne connectée au réseau.
- Eolienne alimentant une charge isolée.

#### **I.4.3. Inconvénients et avantages de l'énergie éolienne :**

##### **Les avantages :**

- L'énergie éolienne est une énergie propre et renouvelable qui ne produit ni pollution, ni déchets. De plus, elle rembourse sa dette énergétique, c'est-à-dire l'énergie nécessaire à sa fabrication, en quelques mois.
- L'énergie éolienne est abondante : le vent est inépuisable. Il constitue donc une véritable ressource renouvelable.
- L'industrie éolienne présente un potentiel important en termes d'emplois au niveau de la fabrication et de l'installation.
- Au-delà de la donne économique et environnementale, l'énergie éolienne suscite un intérêt particulier car elle peut favoriser la diversification et l'indépendance énergétique d'un pays.

##### **Les inconvénients :**

- La pollution visuelle et sonore. La perturbation des ondes électromagnétiques (télévision, radio, portable) sont des obstacles à l'installation chez les particuliers et cela oblige l'installation des éoliennes loin des habitations.

Sur le plan technique, l'éolien a quelques inconvénients par rapport à d'autres types de production de l'énergie électrique :

- L'énergie éolienne est une énergie intermittente et difficilement prévisible.
- Son insertion dans les réseaux électriques entraîne des problèmes et contraintes spécifiques qui doivent être pris en compte par les opérateurs de réseaux.

Aujourd'hui, du fait du développement important et toujours croissant en termes de puissance installée des parcs éoliens, ces derniers sont assujettis à des exigences techniques de plus en plus sévères imposées par des règles de raccordement aux réseaux définies à l'initiative des gestionnaires de réseaux.

#### I.4.4 Types des éoliennes :

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

##### I.4.4.1 Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical de type Darrieus possèdent généralement un rendement plus faible que les éoliennes classiques à axe horizontal (voir figure I.4). Le principe est celui d'un rotor d'axe vertical qui tourne au centre d'un stator à ailettes. Ce type de solution réduit considérablement le bruit tout en autorisant le fonctionnement avec des vents supérieurs à 220km/h et quel que soit leur direction.

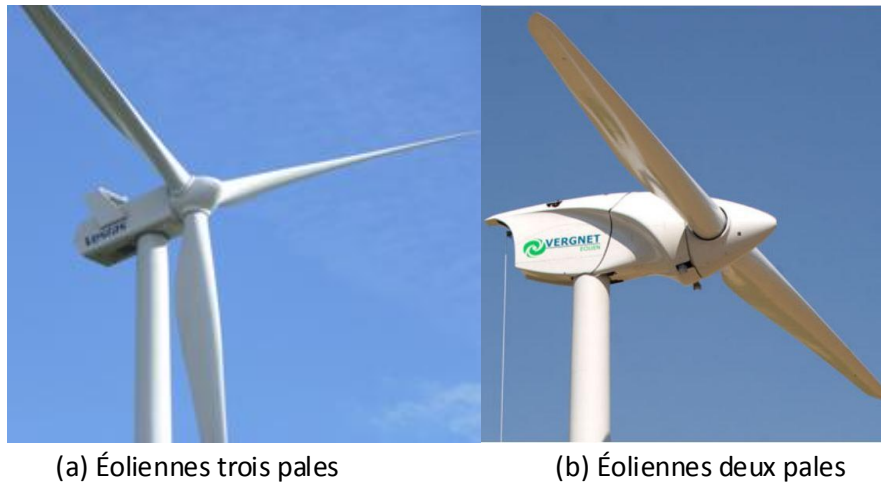


**Figure I-4 :** Eoliennes à axe vertical

##### I.4.4.2. Eoliennes à Axe Horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal beaucoup plus largement employées, elles nécessitent souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentant un rendement aérodynamique plus élevé, démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol.

Dans ces types d'éolienne l'arbre est parallèle au sol. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien, ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important. [5]



**Figure I-5 :** Éolienne à axe horizontal.

#### **I.4.5 Principaux composants d'une éolienne :**

Une éolienne est généralement constituée de trois éléments principaux : la tour ou le mat, la nacelle et l'ensemble rotor-pales.

✓ **Le mât**

Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur.

✓ **La nacelle**

Regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique arbre lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne. [4]

✓ **Le rotor :**

Formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor

tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit.

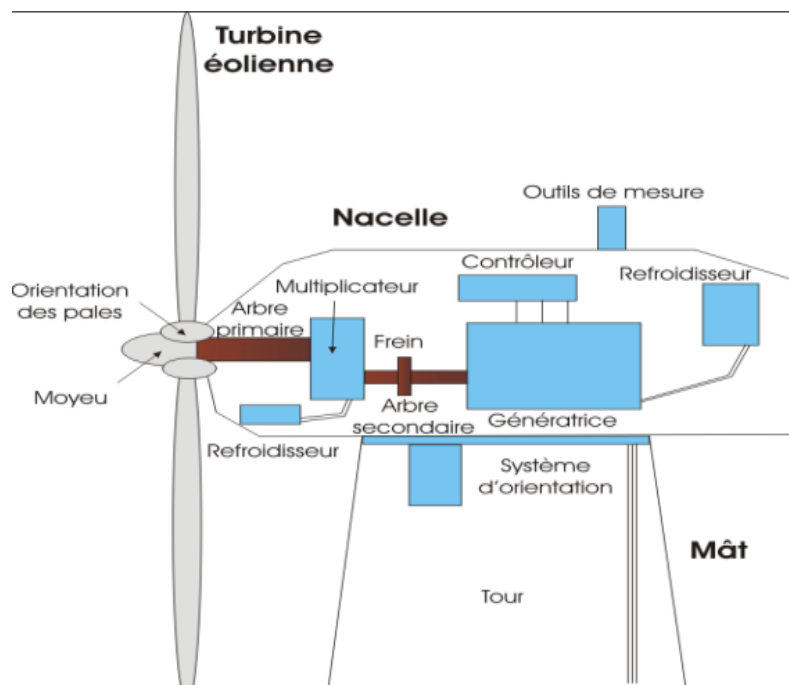


Figure I-6 Eléments constituant une éolienne.

### I.5. Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

#### I.5.1 Loi de BETZ :

La théorie du moteur éolien à axe horizontal a été établie par BETZ. Il suppose que le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini amont d'une vitesse  $V_1$  et à l'infini aval d'une vitesse  $V_2$  : [6]

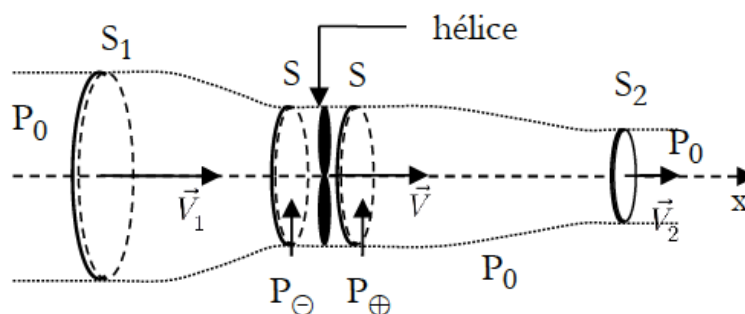


Figure I-7 Tube de courant d'air autour d'une éolienne

Dans la figure (I-7) on peut écrire le principe de l'incompressibilité de l'air et la continuité de l'écoulement :

$$S_1 V_1 = SV = S_2 V_2 \quad (I.1)$$

D'après le théorème d'EULER, La force exercée par l'air sur l'aérogénérateur est donnée par :

$$F = \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_1 - V_2) \quad (I.2)$$

D'où la puissance absorbée par l'aérogénérateur :

$$P_{aero} = F \cdot V = \rho \cdot S \cdot V^2 \cdot (V_1 - V_2) \quad (I.3)$$

$$\text{En prenant : } V = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

On obtient :

$$P_{aero} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (I.4)$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse soit à la vitesse, la puissance correspondante (mécanique théorique) serait alors :

$$P_{mt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3 \quad (I.5)$$

On définit le rapport entre les deux puissances  $C_p$ , puissance extraite du vent et celle qui est théoriquement disponible par le coefficient de puissance :

$$C_p = \frac{P_{aero}}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \frac{V_1}{V_2}\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} \quad (I.6)$$

Ce coefficient présente un maximum de 0,59. C'est cette limite théorique appelée limite de BETZ qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée.

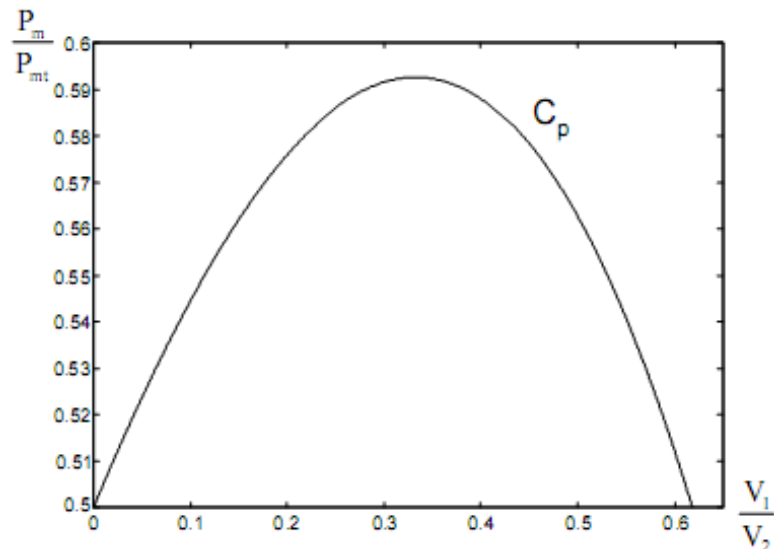


Figure I-8 : Variations du coefficient de puissance

### I.5.2 Modèle de la turbine d'éolienne

L'éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent.[7]

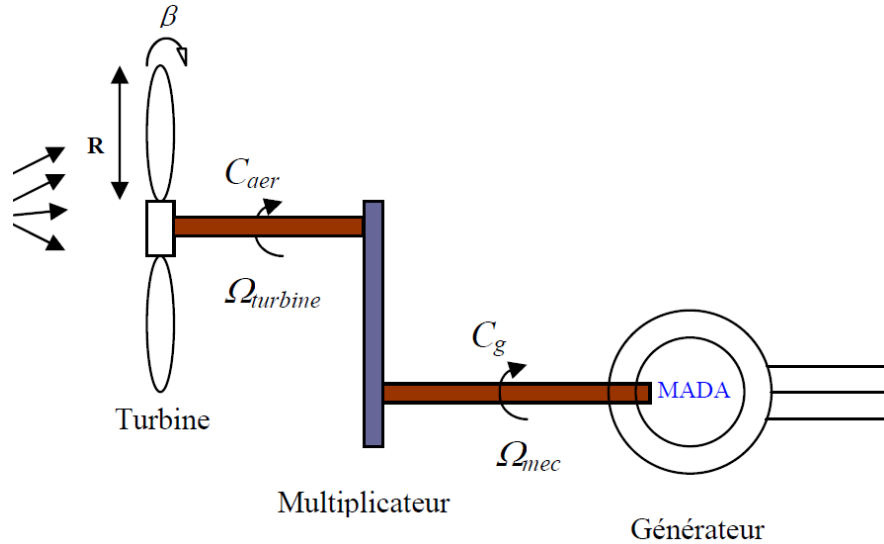


Figure I-9:Schéma Modèle de la turbine.

#### I.5.2.1 Le coefficient de puissance $C_p$

L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne, à partir de relevés réalisés sur une éolienne, l'expression du coefficient de puissance a été approchée, pour ce type de turbine, le  $C_p$  donnée suivant :

$$C_p = f(\lambda, \beta) = C_1 \left[ \left( \left( \frac{C_2}{\lambda_i} \right) - C_3 * \beta - C_4 \right) * e^{\left( \frac{C_5}{\lambda_i} \right)} + C_6 * \lambda \right] \quad (I.10)$$

$$C_1 = 0,5176 ; \quad C_2 = 116 ; \quad C_3 = 0,4 ; \quad C_4 = 5 ; \quad C_5 = 21 ; \quad C_6 = 0,0068 ;$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08 * \beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad (I.11)$$

Le ratio de la vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{\Omega_t * R}{V} \quad (I.12)$$

$\Omega_t$ : vitesse de rotation la turbine.

$R$ : La longueur de la pale.

$V$ : La vitesse moyenne du vent.

$\lambda$ : La vitesse spécifique de la turbine

$\beta$ : L'angle de l'orientation de la pale.

Ainsi comme il est illustré dans la figure (I-10), il est possible de constater que le coefficient de puissance évolue en forme de cloche, le maximum de celle-ci ( $C_p = 0.48$ ) est atteint pour une valeur du rapport d'avance  $\lambda = 8.2$ , et de l'angle d'orientation des pales  $\beta = 0$ . Avec cette valeur la turbine fonctionne avec le rendement maximum théorique. Dans la suite de notre travail une commande adaptée sera élaborée pour atteindre ce point de fonctionnement.

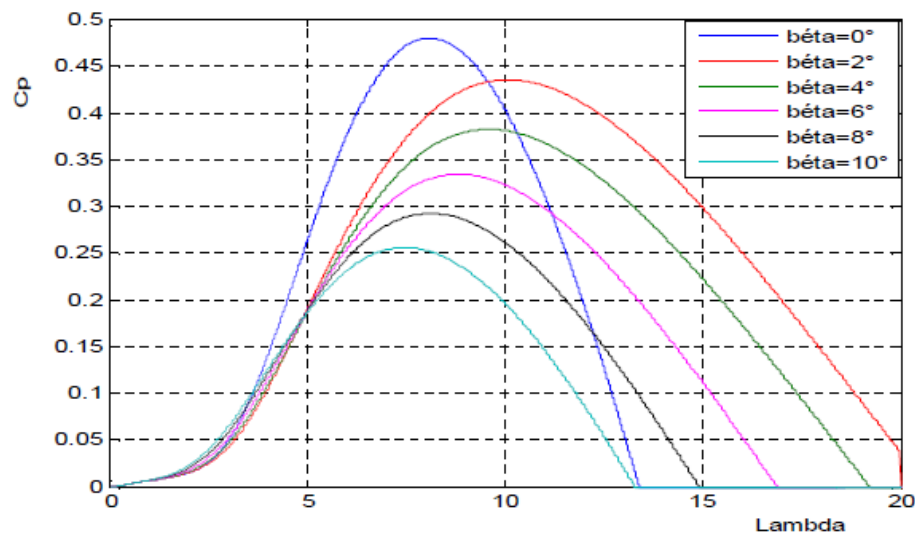


Figure I-10 : Coefficient de puissance  $C_p$  en fonction de  $\lambda$  et  $\beta$

### I.5.2.2 L'équation dynamique de la turbine :

Ce qui doit être modélisé c'est la transmission du couple et de la puissance captée par le rotor éolien. Le train de transmission de puissance est constitué des pales reliées au moyeu, couplées à l'arbre lent, relié à son tour au multiplicateur qui multiplie la vitesse de rotation de l'arbre rapide qui est couplé à son tour à la génératrice [8]

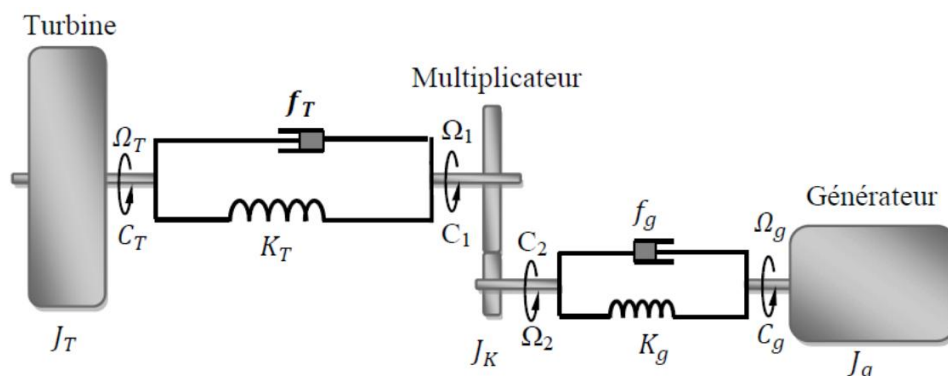
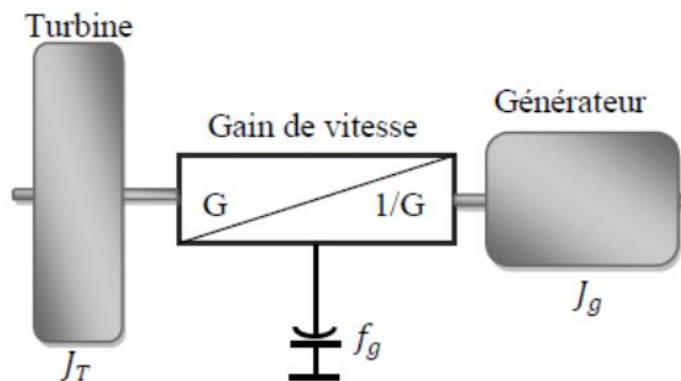


Figure I-11 : Modèle de la turbine.

Le modèle à trois masses équivalent de la chaîne de conversion éolienne est présenté sur la Figure I.16. Les masses correspondent à une grande masse du rotor de la turbine éolienne (90% du moment d'inertie global), masse pour le multiplicateur (2 à 4%), et une masse (6 à 8%) pour le générateur respectivement [9, 10]. En tenant compte des coefficients d'élasticité et de frottement pour les deux arbres [8], ce qui nous permet de poser les hypothèses simplificatrices suivantes [11].

### I.5.2.3 Hypothèses simplificatrices :

- La turbine comprend trois pales de longueur  $R_T$  chaque une, supposées identiques, attachées au moyeu. L'ensemble peut être considéré comme une seule masse d'une inertie  $J_T$ .
- L'inertie du multiplicateur de vitesse est négligeable devant celle de la turbine et celle du générateur, ce qui nous permet de le considérer comme un gain de vitesse égale à  $G$  ou un gain de couple égale à  $1/G$ .
- Les arbres de transmission sont parfaitement rigides. Ces hypothèses nous permettent de considérer le modèle simplifié à deux masses suivant.



**Figure I-12:** Modèle simplifié de la turbine

$$\frac{C_T}{G} - C_g = \left( \frac{J_T}{G^2} + J_g \right) \cdot \frac{d\Omega_g}{dt} + \left( \frac{f_T}{G^2} + f_g \right) \cdot \Omega_g \quad (I.14)$$

Avec

$C_T, C_g$ : Le couple éolien et le couple électromagnétique.

$J_T, J_g$ : L'inertie de la turbine et celle du générateur.

$f_T, f_g$ : Le coefficient des frottements visqueux de la turbine et celui du générateur.

$G$ : Le rapport du multiplicateur de vitesse.

$\Omega_g$ : La vitesse de rotation du générateur (axe rapide).

On pose :

$$\frac{J_T}{G^2} + J_g = J \quad (\text{I.15})$$

$$\frac{f_T}{G^2} + f_g = f \quad (\text{I.16})$$

D'où, l'équation mécanique devienne :

$$\frac{C_T}{G} - C_g = J \cdot \frac{d\Omega_g}{dt} + f \cdot \Omega_g \quad (\text{I.17})$$

Ainsi, nous pouvons établir le modèle de la turbine dont le schéma bloc est donné sur la figure ci-dessous :

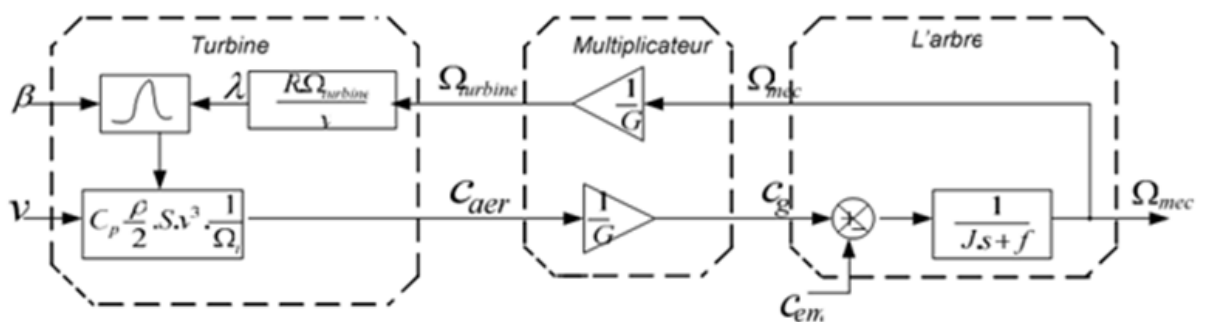


Figure I-13: Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne.

