

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique**

**CENTRE UNIVERSITAIRE D'EL-OUED**

**INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE**

**Mémoire de fin d'études**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie électrique et Electronique

Spécialité : Réseaux Electriques

Presenté par : HAMIDATOU Salem

**Thème**

**Etude d'éoliennes à vitesse variable basées  
sur des machines asynchrones  
(MAS-MADA)**

Soutenu le 29 Juin 2011

Devant le jury composé de :

Mr.	LABI Yacine	MA	Président
Dr.	BEN ATTOUS Djilani	MC	Rapporteur
Mr.	BEKAKRA Youcef	MA	Examineur

2010-2011

## *Dédicace*

*A ma chère mère, pour ses sacrifices depuis qu'elle mis au monde;  
A mon chère père, qui m'a toujours soutenu et aidé à affronter les difficultés,  
pour tous ce qui ont fait pour que je puisse les honorer;  
A tous mes chères frères et mes chères sœurs;  
A toute ma famille;  
A tous mes amis;  
...je dédie ce modeste travail.*

*HAMIDATOU Salem*



*Avant tous, je remercie Dieu le tout puissant qui je donne le courage  
Et la patience pour réaliser ce travail, malgré toutes les difficultés rencontrées*

*Prière et*

*Salutation pour le plus honorable messenger le maître de la création notre  
prophète*

*"Mohamed".*

## *Remerciements*

*Au terme de ce modeste travail, je tiens à remercier vivement mon promoteur  
Monsieur *Ben Attous Djilani* maître de conférence au département d'électrotechnique  
du centre universitaire d'El-Oued pour les conseils, les encouragements et les efforts qu'il  
m'a prodigués durant la réalisation de ce travail ainsi durant les études universitaires.  
Je remercie aussi monsieur *Bekakra Youcef* pour avoir bien voulu co-diriger ce travail.*

*Mes sincères remerciements aux messieurs les membres du jury pour l'honneur qu'ils me  
font en participant au jugement de ce travail.*

*En fin je remercie tout particulièrement *mes parents*, pour leur soutien  
inconditionnel tout au long de ces longues années d'études.*

*HAMIDATOU Salem*

*— R S —*

## TABLEAU DES FIGURES

<b>Figure I.1</b> Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	4
<b>Figure I.2</b> Les différents types d'éoliennes .....	6
<b>Figure I.3</b> Principaux composants d'une éolienne.....	7
<b>Figure I.4</b> Tube de courant autour d'une éolienne.....	9
<b>Figure I.5</b> Coefficient de puissance.....	10
<b>Figure I.6</b> Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.....	10
<b>Figure I.7</b> Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donnée.....	12
<b>Figure I.8</b> Bilan des forces sur une pale.....	12
<b>Figure I.9</b> Flux d'air sur un profil de pale " <i>stall</i> ".....	13
<b>Figure I.10</b> Variation de l'angle de calage d'une pale.....	14
<b>Figure I.11</b> Flux d'air sur un profil de pale " <i>Stall</i> ".....	14
<b>Figure. I.12</b> Caractéristique couple-vitesse d'une machine asynchrone.....	15
<b>Figure I.13</b> Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau.....	15
<b>Figure I.14</b> Machine asynchrone à double stator.....	16
<b>Figure I.15</b> Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur – onduleur.....	17
<b>Figure I.16</b> Schéma développé d'un rotor à cage classique et d'un rotor de machine asynchrone " <i>brushless</i> ". .....	17
<b>Figure I.17</b> Machine asynchrone <i>brushless</i> connectée sur le réseau.....	18
<b>Figure I.18</b> Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée.....	18
<b>Figure. I.19</b> Machine Asynchrone à Double Alimentation – structure de Kramer.....	19
<b>Figure I.20</b> Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.....	19
<b>Figure. I.21</b> Machine asynchrone à double alimentation: structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.....	20
<b>Figure II.1</b> Schéma de la turbine éolienne.....	23
<b>Figure II.2</b> Caractéristique du coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative $\lambda$ .....	25
<b>Figure II.3</b> Modèle d'une turbine éolienne.....	26
<b>Figure II.4</b> Caractéristique puissance - vitesse d'une éolienne.....	27
<b>Figure II.5</b> Stratégies de commande de la turbine .....	28

<b>Figure II.6</b> Représentation de la machine asynchrone à double alimentation. ....	29
<b>Figure II.7</b> Fonctionnement générateur hypo-synchrone .....	30
<b>Figure II.8</b> Fonctionnement générateur hyper-synchrone .....	31
<b>Figure II.9</b> Représentation schématique d'une machine asynchrone à double alimentation. .	34
<b>Figure II.10</b> Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA.....	37
<b>Figure II.11</b> Profil du vent .....	45
<b>Figure II.12</b> Coefficient de puissance $C_p$ .....	45
<b>Figure II.13</b> Vitesse relative $\lambda$ .....	45
<b>Figure II.14</b> Vitesse mécanique .....	45
<b>Figure II.15</b> Couple et Puissance électrique produite .....	46
<b>Figure II.16</b> Courbe du courant statorique avec zoom.....	47
<b>Figure II.17</b> Courbe du courant rotorique avec zoom.....	47
<b>Figure III.18</b> Courbe de la puissance active et réactive statorique.....	47
<b>Figure II.19</b> Courbe du courant statorique avec zoom.....	48
<b>Figure II.20</b> Courbe du courant rotorique avec zoom.....	48
<b>Figure III.21</b> Courbe de la puissance active et réactive statorique.....	49
<b>Figure III.21</b> Courbe de la puissance active et réactive statorique.....	49
<b>Figure III.1</b> Schéma de principe du découplage pour le MADA par analogie avec la machine à courant continu. ....	51
<b>Figure III.2</b> Illustration de l'orientation du flux statorique.....	52
<b>Figure III.3</b> Schéma de principe de la commande directe.....	54
<b>Figure III.4</b> Schéma de la commande indirecte en boucle ouverte.....	55
<b>Figure III.5</b> Schéma de la commande indirecte en boucle fermée. ....	55
<b>Figure III.6</b> Schéma bloc d'un système régulé par un PI. ....	56
<b>Figure III.7</b> Onduleur triphasé à deux niveaux.....	57
<b>Figure III.8</b> Principe de la MLI sinusoïdale. ....	59
<b>Figure III.9</b> Profil du vent appliqué et la vitesse de rotor (rd/s). ....	59
<b>Figure III.10</b> Coefficient de puissance de la turbine.....	59
<b>Figure III.11</b> Puissance active statorique et sa référence avec zoom.....	59
<b>Figure III.12</b> Puissance réactive généré par MADA et sa référence avec zoom.....	60
<b>Figure III.13</b> Couple électromagnétique. ....	60
<b>Figure III.14</b> Courant statorique avec zoom.....	60
<b>Figure III.15</b> Courant rotorique avec zoom.....	61

## دراسة تربينات الرياح ذات السرعة المتغيرة على أساس ماكينات لامتزامنة (الماكينات اللامتزامنة - الماكينة اللامتزامنة مضاعفة التغذية)

### ملخص:

خلال هذا العمل قمنا بدراسة تربينات الرياح ذات السرعة المتغيرة على أساس الماكينات اللامتزامنة (الماكينات اللامتزامنة و الماكينة اللامتزامنة مضاعفة التغذية). قمنا بإعطاء عموميات حول نظام التربينات الهوائية وكيف يتم التقاط الطاقة الحركية من المراوح لتحويلها إلى طاقة ميكانيكية وهذه الأخيرة يتم تحويلها إلى طاقة كهربائية من قبل مولد لا متزامن ذو قفص السنجاب أو مولد لا متزامن مضاعف التغذية. اختتمنا هذه الدراسة مستخدمين التحكم الشعاعي في المولد اللامتزامن مضاعف التغذية. النتائج التي تحصلنا عليها تؤكد صحة عملنا.

### الكلمات المفتاحية:

تربينات الرياح ، ماكينة لامتزامنة ، ماكينة لامتزامنة مضاعفة التغذية ، إنشاء نماذج ، التحكم الشعاعي ، المنظم الكلاسيكي .

## **Etude d'Eoliennes à Vitesse Variable Basées sur des Machines Asynchrones (machine asynchrone - machine asynchrone à double alimentation)**

### Résumé:

Dans ce travail nous avons étudié d'éoliennes à vitesse variable basées sur des machines asynchrones (machine asynchrone - machine asynchrone à double alimentation). Nous donnons un rappel sur les généralités des systèmes éoliens. L'énergie cinétique du vent est captée par les pales afin de la transformer en énergie mécanique. La transformation de cette dernière en énergie électrique est assurée par un générateur électrique de type asynchrone à cage d'écureuil ou générateur asynchrone à double alimentation.

Cette étude a été conclue par la commande vectorielle d'un générateur asynchrone à double alimentation.

Les résultats de simulation obtenus confirment notre travail .

### Mots Clés :

L'éoliennes, Machine asynchrone, Machine asynchrone à double alimentation, Modélisation, Commande vectorielle, Régulateur classique.

## **Study of Variable Speed the Wind Power Based on Induction Machines (induction machine, doubly fed induction generator)**

### **Abstract:**

This work presents a study of variable speed of wind power based on induction machines (induction machine, doubly fed induction generator). We give a reminder about the generality of Wind Energy Systems. The kinetic energy of wind is captured by the blades to turn it into mechanical energy. The transformation of the latter into electrical energy is provided by a generator of asynchronous squirrel-cage or doubly fed induction generator. This study was concluded by vector control of a doubly fed induction generator.

The simulation results confirm our work.

### **Key words:**

Wind power , induction machine , Doubly fed induction machine , Modeling , Vector-control, Classical regulator .

# SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE .....	1
CHAPITRE I	
<i>Généralités sur les systèmes éoliens</i>	
I.1. Introduction .....	4
I.2. Descriptif et qualités de l'énergie éolienne .....	4
I.2.1. Définition de l'énergie éolienne .....	4
I.2.2. Principe .....	4
I.2.3. Les différents types d'éoliennes .....	5
I.2.3.1. Les éoliennes à axe vertical .....	5
I.2.3.2. Les éoliennes à axe horizontal .....	5
I.3. Architecture d'une éolienne à axe horizontal .....	6
I.3.1. Principaux composants d'une éolienne .....	6
I.3.2. La tour .....	7
I.3.3. La nacelle .....	7
I.3.3.1. Arbre lent .....	7
I.3.3.2. Un multiplicateur .....	7
I.3.3.3. le système de refroidissement .....	7
I.3.3.4. la génératrice .....	8
I.3.3.5. Anémomètre .....	8
I.3.3.6. le système de control-commande.....	8
I.3.4. Le rotor et les pales.....	8
I.3.5. Le moyeu .....	9
I.4. Energie cinétique du vent-conversion en énergie mécanique .....	9
I.4.1. Loi de Betz.....	9
I.4.2 Production d'énergie mécanique .....	11
I.5. Stratégies de fonctionnement d'une éolienne .....	12
I.5.1. Bilan des forces sur une pale .....	12
I.5.2. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne.....	13
I.5.2.1. Système à décrochage aérodynamique " <i>stall</i> ".....	13
I.5.2.2 Système d'orientation des pales " <i>pitch</i> " .....	14
I.6. Etat de l'art sur la conversion électromécanique.....	14

I.6.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone .....	14
I.6.1.1. Machine asynchrone à cage d'écureuil .....	14
I.6.1.2. Machine asynchrone à double stator .....	16
I.6.1.3. Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance.....	16
I.6.1.4. Machine asynchrone à double alimentation type "brushless" .....	17
I.6.1.5. Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné" .....	18
I.6.1.5.1. Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée ...	18
I.6.1.5.2. Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer.....	19
I.6.1.5.3. Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec Cycloconvertisseur.....	19
I.6.1.5.4. Machine asynchrone à double alimentation: structure de Scherbius avec convertisseurs MLI .....	20
I.6.2. Systèmes utilisant la machine synchrone .....	20
I.6.2.1. Machines synchrones à rotor bobiné.....	20
I.6.2.2. Machines synchrones à aimants permanents .....	21
I.7. Conclusion .....	21

## CHAPITRE II

### ***Modélisation des systèmes éoliens (Turbine, MADA et MAS)***

II.1. Introduction .....	22
II.2. Modélisation d'une turbine éolienne à axe horizontal .....	22
II.2.1 Modélisation du vent .....	22
II.2.2 Modélisation de la turbine .....	22
II.2.3 Coefficient de puissance $C_p$ .....	24
II.2.4 Modèle du multiplicateur .....	25
II.2.5 Equation dynamique de l'arbre .....	25
II.2.6 Différentes phases de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable .....	26
II.2.7 Maximisation de la puissance extraite.....	27
II.2.8 Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse .....	28
II.2 Modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) .....	29
II.2.1 Présentation de la machine asynchrone a double alimentation.....	29
II.2.2 Modes de fonctionnement de la MADA .....	29
II.2.2.1 Fonctionnement en moteur à vitesse variable .....	30

II.2.2.2 Fonctionnement en génératrice à vitesse variable .....	30
II.2.3 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation .....	31
II.2.4 Application de la MADA .....	31
II.2.5 Avantages et inconvénients de la MADA .....	32
II.2.5.1 Avantages de la MADA.....	32
II.2.5.2 Inconvénients de la MADA .....	32
II.2.6 Modélisation de la MADA .....	33
II.2.6.1 Modèle effectif de la MADA .....	33
II.2.6.2 Equations électriques de la MADA .....	34
II.2.6.3 Application de la transformation de Park à la MADA .....	36
II.2.6.4 Mise en équation de la MADA dans le repère de Park .....	38
II.2.6.5 Choix du référentiel.....	40
II.2.6.6 Expression du couple électromagnétique de la MADA dans le repère de Park ..	41
II.2.7 Modèle de la MADA dans le repère de Park sous forme d'état .....	41
II.3 Modélisation de la Machine Asynchrone.....	43
II.3.1 Equations de puissance et de couple .....	44
II.3.2 Equation mécanique .....	44
II.4 Résultats de Simulation et interprétations.....	45
II.4.1 La turbine .....	45
II.4.2 MADA.....	46
II.4.3 MAS .....	48
II.5 Conclusion .....	49

### CHAPITRE III

#### *Commande vectorielle du GADA*

III.1 Introduction .....	50
III.2 Généralités sur la commande vectorielle .....	50
III.2.1 Principe de la commande vectorielle .....	50
III.2.2 Variantes de la commande vectorielle .....	51
III.2.3 Procède d'orientation du flux .....	51
III.3 Commande vectorielle par orientation du flux statorique.....	52
III.4 Méthodes de la commande vectorielle.....	53
III.4.1 Commande vectorielle directe .....	54
III.4.2 Commande vectorielle indirecte .....	54

---

III.4.2.1. Commande indirecte en boucle ouverte .....	55
III.4.2.2. Commande indirecte en boucle fermée .....	55
III.5 Synthèse du régulateur Proportionnel-Integral (PI).....	56
III.6 Prise en compte de l'onduleur côté rotor.....	57
III.7 Modélisation de largeur d'impulsion MLI.....	57
III.7.1 Principe général .....	57
III.7.2 Propriétés.....	58
III.8 Résultats de Simulation et interprétations.....	58
III.9 Conclusion.....	62
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	63
<b>Annexe</b> .....	65
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	69

## INTRODUCTION GENERALE

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

Durant ces décennies passées, le monde s'est rendu compte des problèmes écologiques engendrés par son développement, et dont certains de ces problèmes affectent la terre entière, la pollution atmosphérique occasionnée par la production énergétique, le transport, la consommation des ressources naturelles et la production de déchets abîme la qualité de l'air dans pas mal de régions et entraîne les pluies acides, le réchauffement climatique et la destruction de la couche d'ozone, par conséquent, plusieurs technologies se sont développées dans le but de protéger l'environnement, et c'est le cas des énergies renouvelables qui toutes sont pratiquement venues du soleil, inépuisables, et reconstituées rapidement par la nature contrairement aux réserves limitées du gaz, du pétrole et du charbon ..., les formes les plus connues d'énergies renouvelables sont : solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, marémotrice et de biomasse .