## I.6 Aperçu sur les systèmes de conversion électromécanique :

### I.6.1 Fonctionnement selon type de vitesse :

Le fonctionnement à vitesse fixe ou à vitesse variable constitue l'une des plus importantes spécifications des aérogénérateurs, Nous allons respectivement citer en ce qui suit les avantages de l'un par rapport à l'autre :

#### I.6.1.1 Fonctionnement à vitesse fixe :

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

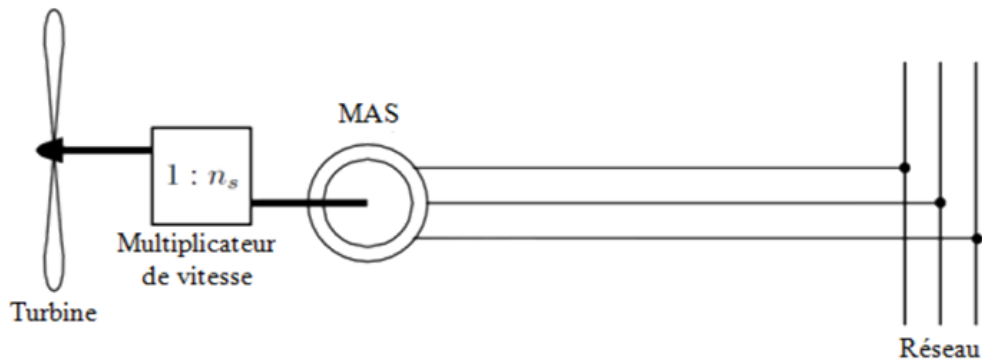


Figure. I-14 : Aérogénérateur à vitesse fixe

### I.6.1.2 Fonctionnement de vitesse variable :

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

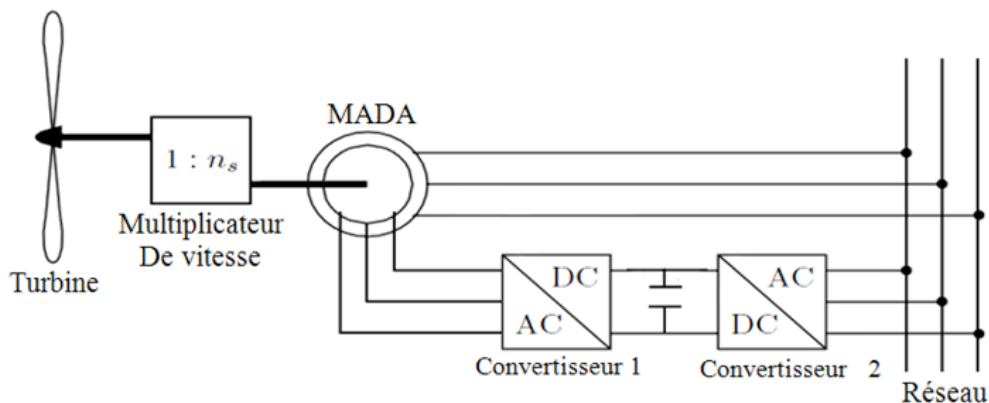


Figure. I-15 : Aérogénérateur à vitesse variable

### I.6.2 Systèmes utilisant la machine synchrone :

La caractéristique (couple-vitesse) d'une machine synchrone utilisée en alternateur exige la maîtrise du synchronisme entre les deux forces électromotrices rotoriques et statoriques, elles doivent tourner à la même vitesse, ce qui pose un problème dans l'intégration de cette machine dans un système de production d'énergie éolienne. Une interface électronique entre le stator de la machine et le réseau est systématiquement insérée.

Dans la plupart des cas, le stator de l'alternateur est à base des aimants permanents qui sont plutôt coûteux, surtout ceux qui sont à base des terres rares, et risquent de perdre ses caractéristiques magnétiques à cause des fortes variations des couples électromagnétiques.

De plus, le convertisseur statique est conçu pour supporter la totalité de la puissance envoyée au réseau. En conséquence, les alternateurs sont abandonnés à cause du coût et des problèmes de l'intégration à un système de production d'énergie éolien.

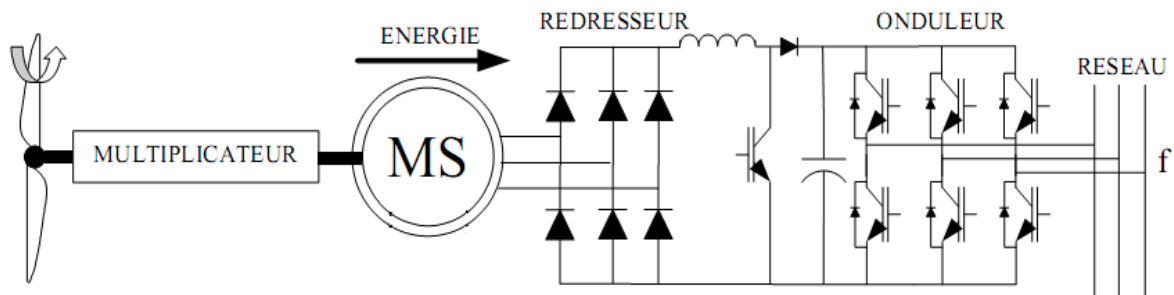
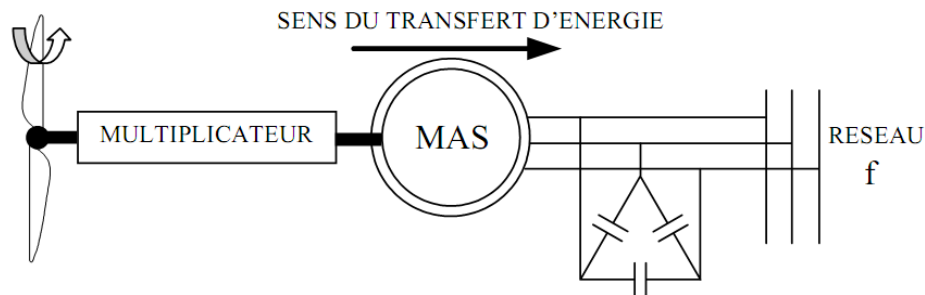


Figure I-16 : Alternateur dans une chaîne de conversion éolienne.

### I.6.3 Systèmes utilisant la machine asynchrone

Les génératrices asynchrones, à cage d'écureuil ou à double alimentation, équipent actuellement la majorité des éoliennes dans le monde. Contrairement à l'habitude d'utiliser la machine asynchrone à cage d'écureuil comme moteur, cette machine est toute à fait réversible et peut répondre aux exigences extrêmes que présente l'énergie éolienne à cause de sa robustesse, son faible coût ainsi que l'absence du système collecteur-balais ou les systèmes de contact glissant. Par contre, pour s'assurer qu'on est dans la zone stable de fonctionnement de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil on doit travailler aux faibles glissements (autour de synchronisme (point  $g = 0$ )). Le nombre des paires de pôles de la machine est fixe, donc on doit fonctionner sur une plage très serrée (glissements inférieur à 2%) [13].

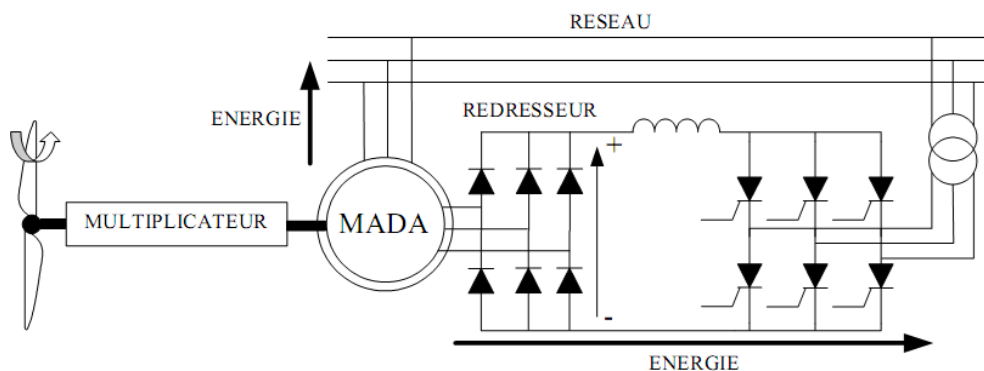
Si le glissement devient important, les courants statoriques augmentent en présentant des pics qui peuvent être destructifs car le stator de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil est connecté directement au réseau. De plus, ce type de convertisseur électromécanique est consommateur de l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance du réseau [13]



**Figure I-17:** Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à vitesse fixe.

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

Dans cette configuration, le convertisseur statique est dimensionné (à une fraction de la puissance nominale de l'éolienne) uniquement pour faire transiter la puissance destinée à la magnétisation de la machine et il est donc moins coûteux.[13]



**Figure I-18 :** MADA dans une chaîne de conversion éolienne

## I.7 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté un état de l'art bref sur l'énergie éolienne, ainsi que les différents concepts de convertisseur d'énergie éolienne en énergie électrique.

Nous avons aussi exposé les différentes exigences que nécessite ces systèmes pour une meilleure intégration dans les réseaux électriques de distribution. Aussi, la modélisation des différentes parties de la turbine éolienne est succinctement démontrée.

## ***Chapitre II :***

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

## II.1 Introduction

La plupart des génératrices utilisées dans les systèmes de génération d'énergie éolienne sont des génératrices asynchrones. Elles sont robustes, leur coût est relativement faible. Il existe deux types de machines asynchrones : les machines asynchrones à cage d'écureuil et les machines asynchrones à rotor bobiné.

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné, la plus utilisée dans les éoliennes tournant à une vitesse variable, en partant d'un certain nombre hypothèses simplificatrices pour la modélisation mathématique de la machine, ainsi que ces modes de fonctionnement en mode génératrice.

## II.2 Structure de la MADA

Selon la conception du rotor, plusieurs types de machines asynchrones à double alimentation ont été envisagés. On va décrire les plus utilisés dans l'industrie.

### II.2.1 MADA à rotor bobiné

La machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné est composée, comme toute machine à courant alternatif, d'un stator et d'un rotor. Le stator est identique à celui d'une machine asynchrone classique. Le rotor est constitué d'enroulements triphasés connectés en étoile dont les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants. [14]

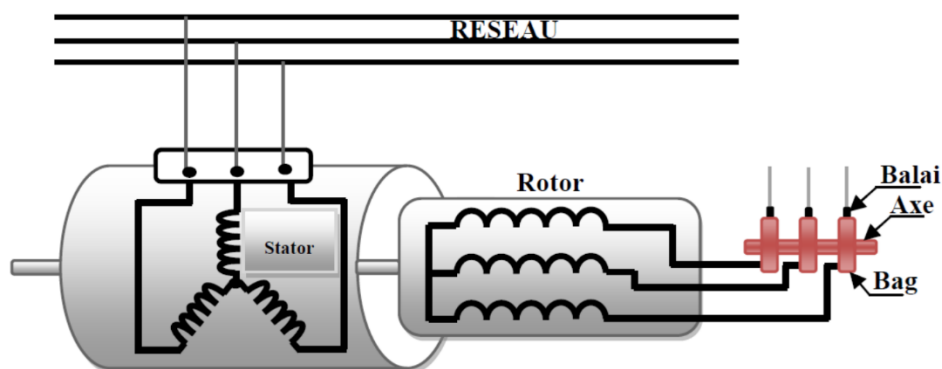


Figure II-1 : Schéma du rotor de la MADA à rotor bobiné.

### II.2.2 MADA sans balais

Cette machine est très proche à la précédente, sauf que cette fois ci les deux enroulements statoriques appartiennent à un circuit magnétique commun. Le rotor est commun et à cage d'écureuil.

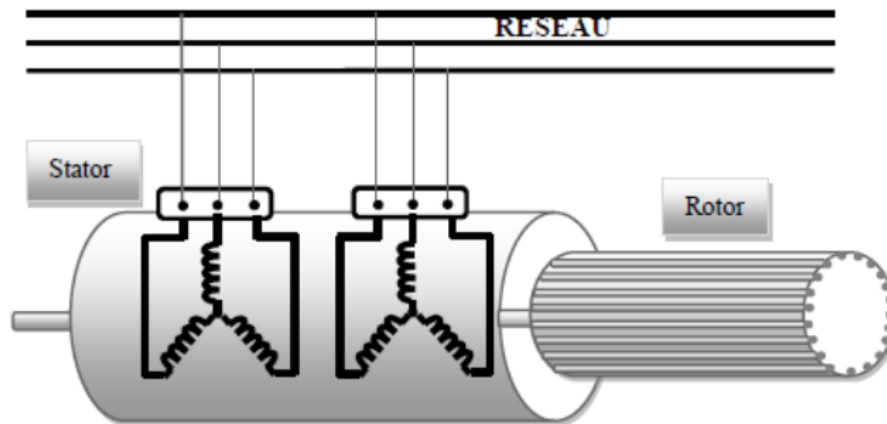


Figure II-2 : Structure de la MADA sans balais

### II.2.3 MADA en cascade :

La structure de la MADA en cascade est définie par deux machines asynchrones dont les rotors sont couplés électriquement et mécaniquement. Cette structure permet d'avoir un système à double alimentation côté stator. Les enroulements statoriques sont reliés à deux sources de tension triphasées [15].

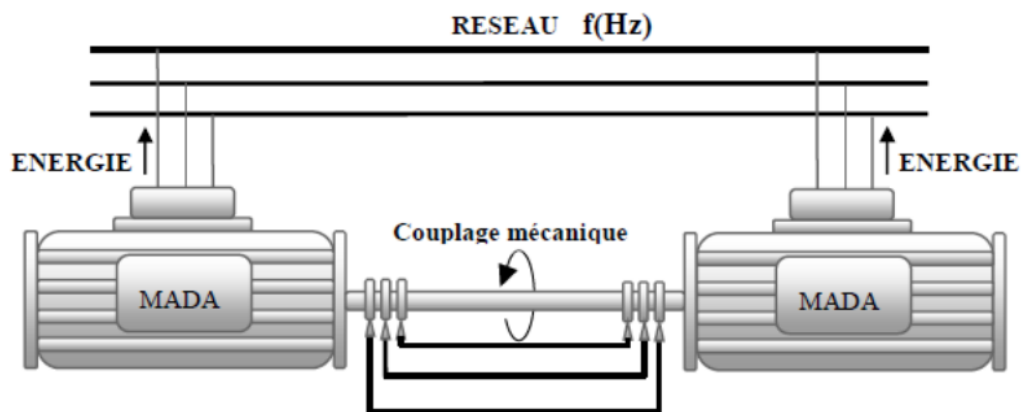


Figure II-3 : Structure en cascade de deux machines asynchrones

### II.3 Mode de fonctionnement

Comme la machine asynchrone à cage, la MADA fonctionne en moteur et en générateur, la différence réside dans le fait que pour la MADA ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement. Dans le cas d'une MADA 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 fonctionnement en hyper ou hypo synchrone aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur [16]. Cette propriété fondamentale a fait de la MADA le choix par excellence des entraînements à vitesse variable et surtout ces dernières années pour la génération d'énergie éolienne à vitesse variable.

### II.3.1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

- Le fonctionnement de la MADA en moteur.
- La puissance  $P_s$  est fournie par le réseau au stator de cette dernière.
- La vitesse de rotation est inférieure à celle du synchronisme.
- La puissance de glissement  $P_r$  transite à travers les deux convertisseurs pour être réinjectée au réseau (Fig. II.4).

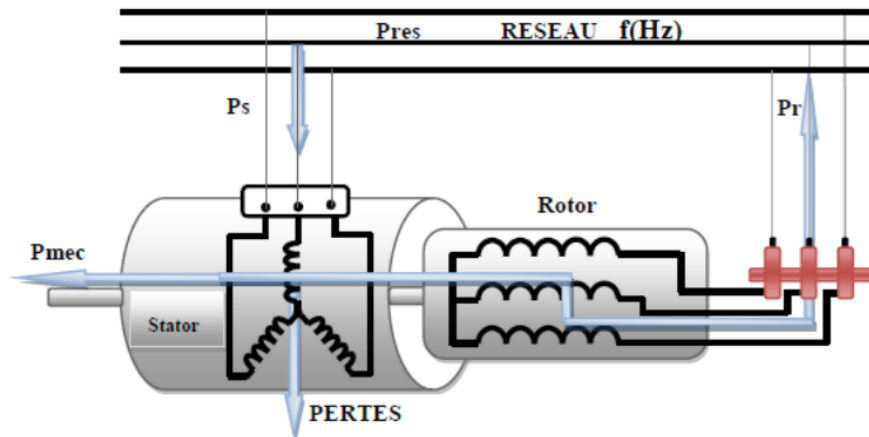


Figure II-4 : Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.

### II.3.2 Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

- Le fonctionnement de la MADA en moteur.
- Le réseau fournit la puissance au stator et au rotor de la MADA.
- La puissance de glissement transite par les deux convertisseurs pour être absorbée par le rotor de la MADA entraînant par ceci un fonctionnement du moteur au-dessus de la vitesse de synchronisme.
- Le champ tournant induit par les enroulements rotoriques est alors en opposition de phase avec celui du stator (Fig. II.5).

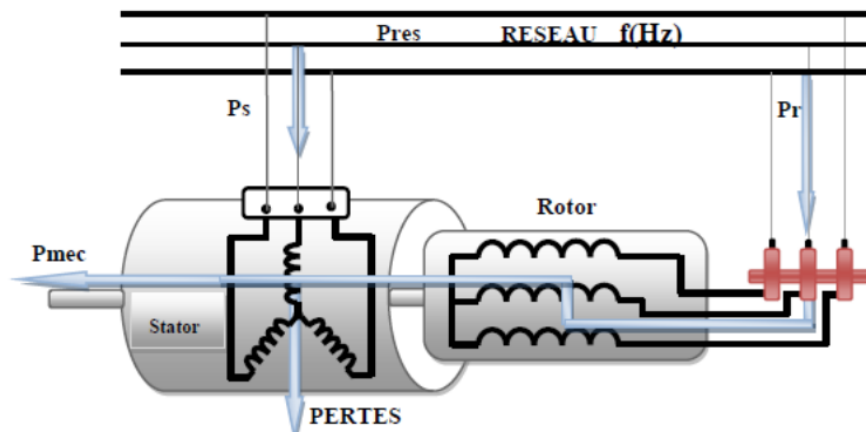


Figure II-5 : Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.

### II.3.3 Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone :

- Le fonctionnement de la MADA en génératrice,
- La turbine fournit une puissance mécanique  $P_{mec}$  à la machine.
- Une partie de la puissance transmittant par le stator est réabsorbée par le rotor (Fig. II.6).

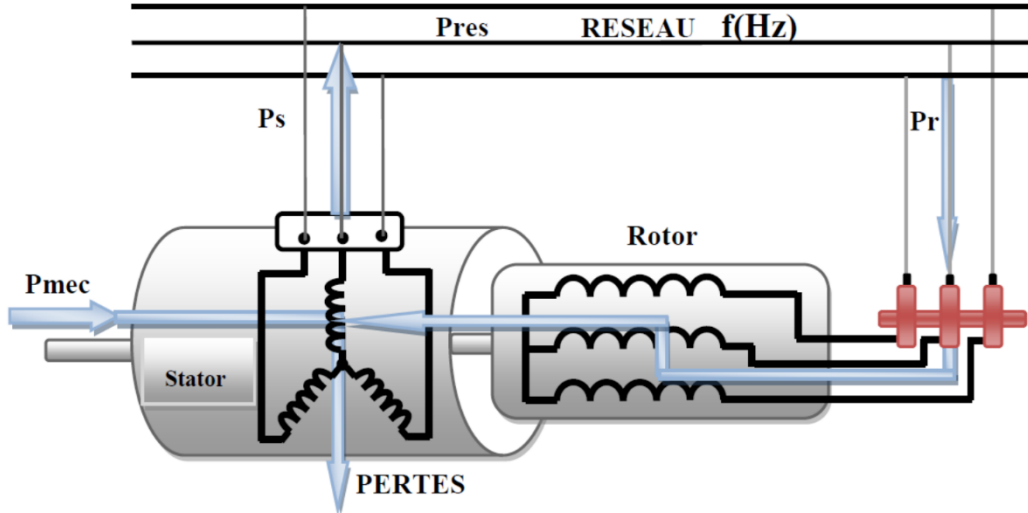


Figure II-6 : Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone.

### II.3.4 Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone :

- Le fonctionnement de la MADA en génératrice.
- La totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près.
- Une partie de cette puissance correspondant à  $g/(1 - g) P_{mec}$  est transmise par l'intermédiaire du rotor (Fig. II.7).

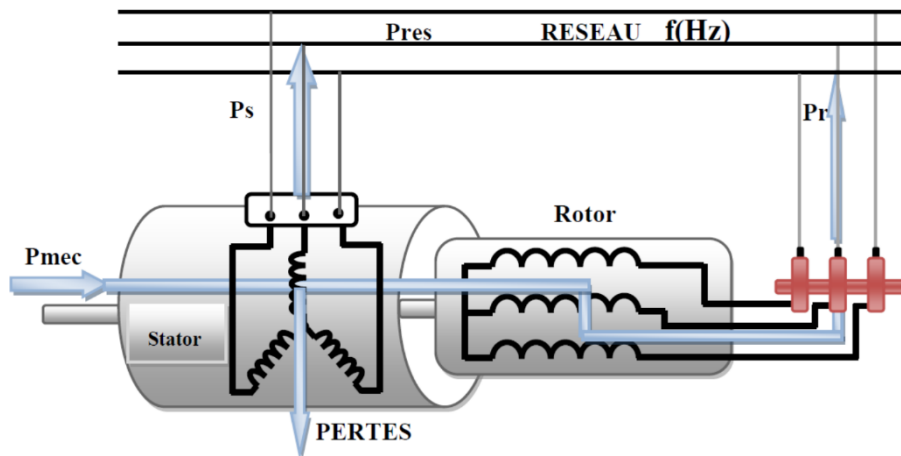


Figure II-7 : Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone.

## II.4 Les différentes configurations de la MADA à rotor bobiné

Le mode de fonctionnement de la MADA aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur est imposé par la commande des tensions rotoriques. Chaque mode est caractérisé par une configuration qui répond à un critère choisi. Les différentes configurations les plus utilisées dans les aérogénérateurs pour un fonctionnement en mode génératrice sont présentées ci-dessous.

### II.4.1 Configuration pour application en génératrice

Le mode générateur est le mode idéal pour l'utilisation d'une MADA, puisqu'elle permet d'avoir une plage de vitesse de rotation variant entre  $\pm 30\%$  de la vitesse du synchronisme. De plus, le contrôle des tensions rotoriques permet de contrôler les puissances actives et réactives produites, et de faciliter ainsi sa commande. [15]

Généralement, le stator de la MADA est connecté directement au réseau et son rotor est alimenté de différentes façons que nous allons montrer dans ce qui suit.

#### II.4.1.1 MADA à énergie rotorique dissipée

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la (Fig.II.8), le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO. Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur.

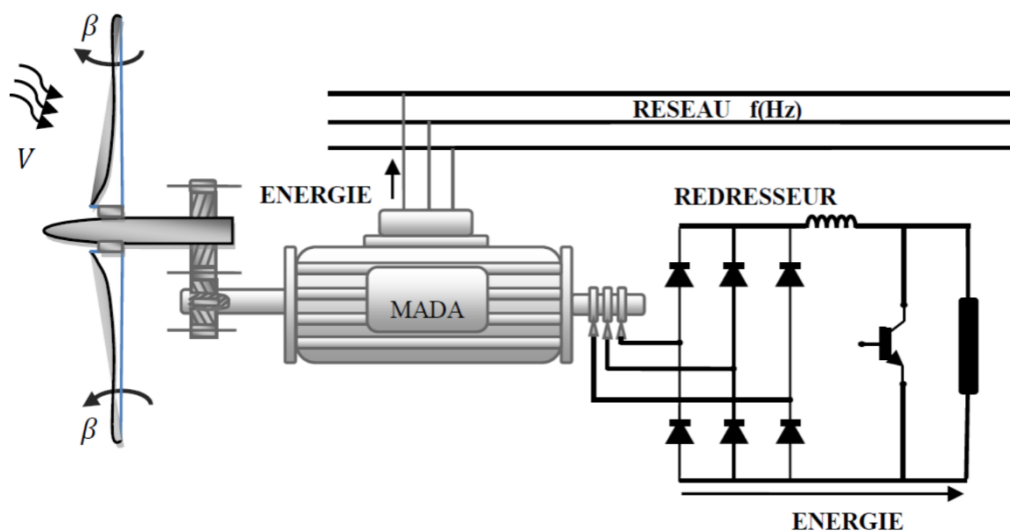
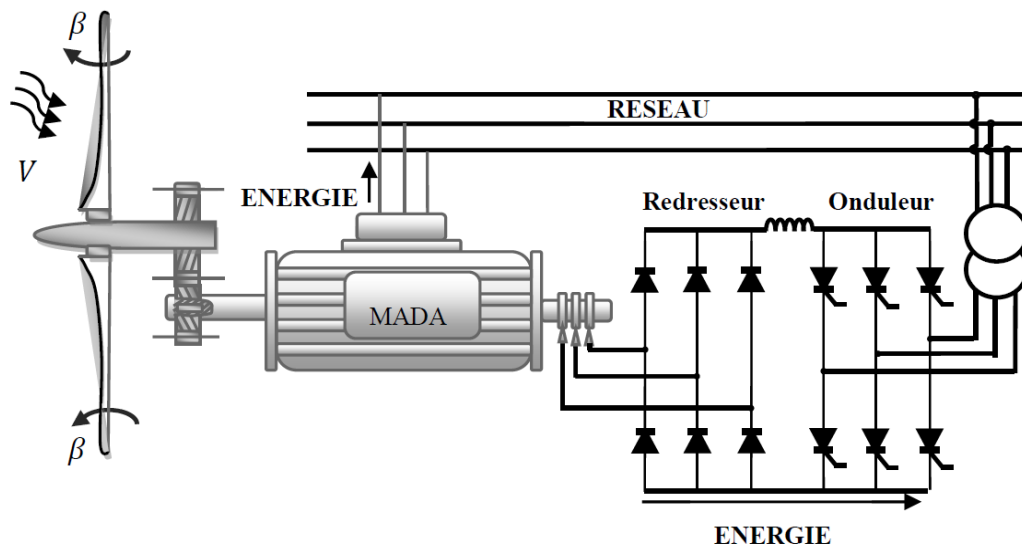


Figure II-8 : MADA à énergie rotorique dissipée.

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance  $R$ , ce qui nuit au rendement du système. De plus cela augmente la puissance transmise dans le convertisseur ainsi que la taille de la résistance.[17]

#### II.4.1.2 Structure de KRAMER

Dans le but de réduire les pertes d'énergie dues à la structure du système précédent, le hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau (Fig. II.9) [5]



**Figure II-9** : MADA à structure de KRAMER.

L'ensemble « redresseur-onduleur » est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Comme dans le cas de la machine sans balais, ce système est avantageux s'il permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. Afin de respecter cette contrainte, le glissement est maintenu inférieur à 30%.

L'utilisation de thyristors pour l'onduleur nuit au facteur de puissance, de plus le redresseur est unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau), donc le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures au synchronisme. Cette solution n'est plus utilisée au profit de la structure de SCHERBIUS avec convertisseurs à IGBT. [18]

### II.4.1.3 Structure de SCHERBIUS avec cycloconvertisseur :

Afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'association redresseur onduleur peut être remplacée par un cycloconvertisseur (Figure II-10), l'ensemble est alors appelé structure de SCHERBIUS. Comme le flux de la puissance est bidirectionnel, il est possible d'augmenter ou de diminuer l'énergie de glissement et ainsi faire fonctionner la machine en génératrice ou en moteur [12]. Son utilisation génère par conséquent des perturbations harmoniques importantes qui nuisent au facteur de puissance du dispositif. Les progrès de l'électronique de puissance ont conduit au remplacement du cycloconvertisseur par une structure à deux convertisseurs à IGBT commandés en MLI.

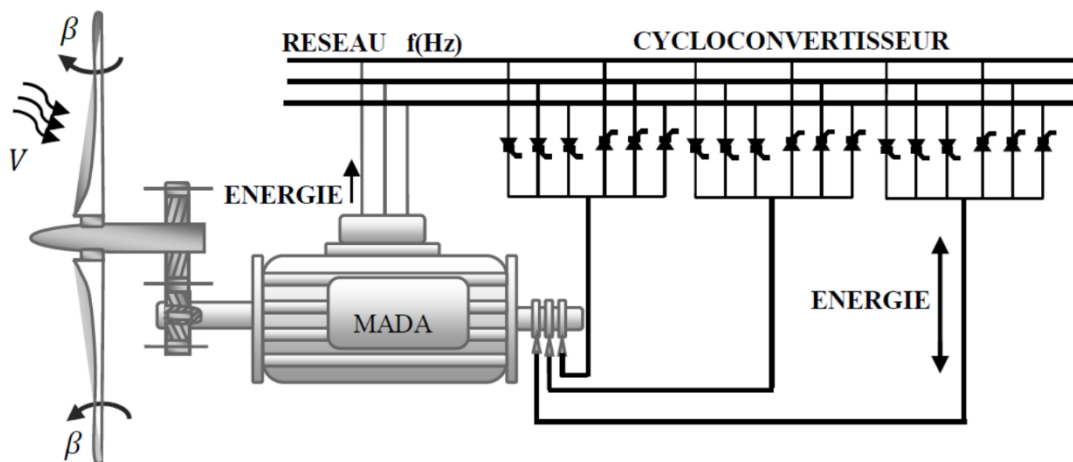
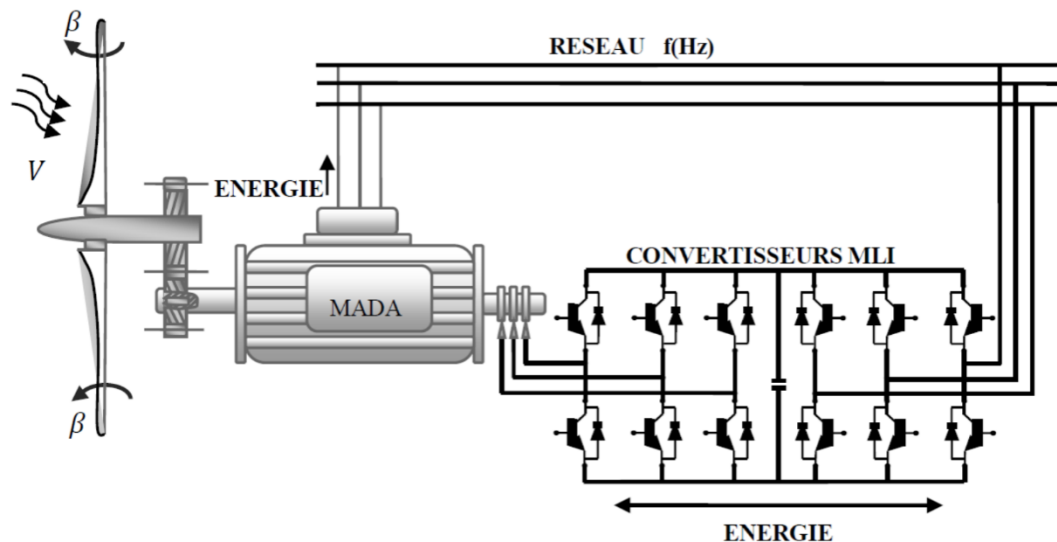


Figure II-10 : Structure de SCHERBIUS avec cycloconvertisseur.

### II.4.1.4 Structure de SCHERBIUS avec convertisseurs MLI :

Le progrès de l'électronique de puissance permet d'avoir des interrupteurs qui peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture comme les IGBT's avec une fréquence de commutation importante. L'utilisation des convertisseurs à base de ce type d'interrupteurs permet le rejet des premiers harmoniques vers les fréquences élevées ce qui limite les perturbations harmoniques et facilite le filtrage [13].



**Figure II-11** : Structure de SCHERBIUS avec convertisseurs MLI.

La réversibilité de puissance du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hypo synchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau. Si le glissement reste inférieur à  $\pm 30\%$  autour du synchronisme, les convertisseurs sont alors dimensionnés pour un tiers de la puissance nominale de la machine et ses pertes représentent moins de 1% de cette puissance [15]. De plus, le fonctionnement hyper synchrone permet de produire de l'énergie du stator vers le réseau mais également du rotor vers le réseau.

La puissance totale ainsi produite peut alors dépasser la puissance nominale de la machine et le facteur de puissance de l'ensemble peut être maintenu unitaire.

## II.5 Avantages et inconvénients de la MADA :

Nous introduisons dans ce paragraphe les avantages et les quelque inconvénients que présente la machine asynchrone à double alimentation [19].

### II.5.1 Avantages de la MADA :

La machine asynchrone à double alimentation présente plusieurs avantages dont on peut citer :

- Production de puissance électrique quelle que soit sa vitesse de rotation (hypo en hyper-synchronisme) et la récupération de la puissance de glissement la puissance nominale sans être surchauffée.
- La mesure des courants au stator et rotor, contrairement à la machine à cage, donne ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.

- Les convertisseurs utilisés sont dimensionnés que pour une fraction de la puissance de la machine (30%) contrairement au système utilisant la machine asynchrone à cage d'écurueil ou le convertisseur est dimensionné pour la totalité de la puissance de la machine. [19]
- Le partage des fréquences entre le stator et le rotor en effet dans le cas d'une double alimentation, il est possible et recommandé de partager la fréquence de rotation du rotor entre les deux convertisseurs qui alimentent la machine, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement.
- En fonctionnement générateur, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée.
- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale.[19]

**II.5.2 Inconvénients de la MADA :**

- Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à cause des balais [19].
- La présence des balais nécessite des interventions périodiques, ce qui augmente le coût de la maintenance.
- Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage nous soulignons que des études récentes, tenant compte de la chute du prix du silicium donnent maintenant un petit avantage à la MADA [19].

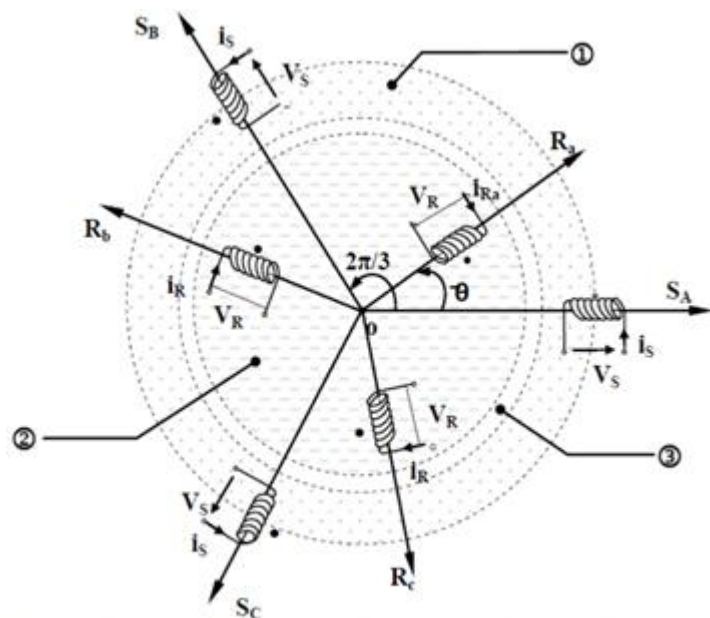
## II.6 Modélisation de la MADA :

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

### II.6.1 Hypothèses simplificatrices :

- L'entrefer constant.
- L'effet des encoches négligé.
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer.
- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.
- Les pertes ferromagnétiques négligeables.
- De ce fait, tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements [20]

La figure (II-12) rappelle la position des axes des phases statoriques et rotoriques dans l'espace électrique, où l'angle électrique est égal à l'angle réel multiplié par le nombre (P) de paires de pôles par phase.



① Partie fixe : Stator. ② Partie mobile : Rotor. ③ Entrefer

**Figure II-12** : Représentation simplifiée de la MADA.

## II.6.2 Equations mathématiques de la MADA dans le repère (a, b, c)

La machine asynchrone à double alimentation MADA comporte trois bobines statoriques décalées entre elles par un angle de  $(2\pi/3)$  et aussi trois bobines rotoriques identiques de répartition et similaire à celles du stator.

Les équations générales de machine asynchrone à cage d'écureuil dans un repère triphasé en mode hypo synchrone s'écrivent sous forme matricielle

### II.6.2.1 Equations électriques

$$\begin{cases} [V_{sabc}] = [R_s] \cdot [I_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sabc}] \\ [V_{rabc}] = [R_r] \cdot [I_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{rabc}] \end{cases} \quad (\text{II. 1})$$

Avec :

$$[V_{sabc}] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}; \quad \text{et} \quad [V_{rabc}] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix};$$

$[V_{sabc}]$ ,  $[V_{rabc}]$  : Sont respectivement les vecteurs des tensions statoriques et rotoriques

$$[I_{sabc}] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix}; [I_{rabc}] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix}; \quad \text{et} \quad [\Phi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix}; [\Phi_{rabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix};$$

$[I_{sabc}]$ ,  $[I_{rabc}]$  : Sont respectivement les vecteurs des courants statoriques et rotoriques

$[\Phi_{sabc}]$ ,  $[\Phi_{rabc}]$  : sont les matrices des flux statoriques et rotoriques suivant les axes a,b,c.

$$[R_s] = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix}; [R_r] = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix};$$

$[R_s]$  et  $[R_r]$  : sont respectivement les matrices des résistances statoriques et rotoriques par phase.

### II.6.2.2 Equations magnétiques :

Les équations des flux statoriques et rotoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} [\Phi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \\ [\Phi_r] = [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s] \end{cases} \quad (\text{II. 2})$$

Avec :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix}; \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

Où :

$L_s$ ,  $L_r$  sont respectivement les inductances principales de fuite statoriques et rotoriques.

$M_s, M_r$  : sont respectivement les inductances mutuelles statoriques et rotoriques.

$[M_{rs}] = [M_{sr}]^t$ : La matrice des inductances mutuelles (ou matrice de couplage rotor-stator) est donnée par :

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^t = M_{\max} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II. 3})$$

$M_{\max}$  : Est l'inductance mutuelle maximum entre une phase statorique et une phase rotorique.

En remplaçant (II.2) dans (II.1), on obtient le système d'équations ci-dessous :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [[L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r]] \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [[L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s]] \end{cases} \quad (\text{II. 4})$$

### II.6.2.3 Equation mécanique

L'équation mécanique de la machine est donnée comme suit : L'équation mécanique de la machine est donnée comme suit :

$$C_{em} = C_r + f_r \cdot \Omega + J \cdot \frac{d\Omega}{d\theta} \quad (\text{II. 5})$$

Avec :

- $C_{em}$  : le couple électromagnétique de la machine.
- $C_r$  : le couple résistant.
- $f_r$  : le coefficient de frottement visqueux de la MADA.
- $\Omega$  : la vitesse de rotation de l'axe de la MADA.
- $J$  : l'inertie des parties tournantes.

L'expression du couple électromagnétique est donnée par la relation suivante :

$$C_{em} = p \cdot [I_s]^t \frac{d}{d\theta} [[M_{sr}] \cdot [I_r]] \quad (\text{II. 6})$$

Où  $p$  et le nombre de paires de pôles de la MADA.

II.6.3 Equations mathématiques de la MADA dans le repère (d, q)

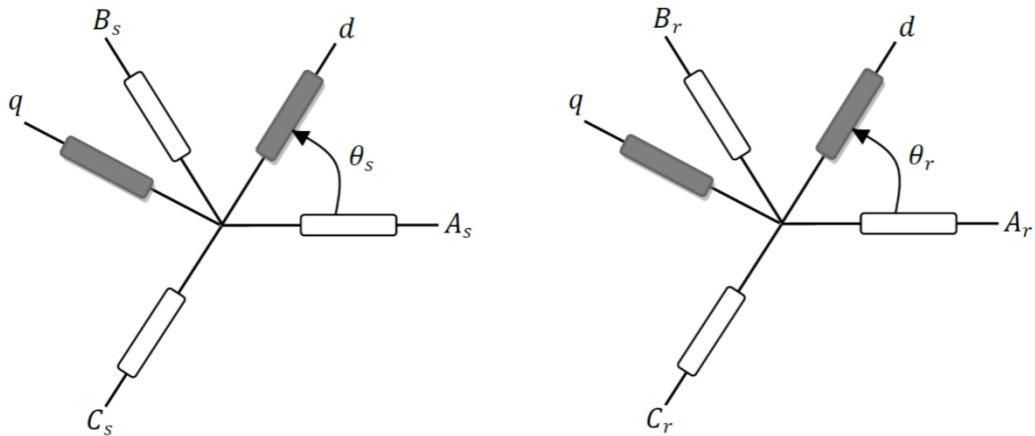


Figure II-13 : Schémas de Transformation des variables statoriques et rotoriques.

L'équation de la transformation de Park pour passer d'un système triphasé à un système biphasé et vice versa est donnée comme suit :

$$[xdq0] = [P(\Theta)].[xabc] \Rightarrow [xabc] = [P(\Theta)]^{-1}.[xdq0]$$

Le modèle mathématique de la génératrice asynchrone à double alimentation s'écrit dans le repère de Park lié au champ tournant comme suit :

$$\begin{cases} V_{sd} = -R_s I_{sd} + \frac{d}{dt} \varphi_{sd} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = -R_s I_{sq} + \frac{d}{dt} \varphi_{sq} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt} \varphi_{rd} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d}{dt} \varphi_{rq} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (II.9)$$

Les composantes des flux statoriques et rotoriques sont données par

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = -L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \varphi_{sq} = -L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} - M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} - M I_{sq} \end{cases} \quad (II.10)$$

Avec respectivement :

$$\omega_r = \omega_s - \omega, \omega = p \cdot \Omega$$

$V_{sd}, V_{sq}, V_{rd}$  et  $V_{rq}$  les tensions statoriques et rotoriques directs en système diphasé.

$I_{sd}, I_{sq}, I_{rd}$  et  $I_{rq}$  les courants statoriques et rotoriques directs en système diphasé.

$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}, \varphi_{rd}$  et  $\varphi_{rq}$  les flux statoriques et rotoriques directs en système diphasé.

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

L'expression du couple électromagnétique est donnée par les relations suivantes :

$$\begin{cases} C_{em} = -P \frac{M}{L_r} (\varphi_{rd} I_{qs} - \varphi_{rq} I_{ds}) \\ C_{em} = P \frac{M}{L_s} (\varphi_{sd} I_{rq} - \varphi_{sq} I_{rd}) \end{cases} \quad (\text{II. 11})$$

L'équation mécanique est donnée par

$$C_{em} + C_r = f\Omega + J \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{II. 12})$$

Avec respectivement :

$C_{em}$  : Couple électromagnétique.

$C_r$  : Couple résistant.

$f$  : Le coefficient de frottement visqueux de la MADA ;

$\Omega$  : La vitesse de rotation de l'axe de la MADA ;

$J$  : L'inertie des parties tournantes.

Les puissances active et réactive statoriques sont représentées par :

$$\begin{cases} P_S = -(I_{ds} V_{ds} + I_{qs} V_{qs}) \\ Q_S = -(I_{ds} V_{qs} - I_{qs} V_{ds}) \end{cases} \quad (\text{II. 13})$$

$P_S$  : La puissance active statoriques.

$Q_S$  : La puissance réactive statoriques.

Les puissances active et réactive rotoriques sont représentées par :

$$\begin{cases} P_r = (I_{rq} V_{rq} + I_{rd} V_{rd}) \\ Q_r = (I_{rd} V_{rq} - I_{rq} V_{rd}) \end{cases} \quad (\text{II. 14})$$

$P_r$  : La puissance active rotoriques.

$Q_r$  : La puissance réactive rotoriques.

## II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons pu faire une synthèse sur les différents modes de fonctionnement des machines asynchrone notamment les génératrices à double alimentation. Aussi, nous avons présenté quelque configuration pour la connexion de ce type de machine dans le réseau de distribution électrique.

Dans une seconde partie de ce chapitre nous avons décrit les différentes équations mathématiques qui permettent de modéliser et de simuler ces machines électriques.

## ***CHAPITRE III :***

### ***Commande Vectorielle des Puissances Active et Réactive***

### III.1 Introduction

La technique du contrôle vectoriel repose sur une loi de commande conduisant à une caractéristique de réglage similaire à celle d'une machine à courant continu à excitation séparée. Pour le cas du contrôle vectoriel de la MADA, il sera question de maîtriser les échanges d'énergie et notamment les transferts de puissances active et réactive envoyées sur le réseau.

Dans ce chapitre, nous allons établir les équations qui lient les tensions rotoriques de la MADA, aux puissances active et réactive statoriques en essayant de développer un algorithme de contrôle indépendant des puissances qui va nous aider à contrôler au mieux le système de production d'énergie éolienne.

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

Le concept d'orientation de flux, proposé par Hasse en 1969 et Blaschke en 1972, constitue sans doute le plus important de paradigme dans la théorie et la pratique de contrôle des machines à induction. En effet, l'objectif de l'orientation du flux est de rendre le moteur à induction semblable à un moteur à courant continu à excitation séparée, ce qui permet le contrôle optimal du couple électromagnétique indépendamment du flux.