Parmi les énergies renouvelables, on distingue trois grandes familles : l'énergie d'origine mécanique (la houle, éolien), énergie électrique (panneaux photovoltaïques) ou l'énergie sous forme de chaleur (géothermie, solaire thermique,...) en sachant qu'à la racine de toutes ces énergies est l'énergie en provenance du Soleil transformée ensuite par l'environnement terrestre. Etant donné que l'énergie mécanique est très difficilement transportable, elle n'est utilisable directement que ponctuellement (pompage direct de l'eau, moulins,...). Cette énergie est donc majoritairement transformée en énergie électrique [19].

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau. Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2000 ans avant J.-C environ. La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans

avant J.-C. En Europe, ce n'est qu'au *VII<sup>ème</sup>* siècle que l'on voit apparaître les premiers moulins à vent. Utilisés tout d'abord pour moudre le grain, d'où leur nom de " moulins ", ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés. Dès le *XIV<sup>ème</sup>* siècle, les moulins à vent sont visibles partout en Europe et deviennent la principale source d'énergie. Seulement en Hollande et Danemark, vers le milieu du *XIX<sup>ème</sup>* siècle, le nombre des moulins est estimé respectivement à plus de 30000 et dans toute l'Europe à 200000. A l'arrivée de la machine à vapeur, les moulins à vent commencent leur disparition progressive [2].

C'est en 1802 que l'on a songé pour la première fois à transformer l'énergie éolienne en énergie électrique. Lord Kelvin en effet essaya d'associer une génératrice d'électricité à un moteur éolien, mais en fait il faudra attendre 1850 et l'avènement de la dynamo pour qu'on puisse voir ce que l'on appellera les « aérogénérateurs ». Cette nouvelle application de l'énergie éolienne a connu un certain succès, et l'on comptait en 1920 jusqu'à 300 constructeurs d'aérogénérateurs. Les premières recherches aérodynamiques sur l'aéronautique ont participé au développement des moteurs éoliens, et réalisation de grandes machines allant de 100 à 1000 kW.

Dés 1973, le processus inverse à petit, relancé les programmes d'études et de réalisation d'aérogénérateurs. Mais les budgets de recherche et de développement ainsi que les aides gouvernementales fluctuent avec le prix du baril de pétrole et les aides accordées aux autres énergies (photovoltaïque en particulier). Toutefois au court des dernières années se dessine une nette tendance au développement de « fermes éoliennes » ou « parcs éoliens » raccordés aux réseaux de distribution avec les machines de 300KW à 1.5MW. Les travaux sur les machines pour site isolés sont peu nombreux.

Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pût être « redécouverte » et de nouveau utilisée (dans les années 40 au Danemark 1300 éoliennes). Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux Etats-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées. Dans les années 60, fonctionnait dans le monde environ 1 million d'aérogénérateurs. La crise pétrolière de 1973 a relancé de nouveau la recherche et les réalisations éoliennes dans le monde. A la fin des années 80, le nombre de machines installées n'a cessé d'augmenter avec une forte croissance à la fin des années 90 [2].

Dans ce contexte général, notre étude porte sur la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique qui est devenue compétitive grâce aux trois facteurs essentiels: La nature motivante de cette énergie, le développement de l'industrie des éoliennes, et l'évolution de la

technologie des semi-conducteurs, ainsi que les nouvelles méthodologies de contrôle des turbines à vitesses variables. Néanmoins, plusieurs problèmes rencontrés, liés d'une part à la complexité des systèmes de conversion éolienne ; à savoir, la nécessité du multiplicateur de vitesse entre la turbine et la génératrice, et l'instabilité de la vitesse du vent d'une autre part.

Dans le domaine de production de l'énergie électrique à vitesse variable, on leur préfère plutôt des machines à rotor bobiné doublement alimentées qui offrent d'excellents compromis performances/coût [1]. La MADA utilisée pour la génération d'énergie électrique dans un site isolé ceci est considéré comme une solution écologique intéressante. Le générateur à induction double alimenté est davantage adapté pour cette application, parce qu'il reçoit une vitesse variable sur son arbre, et il doit produire une tension à amplitude et fréquence constantes coté charge, donc pour une génératrice autonome, débitant sur un site isolé, le problème devient plus complexe, car il faut contrôler aussi la tension et la fréquence du coté du stator.

Le présent mémoire décrit une étude sur l'utilisation des machines de type asynchrone : machine asynchrone à cage , et machine asynchrone à double alimentation pour des fortes puissances, pilotée à travers les grandeurs rotoriques, intégrée dans un système éolien.

**Organisation du mémoire :**

Ce présent travail est relatif à une étude d'éoliennes à vitesse variable basées sur des machines asynchrones (MAS-MADA).

Ce mémoire a été structuré en trois chapitre comme suit :

- Le premier chapitre présente un rappel sur les généralités des systèmes éoliens.
- Dans le deuxième chapitre, on présentera la modélisation des systèmes éoliens.
- Le troisième chapitre sera consacré à la commande vectorielle du GADA.

Ce travail s'achève avec une conclusion générale qui finisse tout le travail.

# **CHAPITRE I**

*Généralités*

*Sur*

*Les systèmes*

*éoliens*

## I.1. Introduction :

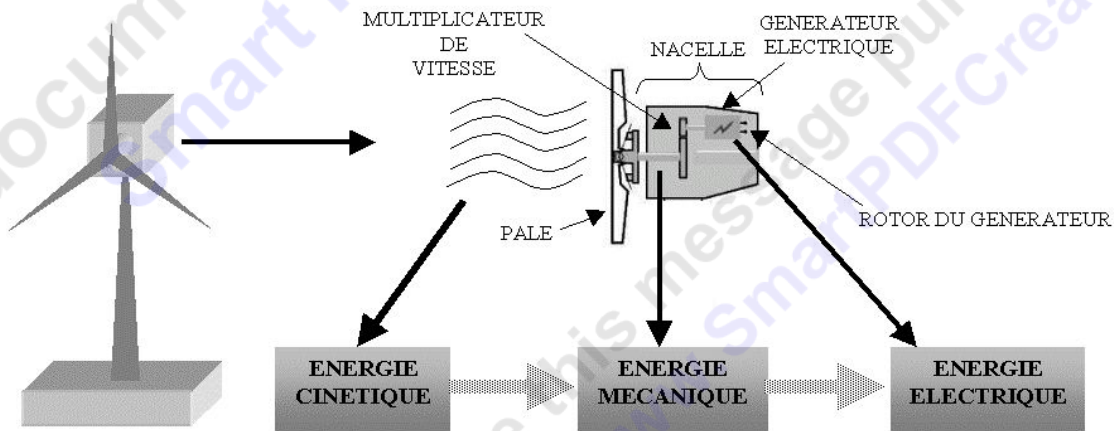
Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes [3]

Ce chapitre est une description générale sur l'énergie éolienne, les différents types d'aérogénérateur (éoliennes à axe vertical, et éoliennes à axe horizontal) et en cite les générateurs les plus utilisées.

## I.2. Descriptif et qualités de l'énergie éolienne :

### I.2.1. Définition de l'énergie éolienne :

Un aérogénérateur plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [3]. (Figure I-1).



*Figure I-1 Conversion de l'énergie cinétique du vent.*

### I.2.2. Principe :

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

- ✓ Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- ✓ Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique [4].

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [3].

Les éoliennes sont classées selon leur puissance nominale :

1. Éoliennes de petite puissance: inférieure à 40 kW
2. Éoliennes de moyenne puissance: de 40 à quelques centaines de kW.
3. Éoliennes de forte puissance: supérieure à 1 MW [3].

### **I.2.3. Les différents types d'éoliennes :**

Selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice on classe les éoliennes selon deux types :

#### **I.2.3.1. Les éoliennes à axe vertical :**

Ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de Maintenance . En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mat souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal [4].

#### **I.2.3 .2. Les éoliennes 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 [4].



(a)

(b)

*Figure I-2 Les différents types d'éoliennes :*

*(a)- éolienne à axe vertical.*

*(b)- éolienne à axe horizontal.*

Outre, l'aspect visuel des éoliennes, leur impact sur l'environnement est réduit. Une éolienne ne couvre qu'un pourcentage très réduit de la surface totale du site sur laquelle elle est implantée, permettant alors à la plupart des sites de conserver leurs activités industrielles ou agricoles. Leurs nuisances sonores sont de plus relativement faibles. En effet, selon l'ADEME, le niveau sonore d'une éolienne est de 50dB à 150 mètres et devient imperceptible au delà de 400 mètres. Dans la plupart des cas, le bruit du vent est supérieur à celui engendré par l'éolienne [4].

### **I.3. Architecture d'une éolienne à axe horizontal :**

#### **I.3.1. Principaux composants d'une éolienne :**

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

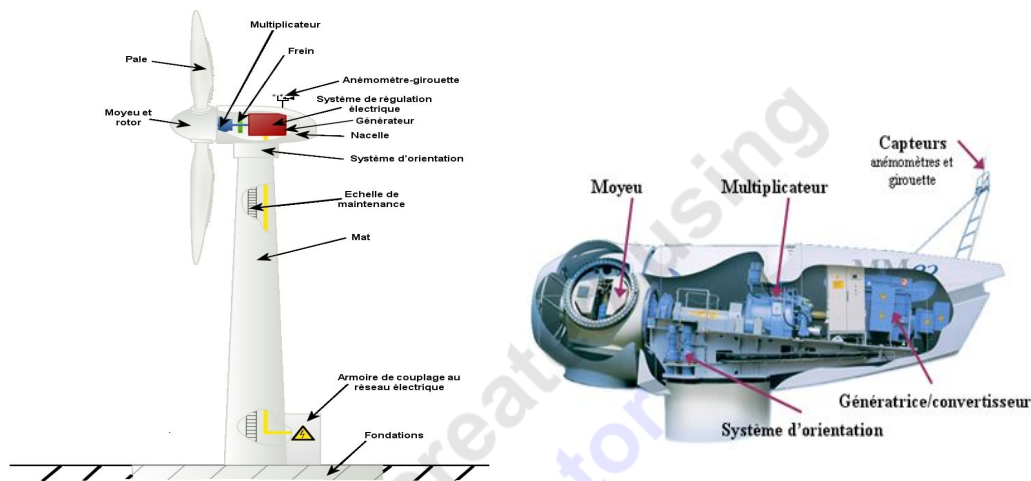


Figure I-3 Principaux composants d'une éolienne.

### I.3.2. La tour :

C'est un élément porteur, généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, il doit être le haut possible pour éviter les perturbations près du sol. La tour a une forme d'un tronc en cône où à l'intérieur sont disposés les câbles de transport d'énergie électrique, les éléments de contrôle, les appareillages de connexion au réseau de distribution ainsi que l'accès à la nacelle [4].

### I.3.3. La nacelle :

Elle regroupe tout le système de transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique et divers actionneurs de commande [4].

#### I.3.3.1. Arbre lent :

Il relie le moyeu au multiplicateur et contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin [4].

#### I.3.3.2. Un multiplicateur :

Il adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique (qui est généralement entraîné aux environs de 1500 tr/min). Ce multiplicateur est muni d'un frein mécanique à disque actionné en cas d'urgence lorsque le frein aérodynamique tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne [4].

#### I.3.3.3. le système de refroidissement :

Il comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur. Il existe un certain type d'éoliennes comportant un refroidissement à l'eau [4].

**I.3.3.4. la génératrice :**

La fonction première de la génératrice est de transformer l'énergie mécanique disponible sur l'arbre de sortie du multiplicateur en énergie électrique. Cette fonction peut être réalisée au moyen de deux types de machines: une génératrice asynchrone ou alors une génératrice synchrone. De plus un convertisseur de puissance associé éventuellement à la génératrice selon le type (direct ou indirect) de connexion au réseau[4].

**I.3.3.5. Anémomètre :**

Les signaux électriques émis par l'anémomètre sont utilisés par le système de contrôle commande de l'éolienne pour la démarrer lorsque la vitesse du vent atteint approximativement 5m/s. De même le système de commande électrique arrête automatiquement l'éolienne si la vitesse du vent est supérieure à 25m/s pour assurer la protection de l'éolienne [4].

**I.3.3.6. le système de control-commande:**

Il comporte un ordinateur qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation à titre d'exemple en cas de surchauffe du multiplicateur ou de génératrice, le système arrête automatiquement l'éolienne et le signale à l'ordinateur de l'opérateur via un modem téléphonique [4].

**I.3.4. Le rotor et les pales:**

Le rotor de l'aérogénérateur est constitué de pales qui sont elles-mêmes montées sur un moyeu. Le rôle essentiel du rotor est de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Le rendement maximal du rotor est d'environ 59% (limite de Betz). Le nombre des pales a relativement peu d'influence sur les performances d'une éolienne. Plus le nombre de pale est grand plus le couple de démarrage sera grand et plus la vitesse de rotation sera petite. Les turbines uni et bipales ont l'avantage de peser moins, mais elles produisent plus de fluctuations mécaniques. Elles ont un rendement énergétique moindre, et sont plus bruyantes puisque elles tournent plus vite. Elles provoquent une perturbation visuelle plus importante de l'avis des paysagistes. De plus, un nombre pair de pales doit être évité pour des raisons de stabilité [4].

La pale est une pièce techniquement difficile à réaliser car elle doit obéir à certaines règles géométriques concernant le profil aérodynamique, mais elle doit aussi être fabriquée avec un matériau suffisamment résistant à une force de pression exercée par le vent et aux agressions extérieures telles que la pollution ou certaines particules qui se trouvent dans l'air.

Les pales sont réalisées en fibre de verre ou en matériaux composites comme la fibre de carbone qui est légère et résistante [4].

### I.3.5. Le moyeu :

C'est le support des pales, il doit être capable de supporter des à-coups importants, surtout au démarrage de l'éolienne, ou lors de brusques changements de vitesse du vent. C'est pour cette raison que le moyeu est entièrement moulé et non réalisé par soudure[4].