Le principe de cette commande est similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée ; à savoir le contrôle indépendamment des puissances active et réactive générées au stator de la machine. La puissance active dépend uniquement du courant rotorique  $I_{rq}$ , et la puissance réactive dépend uniquement du courant  $I_{rd}$  (Figure III.1) [21].

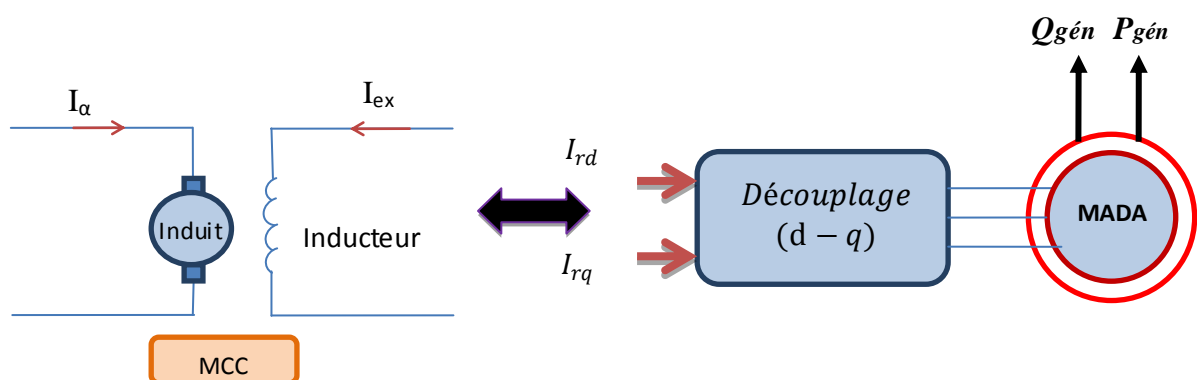


Figure III-1 : Principe de la commande vectorielle.

### III.3 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique :

Dans ce qui suit nous allons supposer que l'axe  $d$  du repère de Park est orienté suivant le flux statorique. Ce choix n'est pas au hasard mais il se justifie par le fait que la machine est souvent couplée à un réseau puissant de tension et de fréquence constante, ce qui entraîne un flux constant au stator de la machine. [16].

Rappelant le système d'équations différentielles (II.9), décrivant la machine asynchrone dans un repère lié au champ tournant qui est donné par :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega_r \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \omega_r \phi_{rd} \end{cases} \quad (III. 1)$$

#### III.3.1 Choix du référentiel pour le modèle diphasé

En appliquant la technique d'orientation du flux statorique sur le modèle de la machine en orientant le repère de Park pour que le flux statorique suivant l'axe  $q$  soit constamment nul (Figure II.2), nous pouvons écrire [22]. :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = \phi_s \\ \phi_{sq} = 0 \end{cases} \quad (III. 2)$$

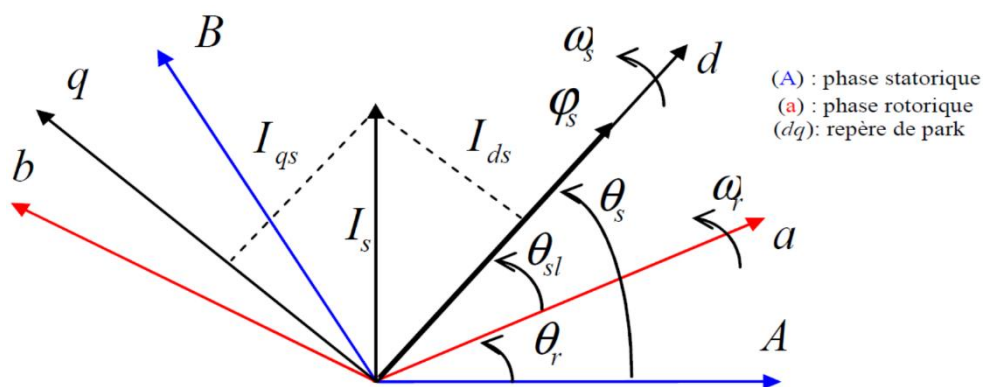


Figure III-2: Orientation de l'axe d sur le flux statorique.

A travers les équations (III.1) et (III.2) on peut simplifier par le systèmes d'équations comme suit[23]:

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \omega_s \varphi_s \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III. 3})$$

Si on néglige la résistance  $R_s$ , qui est une hypothèse souvent acceptée pour les machines de grande puissance utilisée dans la production d'énergie éolienne, les équations des tensions de la machine se réduisent à la forme suivante [24]:

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \varphi_s \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III. 4})$$

De la même manière que pour les tensions, les équations des flux deviennent :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = \varphi_s = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ 0 = L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{sd} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (\text{III. 5})$$

### III.3.2 Relation entre les courants statoriques et les courants rotoriques

A partir des équations (III.5), nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotorique :

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{\varphi_s}{L_s} + \frac{M}{L_s} I_{rd} \\ I_{sq} = -\frac{M}{L_s} I_{rq} \end{cases} \quad (\text{III. 6})$$

### III.3.3 Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques

Dans un repère biphasé, les puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (\text{III. 7})$$

L'adaptation de ces équations au système d'axe choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas donne :

$$\begin{cases} P_s = V_s I_{sq} \\ Q_s = V_s I_{sd} \end{cases} \quad (\text{III. 8})$$

En remplaçant les courants statoriques directs ( $I_{sd}$ ) et en quadratures ( $I_{sq}$ ) par leurs expressions (II.8), nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances active et réactive :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - V_s \frac{M}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad (\text{III. 9})$$

Il ressort de l'expression (III.9) 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  $\frac{V_s^2}{\omega_s L_s}$  imposée par le réseau [16].

### III.3.4 Relations entre les tensions rotoriques et les courants rotoriques :

A partir du système d'équation (III.6), les expressions des flux rotoriques peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + \frac{V_s M}{\omega_s L_s} \\ \varphi_{rq} = \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \end{cases} \quad (\text{III. 10})$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{rd}}{dt} - \omega_r \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{rq}}{dt} + \omega_r \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \frac{V_s M}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III. 11})$$

Avec :  $\omega_r = g\omega_s$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{rd}}{dt} - g\omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{rq}}{dt} + g\omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \frac{V_s M}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III. 12})$$

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

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} - g\omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + g\omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \frac{V_s M}{L_s} \end{cases} \quad (III.13)$$

En appliquant la transformation de Laplace à ces deux équations, on obtient[16]:

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} - g\omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + g\omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} + g \frac{V_s M}{L_s} \end{cases} \quad (III.14)$$

Avec :

- $V_{rd}$  Et  $V_{rq}$  : Sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques désirés.
- $g$  : Coefficient de glissement.
- $\left( \frac{V_s M^2}{L_s} \right)$  : Est le terme de couplage entre les deux axes. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser.
- $g \left( \frac{M^2}{L_s} \right)$  : Représente une force électromotrice dépendant de la vitesse de rotation.

A partir des systèmes d'équations (III.9) et (III.14), nous pouvons élaborer le modèle de la machine MADA pour le contrôle des puissances tel qu'il est présenté par le schéma bloc (figure III.3).

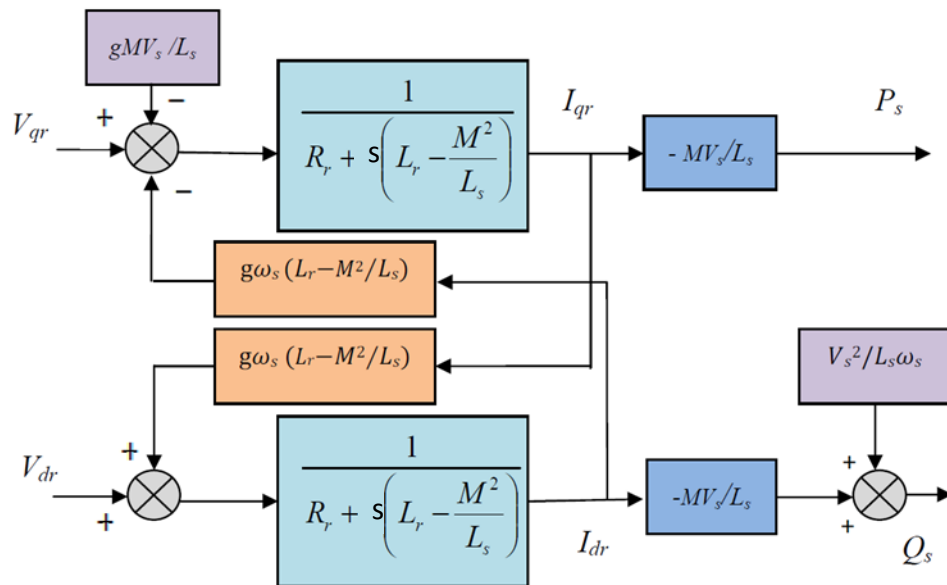


Figure III-3: Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances (système interne).

Ce schéma fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances actives et réactive statoriques. Il montre également que nous pouvons mettre en place une commande vectorielle étant donné qu'à l'influence des couplages près de chaque axe peut être commandé indépendamment avec chacun son propre régulateur. Les grandeurs de références pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe  $q$  rotorique et la puissance active pour l'axe  $d$  rotorique. La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau. La consigne de puissance active devra permettre de garder le coefficient de puissance de l'éolienne optimal.

### III.4 Types de commande de la MADA

L'utilisation de la commande vectorielle des machines asynchrones à double alimentation dans les applications dans l'énergie éolienne nécessite une haute performance dynamique concernant la commande du couple et de la vitesse. Pour cela, nous devons connaître, avec exactitude, le vecteur flux statorique (amplitude et phase).

Deux méthodes ont été développées soit :

- La commande vectorielle directe.
- La commande vectorielle indirecte [14].

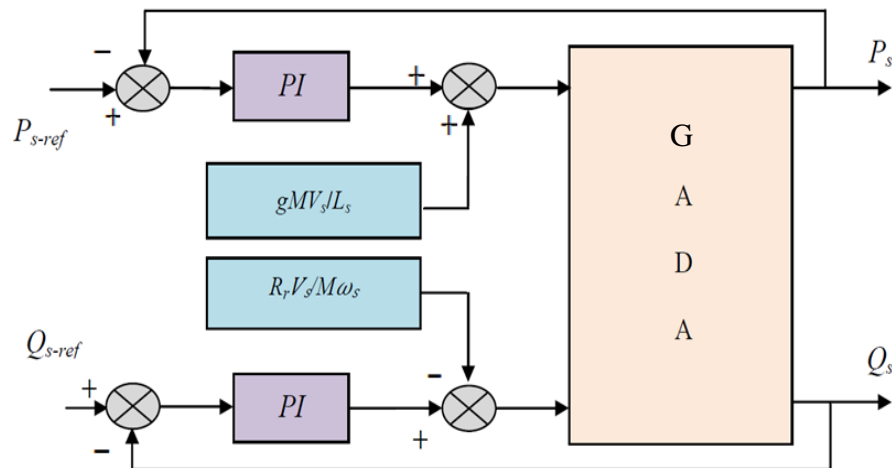
#### III.4.1 Commande vectorielle directe

Le flux rotorique est mesuré à partir de capteurs à effet hall placés sous les dents du stator. Ces capteurs donnent des valeurs locales du flux. Il faut ensuite traiter ces valeurs pour obtenir le flux global.

Cette méthode présente des inconvénients au niveau de la fiabilité de la mesure soit :

- Le problème de filtrage du signal mesuré.
- La mesure varie en fonction de la température.
- Le coût de production est élevé. (Capteurs, conditionneurs, filtre,...).

Cette commande n'est donc pas optimale [14].



**Figure III-4** : La commande directe du Modèle de la GADA pour le contrôle des puissances.

### III.4.2 Commande vectorielle indirecte :

La commande indirecte est basée sur le principe à ne pas mesurer (ou estimer) l'amplitude du flux mais seulement sa position. Elle consiste à estimer la position du vecteur du flux, et de régler son amplitude en boucle ouverte. Les tensions ou les courants assurant l'orientation du flux et le découplage sont évalués à partir d'un modèle de la machine en régime transitoire. Cette méthode a été favorisée par le développement des micro processeurs, elle est très sensible aux variations paramétriques de la machine. Il est important de souligner que la méthode indirecte est la plus simple à réaliser et la plus utilisée que la méthode directe, mais le choix entre les deux méthodes varie d'une application à l'autre [25].

#### III.4.2.1 Commande indirecte sans boucle de puissance :

Dans le souci de garantir une bonne stabilité du système nous introduisons une boucle de régulation des courants rotoriques dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer à la machine. On établit ainsi le système de régulation utilisé de la figure III.3[26].

Cette commande consiste à réguler les courants par une boucle dans chaque axe. Les consignes de régulation sont déduites à partir des valeurs de références telles qu'illustrées dans la figure III.5.

Les régulateurs de cette structure sont calculés de la même façon que pour la commande directe. Ils sont identiques pour chaque axe.

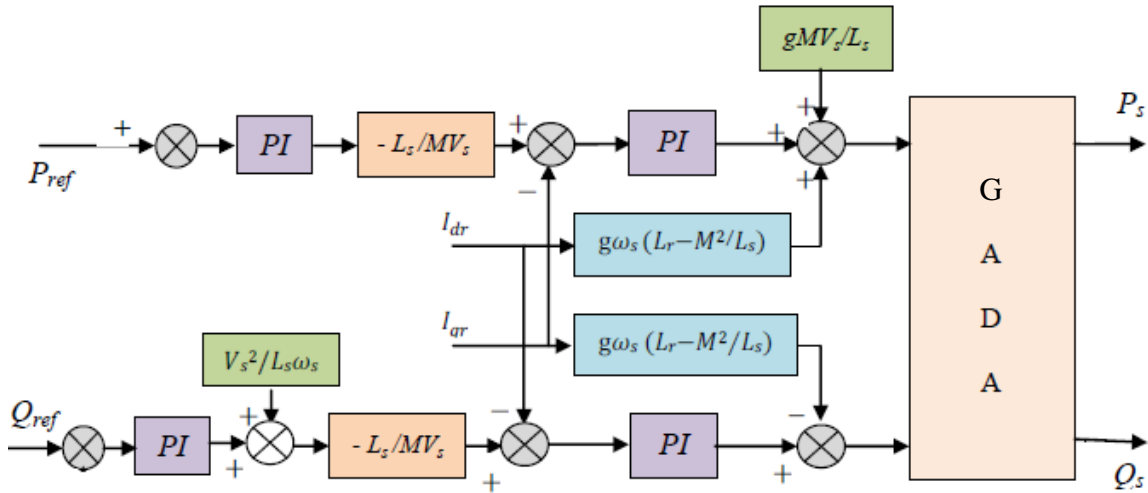


Figure III-5 : Commande indirecte sans boucle de puissance.

III.4.2.2 Commande indirecte avec boucle de puissance :

Dans le but d'améliorer la commande précédente, nous allons introduire une boucle de régulation supplémentaire au niveau des puissances afin d'éliminer l'erreur statique tout en préservant la dynamique du système.[26]

Nous aboutissons au schéma bloc présenté en (figure III.6) sur lequel on distingue bien les deux boucles de régulation pour chaque axe, l'une contrôlant le courant et l'autre la puissance. Ce type de régulation donne une dynamique satisfaisante et une erreur statique nulle.

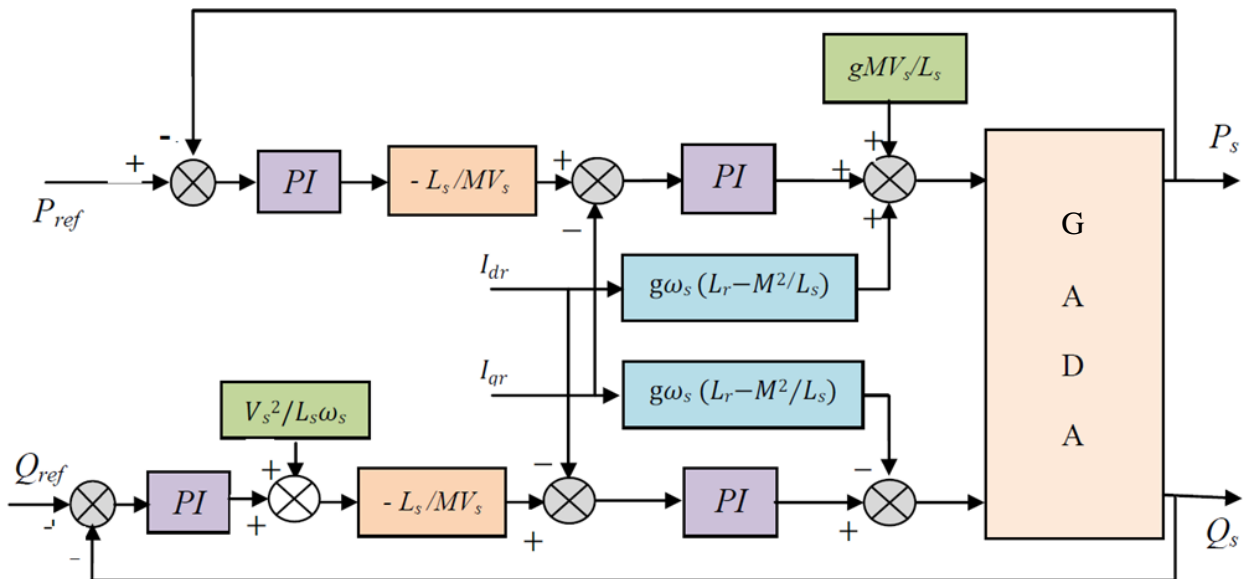
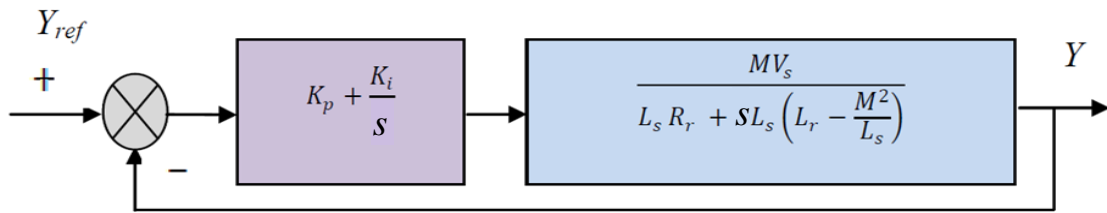


Figure III-6 : Commande indirecte avec boucle de puissance.

**III.4.3 Synthèse de régulateur PI :**

Le régulateur Proportionnel-Intégral (PI) utilisé pour commander la MADA en génératrice, est simple et rapide à mettre en œuvre tout en offrant des performances acceptables [22][26]. C’est pour cela qu’il a retenu notre attention pour une étude globale du système de régulation éolien. La figure III.7 montre une partie de notre système bouclé et corrigé par un régulateur (PI) dont la fonction de transfert est de la forme  $K_p + \frac{K_i}{s}$  correspondant aux régulateurs utilisés dans la figure III.4, la figure III.5 et la figure III.6.



**Figure III-7 :** Système régulé par un PI

La Fonction de Transfert en Boucle Ouverte (FTBO) avec le régulateur PI s’écrit de la manière suivant :

$$FTBO = \left( \frac{s + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{s}{K_p}} \right) \cdot \frac{\frac{MV_s}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{s + \frac{L_s R_r}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}} \tag{III. 15}$$

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

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{L_s R_r}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \tag{III. 16}$$

Après la compensation, on obtient la fonction FTBO suivante :

$$FTBO = K_p \frac{MV_s}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} / s \tag{III. 17}$$

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

$$FTBF = \frac{1}{1 + s \tau_r} \tag{III. 18}$$

Avec :

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

Le terme  $\tau_r$  désigne ici la constante du temps du système. On peut désormais exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse :

$$K_p = \frac{1}{\tau_r} \frac{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{MV_s} \tag{III.19}$$

$$K_i = \frac{1}{\tau_r} \frac{R_r L_s}{MV_s} \tag{III.20}$$

### III.5 Prise en compte de l'onduleur côté rotor

Le rotor de la MADA est connecté au bus continu par l'intermédiaire d'un onduleur de tension. La tension de sortie de ce dernier est contrôlée par une technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) qui permet le réglage simultané de la fréquence et de la tension de sortie de l'onduleur.

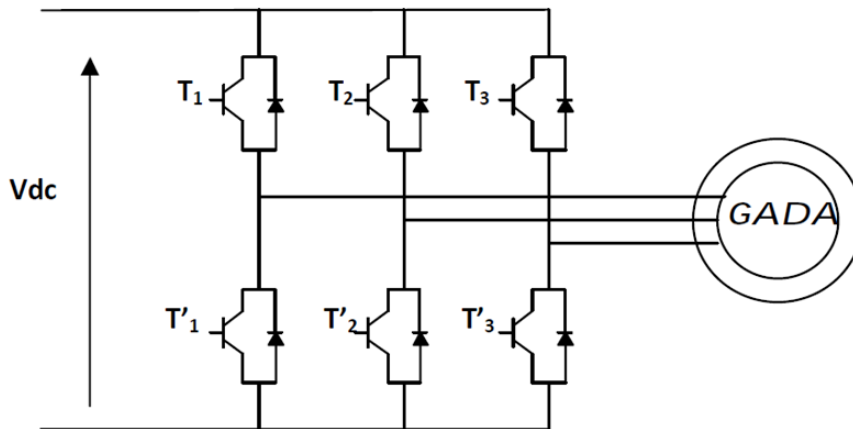


Figure III-8 : Représentation d'un onduleur à deux niveaux

### III.6 Modulation de largeur d'impulsion MLI :

Elle consiste à convertir une modulante (tension de référence au niveau commande), généralement sinusoïdale, en tension sous forme de créneaux successifs, générée à la sortie de l'onduleur (niveau puissance). Au niveau électronique, son principe repose sur la comparaison de la modulante avec la porteuse (tension à haute fréquence de commutation). [19]

Pour exprimer les tensions de lignes en fonction de la tension dans l'étage continu et de l'état des commutateurs, les variables  $S_a$ ,  $S_b$  et  $S_c$  se doivent d'être définies en fonction de l'état des commutations dans les trois branches :

➤ Branche 1 :

$S_a=0$  Si S1 est ouvert et S4 est fermé ;

$S_a=1$  Si S1 est fermé et S4 est ouvert.