## I.4. Energie cinétique du vent-conversion en énergie mécanique :

### I.4.1. Loi de Betz :

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure I.4 sur lequel on a représenté la vitesse du vent  $V_1$  en amont de l'aérogénérateur et la vitesse  $V_2$  en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne  $V_1$  et la vitesse du vent après passage à travers le rotor  $V_2$  soit  $\frac{v_1 + v_2}{2}$  la masse d'air en mouvement de densité  $\rho$  traversant la surface  $S$  des pales en une seconde est:

$$m = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{I-1})$$

La puissance  $P_m$  alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_m = \frac{m \cdot (v_1^2 - v_2^2)}{2} \quad (\text{I-2})$$

Soit en remplaçant  $m$  par son expression dans l'équation (I.1):

$$P_m = \frac{\rho \cdot S \cdot (v_1 + v_2) \cdot (v_1^2 - v_2^2)}{4} \quad (\text{I-3})$$

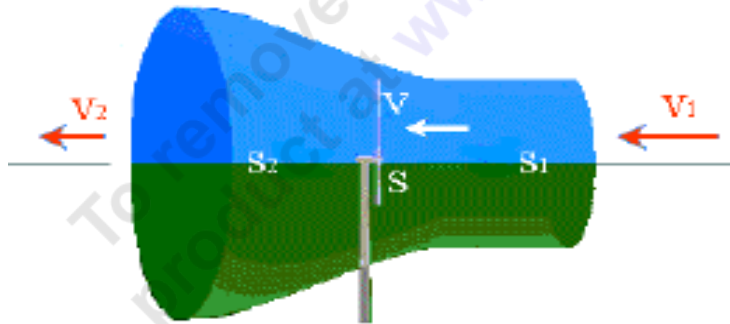


Figure I-4 Tube de courant autour d'une éolienne.

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse  $V_1$ , la puissance  $P_{mt}$  correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \frac{\rho \cdot S \cdot v_1^3}{2} \tag{I-4}$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{v_1}{v_2}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^2\right)}{2} \tag{I-5}$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (Figure I-4), on s'aperçoit que le ratio  $\frac{P_m}{P_{mt}}$  appelé aussi coefficient de puissance  $C_p$  présente un maxima de  $\frac{16}{27}$  soit 0,59 (Figure I-5). C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent [3].

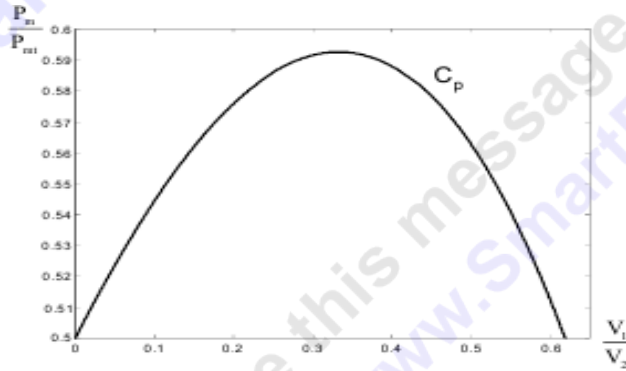


Figure I-5 Coefficient de puissance.

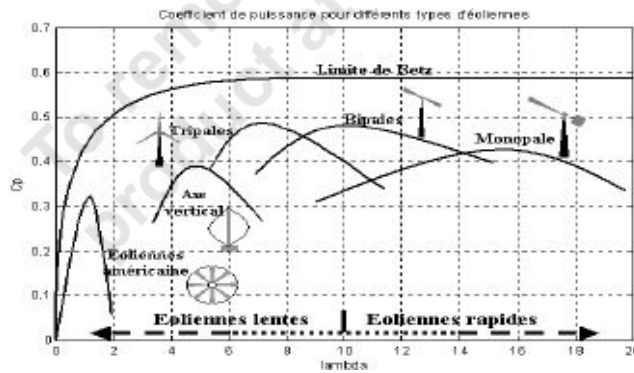


Figure I-6 Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance (Figure I-6) atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts [3].

Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, leur coefficient de puissance (Figure I-6) atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s [3].

#### I.4.2 Production d'énergie mécanique :

En combinant les équations (I-1), (I-4) et (I-5), la puissance mécanique  $P_m$  disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_m = \frac{P_m}{P_{mt}} \cdot P_{mt} = C_p \cdot P_{mt} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \quad (I-6)$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_1 R}{V_1} \quad (I-7)$$

$\Omega_1$  : vitesse de rotation avant multiplicateur.

R : rayon de l'aérogénérateur.

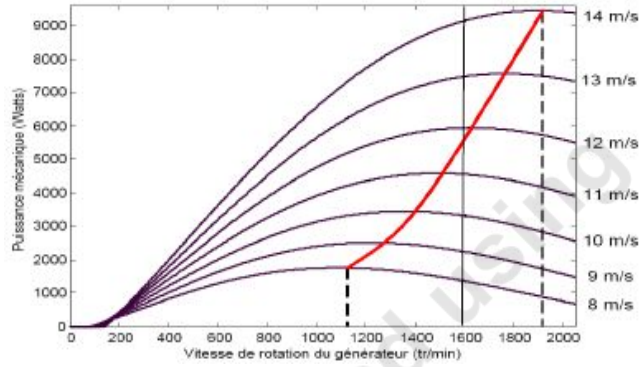
Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse K, la puissance mécanique  $P_m$  disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

$$P_{mg} = \frac{1}{2} C_p \left( \frac{\Omega_2 R}{KV_1} \right) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \quad (I-8)$$

Avec :

$\Omega_2$  : vitesse de rotation après multiplicateur.

Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent (Figure I-7) [3].

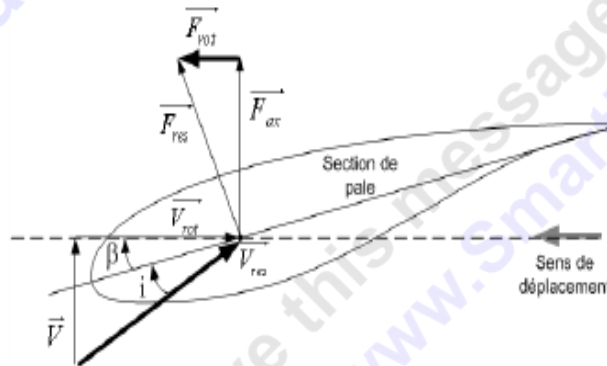


**Figure I-7** Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donnée.

Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1600 tr/min sur la Figure I-7) les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités. Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse de vent, la machine devra pouvoir fonctionner entre 1100 et 1900 tr/min pour cet exemple [3].

## I.5. Stratégies de fonctionnement d'une éolienne :

### I.5.1. Bilan des forces sur une pale :



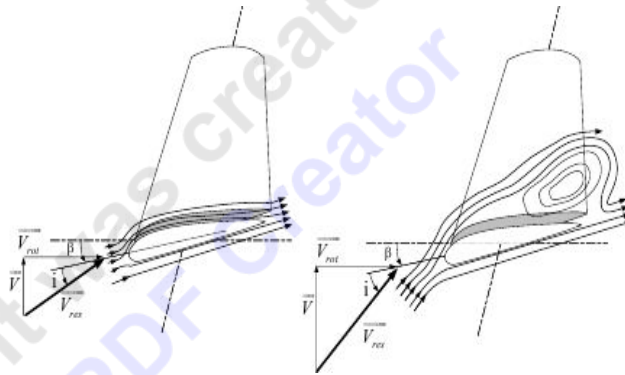
**Figure I-8** Bilan des forces sur une pale.

La Figure I-8 représente la section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur. La vitesse du vent arrivant face à cette pale, est représentée par le vecteur  $\vec{V}$ . Le vecteur  $\vec{V}_{rot}$  représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée  $\vec{V}_{res}$ . L'action du vent sur la pale produit une force  $\vec{F}_{res}$  qui se décompose en une poussée axiale  $\vec{F}_{ax}$  directement compensée par la résistance mécanique du mat et une poussée en direction de la rotation  $\vec{F}_{rot}$  qui produit effectivement le déplacement.

Chaque turbine éolienne est ainsi dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur nominale pour une vitesse de vent nominale donnée. Lorsque la vitesse de vent devient trop élevée ou si la génératrice nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale [3].

## I.5.2. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne :

### I.5.2.1. Système à décrochage aérodynamique "stall" :



**Figure I-9** Flux d'air sur un profil de pale "stall".

La plupart des éoliennes connectées au réseau électrique nécessitent une vitesse de rotation fixe pour des raisons de cohérence de fréquence avec le réseau. Le système de limitation de vitesse le plus simple et le moins coûteux est un système de limitation naturelle (intrinsèque à la forme de la pale) dit "stall". Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence  $i$  devient important, c'est à dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale  $V_n$ , l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale (Figure I-9) et par conséquent une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation [3].

Ce système est simple et relativement fiable mais il manque de précision car il dépend de la masse volumique de l'air et de la rugosité des pales donc de leur état de propreté. Il peut, dans certains cas, être amélioré en autorisant une légère rotation de la pale sur elle même (système "stall actif") permettant ainsi de maximiser l'énergie captée pour les faibles vitesses de vent. Pour les fortes vitesses de vent, la pale est inclinée de façon à diminuer l'angle de calage  $\beta$  et renforcer ainsi l'effet "stall" de la pale. La répercussion des variations de vitesse de vent sur le couple mécanique fournie par l'éolienne est ainsi moins importante [3].

### I.5.2.2 Système d'orientation des pales "pitch" :

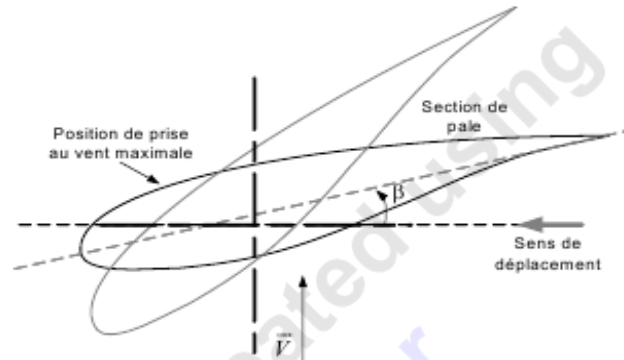


Figure I-10 Variation de l'angle de calage d'une pale.

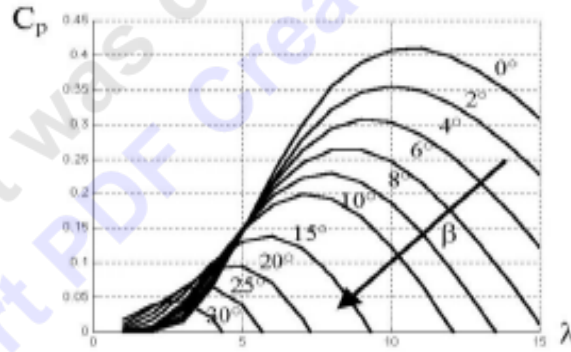


Figure I-11 Flux d'air sur un profil de pale " Stall ".

## I.6. Etat de l'art sur la conversion électromécanique:

L'énergie cinétique du vent est convertie en énergie mécanique par l'éolienne. Ensuite, la vitesse de rotation de l'éolienne est adaptée à celle de la génératrice classique (typiquement de 750 à 3000 tr/min) avec un multiplicateur de vitesse. La génératrice a pour rôle de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique. Le générateur peut ensuite être lié directement ou indirectement au réseau [5].

La vitesse variable permet également d'améliorer la qualité de la puissance électrique produite, en introduisant de la souplesse dans la réaction du système face aux fluctuations brusques de la vitesse du vent [6].

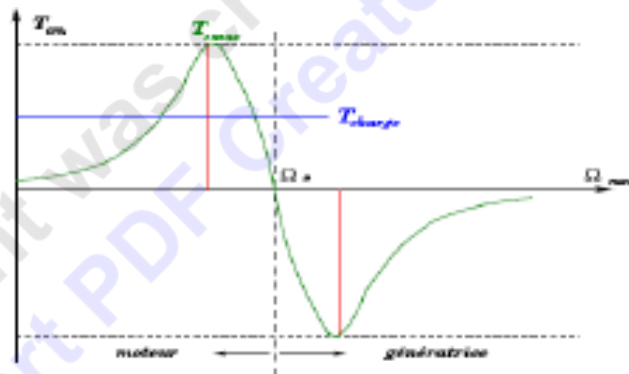
### I.6.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone :

#### I.6.1.1. Machine asynchrone à cage d'écureuil :

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le

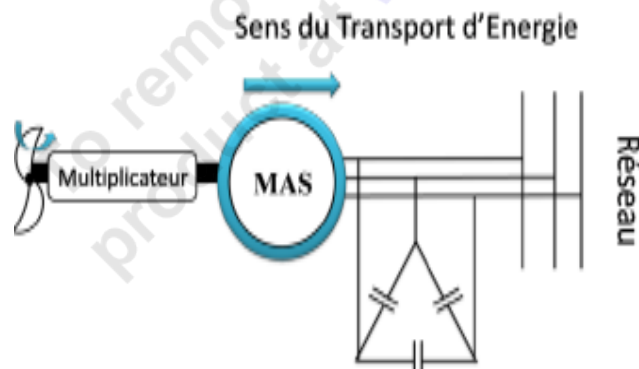
monde. Cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne [3].

Le couple mécanique entraînant (produit par la turbine) tend à accélérer la vitesse de la génératrice. Cette dernière fonctionne alors en hypersynchrone et génère de la puissance électrique sur le réseau. Pour une génératrice standard à deux paires de pôles la vitesse mécanique ( $\Omega_{mec}$ ) est légèrement supérieure à la vitesse du synchronisme  $\Omega_s=1500$  tr/min, ce qui nécessite l'adjonction d'un multiplicateur pour adapter la génératrice à celle du rotor de l'éolienne [6].



**Figure I-12** Caractéristique couple-vitesse d'une machine asynchrone.

Ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau. Celui-ci peut-être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités représentées sur la figure I.13 qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne [3].



**Figure I-13** Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau.

Malgré sa simplicité, le système de fonctionnement à vitesse fixe peut être bruyant, à cause de la modification des caractéristiques aérodynamiques dues à l'orientation des pales, et il n'exploite pas la totalité de la puissance théoriquement disponible pour les vitesses de vent élevées.

#### I.6.1.2. Machine asynchrone à double stator :

Pour améliorer le rendement du dispositif précédent, certains constructeurs utilisent un système à base de machine asynchrone à double stator (Figure 1-14) :

- Un stator de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les petites vitesses de vent.
- Un stator de forte puissance à faible nombre de paires de pôles permettant de fonctionner aux vitesses de vent élevées.

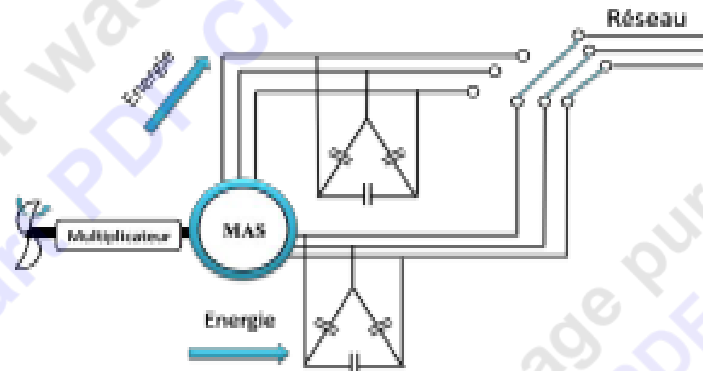
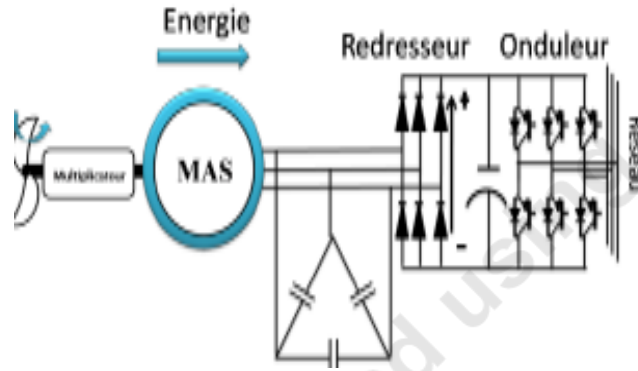


Figure I-14 Machine asynchrone à double stator.

#### I.6.1.3. Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance :

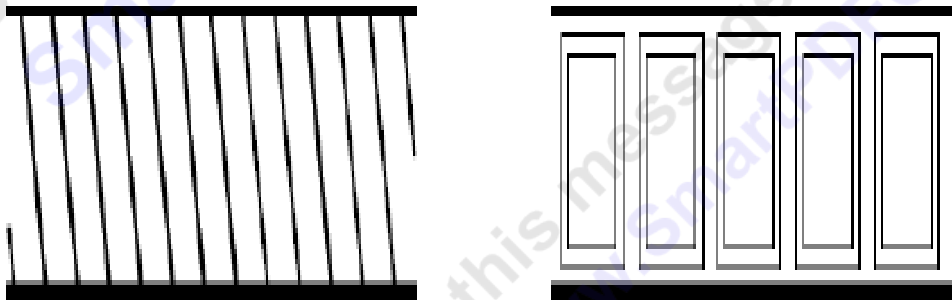
Le dispositif de base est représenté sur la figure 1-15. Cette configuration autorise un fonctionnement à vitesse variable sans limite physique théorique. En effet, quelle que soit la vitesse de rotation de la machine, la tension produite est redressée et transformée en tension continue. Le fonctionnement de l'onduleur est alors classique et une commande adéquate permet de délivrer une tension alternative de fréquence fixe correspondant à celle du réseau avec un facteur de puissance unitaire [3].



*Figure I-15* Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur – onduleur.

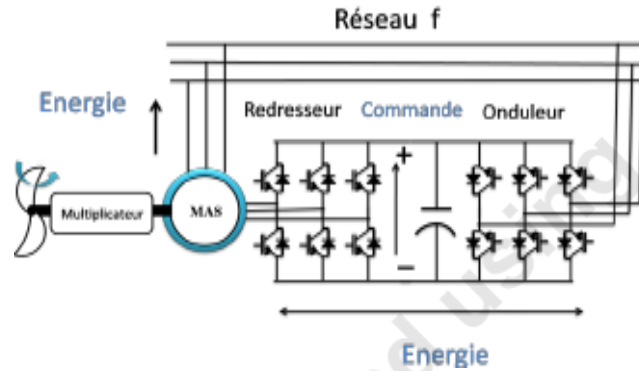
#### I.6.1.4. Machine asynchrone à double alimentation type "brushless" :

Cette machine a la particularité de posséder deux bobinages triphasés au stator. Un des bobinages est directement connecté au réseau et est destiné au transfert de puissance. Le second bobinage, dont la section des conducteurs est moins élevée, permet de faire varier les courants d'excitation de la machine. Le rotor possède une structure spéciale différente de la cage d'écurie classique mais tout aussi robuste : il est constitué de plusieurs boucles conductrices concentriques (Figure I-16) [3].



*Figure I-16* Schéma développé d'un rotor à cage classique et d'un rotor de machine asynchrone "brushless".

Cette machine présente l'intérêt d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable à l'instar du dispositif de la (Figure I-16). En revanche, le stator de forte puissance est connecté directement sur le réseau et le convertisseur est placé entre le stator de faible puissance et le réseau (Figure I-17) [3].



*Figure I-17 Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau.*

#### **I.6.1.5. Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné" :**

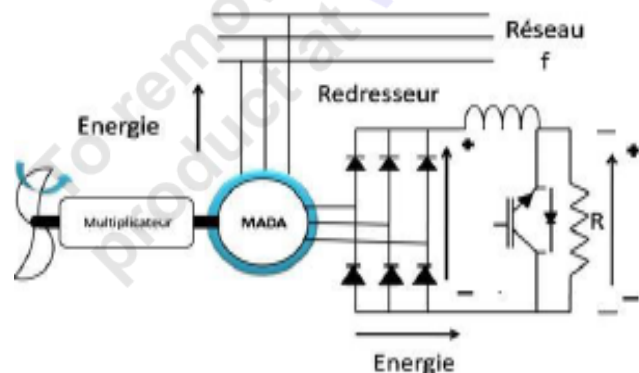
La machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants [5].

##### **I.6.1.5.1. Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée :**

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la figure I-18, 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 [3].

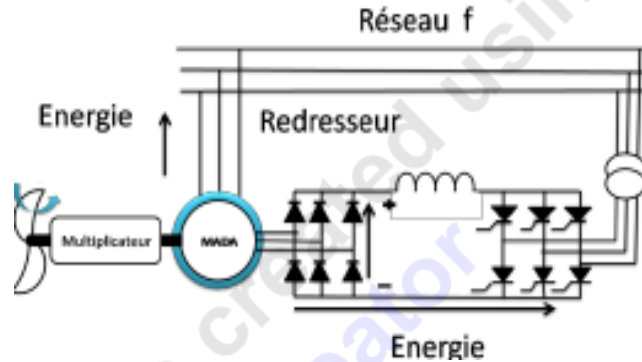
La variation de la vitesse limitée à environ 10% autour de la vitesse de synchronisme par le changement de la résistance rotor [5].



*Figure I-18 Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée.*

### I.6.1.5.2. Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer:

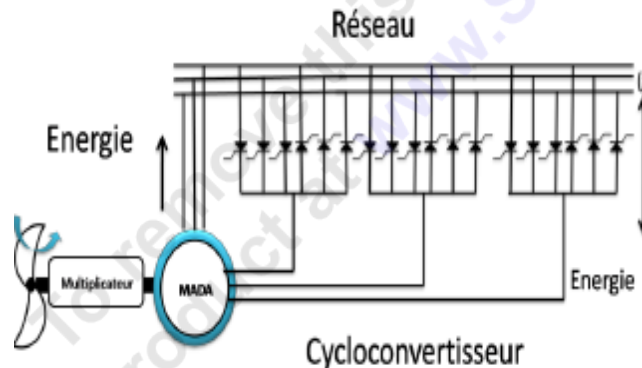
Dans le but de réduire les pertes d'énergie dues à la structure du système précédent, le hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau (structure de Kramer, Figure I-19) [3].



**Figure I.19** Machine Asynchrone à Double Alimentation – structure de Kramer.

### I.6.1.5.3. Machine asynchrone à double alimentation – 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 remplacé par un cycloconvertisseur (Figure I-20), l'ensemble est alors appelé structure de Scherbius. La plage de variation de vitesse est doublée par rapport à la structure de la (Figure 1-19). En effet si la variation du glissement doit rester inférieure à 30% pour maintenir l'efficacité du système, cette variation peut être positive (fonctionnement hyposynchrone) ou négative (fonctionnement hypersynchrone) [3].



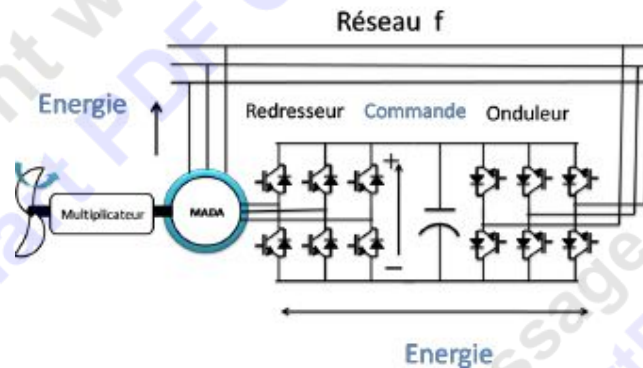
**Figure I-20** Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.

#### I.6.1.5.4. Machine asynchrone à double alimentation: structure de Scherbius avec convertisseurs MLI :

Cette configuration (Figure I-21) a les mêmes caractéristiques que la structure de Scherbius avec cycloconvertisseur. Toutefois les interrupteurs utilisés ici (transistors IGBT) peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO.

L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI) dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées).

Un tel dispositif a l'avantage de fonctionner à vitesse variable en faisant intervenir un convertisseur de faible puissance. Si le glissement reste inférieur à  $\pm 30\%$  autour du synchronisme [3].



*Figure I-21 Machine asynchrone à double alimentation: structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.*

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

Les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes (sans multiplicateur mécanique), pour minimiser la maintenance et accroître la fiabilité [6].

##### I.6.2.1. Machines synchrones à rotor bobiné :

Font appel, le plus souvent, à une excitatrice associée à un redresseur tournant, pour éliminer tout contact glissant. Le rotor peut être à pôles lisses ou saillants et est généralement équipé de circuits amortisseurs [6].

Pour certaines applications à forte puissance et à grande vitesse (30 MW et 30 000 tr/min par exemple), on utilise un rotor cylindrique massif. Mais il est possible de s'affranchir de l'application à grande vitesse en utilisant une machine synchrone à aimants permanents basses vitesses à grand nombre de paires de pôles [6].

#### **I.6.2.2. Machines synchrones à aimants permanents :**

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. L'avantage d'avoir un bon rendement et un bon couple massique, Les inducteurs à aimants à haute énergie permettent de gagner environ 25% de masse par rapport à ceux de type bobiné. Ces qualités sont contre balancées par un coût plus élevé que la MAS. Le convertisseur de fréquence s'impose. C'est pourquoi les machines à entraînement direct sont toutes à vitesse variable [6].

Mais leur inconvénient principal provient de l'absence de possibilité de réglage du flux d'excitation [6].

#### **I.7. Conclusion :**

Une description de l'énergie éolienne a été présentée dans ce chapitre. Dans ce contexte, quelques notions principales au sujet de la technologie éolienne ont été données comme les méthodes de description du gisement éolien, des exemples d'architectures, que sa commence par les différents capteurs éoliens (à axe horizontal, vertical) en suite les caractéristiques technologiques des éoliennes à axe horizontal, aussi les génératrices adaptées avec l'éolien pour différents types et configurations.

# **CHAPITRE II**

*Modélisation*

*Des Systèmes*

*Éoliens*

*(Turbine, MADA et MAS)*

## II.1. Introduction:

Dans ce chapitre, le générateur éolien, qui est basé sur une turbine à vitesse variable à attaque directe et une génératrice asynchrone, nous nous intéressons uniquement à la modélisation d'un système éolien (turbine éolienne à axe horizontal tri-pales et machine asynchrone). Tous les modèles ont été développés en vue d'une exploitation par le logiciel Matlab/Simulink.

## II.2. Modélisation d'une turbine éolienne à axe horizontal :

### II.2.1 Modélisation du vent :

La ressource en vent, du point de vue de sa distribution statistique, est primordiale dans un projet éolien et donc déterminante pour le calcul de production de l'électricité et de rentabilité. Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales, est au cube de la vitesse du vent. La vitesse du vent est un vecteur tridimensionnel. Néanmoins, la direction du vecteur de vitesse du vent dans l'axe vertical n'a pas d'importance du point de vue de la turbine éolienne car elle n'est pas vue par sa surface active. Par simplification, le vecteur de vitesse évolue dans le plan horizontal. Les turbines à axe horizontal sont dépourvues de tout dispositif d'orientation des pales (la surface active est toujours en face du vent), alors le modèle du vent comportemental est simplifié considérablement. La vitesse du vent peut être donc modélisée comme une fonction scalaire qui évolue dans le temps :

$$v(t) = f(t) \quad (\text{II-1})$$

Elle sera modélisée, dans cette étude, sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques:

$$v(t) = A + \sum_{n=1}^i (a_n + \sin(b_n \cdot \omega_n \cdot t)) \quad (\text{II-2})$$

Nous prendrons comme exemple dans notre modélisation l'équation de vent suivante :

$$v(t) = 6.5 + 0.02 \sin(0.1047t) + 0.2 \sin(0.2665t) + 0.1 \sin(1.2930t) + 0.02 \sin(3.6645t) \quad (\text{II-3})$$

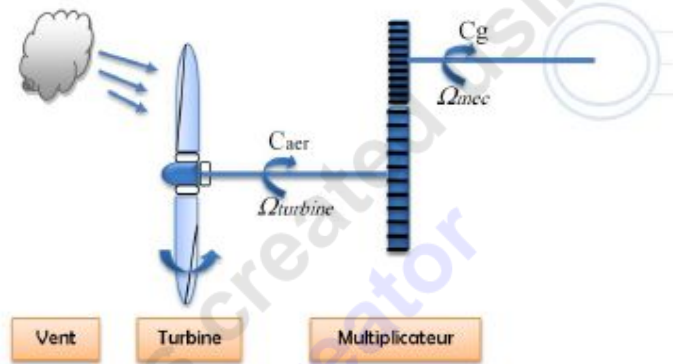
### II.2.2 Modélisation de la turbine :

La turbine qui sera modéliser comporte trois pales de longueur R, fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse  $\Omega_{\text{turbine}}$ , qui entraînera une génératrice (MAS ou MADA) à travers un multiplicateur de vitesse de gain G [1].

On obtient alors un modèle global composé de trois sous-systèmes [5]:

- La turbine.
- Le multiplicateur.
- L'arbre.

La figure II.1 montre le schéma d'une turbine éolienne



**Figure II-1** Schéma de la turbine éolienne

Le dispositif, qui est étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur  $R$  entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain  $G$  (Figure II-1) [5].