➤ Branche 2 :

$S_b=0$  Si S2 est ouvert et S5 est fermé ;

$S_b=1$  Si S2 est fermé et S5 est ouvert.

➤ Branche 3 :

$S_c=0$  Si S3 est ouvert et S6 est fermé ;

$S_c=1$  Si S3 est fermé et S6 est ouvert.

Les tensions composées à la sortie du convertisseur s'expriment alors par :

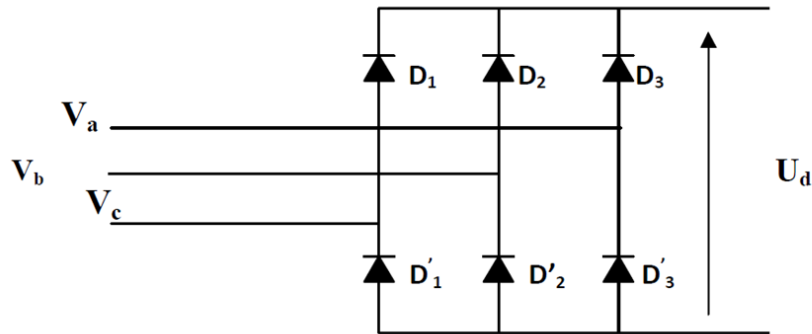
$$\begin{cases} U_{ab} = V_{dc} (S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{dc} (S_b - S_c) \\ U_{ca} = V_{dc} (S_c - S_a) \end{cases} \quad (\text{III. 21})$$

Or, si on considère que les tensions sont équilibrées on peut déduire les expressions des tensions en lignes par rapport aux tensions composées :

$$\begin{cases} V_a = 1/3 (U_{ab} - U_{cd}) \\ V_b = 1/3 (U_{bc} - U_{cb}) \\ V_c = 1/3 (U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (\text{III. 22})$$

### III.7. Convertisseur coté réseau (redresseur à diodes) :

Les redresseurs sont des convertisseurs de l'électronique de puissance qui assurent la conversion alternative-continu. On utilise un redresseur chaque fois qu'on a besoin de source continue sachant que l'énergie électrique est disponible en alternative. Les redresseurs ont un très vaste domaine d'application mais malheureusement leur inconvénient major est qu'ils envoient au réseau des courants non sinusoïdaux riches en harmonique. Nous utilisons un pont triphasé à diodes alimenté par un système de tension sinusoïdale triphasée, la structure de ce redresseur est représentée par la (figure III.9).



**Figure III-9** : Représentation d'un redresseur à diodes.

Deux diodes d'un même bras ne peuvent conduire simultanément. Lorsque  $D_1$  conduit, l'une des deux diodes  $D'_2$  et  $D'_3$  conduit également. Il en vient que  $D_1$  conduit lorsque  $V_1$  est supérieur à  $V_2$  et  $V_3$ , ou encore :

$$V_1 = \text{Max}(V_j) \text{ avec } j = 1, 2, 3.$$

Le même raisonnement conduit aux conditions suivantes :

$$D_i \text{ conduit si } V_i = \text{Max}(V_j) \text{ avec } i=1,2,3 ; j=1,2,3.$$

$$D'_i \text{ conduit si } V'_i = \text{Max}(V_j) \text{ avec } i=1,2,3 ; j=1,2,3.$$

Pendant chaque séquence de conduction, la tension  $U_d$  à la sortie du redresseur est :

$$U_d = \text{Max}(V_j) - \text{Min}(V_j) \text{ avec } j=1,2,3.$$

La tension obtenue par ce redresseur présente des ondulations importantes, ce qui nécessite l'utilisation d'un filtre passif.

### III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons pu présenter la commande vectorielle que nous allons utiliser pour l'intégration d'une turbine éolienne dans un réseau électrique, nous avons ainsi donné un aperçu sur les différentes techniques existantes, qui permettent une commande adéquate de la puissance active et réactive de la MADA.

## ***CHAPITRE IV :***

### ***Simulations et résultats***

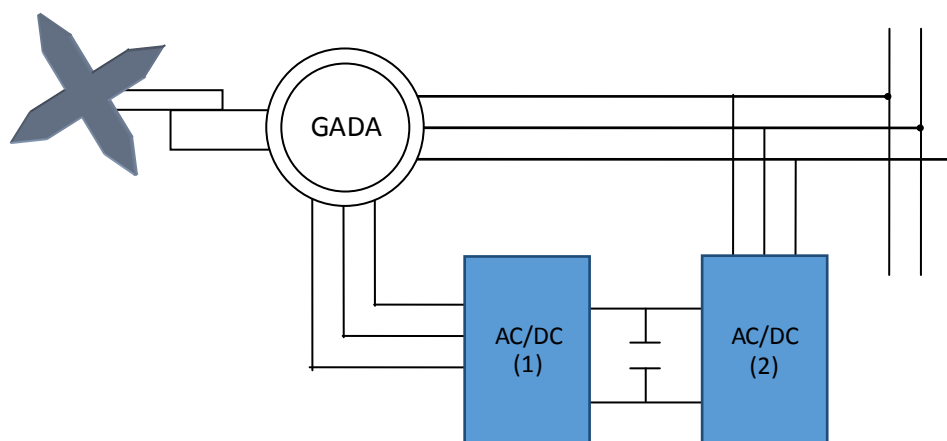
## VI.1 Introduction

Dans ce dernier chapitre, nous allons dans un premier temps l'architecture du système proposé avec les configurations possibles que nous pouvons en tirer, ensuite nous allons présenter les différentes simulations réalisées pour plusieurs scénarios possibles que nous avons choisies, aussi nous allons montrer les différents résultats des commandes que nous avons élaborées.

## VI.2 Architecture du système

Différentes architectures peuvent être proposées pour l'utilisation de l'énergie éolienne pour la génération de l'électricité ; elles peuvent être hybride et intégrer d'autres sources d'énergie, ou des moyens de stockage électrochimique ou mécanique. Nous allons nous intéresser dans cette étude à une architecture très utilisée dans les moyennes et grandes puissances, elle permet d'injecter l'énergie électrique produite directement dans le réseau électrique de distribution, à travers l'utilisation d'une machine électrique de type asynchrone à double alimentation.

Dans la figure ci-dessous nous pouvons voir les principaux éléments de l'architecture choisie.



**Figure IV-1:** Architecture d'un système de génération éolienne.

Cette architecture est basée sur l'utilisation de deux convertisseurs de puissance de type alternatif/continu. Le choix du fonctionnement de chaque convertisseur permet différentes configurations, où le flux de puissance traversant les différents composants du système permet un fonctionnement optimal et un rendement meilleur.

Pour ce faire, nous avons choisi la configuration où le convertisseur (1) et en mode onduleur et le convertisseur (2) en mode redresseur, ceci permet à la GADA de toujours travailler en mode hypo-synchrone.

### IV.3 Simulation du système sans turbine

Pour comprendre le fonctionnement du système, et pour optimiser son fonctionnement nous allons commencer par déconnecter la turbine et la remplacer par une source de couple et continue. Ceci afin de vérifier le dimensionnement de la machine et la justesse de la commande.

#### IV.3.1 Résultat de simulation sans redressement :

Pour :

$$V_{dc} = 380 \text{ V.}$$

$$T_m = -40 \text{ N. m.}$$

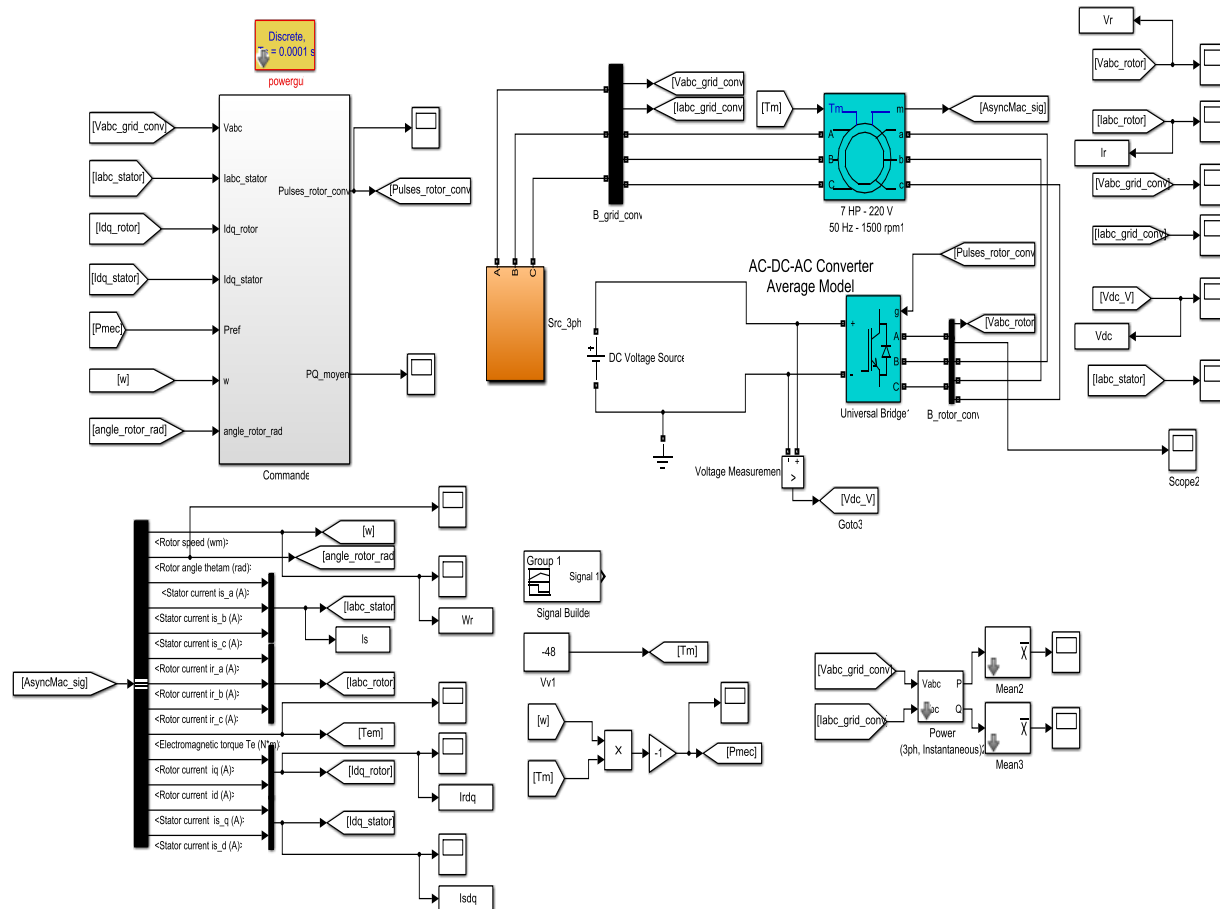


Figure IV-2 : Schéma block du model sans turbine et sans redressement par Matlab/Simulink.

Les premiers résultats montrent la vitesse rotationnelle rotorique qui est proche de la vitesse de synchronisme (157rad/s).

Et la puissance active mesurée qui suit la puissance mécanique de référence.

Cette puissance mécanique est celle fourni par la turbine voire le figure (IV-2) et figure (IV-7).

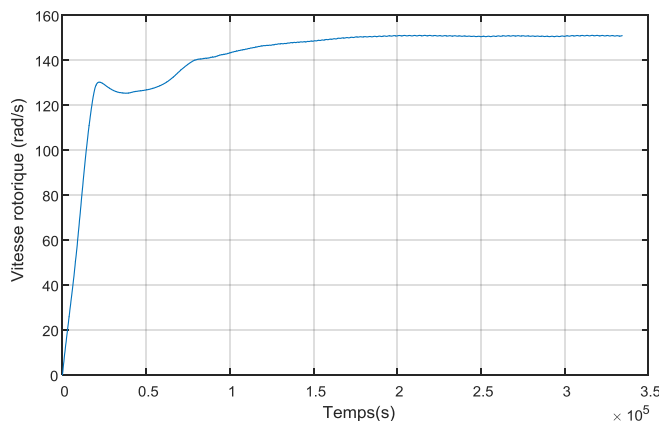


Figure IV-3 : la vitesse rotorique(rad/s).

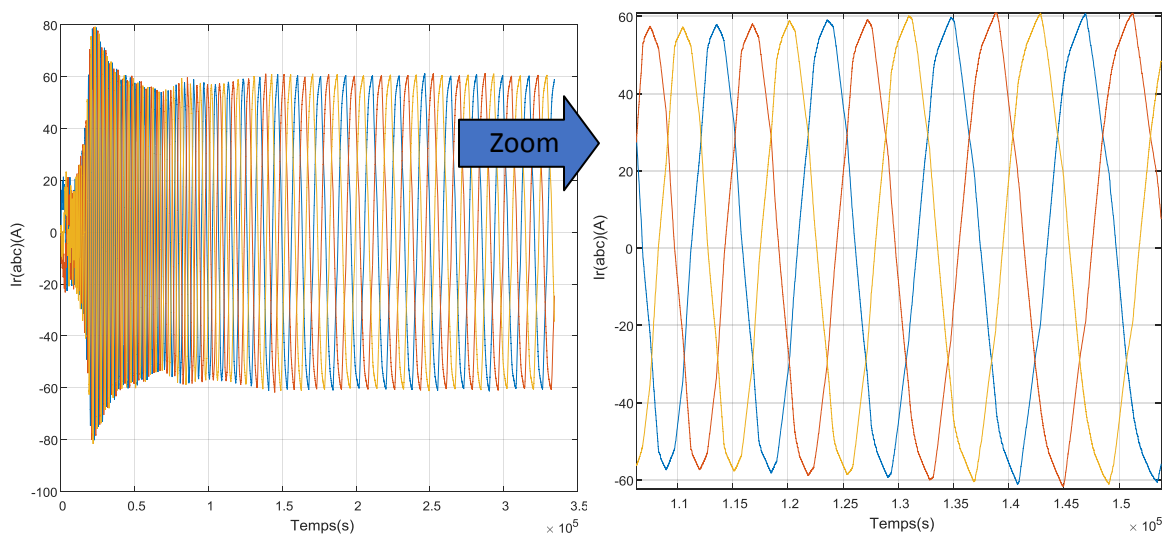


Figure IV-4 : Courant rotorique dans le repère abc.

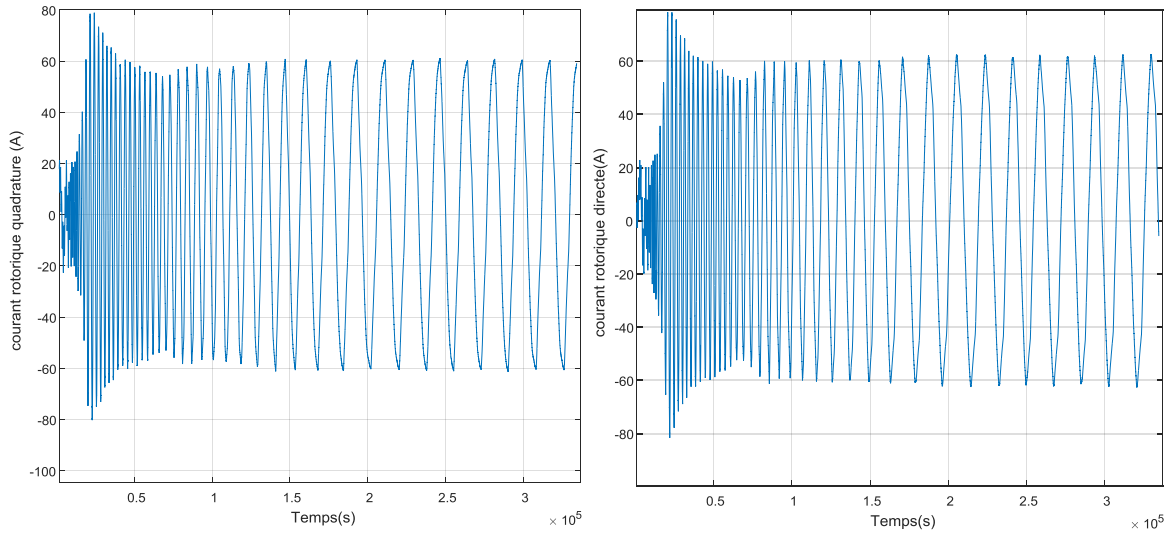


Figure IV-5 : Les courant rotorique quadrature et directe

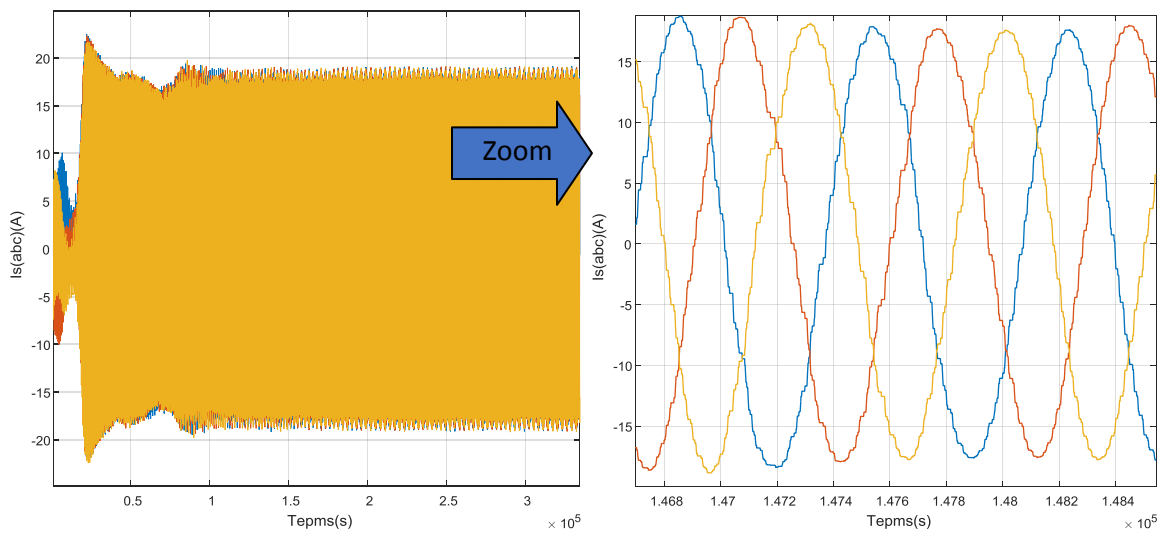


Figure IV-6 : Courant statorique dans le repère abs.

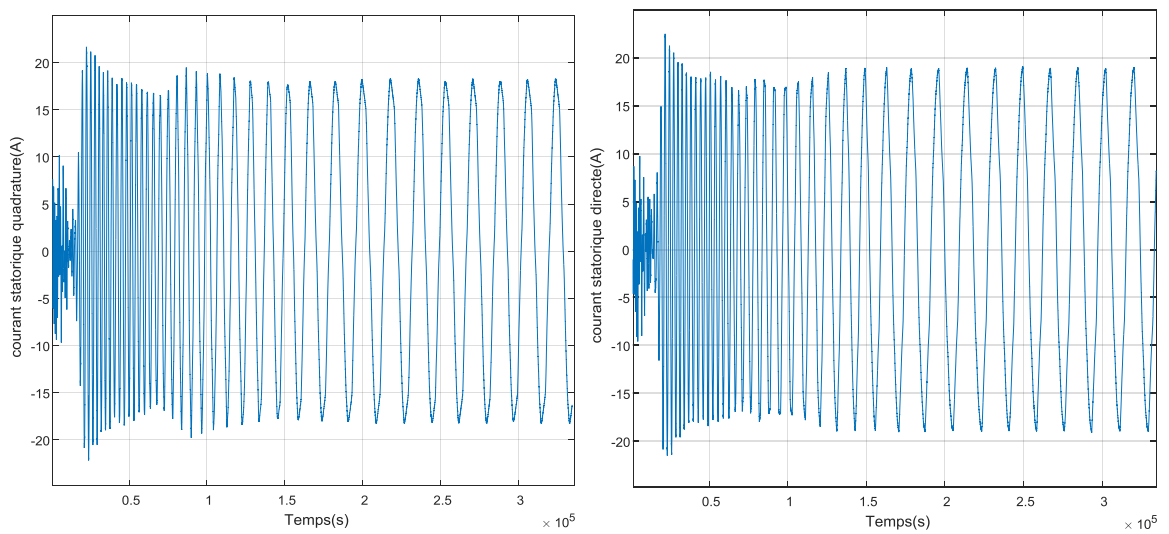
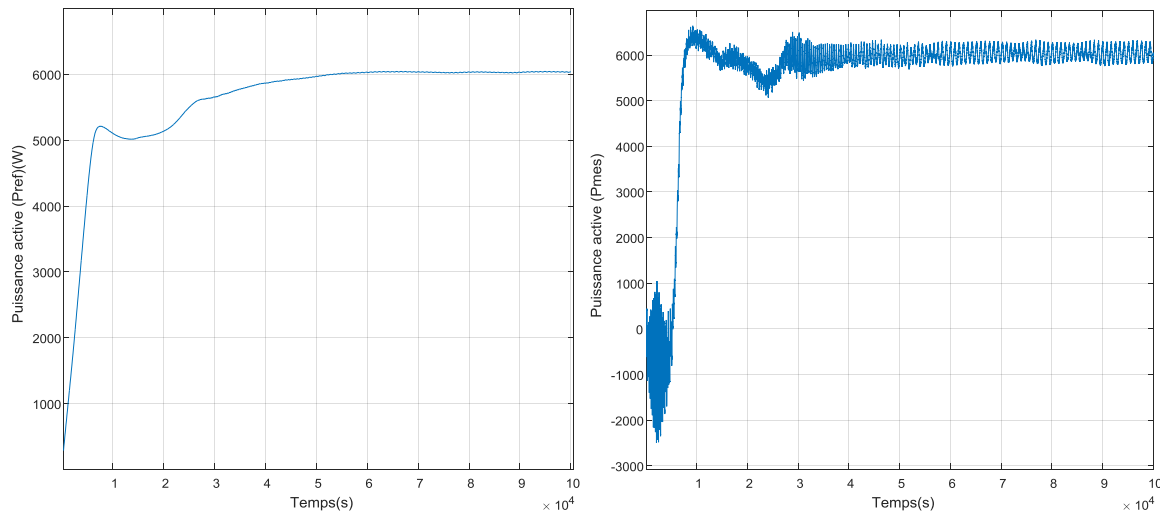


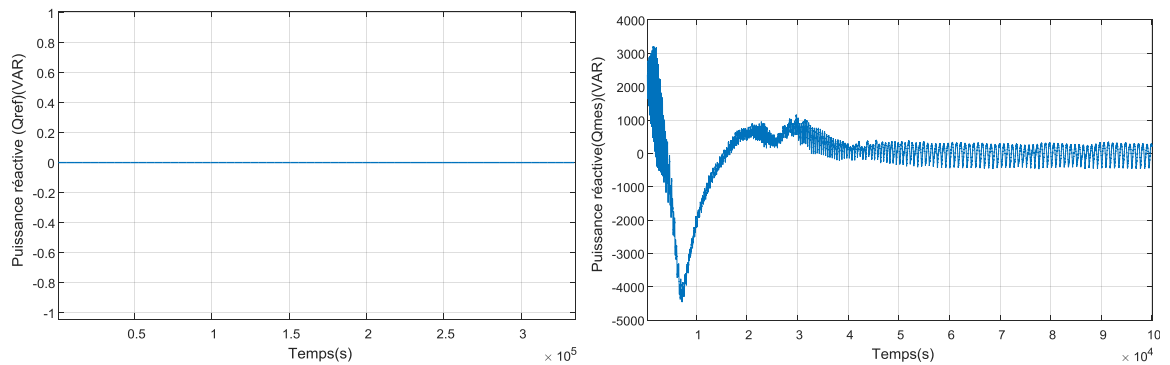
Figure IV-7 : Les courant statorique quadrature et directe



**Figure IV-8** : Les puissance active statorique (Pref)et(Pmes)

Aussi la puissance réactive tend vers la puissance réactive de référence (qui est égale à 0),

Voir le figure(IV-8).