L'énergie cinétique d'une masse d'air  $m$  ( $\rho_v$ ) qui se déplace avec la vitesse  $v$ , est :

$$E_v = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (\text{II-4})$$

On connaît la puissance disponible par dérivation de l'énergie cinétique:

$$P_v = \frac{dE}{dt} \quad (\text{II-5})$$

Si cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'un dispositif ayant la surface  $S$  ( $S = \pi \cdot R^2$ ), situé perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent, la puissance du vent ou puissance éolienne instantanée serait alors :

$$P_v = \frac{d}{dt} \left[ \frac{1}{2} \rho V v^2 \right] \quad (\text{II-3})$$

$$P_v = \frac{d}{dt} \left[ \frac{1}{2} \rho (S \cdot x) v^2 \right] = \frac{1}{2} \rho \left( S \cdot \frac{dx}{dt} \right) v^2 \quad (\text{II-7})$$

$\frac{dx}{dt}$  : la vitesse de vent.

$$P_v = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (\text{II-8})$$

$\rho$  : est la densité de l'air (approx.  $1.22 \text{ kg.m}^3$  à la pression atmosphérique à  $15^\circ\text{C}$ ).

$S$  : est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale.

$v$ : est la vitesse du vent.

En réalité, le dispositif de conversion (la turbine éolienne) extrait une puissance aérodynamique  $P_{aer}$  inférieure à la puissance disponible  $P_v$ .

$$P_{aer} = C_p \cdot P_v = C_p(\beta, \lambda) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (\text{II-9})$$

Le coefficient de puissance  $C_p$ , représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne  $\frac{P_{aer}}{P_v}$ . Il dépend de la caractéristique de la turbine [5].

Ce coefficient varie avec l'angle d'orientation des pales ( $\beta$ ) et le ratio de vitesse ( $\lambda$ ). Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_{turbine}}{v} \quad (\text{II-10})$$

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

Connaissant la vitesse de la turbine, donc le couple aérodynamique directement déterminé par :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (\text{II-11})$$

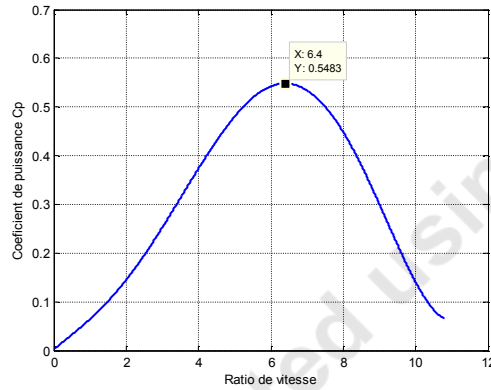
### II.2.3 Coefficient de puissance $C_p$ :

Généralement le coefficient  $C_p$  présente par des graphiques. Le coefficient  $C_p$  est différent d'une turbine à l'autre, qui est généralement fourni par le fabricant et peuvent être utilisées, pour définir une approximation mathématique. En effet, celle-ci a été développée dans la littérature pour calculer le coefficient  $C_p$ . La modélisation peut se faire avec une approximation polynomiale d'ordre  $N$ .

$$C_p(\lambda) = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i \lambda_i \quad (\text{II-12})$$

Dans ce sens. Nous avons donc choisi de modéliser une éolienne de 4 KW, d'où, le coefficient  $C_p$  est donné par la formule suivante:

$$C_p = 7.95633\lambda^5 10^{-5} - 17.375\lambda^4 10^{-4} + 9.86\lambda^3 10^{-3} - 9.4\lambda^2 10^{-3} + 6.38\lambda 10^{-2} + 0.001 \quad (\text{II-13})$$



**Figure II-2** Caractéristique du coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative  $\lambda$

On peut remarquer sur la figure II-2 que le coefficient de puissance passe par un maximum pour une valeur particulière du rapport de vitesse que l'on appelle  $\lambda_{opt}$ . Pour laquelle on a coefficient de puissance  $C_p$  maximale, et par voie de conséquence une puissance captée maximale. Il est alors possible d'élaborer des lois de commande qui permettent de capter la puissance maximale quelque soit la vitesse du vent jusqu'à la puissance nominale de la génératrice où la puissance extraite est limitée à cette valeur[5].

La valeur maximale du coefficient  $C_p$  est 0,548 correspond à  $\lambda = 6,4$ .

#### II.2.4 Modèle du multiplicateur :

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice (Figure II.1). Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (II-14)$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II-15)$$

#### II.2.5 Equation dynamique de l'arbre :

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie  $J$  turbine et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale  $J$  constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice [7].

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (II-16)$$

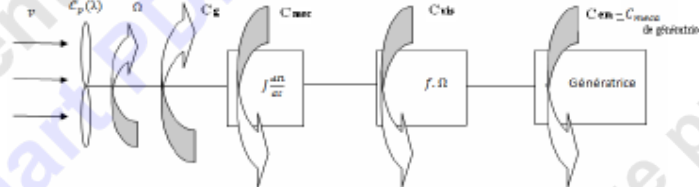
Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe. L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total ( $C_{mec}$ ) appliqué au rotor [5] :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (II-17)$$

Où  $J$  est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice. Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique  $C_{em}$  produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux  $C_{vis}$ , et le couple issu du multiplicateur. Le couple résistant du aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux  $f$  :

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \quad (II-18)$$

En prenant en compte l'inertie et les frottements de paliers la voilure peut être présentée comme dans la figure II-3



**Figure II-3** Modèle d'une turbine éolienne

L'équation mécanique qui gère un tel ensemble est donnée par :

$$C_{mec} = C_g - C_{mec} - C_{vis} \quad (II-19)$$

$$C_g - C_{mec} = J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f \cdot \Omega_{mec} \quad (II-20)$$

En utilisant la transformée de LAPLACE, on peut obtenir la vitesse :

$$\Omega_{mec} = \frac{1}{Js + f} (C_g - C_{mec}) \quad (II-21)$$

### II.2.6 Différentes phases de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable :

Il y a quatre phases de fonctionnement (zones) d'une éolienne comme le montre à la figure II-4 :

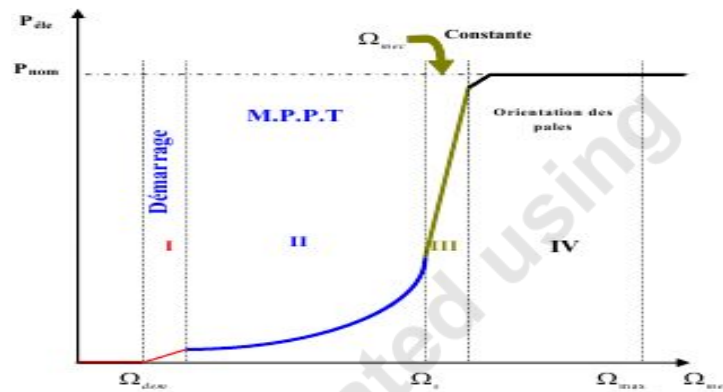


Figure II-4 Caractéristique puissance - vitesse d'une éolienne

**Zone 1** : A partir d'une certaine vitesse minimale nécessaire à l'entraînement de l'aérogénérateur l'éolienne commence à tourner .

**Zone 2** : A partir d'une certaine vitesse seuil de la génératrice (correspondant à un glissement de 30%), un algorithme de commande permettant l'extraction du maximum de puissance du vent (MPPT: *Maximum Power Point Tracking*) est appliqué. On maintient l'angle de calage à sa valeur minimale qui correspond au maximum du coefficient de puissance.

**Zone 3** : Au-delà, l'éolienne fonctionne à vitesse constante. Dans cette zone la puissance atteint jusqu'à 90 % de sa valeur nominale.

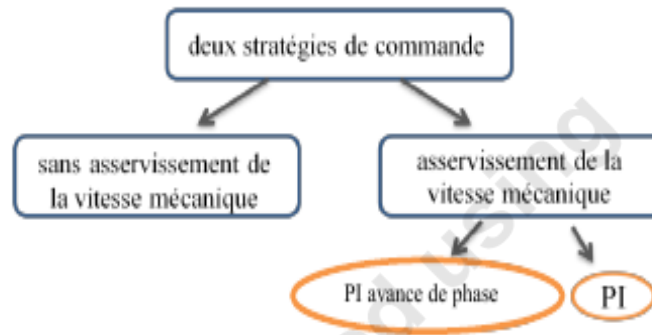
**Zone 4** : arrivée à la puissance nominale, la vitesse doit être limitée, c'est la phase où intervient la limitation de vitesse par orientation des pales (angle de calage), c'est le «Pitch Control» [8], [5].

Dans ce qui suit nous sommes intéressés à la zone 2 ou la maximisation de l'énergie électrique extraite, cette opération est réalisée par le contrôle du couple électromagnétique généré [5].

### II.2.7 Maximisation de la puissance extraite

En pratique, la vitesse de rotation est contrôlée par le couple électromagnétique, de manière à maximiser la puissance électrique générée, c'est le principe de MPPT. On distingue deux structures de commande (voir figure II-5):

- Le contrôle par asservissement de la vitesse mécanique;
- Le contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique.



**Figure II-5** Stratégies de commande de la turbine

Il est difficile de mesurer précisément la vitesse du vent qui est de nature une grandeur très fluctuante. Une mesure erronée de la vitesse conduit donc à une dégradation de la puissance captée selon la technique MPPT. C'est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse.

### II.2.8 Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse :

Cette structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas on obtient :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (II-22)$$

Si on néglige l'effet du couple des frottements visqueux, on obtient :  $C_g = C_{em}$

A partir de la mesure de la vitesse mécanique et la connaissance d'une estimation de la vitesse du vent, on obtient

$$C_{aer} = C_p \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \frac{1}{\Omega_{turbine\_estimée}} v_{estimée}^3 \quad (II-23)$$

Avec:

$$v_{estimée} = \frac{\Omega_{turbine\_estimée} \cdot R}{\lambda} \quad (II-24)$$

On fixe le ratio de vitesse à la valeur  $\lambda_{C_p \max}$ , qui correspond au maximum du coefficient de puissance  $C_{p \max}$  et, en regroupant les équations précédentes, on aura l'expression du couple de référence qui est proportionnel au carré de la vitesse de la génératrice.

$$C_{em\_ref} = \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2 \cdot G^3} \frac{C_p}{\lambda_{C_p \max}^3} \cdot \Omega_{mec}^2 \quad (II-25)$$

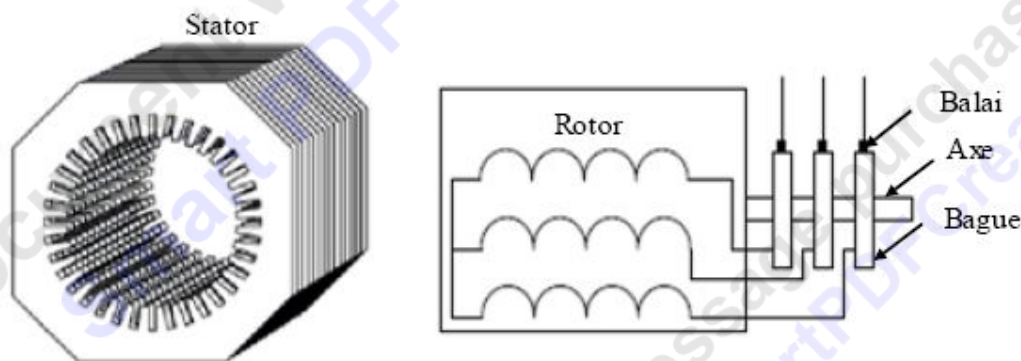
## II.2 Modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) :

### II.2.1 Présentation de la machine asynchrone a double alimentation:

La première apparition de cette machine date de l'année 1899 [8]; il ne s'agit pas d'une nouvelle structure mais d'un nouveau mode d'alimentation [9].

La MADA est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné alimentée par ses deux armatures; elle présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone ou synchrone). Son rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais, il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne [8], [10].

La figure suivante représente la structure de la machine asynchrone à double alimentation.



**Figure II-6** Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.

Dans cette machine, les enroulements statoriques sont alimentés par le réseau et les enroulements rotoriques sont alimentés à travers un convertisseur de fréquence, ou bien les deux enroulements sont alimentés par deux onduleurs autonomes en général.

### II.2.2 Modes de fonctionnement de la MADA:

Seul le mode de fonctionnement avec le stator directement connecté au réseau et le rotor alimenté par un onduleur nous concerne dans cette étude.

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

Effectivement, une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au dessus pour être en générateur. Ici, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper ou hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. Nous allons présenter successivement ces différents modes de fonctionnement [11].

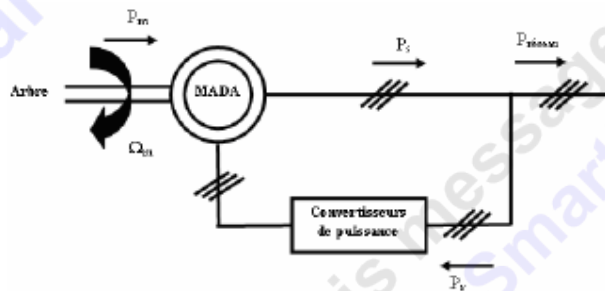
### II.2.2.1 Fonctionnement en moteur à vitesse variable :

Lorsque la machine fonctionne en moteur, la puissance est fournie par le réseau. Si la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme la puissance du glissement peut être récupérée, c'est la cascade hypo synchrone. En cascade hyper synchrone, une partie de la puissance fournie par le réseau va au rotor et est convertie en puissance mécanique[6].

### II.2.2.2 Fonctionnement en génératrice à vitesse variable :

#### II.2.2.2.1 Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone:

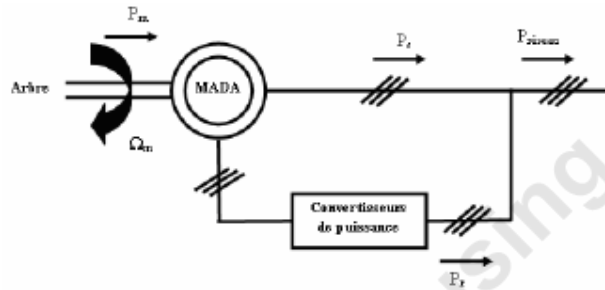
La figure II-7 montre que la puissance est fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce mode fonctionnement [12].



*Figure II-7 Fonctionnement générateur hypo-synchrone*

#### II.2.2.2.2 Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone:

La figure II-8 montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au dessus de la vitesse synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en joule dans le rotor [12].



**Figure II-8** Fonctionnement générateur hyper-synchrone

On peut donc remarquer que la MADA a deux principaux avantages sur la machine à cage classique: la production de puissance électrique quelle que soit sa vitesse de rotation (hypo ou hyper synchronisme) et la récupération de la puissance de glissement [11].

### II.2.3 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation :

Pour un fonctionnement normal de la machine asynchrone en régime établi, il faut que les vecteurs des forces magnétomotrices du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre. Et du moment que le vecteur résultant de  $f_{mms}$  des enroulements statoriques tourne dans l'espace avec une vitesse angulaire  $\omega_s = 2\pi f$  et le rotor tourne avec la vitesse  $\omega_r$ ; alors pour que cette condition soit vérifiée, il faut que le vecteur des  $f_{mms}$  des enroulements rotoriques tourne par rapport au rotor avec une vitesse  $\omega_{gl}$  [9].

Telle que:

$$\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r = \omega_s g \quad (\text{II-26})$$

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

Si la vitesse de la machine est inférieure à la vitesse de synchronisme, les sens de rotation des deux vecteurs sont identiques; dans le cas contraire, quand la vitesse est supérieure à la vitesse de synchronisme les sens seront opposés [9].

Pour que la rotation du vecteur résultant des  $f_{mms}$  par rapport au rotor se réalise, le courant dans l'enroulement doit avoir une fréquence  $f_{ro}$ , définie à partir de  $\omega_{gl} = 2\pi f_{ro}$ ; c'est-à-dire:

$$f_{ro} = f \cdot g \quad (\text{II-27})$$

### II.2.4 Application de la MADA:

Actuellement la machine asynchrone à double alimentation occupe une large place dans les applications industrielles, grâce à ces nombreux avantages. En effet, la MADA est très utilisée en mode générateur dans les applications d'énergie renouvelable notamment dans les systèmes éoliens [9].

De plus, le fonctionnement en générateur présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée telles que [9]:

- Les générateurs des réseaux de bord des navires ou des avions;
- Les centrales hydrauliques à débit et vitesse variable;
- Les groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.

La MADA peut être utilisée aussi dans d'autres applications importantes nécessitant un fort couple de démarrage [10], telles que:

- La métallurgie avec les enrouleuses et les dérouleuses de bobines;
- La traction, avec notamment des applications de type transport urbain ou propulsion maritime;
- Et enfin l'application de levage, les ascenseurs, les monte-charges etc... .

### **II.2.5 Avantages et inconvénients de la MADA :**

Nous introduisons succinctement dans ce paragraphe les avantages et les quelques inconvénients de la Machine Asynchrone à Double Alimentation lors de son fonctionnement à vitesse variable [13].

#### **II.2.5.1 Avantages de la MADA :**

Parmi ses nombreux avantages, nous citons :

- La mesure des courants au stator et rotor, contrairement à la machine à cage, donnant ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- La possibilité de fonctionner à couple constant au delà de la vitesse nominale.
- La MADA se comporte comme une machine synchrone et l'on peut pratiquer des rapports de démagnétisation très importants (de l'ordre de 1 à 6).

#### **II.2.5.2 Inconvénients de la MADA :**

Tout d'abord, la MADA est une machine asynchrone; alors le premier inconvénient est que sa structure est non linéaire, ce qui implique la complexité de sa commande. En plus de ça, on peut citer les inconvénients suivants :

- Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à causes des balais.
- Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage.

- Nous utilisons un nombre des convertisseurs (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) plus importants que la machine à cage (un redresseur et un onduleur) [13].
- Un autre inconvénient apparaît lors de l'étude de cette machine, ce dernier est la stabilité notamment en boucle ouverte [12],[9].

### II.2.6 Modélisation de la MADA :

La modélisation d'une machine asynchrone était basée sur l'élaboration de schémas équivalents dérivés de la théorie du champ tournant. La simplicité de conception et d'entretien de cette machine à la faveur des industries, s'accompagne toutefois d'une grande complexité physique, liée aux interactions électromagnétiques entre le stator et le rotor. Les méthodes matricielles sont développées et sont devenues les bases pour une approche de modélisation, de simulation, d'identification et de commande. Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la modélisation et à la simulation de la machine asynchrone à double alimentation[5].

Pour notre étude, nous considérons les hypothèses simplificatrices suivantes :

- ❖ L'entrefer est constant, les effets des encoches et les pertes ferromagnétiques sont négligeables;
- ❖ Le circuit magnétique est non saturé, c'est à dire à perméabilité constante;
- ❖ Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et l'effet de peau est négligeable ;
- ❖ La  $fmm$  créée par chacune des phases des deux armatures est supposée à répartition sinusoïdale;

#### II.2.6.1 Modèle effectif de la MADA :

La machine asynchrone à double alimentation peut être modélisée par six équations électriques et une seule équation mécanique qui concerne la dynamique du rotor. Elle peut être schématisée par la figure II-9.

Les phases sont désignées par a, b, c pour le stator et A, B, C pour le rotor. L'angle électrique  $\theta$  définit la position relative instantanée entre les axes magnétiques des phases statoriques et rotoriques.

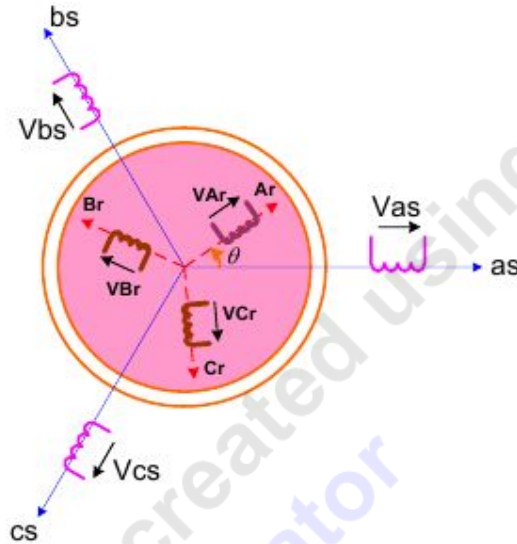


Figure II-9 Représentation schématisée d'une machine asynchrone à double alimentation.

### II.2.6.2 Equations électriques de la MADA :

Les enroulements illustrés par la figure II-9 obéissent aux équations électriques qui s'écrivent sous la forme matricielle suivante.

$$[V_{abc}] = R_s [i_{abc}] + \frac{d[\phi_{abc}]}{dt} \tag{II-28}$$

$$[V_{ABC}] = R_r [i_{ABC}] + \frac{d[\phi_{ABC}]}{dt} \tag{II-29}$$

Où :

$R_s$  est la résistance d'une phase statorique;

$R_r$  est la résistance d'une phase rotorique.

Les matrices suivantes représentent respectivement:

$[V_{abc}] = [V_a V_b V_c]^t$  : le vecteur des tensions statoriques;

$[i_{abc}] = [i_a i_b i_c]^t$  : le vecteur des courants statoriques;

$[\phi_{abc}] = [\phi_a \phi_b \phi_c]^t$  : le vecteur des flux statoriques.

On définit de même, par changement d'indices, les vecteurs rotoriques:

$[V_{ABC}] = [V_A V_B V_C]^t$  : le vecteur des tensions rotoriques;

$[i_{ABC}] = [i_A i_B i_C]^t$  : le vecteur des courants rotoriques;

$[\phi_{ABC}] = [\phi_A \phi_B \phi_C]^t$  : le vecteur des flux rotoriques.

Les équations des flux totalisés couplés avec les phases statoriques et rotoriques, sont données par les expressions suivantes:

Pour le stator:

$$[\phi_{abc}] = [L_s][i_{abc}] + [L_{sr}][i_{ABC}] \quad (\text{II-30})$$

Pour le rotor:

$$[\phi_{ABC}] = [L_r][i_{ABC}] + [L_{sr}]^t[i_{abc}] \quad (\text{II-31})$$

Où :  $[L_s]$  est la matrice des inductances statoriques, elle est donnée par:

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ab} \\ L_{ab} & L_{aa} & L_{ab} \\ L_{ab} & L_{ab} & L_{aa} \end{bmatrix}$$

$[L_r]$  est la matrice des inductances rotoriques, elle est donnée par:

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AB} \\ L_{AB} & L_{AA} & L_{AB} \\ L_{AB} & L_{AB} & L_{AA} \end{bmatrix}$$

Et  $[L_{sr}]$  est la matrice des inductances mutuelles, entre le stator et le rotor, elle est donnée par:

$$[L_{sr}] = L_{aA} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta \end{bmatrix}_{AB}$$

Avec:

$L_{aa}$  : C'est l'inductance propre d'une phase statorique;

$L_{ab}$  : C'est l'inductance mutuelle entre deux phases statoriques;

$L_{AA}$  : C'est l'inductance propre d'une phase rotorique;

$L_{AB}$  : C'est l'inductance mutuelle entre deux phases rotoriques;

$L_{aA}$  : C'est l'inductance mutuelle maximale entre une phase statorique et une phase rotorique.

En introduisant les équations II-30 et II-31 dans les équations II-28 et II-29 respectivement, on obtient:

$$[V_{abc}]R_s[i_{abc}] + [L_s]\frac{d[i_{abc}]}{dt} + \frac{d([L_{sr}][i_{ABC}])}{dt} \quad (\text{II-32})$$

$$[V_{ABC}] = R_r[i_{ABC}] + [L_r]\frac{d[i_{ABC}]}{dt} + \frac{d([L_{sr}]^t[i_{abc}])}{dt} \quad (\text{II-33})$$

La dernière relation importante complétant le modèle de la machine asynchrone à double alimentation, est l'équation fondamentale mécanique décrivant la dynamique du rotor[9]. Cette équation est donnée par:

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} + f_r \Omega_r = C_{em} - C_r \quad (\text{II-34})$$

Où :

$J$  est le moment d'inertie du rotor de la machine en  $(\text{kg.m}^2)$ ;

$\Omega_r$  est la vitesse angulaire mécanique du rotor en  $(\text{rad/s})$ ;

Avec: 
$$\Omega_r = \frac{\omega_r}{p}$$

Tel que:

$p$  : est le nombre de paires de pôles;

$\Omega_r$  : est la vitesse angulaire électrique de rotation du rotor;

$f_r$  : est le coefficient de frottement en  $(\text{N.m.s/rad})$ ;

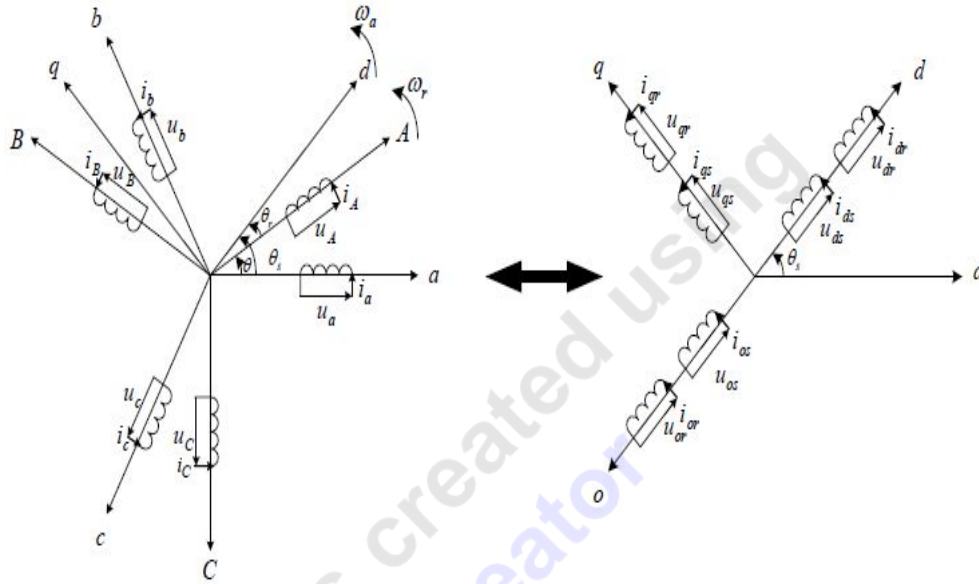
$C_{em}$  est le couple électromagnétique en  $(\text{N.m})$ ;

$C_r$  est le couple résistant en  $(\text{N.m})$ .

Le modèle réel de la machine asynchrone à double alimentation est composé d'un ensemble d'équations différentielles ordinaires à coefficients variables en fonction de l'angle de rotation  $\theta$  (voir la matrice des inductances mutuelles entre le stator et le rotor). On utilise la transformation de Park qui permet d'obtenir un système d'équations à coefficients constants, en transformant les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalents.

### II.2.6.3 Application de la transformation de Park à la MADA :

Transformation de Park consiste à transformer un système d'enroulements triphasés d'axes  $a, b, c$ , en un système équivalent à deux enroulements biphasés d'axes  $d, q$  créant la même force magnétomotrice. La composante homopolaire intervient pour équilibrer le système transformé, c'est-à-dire, elle ne participe pas à la création de cette  $fmm$  de sorte que l'axe homopolaire peut être choisi orthogonal au plan  $(d,q)$ . La condition de passage du système triphasé au système biphasé est la création d'un champ électromagnétique tournant avec des forces magnétomotrices égales. Ceci conduit à la conservation de puissances instantanées et la réciprocité des inductances mutuelles, et permet d'établir une expression du couple électromagnétique dans le repère correspondant au système transformé, qui reste invariable pour la machine réelle [14]. Le schéma de la figure II-10 montre le principe de la transformation de Park appliquée à la machine asynchrone à double alimentation.



**Figure II-10** Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA.

Où:

$\theta$  : est l'angle entre l'axe rotorique A et l'axe statorique a;

$\theta_r$  : est l'angle entre l'axe rotorique A, et l'axe de Park direct d;

$\theta_s$  : est l'angle entre l'axe statorique a, et l'axe de Park direct d;

$\omega_a$  : est la vitesse angulaire du système d'axes (d, q);

$\omega_r$  : est la vitesse angulaire électrique rotorique.

Grâce à cette transformation, on définit une matrice unique appelée matrice de Park donnée par:

$$[A] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\psi & \cos\left(\psi + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\psi & -\sin\left(\psi + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

Les grandeurs statoriques et rotoriques dans le repère de Park sont exprimées en utilisant les deux transformations suivantes:

- Pour le stator:

$$[X_{dgo}]_s = [A_s][X_{abc}] \quad (\text{II.35})$$

- Pour le rotor:

$$[X_{dgo}]_r = [A_r][X_{ABC}] \quad (\text{II.36})$$

Telle que X est une grandeur qui peut être une tension U, un courant I, ou un flux  $\phi$ .

Avec :

$$[A_s] = [A(\psi = \theta_s)] \text{ et } [A_r] = [A(\psi = \theta_r)].$$

#### II.2.6.4 Mise en équation de la MADA dans le repère de Park :

Dans le repère de Park, on a les transformations suivantes:

- Pour les tensions:

$$[V_{dqo}]_s = [A_s][V_{abc}] \quad (\text{II-37})$$

$$[V_{dqo}]_r = [A_r][V_{ABC}] \quad (\text{II-38})$$

- Pour les courants:

$$[i_{dqo}] = [A_s][i_{abc}] \quad (\text{II-39})$$

$$[i_{dqo}] = [A_r][i_{ABC}] \quad (\text{II-40})$$

- Pour les flux:

$$[\phi_{dqo}]_s = [A_s][\phi_{abc}] \quad (\text{II-41})$$

$$[\phi_{dqo}] = [A_r][\phi_{ABC}] \quad (\text{II-42})$$

##### II.2.6.4.1 Equations des tensions:

Pour le stator, on a:

$$[V_{abc}] = R_s [i_{abc}] + \frac{d[\phi_{abc}]}{dt} \quad (\text{II-43})$$

En multipliant l'équation II-43 par la matrice  $[A_s]$ , il vient:

$$[A_s][V_{abc}] = [A_s]R_s [i_{abc}] + [A_s] \frac{d[\phi_{abc}]}{dt} \quad (\text{II-44})$$

Alors:

$$[V_{dqo}] = R_s [i_{dqo}] + [A_s] \frac{d[\phi_{abc}]}{dt} \quad (\text{II-45})$$

Le développement de l'équation II-37 donne:

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_a \phi_{qs} \quad (\text{II-46})$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} - \omega_a \phi_{ds} \quad (\text{II-47})$$

$$V_{os} = R_s i_{os} + \frac{d\phi_{os}}{dt} \quad (\text{II-48})$$

Où :  $\omega_a = \frac{d\theta_s}{dt}$  est la vitesse angulaire du système d'axes (d,q).