**Figure IV-9** : les puissance réactive statorique (Qref) et (Qmes).

**IV.3.2 Résultat de simulation avec redressement :**

Pour :

$$T_m = -48 \text{ N.m.}$$

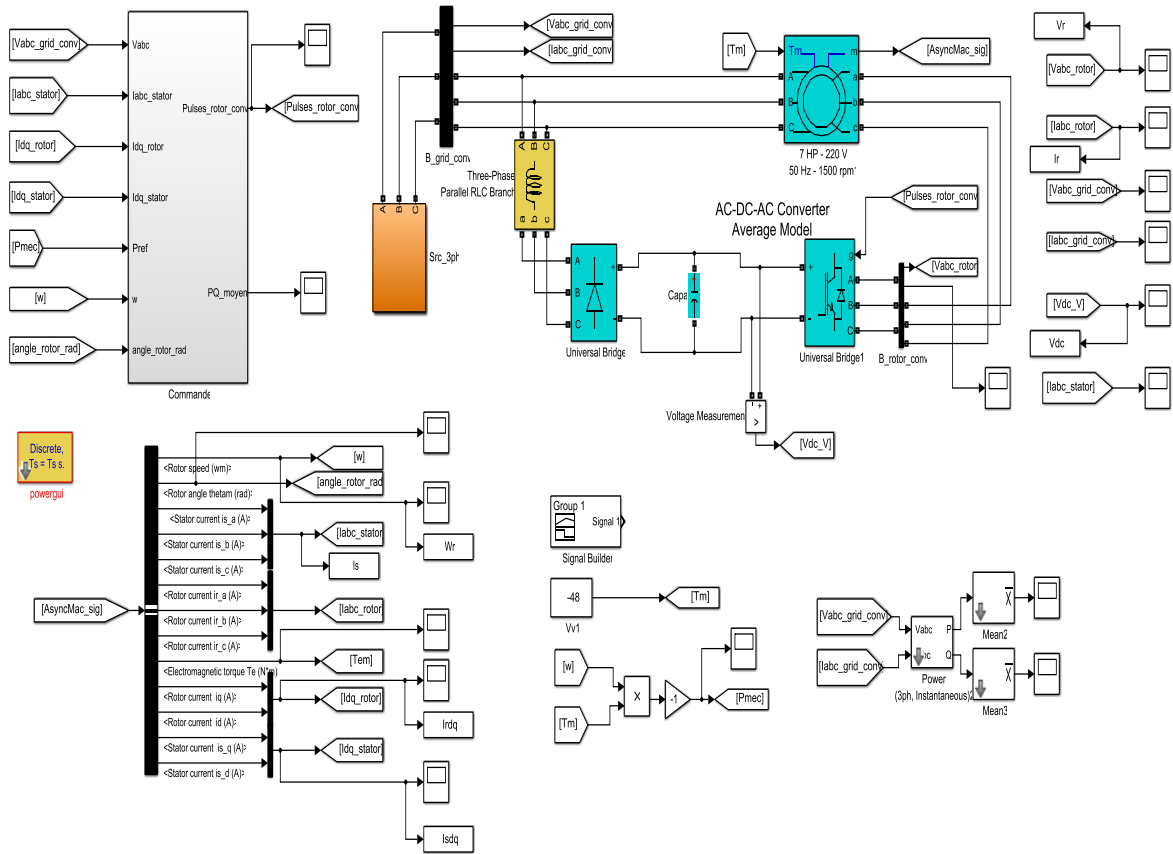


Figure IV-10 : Schéma block du model sans turbine et aves redressement par Matlab/Simulink

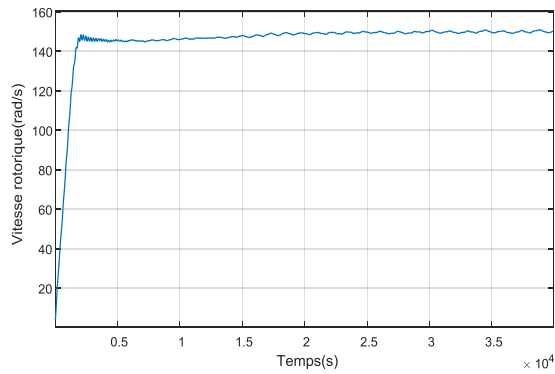


Figure IV-11 : Vitesse rotorique (rad/s)

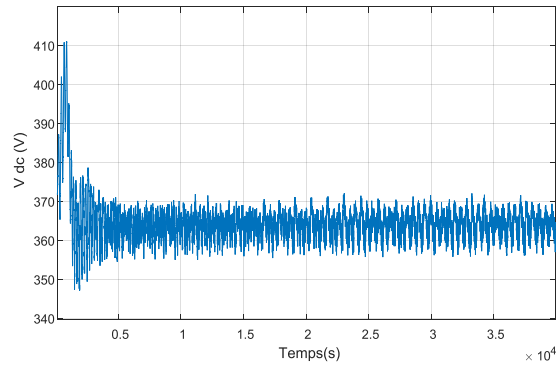


Figure IV-12 : La tension de bus contenu (V).

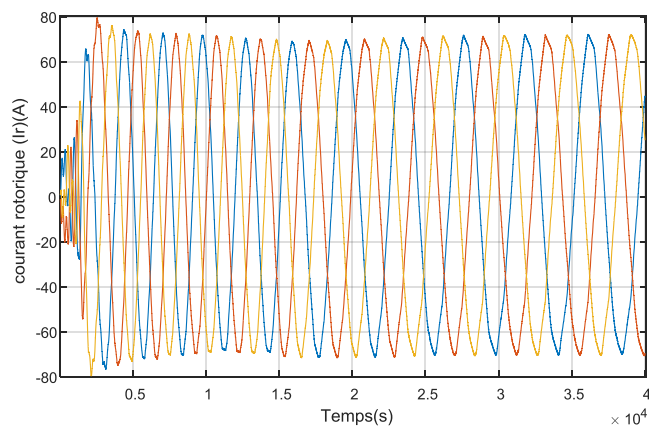


Figure IV-13 : Les courant rotorique dans le repère abc (A).

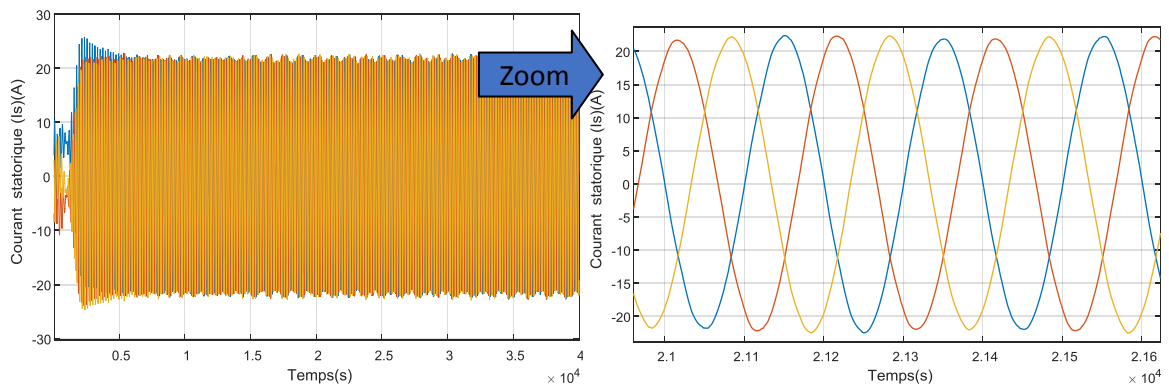


Figure IV-14 : Les courant statorique dans le repère abc (A).

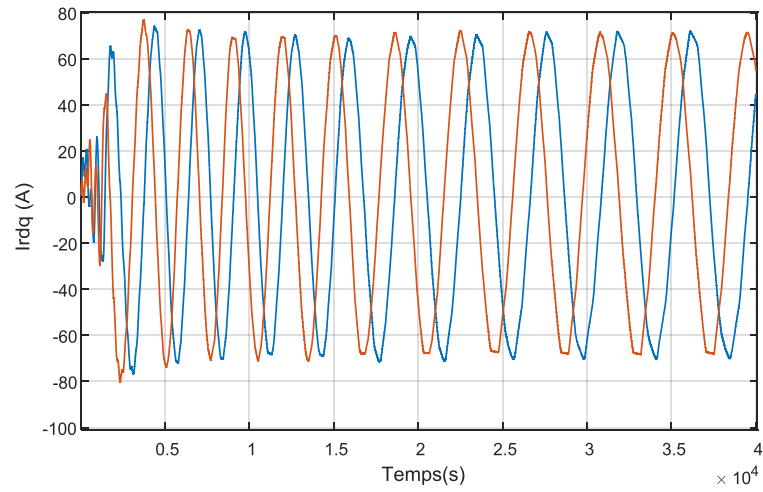


Figure IV-15 : Les courant rotorique directe et quadrature (A).

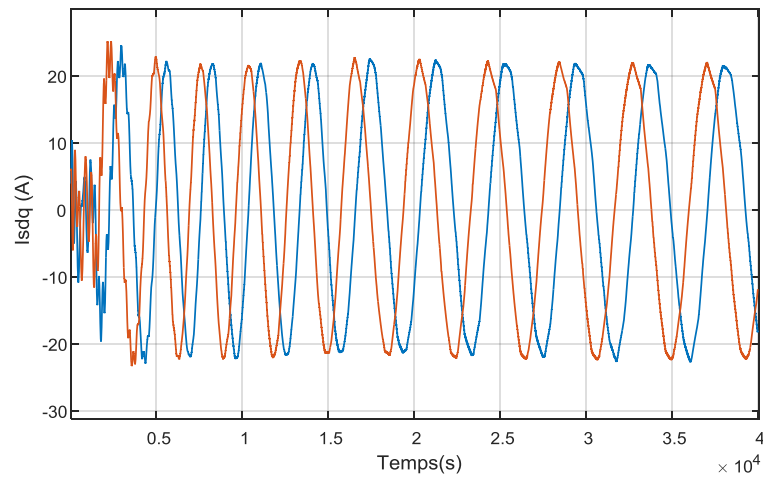


Figure IV-16 : Les courant statorique directe et quadrature (A).

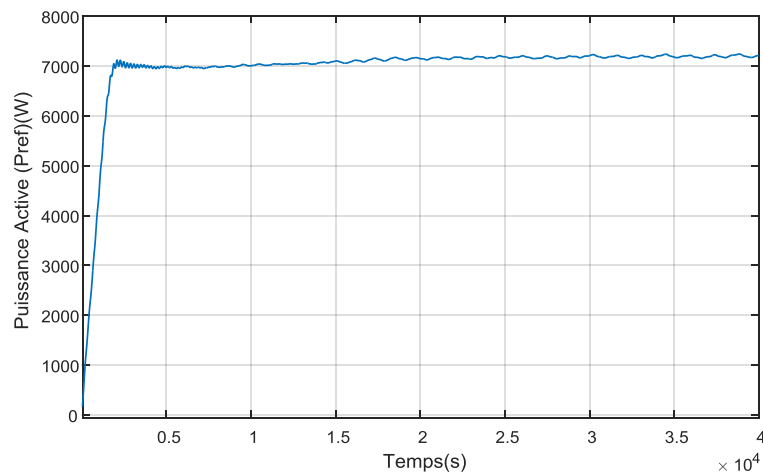
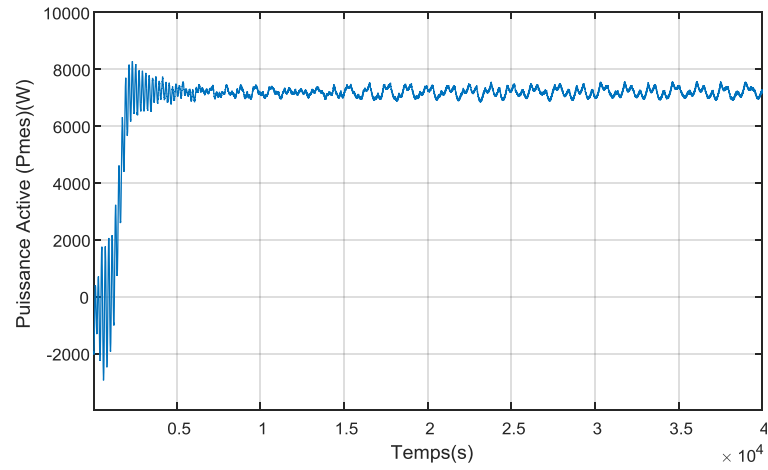
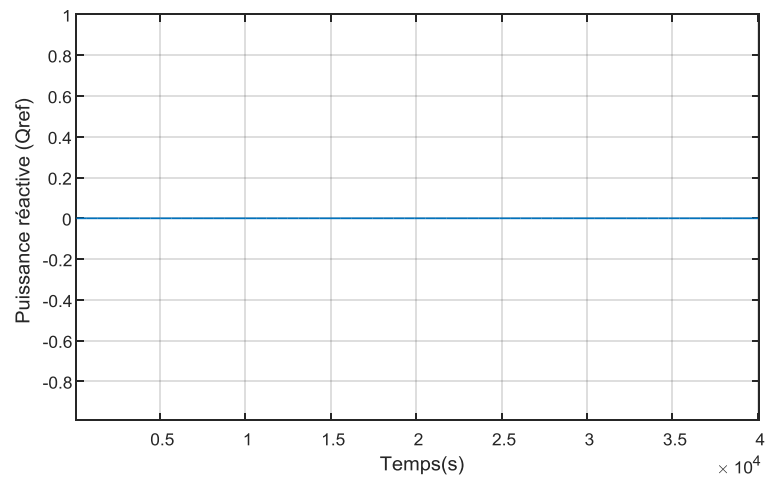


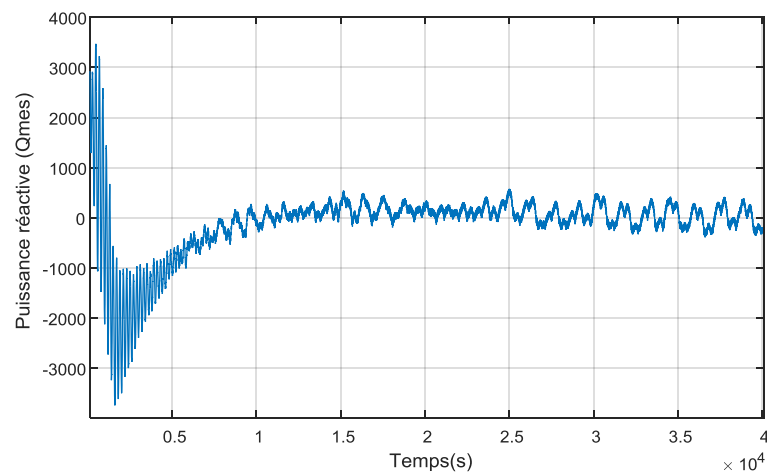
Figure IV-17 : La puissance active de référence (W).



**Figure IV-18** : La puissance active mesurée (W).



**Figure IV-19** : La puissance réactive de référence (VAR).



**Figure IV-20** : La puissance réactive mesurée (VAR).

## IV.4 Simulation du système avec turbine :

### IV.4.1 avec commande direct :

Dans ce qui suit, nous allons présenter les résultats de simulation du modèle de la machine asynchrone à double alimentation intégrée dans un système éolien. Nous avons choisi un profil du vent pour une période de 4 et 10 secondes, afin d'avoir une puissance active de référence, La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle de façon à garder un facteur de puissance unitaire côté stator. Les figures ci-dessous montrent les performances de la commande vectorielle directe et indirecte en puissance actives et réactives statorique appliquée à la MADA intégrée dans un système éolien.

#### IV.4.1.1 à vitesse du vent fixe :

Pour :  $V_v = 14 \text{ m/s}$ .

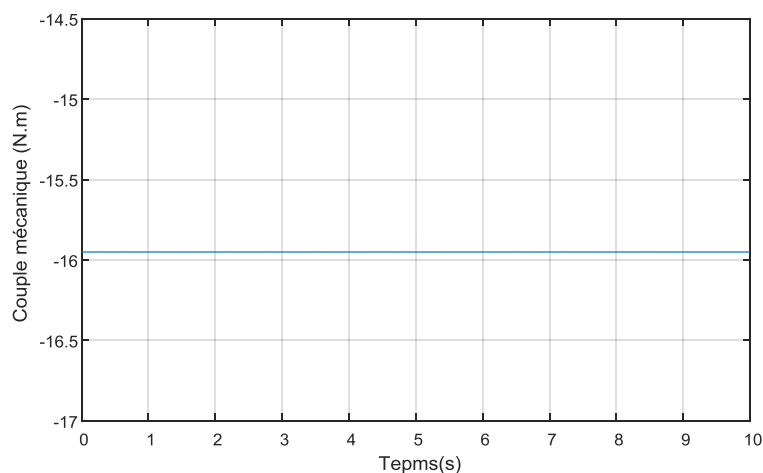


Figure IV-21 : Couple mécanique (N.m)

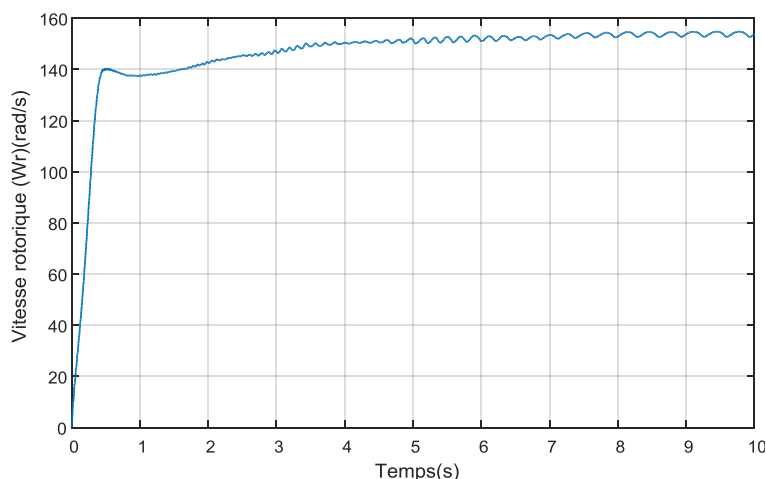
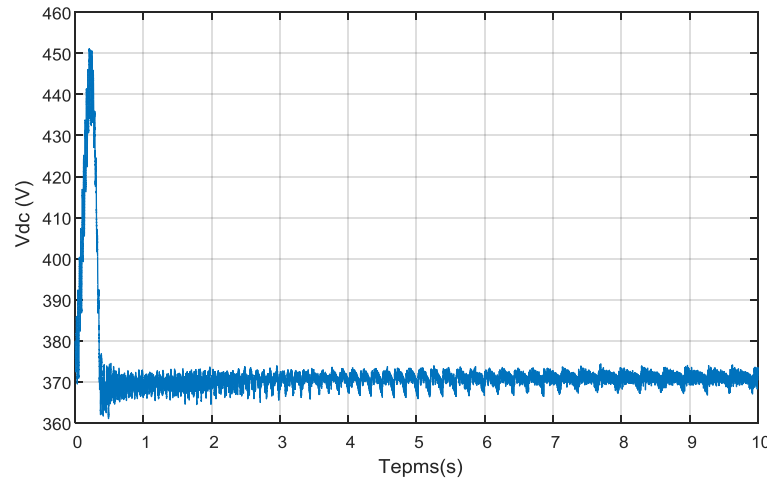
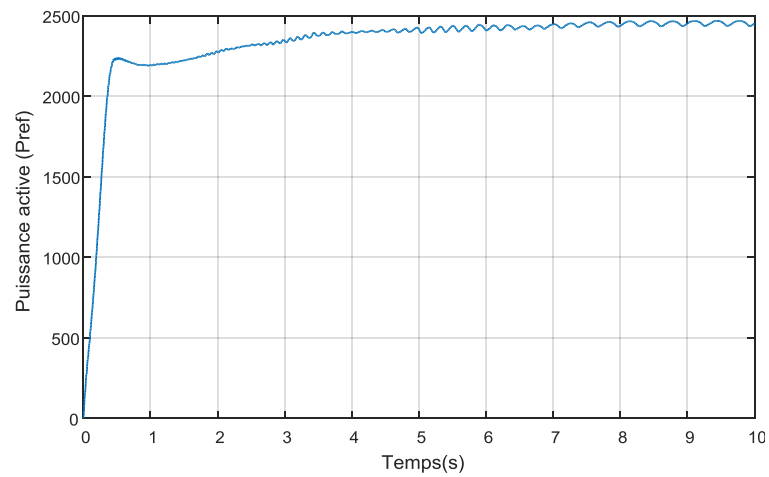


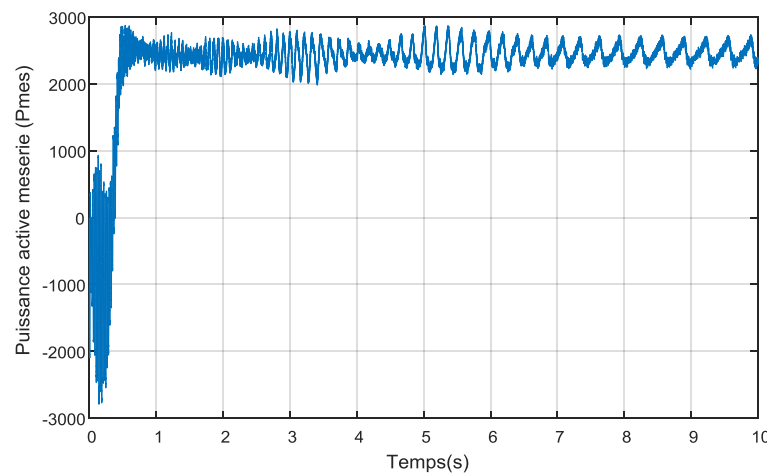
Figure IV-22 : Vitesse rotorique (rad/s).