En procédant d'une façon analogue à celle du stator, on trouve pour le rotor:

$$V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_a - \omega_r) \phi_{qr} \quad (\text{II-49})$$

$$V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} - (\omega_a - \omega_r) \phi_{dr} \quad (\text{II-50})$$

$$V_{or} = R_r i_{or} + \frac{d\phi_{or}}{dt} \quad (\text{II-51})$$

#### II.2.6.4.2 Equations des flux:

Pour le stator, en multipliant l'équation II-30 par  $[A_s]$  on trouve:

$$[A_s] [\phi_{abc}] = [A_s] [L_s] [i_{abc}] + [A_s] [L_{sr}] [i_{ABC}] \quad (\text{II-52})$$

Donc :

$$[\phi_{dqo}] = [A_s] [L_s] [i_{abc}] + [A_s] [L_{sr}] [i_{ABC}] \quad (\text{II-53})$$

Après la simplification, on trouve:

$$\phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \quad (\text{II-54})$$

$$\phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \quad (\text{II-55})$$

$$\phi_{os} = L_s i_{os} \quad (\text{II-56})$$

Pour le rotor, et de la même manière, on trouve

$$\phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \quad (\text{II-57})$$

$$\phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \quad (\text{II-58})$$

$$\phi_{or} = L_r i_{or} \quad (\text{II-59})$$

Avec :

$L_s = L_{aa} - L_{ab}$  : est l'inductance cyclique statorique;

$L_{os} = L_{aa} + 2 L_{ab}$  : est l'inductance homopolaire statorique;

$M = \frac{2}{3} L_{aA}$  : est l'inductance mutuelle cyclique entre le stator et le rotor;

$L_r = L_{AA} - L_{AB}$  : est l'inductance cyclique rotorique;

$L_{or} = L_{AA} + 2 L_{AB}$  : est l'inductance homopolaire rotorique.

Jusqu'à maintenant, le modèle de Park n'est pas complètement défini, puisque la vitesse de rotation  $\omega_a$  du repère (d,q) par rapport au stator est quelconque. Les équations des tensions sont affectées, par le choix du référentiel, c'est-à-dire de la vitesse de rotation  $\omega_a$ .

### II.2.6.5 Choix du référentiel:

En général, l'étude du comportement dynamique des machines électriques peut se faire suivant la transformation de Park pour différents référentiels. Le choix du référentiel s'effectue suivant le phénomène à étudier et les simplifications offertes par ce choix. Trois types de référentiels sont intéressants en pratique:

- Référentiel lié au stator: Ce référentiel est appelé aussi système d'axes  $(\alpha, \beta)$ . Dans ce cas,  $(\omega_a = 0)$ . Ce système est utilisé pour étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines électriques [9]. Les équations électriques de la machine deviennent:

**Au stator:**

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} \quad (\text{II-60})$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} \quad (\text{II-61})$$

$$V_{os} = R_s i_{os} + \frac{d\phi_{os}}{dt} \quad (\text{II-62})$$

**Au rotor:**

$$V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} + \omega_r \phi_{qr} \quad (\text{II-63})$$

$$V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + \omega_r \phi_{dr} \quad (\text{II-64})$$

$$V_{or} = R_r i_{or} + \frac{d\phi_{or}}{dt} \quad (\text{II-65})$$

- Référentiel lié au rotor: Dans ce cas, le système d'axes  $(d,q)$  est immobile par rapport au rotor et tourne avec la vitesse  $(\omega_a = \omega_r)$ . Ce système d'axes est utilisé pour étudier les processus transitoires dans les machines synchrones et asynchrones avec une connexion non symétrique des circuits du rotor [9].

Les équations électriques de la machine dans ce référentiel deviennent:

Au stator:

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_r \phi_{qs} \quad (\text{II-66})$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_r \phi_{ds} \quad (\text{II-67})$$

$$V_{os} = R_s i_{os} + \frac{d\phi_{os}}{dt} \quad (\text{II-68})$$

Au rotor:

$$V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} \quad (\text{II-69})$$

$$V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} \quad (\text{II-70})$$

$$V_{or} = R_r i_{or} + \frac{d\phi_{or}}{dt} \quad (\text{II-71})$$

### -Référentiel lié au champ tournant:

Ce référentiel est appelé aussi système d'axes (X,Y) il tourne avec la vitesse du champ électromagnétique, c'est-à-dire ( $\omega_a = \omega_s$ ) les équations électriques deviennent :

Au stator:

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \quad (\text{II-72})$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \quad (\text{II-73})$$

$$V_{os} = R_s i_{os} + \frac{d\phi_{os}}{dt} \quad (\text{II-74})$$

Au rotor:

$$V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr} \quad (\text{II-75})$$

$$V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{dr} \quad (\text{II-76})$$

$$V_{or} = R_r i_{or} + \frac{d\phi_{or}}{dt} \quad (\text{II-77})$$

### II.2.6.6 Expression du couple électromagnétique de la MADA dans le repère de Park :

Pour étudier les phénomènes transitoires (démarrage, freinage, variation de la charge) avec une vitesse rotorique variable, il faut ajouter l'équation du mouvement II-34 au système d'équations différentielles modélisant la machine [8].

La forme générale du couple électromagnétique d'une machine asynchrone triphasée modélisée dans le repère de Park est donnée par la relation suivante:

$$C_{em} = \frac{3pM}{2L_r} (\phi_{dr} i_{qs} - \phi_{qr} i_{ds}) = \frac{3p}{2} (\phi_{dr} i_{qs} - \phi_{qr} i_{ds}) \quad (\text{II-78})$$

### II.2.7 Modèle de la MADA dans le repère de Park sous forme d'état :

Pour la machine asynchrone à double alimentation les variables de contrôle sont les tension statorique et rotorique. En considérant les courants statorique et rotorique comme des vecteurs d'état, alors le modèle de la MADA est par l'équation d'état suivante:

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt} = A X + B U \quad (\text{II-79})$$

Avec:

X : Vecteur d'état.

A : Matrice d'évolution d'état du système.

B : Matrice de commande.

U : Vecteur du système de commande.

Où:

$$X = [i_{sd} \ i_{sq} \ i_{rd} \ i_{rq}]^T ;$$

$$U = [V_{sd} \ V_{sq} \ V_{rd} \ V_{rq}]^T ;$$

Pour le représentation matriciel:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & \omega_s L_s & 0 & \omega_s M \\ -\omega_s L_s & -R_s & -\omega_s M & 0 \\ 0 & (\omega_s - \omega) M & -R_r & (\omega_s - \omega) L_r \\ -(\omega_s - \omega) M & 0 & -(\omega_s - \omega) L_r & -R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} \\ & \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -R_s & \omega_s L_s & 0 & \omega_s M \\ -\omega_s L_s & -R_s & -\omega_s M & 0 \\ 0 & (\omega_s - \omega) M & -R_r & (\omega_s - \omega) L_r \\ -(\omega_s - \omega) M & 0 & -(\omega_s - \omega) L_r & -R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II-80}) \end{aligned}$$

On pose:

$$[L] = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}$$

$$[Z] = \begin{bmatrix} -R_s & \omega_s L_s & 0 & \omega_s M \\ -\omega_s L_s & -R_s & -\omega_s M & 0 \\ 0 & (\omega_s - \omega) M & -R_r & (\omega_s - \omega) L_r \\ -(\omega_s - \omega) M & 0 & -(\omega_s - \omega) L_r & -R_r \end{bmatrix}$$

Alors l'équation II-80 dévient :

$$\frac{dX}{dt} = [L]^{-1} \cdot [Z] X + [L]^{-1} U \quad (\text{II-81})$$

Par analogie de l'équation II-81 avec l'équation II-79, on trouve:

$$A = [L]^{-1} [Z]$$

$$B = [L]^{-1}$$

La matrice  $[Z]$  peut être écrite comme suit:

Dans le but de simplifier la réalisation par SIMULINK/MATLAB la matrice  $[Z]$  peut être décomposée de la forme suivante:

$$[Z] = -[Z_1] - \omega \cdot [Z_2] + \omega_s \cdot [Z_3]$$

Avec :

$$[Z_1] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}, [Z_2] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix}, [Z_3] = \begin{bmatrix} 0 & L_s & 0 & M \\ -L_s & 0 & -M & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix}$$

### II.3 Modélisation de la Machine Asynchrone :

De la même manière que nous avons exposé le modèle de la MADA. le modèle de la machine à cage reste le même, à une différence près : les enroulements rotoriques sont plus en court-circuit et sont accessibles via des collecteurs, par conséquent les tensions diphasées rotoriques du modèle sont plus nulles. Nous allons donc nous contenter de rappeler le modèle diphasé de la machine asynchrone dans le référentiel (d - q) lié au champ tournant[15]:

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \quad (\text{II-82})$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \quad (\text{II-83})$$

$$V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr} = 0 \quad (\text{II-84})$$

$$V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{dr} = 0 \quad (\text{II-85})$$

### II.3.1 Equations de puissance et de couple

Sachant que la transformation de Park conserve la puissance instantanée. Cette dernière sera donnée par :

$$\begin{aligned} P_i &= (V_s)^t \cdot I_s = V_{sa} \cdot i_{as} + V_{sb} \cdot i_{sb} + V_{sc} \cdot i_{sc} \\ &= V_{sd} \cdot i_{sd} + V_{sq} \cdot i_{sq} \end{aligned} \quad (\text{II-86})$$

$$\Rightarrow P_i = \left[ R_s \cdot I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \right] I_{ds} + \left[ R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \right] I_{qs} \quad (\text{II-87})$$

Après calcul, on trouve :

$$P_i = \left[ R_s \cdot I_{ds}^2 + R_s \cdot I_{qs}^2 \right] + \left[ \frac{d\phi_{ds}}{dt} \cdot I_{ds} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} \cdot I_{qs} \right] + \left[ \omega_s (\phi_{ds} I_{qs} - \phi_{qs} I_{ds}) \right] \quad (\text{II-88})$$

Le premier terme est facilement identifiable aux pertes joules, le second terme correspond à la puissance électromagnétique stockée. Le troisième terme représente donc la puissance électrique transformée en puissance mécanique [16].

$$C_e = P(\phi_{ds} I_{qs} - \phi_{qs} I_{ds})$$

En remplaçant par les expressions des flu  $\phi_{dr}, \phi_{qr}$

$$\Rightarrow C_e = \frac{PM}{L_r} (\phi_{dr} \cdot I_{qs} - \phi_{qr} \cdot I_{ds}) \quad (\text{II-89})$$

### II.4.2 Equation mécanique :

Pour étudier les phénomènes transitoires électromécaniques avec une vitesse rotorique variable (par exemple le démarrage, le freinage, la variation de la charge à l'arbre, ...etc), il faut ajouter l'équation de mouvement au système d'équations différentielles [16].

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = C_e - C_r - f\Omega_r \quad (\text{II-90})$$

Notons que la vitesse électrique du rotor est donnée par l'expression suivante :

$$\omega_r = p \cdot \Omega_r \quad (\text{II-91})$$

Avec :