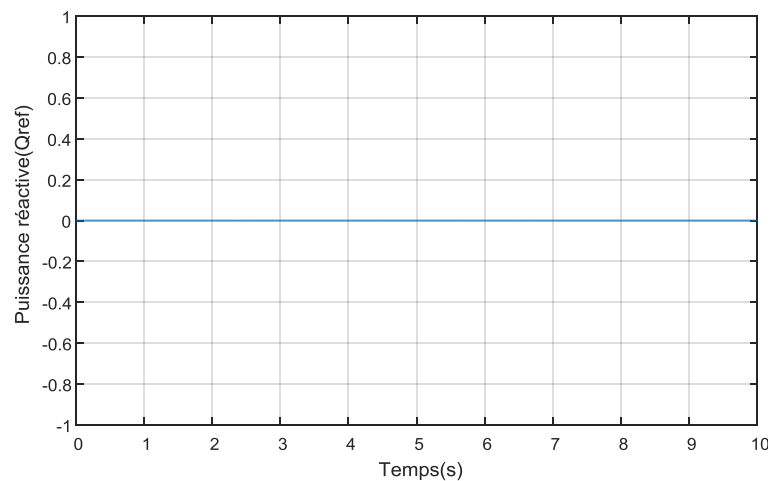
**Figure IV-23** : Tension de bus contenu (V).



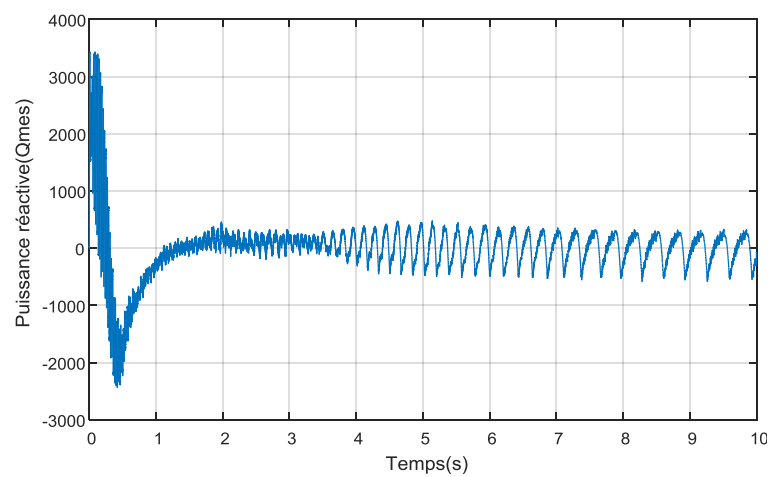
**Figure IV-24** :Puissance active de référence (Pref) (W).



**Figure IV-25** :Puissance active mesurée (Pmes) (W).



**Figure IV-26** :Puissance réactive de référence ( $Q_{ref}$ ) (VAR).



**Figure IV-27** :Puissance réactive mesurée ( $Q_{mes}$ ) (VAR).

IV.4.1.2 à vitesse du vent variable :

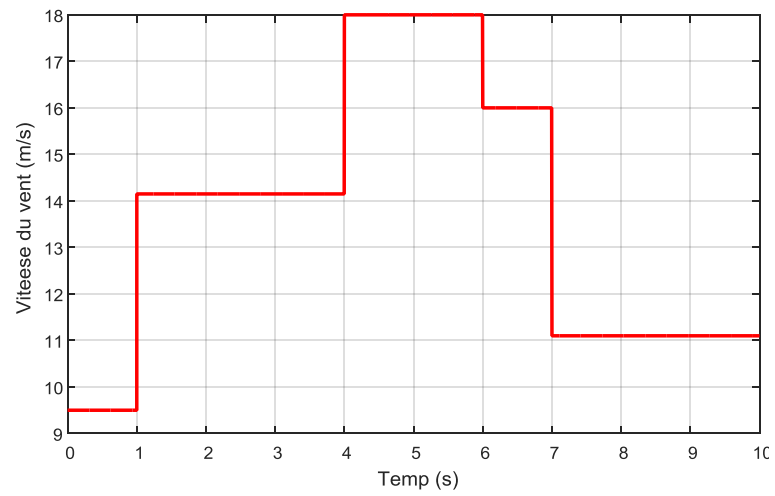


Figure IV-28 : Le profil de la vitesse du vent

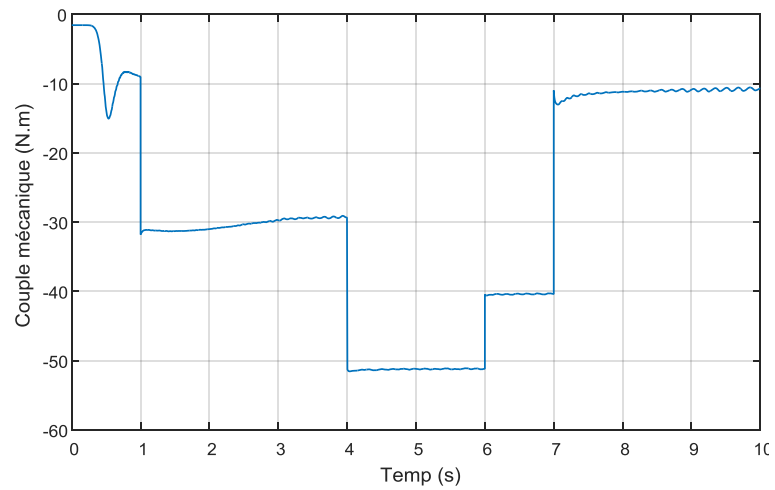


Figure IV-29 : Couple mécanique (N.m)

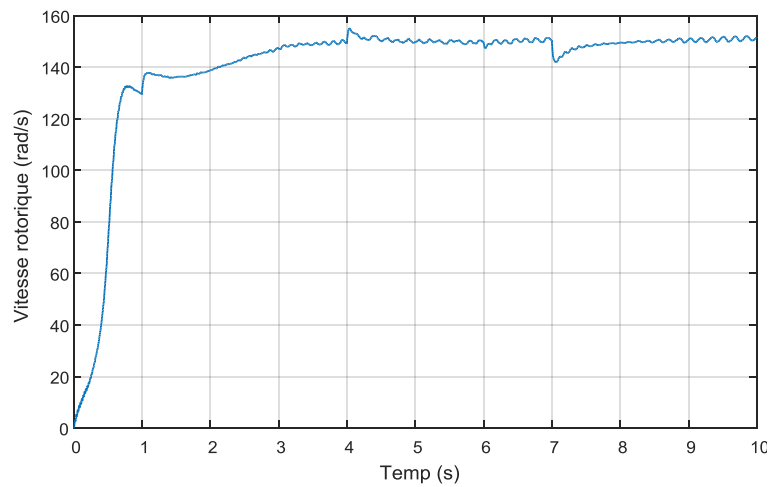
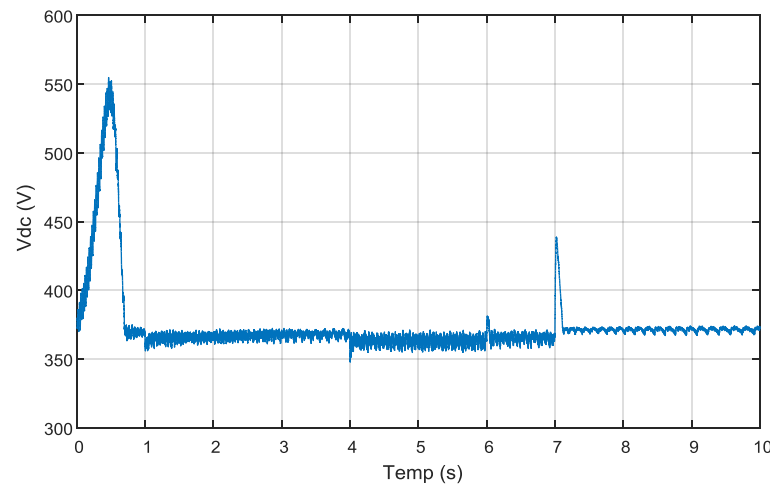
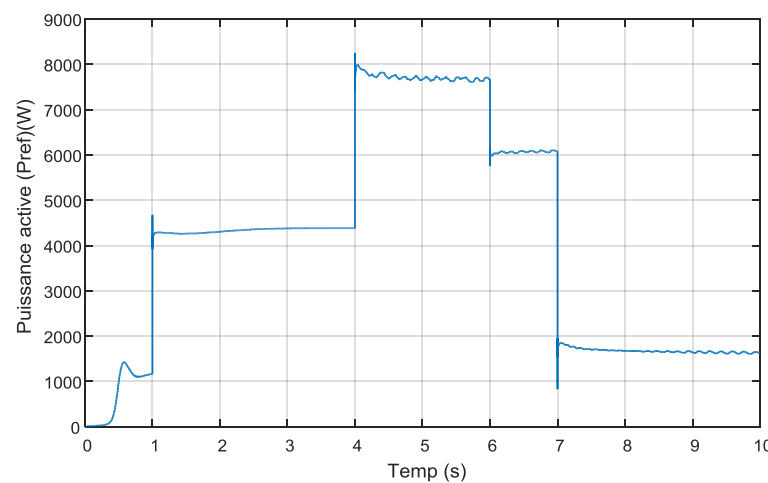


Figure IV-30 : Vitesse rotorique (rad/s).

Dans ce deuxième test nous avons fait varier la vitesse de vent, et nous avons relevé que la vitesse rotationnelle du rotor reste toujours en hypo-synchronisme voire le figure (IV-28) et figure (IV-30).



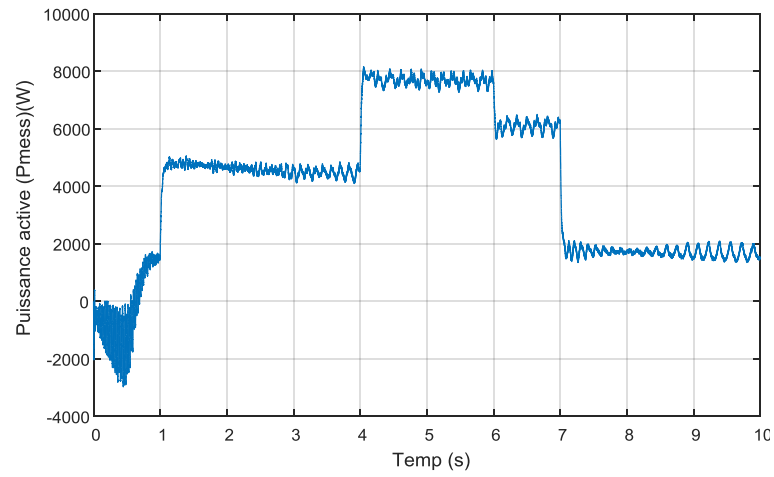
**Figure IV-31** : La tension de bus contenu(V).



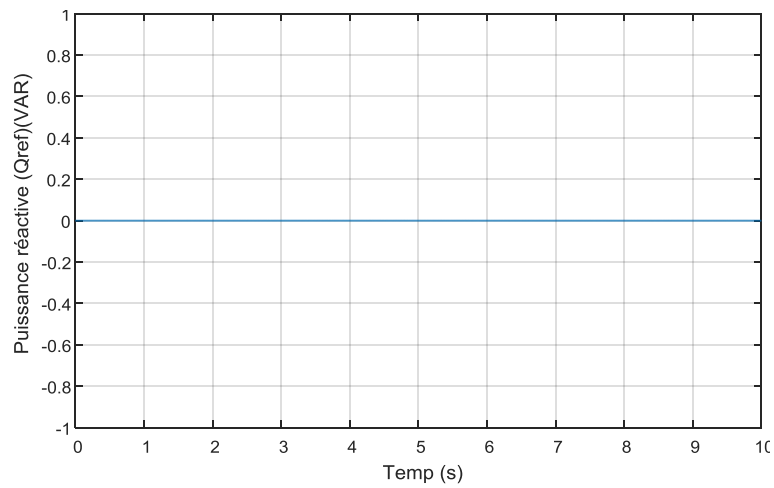
**Figure IV-32** : Les puissance active ( $P_{ref}$ )

Nous remarquons sur ces courbes que la puissance électrique produite suit la forme de la puissance mécanique de référence, et la puissance réactive varie au tours de zéro.

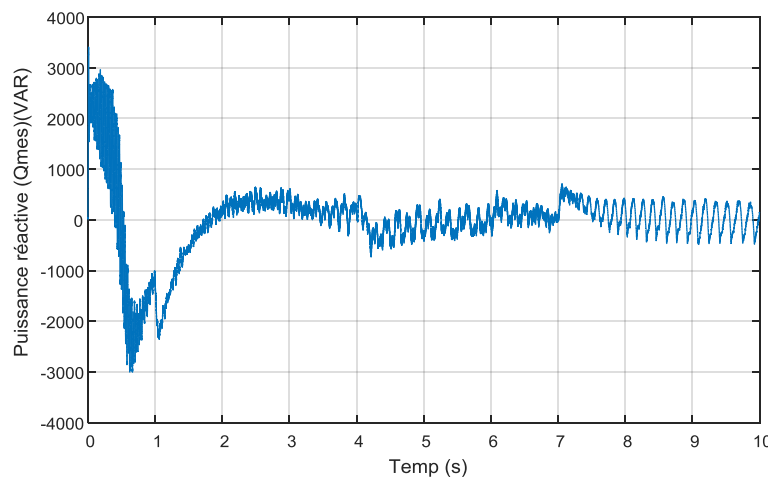
Voir le figure (IV-32) et le figure (IV-33) et le figure (IV-34) et le figure (IV-35) .



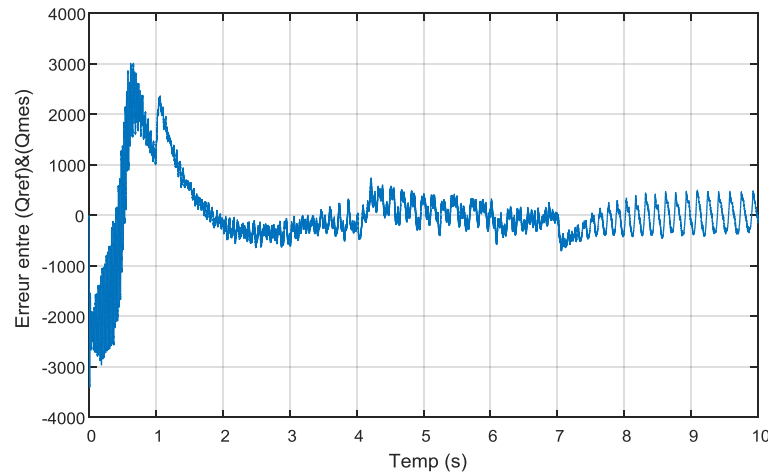
**Figure IV-33** : Les puissance active ( $P_{mes}$ )



**Figure IV-34** : La puissance réactive de référence (VAR).



**Figure IV-35** : La puissance réactive mesurée (VAR)

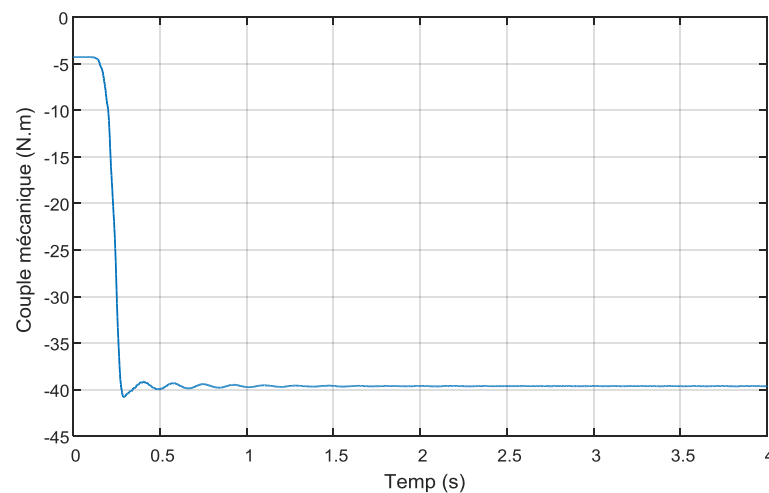


**Figure IV-36** : L'erreur entre (Qref) et (Qmes)

#### IV.4.2 Résultat de simulation avec commande indirect sans boucle de puissance :

##### IV.4.2.1 à vitesse du vent fixe :

Pour :  $V_v = 16$  m/s.

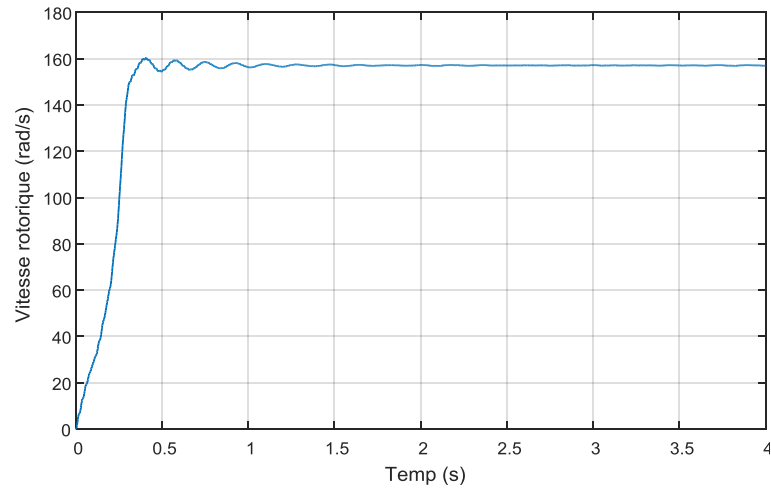


**Figure IV-37** : Le couple mécanique (N.m)

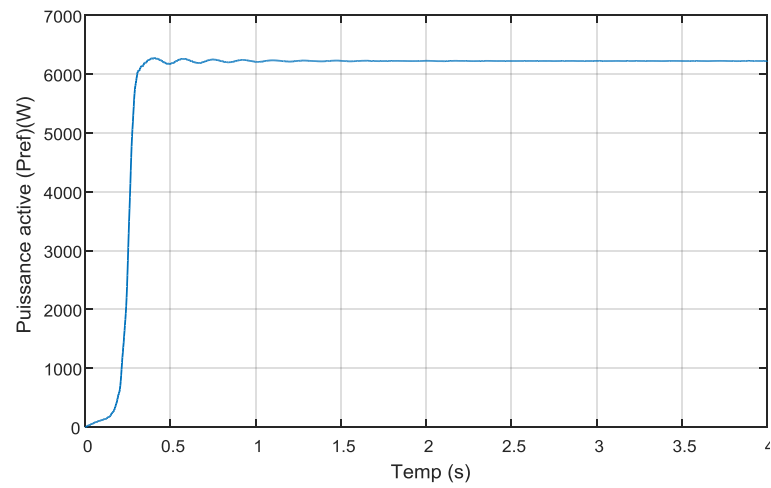
Nous avons aussi effectué les mêmes simulations avec la commande indirecte sans boucle de puissance.

Nous avons ainsi constaté que pour une vitesse de vent fixe nous avons une meilleure poursuite de la puissance et une vitesse de rotorique plus stable.

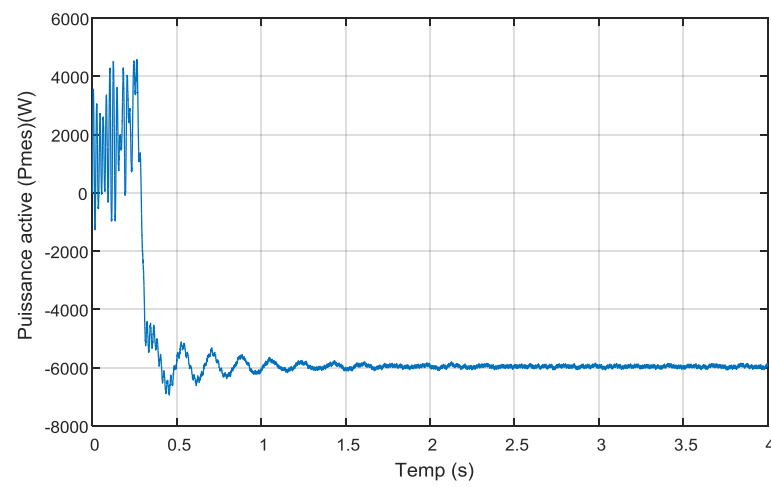
Voir le figure (IV-37) et figure (IV-38) et figure (IV-39).



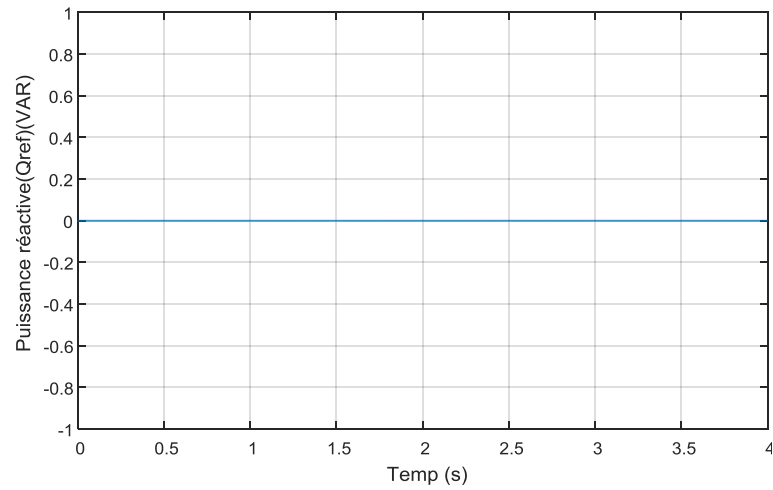
**Figure IV-38** : La vitesse rotorique(rad/s).



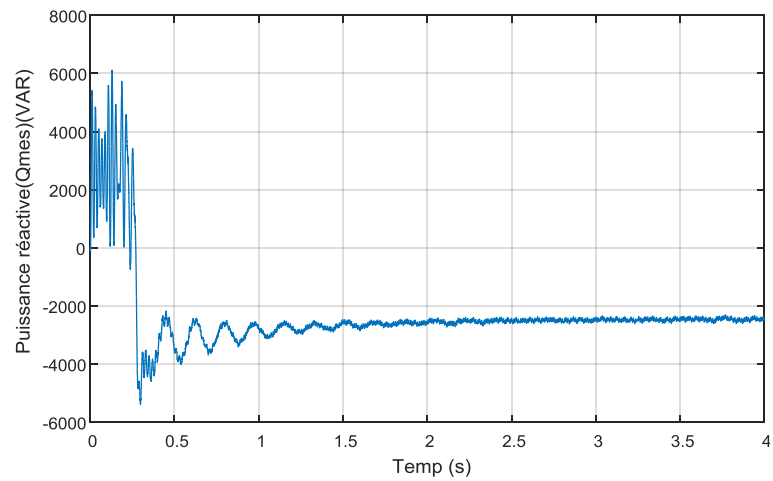
**Figure IV-39** : La puissance active de référence (W).



**Figure IV-40** : La puissance active mesurée (W).



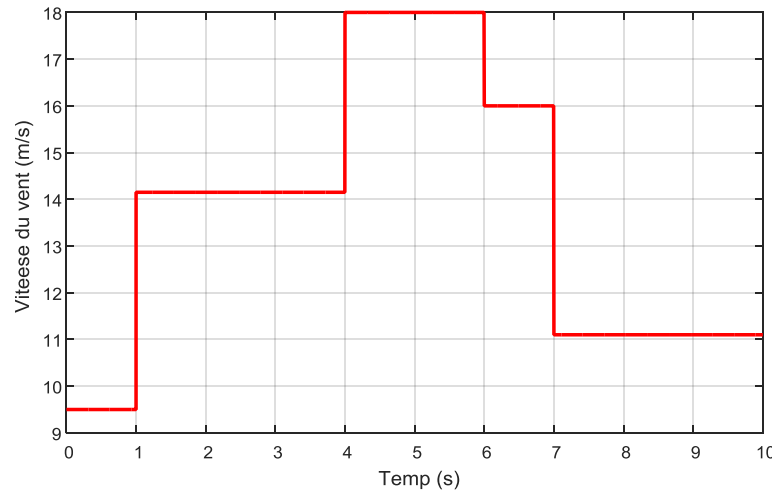
**Figure IV-41** : La puissance réactive de référence (VAR).



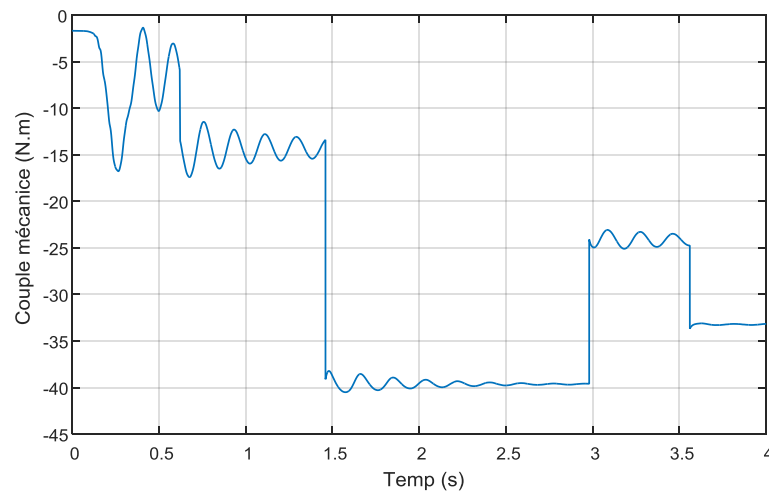
**Figure IV-42** : La puissance réactive mesurée (VAR).

#### IV.4.2.2 à vitesse du vent variable :

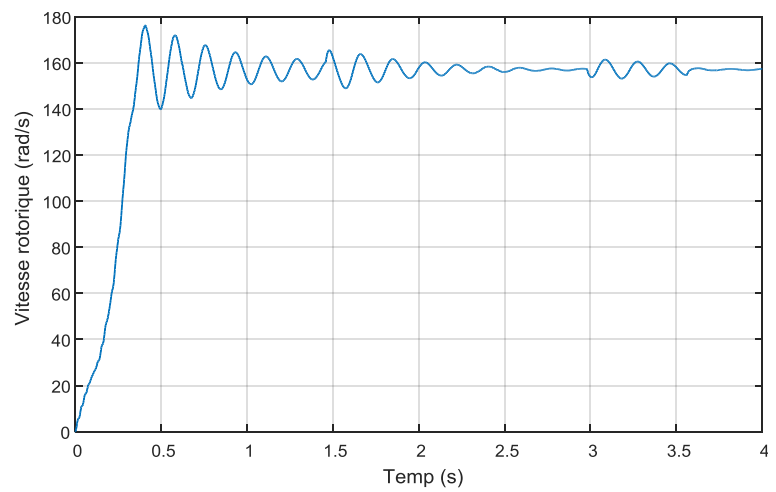
Par contre pour une vitesse de vent variable nous constatons que la vitesse de rotation est plus perturbée. Voir le figure (IV-42) et figure (IV-44).



**Figure IV-43** : le profil de la vitesse du vent.



**Figure IV-44** : Le couple mécanique (N.m).



**Figure IV-45** : La vitesse rotorique(rad/s).

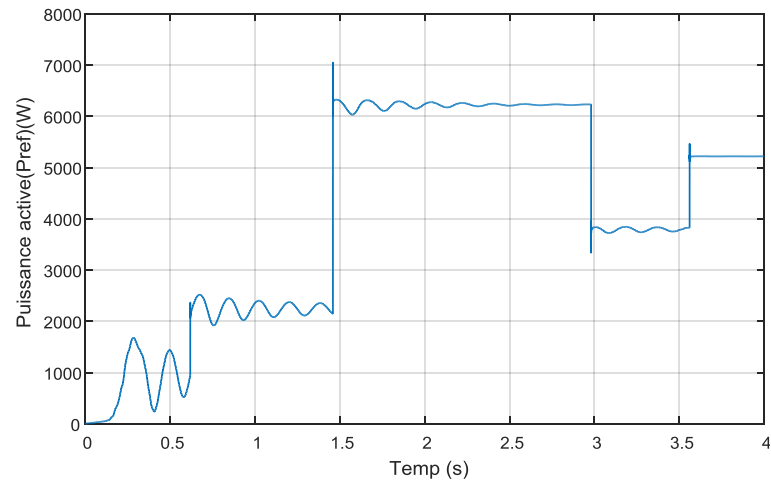


Figure IV-46 : La puissance active de référence (W)

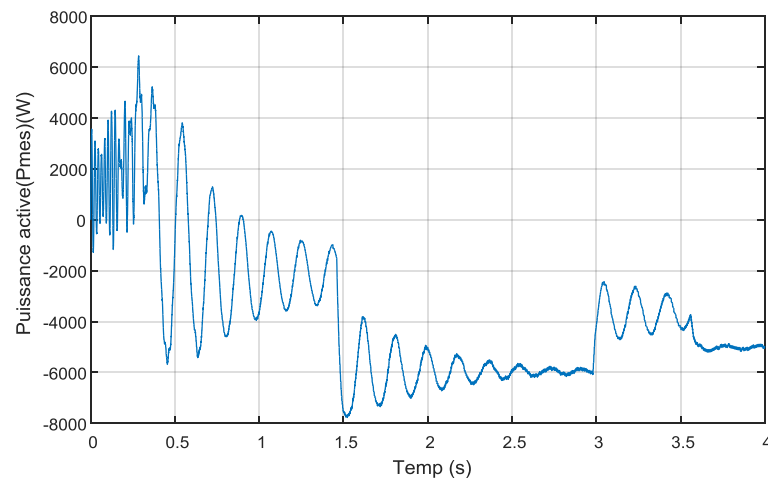


Figure IV-47 : La puissance active mesurée (W).

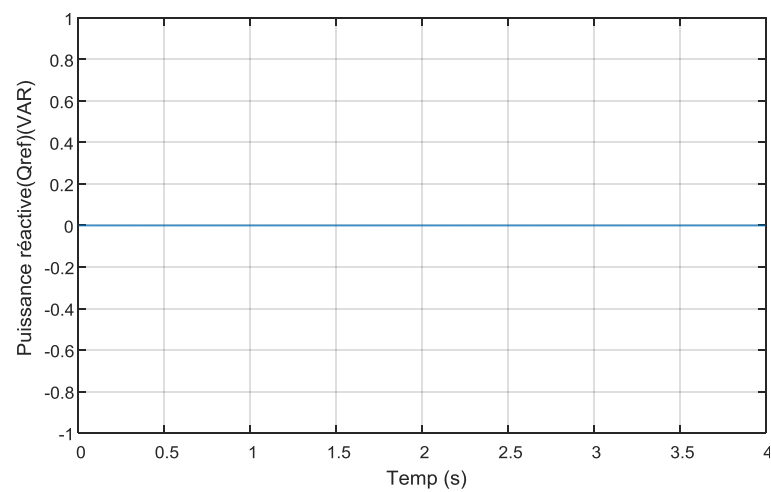
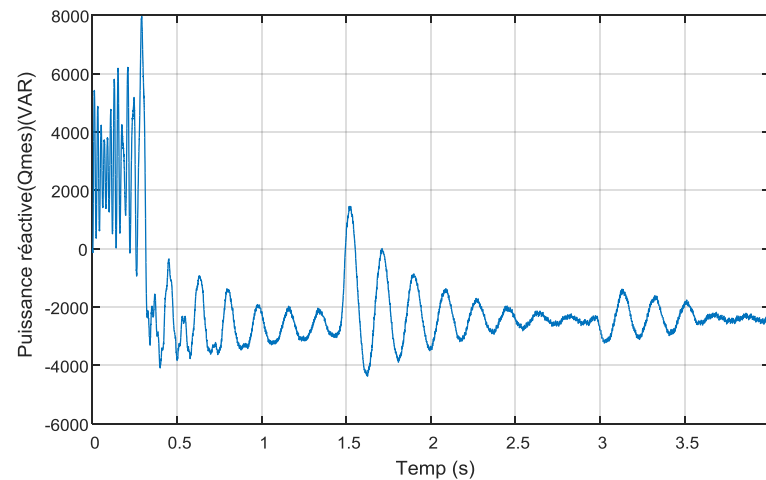


Figure IV-48 : La puissance réactive de référence (VAR).



**Figure IV-49** : La puissance réactive mesurée (VAR).

Concernant la puissance mesurée, nous constatons que le temps de réponse est plus rapide mais les ondulations sont plus importantes et ceci on compare les deux méthodes de contrôle.

Voir le figure(IV-45) et figure (IV-46) et figure (IV-47) et figure (IV-48) et figure (IV-48).

## VI.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la simulation de différente architecture d'un système de conversion éolien connectée à un réseau. Nous avons ainsi, présenté la simulation et l'influence des configurations choisies et des commandes implémentées sur les puissances injecté dans le réseau.

Nous avons pu vérifier les performances de notre système en terme de puissance active et de puissance réactive tirées produites par la MADA.

## Conclusion générale

---

Le présent travail nous a permis de faire l'étude d'un système de production d'énergie éolienne. L'objectif de notre travail était de faire une modélisation des différents composants du système éolien, pour ensuite utiliser ces modèles pour élaborer un système de commande qui devait atteindre les objectifs de performance et de coût optimal.

Afin d'atteindre ces objectifs et vu la complexité du système, nous avons étudié chaque partie du système dans des chapitres séparés, pour comprendre au mieux les caractéristiques techniques et physiques de chaque élément, ceci afin de les modéliser de façon correcte et objective.

Dans une deuxième partie de notre travail, nous avons assemblé les différents éléments de base d'une chaîne de conversion éolienne dans différentes architectures, nous avons ainsi réglé beaucoup de problèmes de compatibilité entre les différents modèles, pour arriver à les faire fonctionner dans un ensemble homogène et sans faille.

Finalement, nous avons testé une architecture à base d'onduleur côté rotor et de redresseur à base de diode côté réseau, avec une machine GADA de 7,5 KW. Différentes techniques de commande ont été validées, où nous avons fait une synthèse des différents résultats obtenus dans le dernier chapitre.

La poursuite de ces travaux doit se faire afin de valider le fonctionnement de cette architecture dans des conditions de fonctionnement plus réalistes. De plus, il est prévu de faire des améliorations en ce qui concerne le choix de la commande et le réglage des différents régulateurs utilisés.

# **BIBLIOGRAPHIE**

- [1] <http://www.connaissancedesenergies.org/leolien>, en France en Europe et dans le monde quel développement en 2015 sources RTE, EWEA, GWEC, 2015.
- [2] E.Hau, Wind Turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics, 2nd ed. Springer, 2005.
- [3] S.M. Boudia, "Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie ", Thèse de Doctorat. Université de Tlemcen, 2013.
- [4] DehoumFawzi&Djeddou Lakhdar,Cheriat El hachemi«Commande vectorielle d'une génératrice asynchrone double alimentation «GADA» pour l'utilisation de l'énergie éolienne», Thèse de d'ingénieur, Université M'sila, 2011.
- [5] Saki Ali &Belaidi Mourad «Etude d'un Générateur Asynchrone dans La Production d'Énergie Electrique par Eolienne», Thèse de d'ingénieur,Ecole Nationale Polytechnique, 2006.
- [6]Frédéric POITIERS«Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne», Thèse de doctorat, Université de Nantes, Décembre 2003.
- [7] F. Kendouli&K. Nabti,& K. Abed et H. Benalla«Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation»,Revue des Energies Renouvelables,Vol. 14 N°1, pp.109 – 120,2011.
- [8] LamriLOUZE ,«Production décentralisée de l'énergie électrique :Modélisation et contrôle d'une génératrice asynchrone auto excitée ». », Thèse de doctorat D'université mentouri - Constantine.08/07/2010
- [9] S.M. MUYEEN, J. TAMURA, T. MURATA. « Stability augmentation of a grid-connected wind farm ». Springer 2009.
- [10] I. MUNTEANU, A. I. BRATCU, N.A CUTULULIS, E. CEANGĂ. « Optimal control of wind energy systems ». Springer 2008.
- [11] N. LAVERDURE, « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires ». Thèse doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble 2005
- [12] S. EL AIMANI. « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension ». Thèse de doctorat, École Centrale De Lille 2004.
- [13] 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.
- [14] 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 2006.

- [15] Paul-Etienne VIDAL, « Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation ». Thèse doctorat, L'institut National Polytechnique de Toulouse 2004.
- [16].METATLA Samir « Optimisation et Regulation des Puissances d'une eoliennea Base d'une MADA » Mémoire de Magister, ENSP, 2009.
- [17] M.S. ABDOULAZIZ, I .SOUMANA NOUHOU “ Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergieéolienne”,Mémoire d'ingénieur, à L'ENP, 2007..
- [18] Retscreen - analyse de projets d'énergie éolienne, [www.retscreen.net](http://www.retscreen.net).
- [19]. M.Bouaraki "Etude d'un entrainement à double alimentation pour turbin éolienne à vitesse variable :Application sur un site à TINDOUF",thèse de magister de l'université M'hamedbougara ,boumardas,2012
- [20]. N. abu-tabak. « Stabilité dynamique des systèmes électriques multimachines : modélisation, commande, observation et simulation». Thèse de Doctorat, École Centrale deLyon 2008.
- [21] M. Loucif, A. Boumediene and A. Mechernene, « Backstepping Control of Double Fed Induction Generator Driven by Wind Turbine ». Proceedings of the 3rd International Conference on Systems and Control, Algiers, Algeria, October 29-31, 2013IEEE.
- [22].Y. Djeriri : « Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle », Thèse de Doctora,Université de Sidi Bel-Abbes, Alger, 2015.
- [23] D. Aouzellag, K. Ghedamsi, E.M. Berkouk, « Network power flux control of a wind generator ». Renewable Energy, Volume 34, Issue 3, pp 615- 622, Elsevier 2009.
- [24] K. Ouari a, T. Rekioua a,\*, M.Ouhrouche b, « Real time simulation of nonlinear generalized predictive control for wind energy conversion system with nonlinear observer ». ISA Transactions,Vol. 53, 2014, pp.76-84.
- [25]. B.toual « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à DoubleAlimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable » thèse de magister de l'Université de Batna ,2010.
- [26]. BENAMOR Afaf. « Commande Directe des Puissances d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation Intégré dans un Système Éolien Connecté au Réseau ». Mémoire de Magister en Électrotechnique . Université d'El Oued.2013

## Annexe

**A)**

**Les paramètres de la génératrice asynchrone double alimentée:**

**La valeur nominale**

Puissance nominale	$P_n = 7.5KW$
Fréquence	$f = 50Hz$
Tension nominale	$v/U = 220/380 V$
La vitesse nominale	$\Omega_n = 157 rad/s$
Nombre de paires de pôles	$P = 2$

**Paramètre de la machine**

Resistance statorique	$R_s = 0.455 \Omega$
Resistance rotorique	$R_r = 0.19 \Omega$
Inductance statorique	$L_s = 0.07 H$
Inductance rotorique	$L_r = 0.0213 H$
Inductance mutuelle	$M = 0.034 H$
Vitesse synchronisme	$\omega_s = 2\pi f = 314 rad/s$

**Constantes mécanique :**

Moment Inertie	$J = 0.05 Kg.m^2$
Coefficient de frottement	$f = 0.0001 N.m.S/rd$

**Les paramètres de la turbine éolienne utilisée :**

Puissance nominal	$P_T = 7KW$
Number de pale	$N_p = 3$
Diameter d'une pale	$R = 4 m$
Gain de multiplication	$G = 50$

## B)

### 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 d, q, o), et donc d'obtenir un système d'équation à coefficients constants ce qui simplifie sa résolution.

La matrice de transformation est définie comme suit :

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

$[P(\theta)]$  : Est Orthonormée ce qui permet la conservation des puissances lors du passage du système triphasé au système biphasé, et inversement.

$\theta$  : L'angle entre le repère du système triphasé à transformer et le repère de Park.

Pour la transformation inverse , c'est-à-dire pour le passage du système biphasé au système triphasé, on utilise la matrice de Park inverse suivante :

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

La matrice  $[P(\theta)]^{-1}$  est appelée matrice de transformation de Park inverse.

## **Résumé :**

Ce travail, porte sur la modélisation et le contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable, cette dernière est basée sur une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) de moyenne puissance. L'énergie récoltée est injecté dans le réseau électrique à travers un convertisseur de puissance, pour une meilleure intégration et une qualité de courant optimale. La stratégie de commande développée est basée sur un contrôle vectoriel de la puissance active et réactive, selon plusieurs schémas de commande. Enfin, ce travail a été conclu par des simulations est des résultats qui nous ont permis de valider les modèles développés.

## **Mots clés:**

Turbine Eolienne, GADA, Commande Vectorielle, Convertisseur de puissance.

## **Summary :**

This work concerns the modeling and control of a variable speed wind turbine, the latter being based on a medium power doubly-fed induction generator (DFIG). The harvested energy is injected into the power grid through a power converter, for better integration and optimum current quality. The developed control strategy is based on a vector control of the active and reactive power, according to several control schemes. Finally, this work was concluded by simulations is results that allowed us to validate the models developed.

## **Keywords:**

Wind Turbine, DFIG, Vector Control, Power converter.

## **ملخص:**

في هذا العمل نعرض نمذجة توربينات الرياح ذات السرعة المتغيرة، ويستند هذا الأخير إلى مولد حثي مزدوج التغذية. يتم حقن الطاقة المنتجة في شبكة الكهرباء من خلال محول الإستطاعة، من أجل تكامل أفضل وجودة المثلى. وتستند إستراتيجية التحكم التي وضعت على القدرة الفاعلة والغير فاعلة . اختتمت هذه الدراسة بنتائج المحاكاة، للتحقق من النماذج التي تم الحصول عليها من النظام.

## **كلمات مفتاحية :**

عنفه هوائية ، مولد حثي مزدوج التغذية ، تحكم شعاعي ، محول الاستطاعة.