$C_r$  : couple de charge

$C_e$  : couple électromagnétique

$f$  : coefficient de frottement

$J$  : moment d'inertie

$\Omega_r$  : la vitesse angulaire de la machine

## II.4 Résultats de Simulation et Interprétations:

### II.4.1 La turbine :

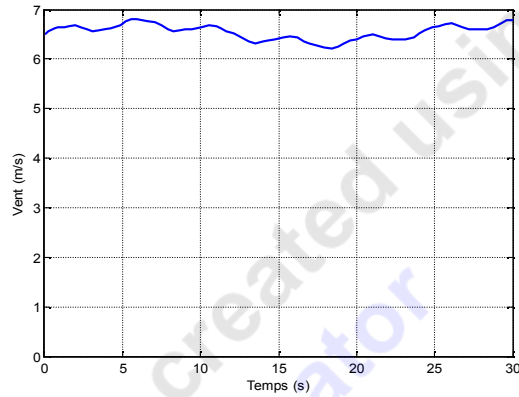


Figure II-11 Profil du vent

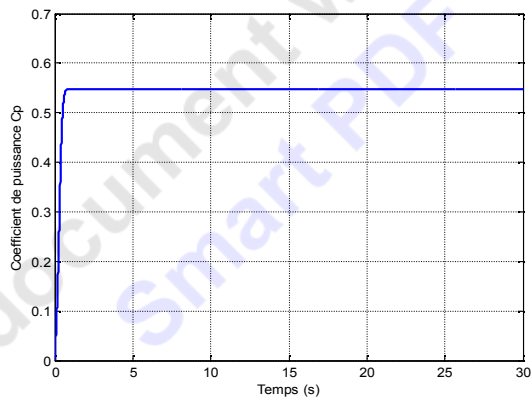


Figure II-12 Coefficient de puissance  $C_p$

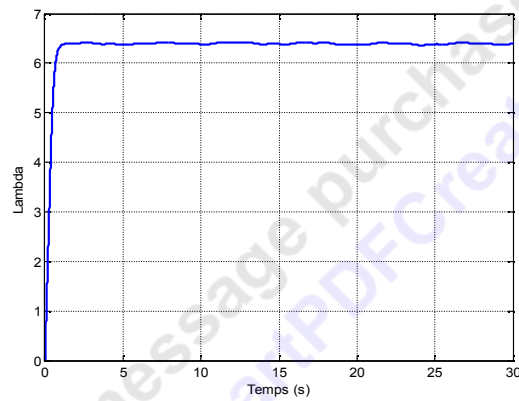


Figure II-13 Vitesse relative  $\lambda$

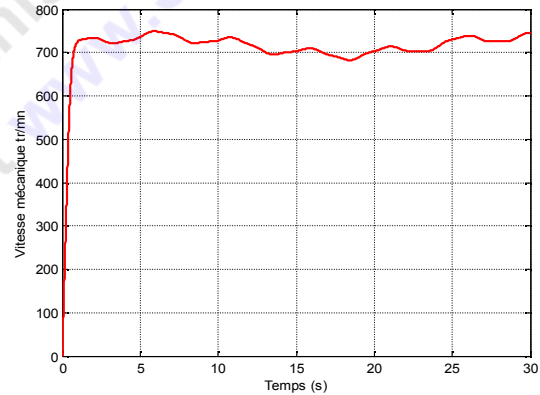
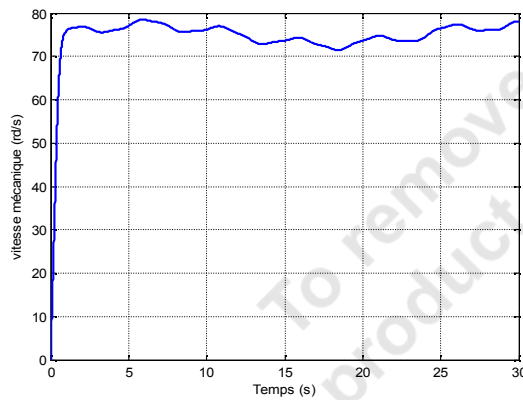
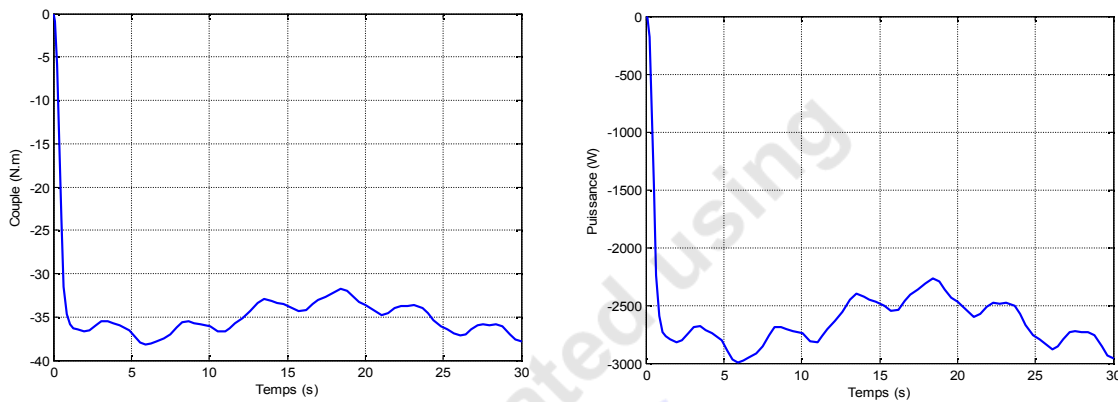


Figure II-14 Vitesse mécanique



**Figure II-15** Couple et Puissance électrique produite

Ce coefficient de puissance est obtenu pour un angle de calage  $\beta$  fixe ( $\beta=2^\circ$ ), qui nous donne un  $\lambda_{optimal}$ . On remarque que le  $C_p$  atteint une valeur moyenne de 0,54, il cherche à être gardé au maximum possible pour but de maximiser la production, et varie légèrement selon la variation de la vitesse du vent.

En négligeant les pertes d'origine électrique, la puissance électrique devient égale à la puissance électromagnétique définie par  $:\Omega_{mec} \cdot C_{em}$ . Cette puissance (puissance de référence) sera comptabilisée négativement car elle s'oppose à la puissance aérodynamique "pour respecter la convention récepteur de l'ensemble". Lorsque ces deux puissances sont égales, l'éolienne tourne à vitesse constante.

#### II.4.2 MADA:

Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus pour le modèle d'une machine asynchrone à double alimentation, de puissance 4KW, alimentée directement par deux sources de tension triphasées parfaites, l'une au niveau du stator avec une fréquence du réseau qui est 50Hz et d'amplitude de 220V, et l'autre au niveau du rotor avec une amplitude de 12V et une fréquence égale à la fréquence rotorique. Le rotor de la machine est entraîné à une vitesse fixe proche de la vitesse de synchronisme égale à 152.0531 rad/s . Les résultats obtenus montrent que :

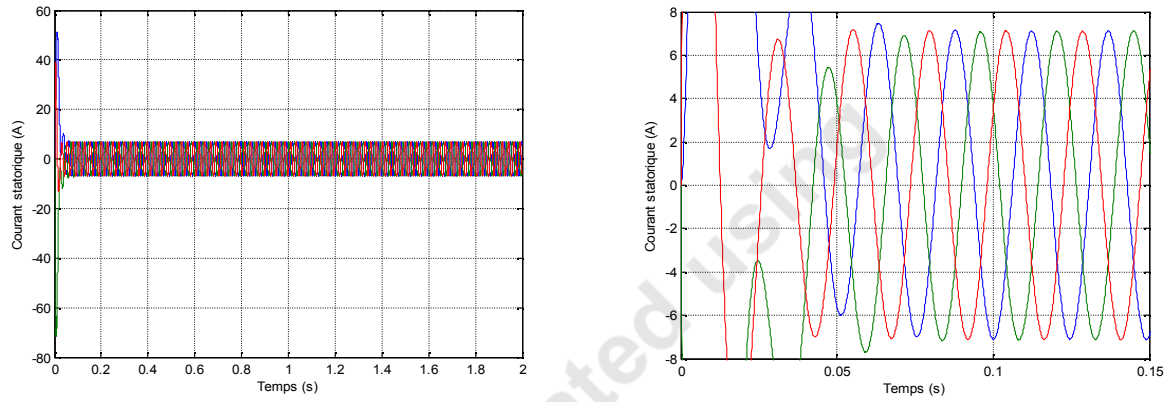


Figure II-16 Courbe du courant statorique avec zoom.

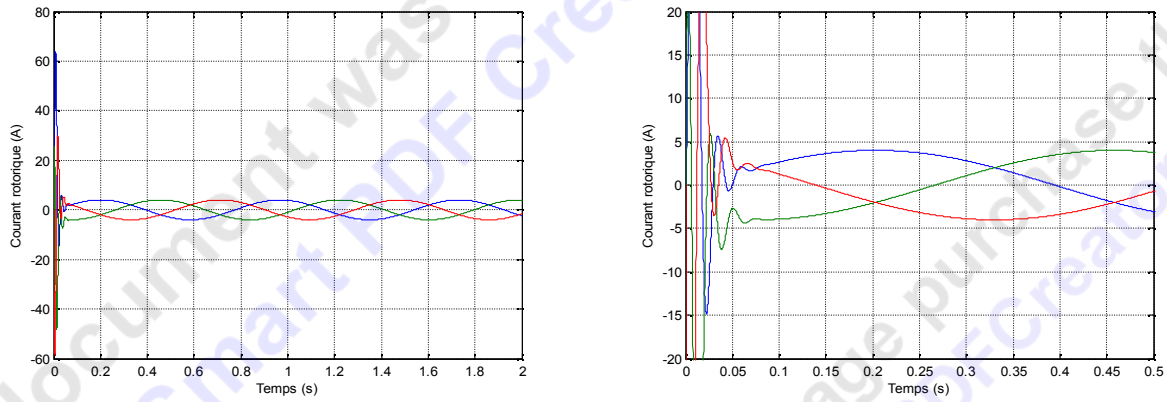


Figure II-17 Courbe du courant rotorique avec zoom.

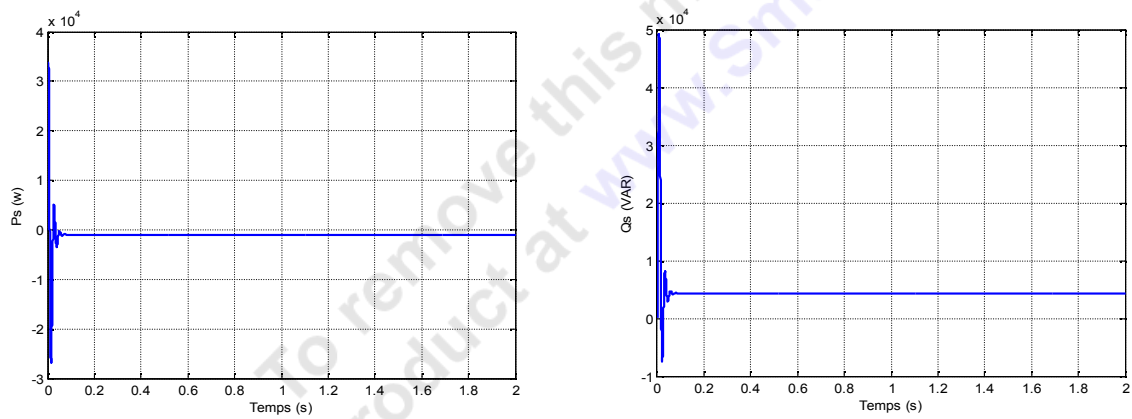


Figure III-18 Courbe de la puissance active et réactive statorique.

### II.4.3 MAS:

De la même manière que nous avons exposé le modèle de la MADA. le modèle de la machine à cage reste le même, mais le niveau du rotor avec une amplitude de zéros . Les résultats montrés sur les figures ci-dessous:

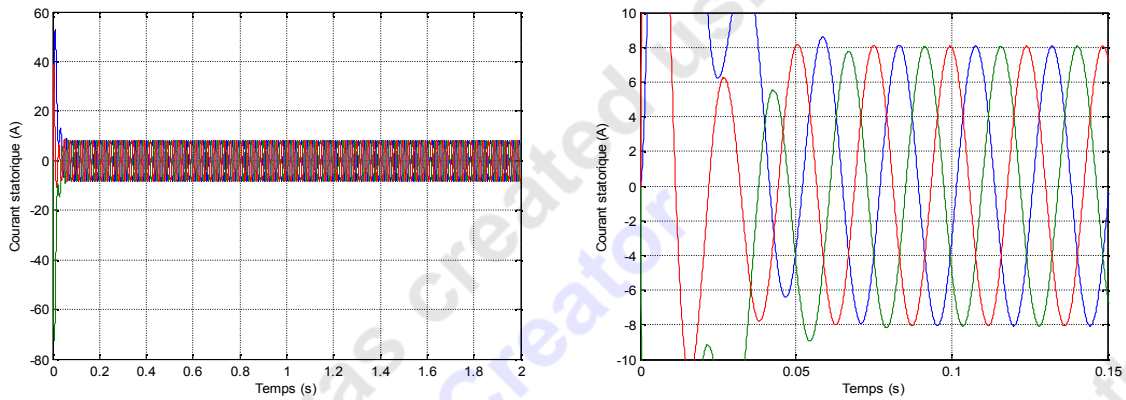


Figure II-19 Courbe du courant statorique avec zoom.

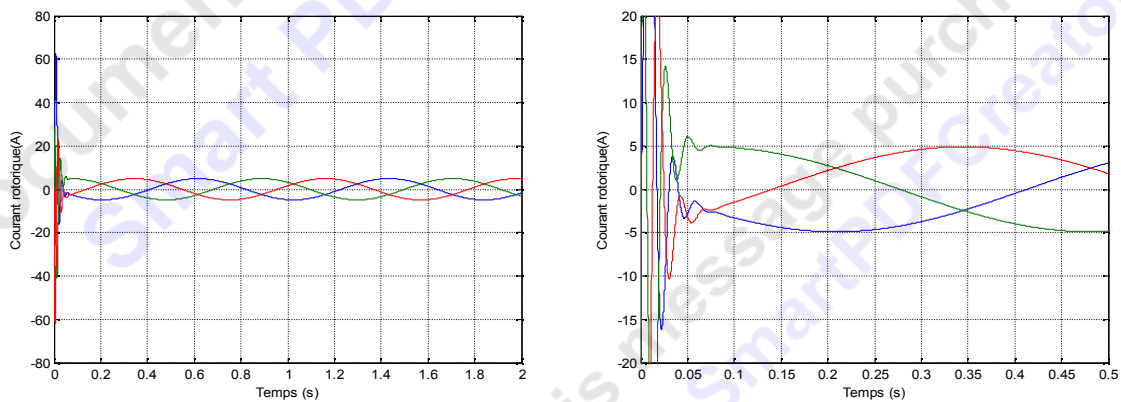


Figure II-20 Courbe du courant rotorique avec zoom.

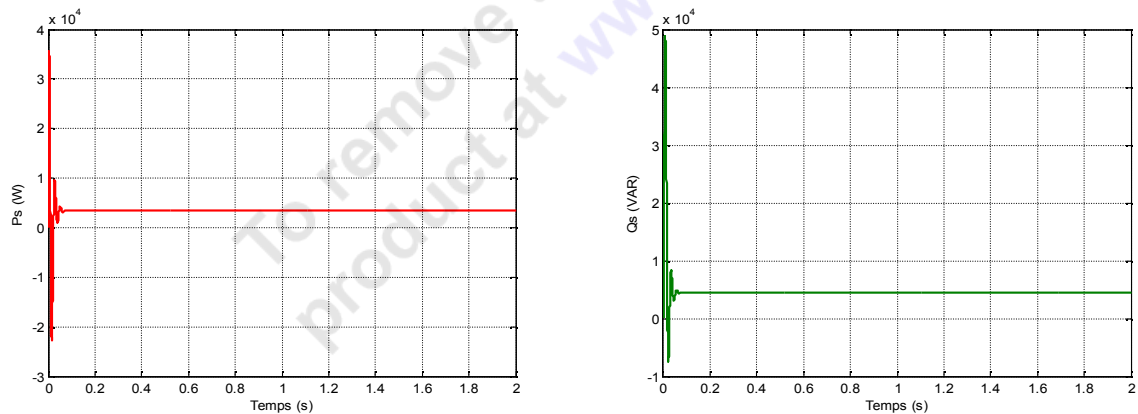


Figure III-21 Courbe de la puissance active et réactive statorique.

## II.5 Conclusion :

Dans ce chapitre on a modélisé le système global turbine-Machine (MADA et MAS). d'une éolienne de 4 KW de puissance . Dans un premier temps, nous avons établi un modèle permettant de reproduire des variations de la vitesse du vent en se basant sur un échantillonnage de la densité spectrale de puissance de vitesses mesurées sur un site. Ces variations de vent sont ensuite appliquées à un modèle de turbine de 4 KW utilisant les équations de base donnant le couple éolien en fonction de la densité de l'air, du coefficient de puissance de l'éolienne de la vitesse du vent et de la longueur d'une pale. La vitesse de rotation de l'éolienne, calculée en fonction de l'inertie et du coefficient de frottements visqueux. Après appliquées à un modèle de turbine , nous avons consacré à l'étude de la Machine Asynchrone à Double Alimentation et la Machine Asynchrone à cage fonctionnant en génératrice .

Dans ce qui suit nous allons étudier la commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation, fonctionnement génératrice à vitesse variable..

# **CHAPITRE III**

**Commande**

**Vectorielle**

**Du**

**GADA**

### III.1 Introduction :

Il a été montré dans le premier chapitre que l'utilité de la MADA est de permettre le fonctionnement à vitesse variable, ceci est nécessaire pour extraire le maximum de puissance à partir du vent et ainsi augmenter le rendement de la machine [5].

Dans ce chapitre, nous allons intéresser à la commande vectorielle en puissance active et réactive de la machine asynchrone à double alimentation à rotor bobine fonctionnement générateur [5].

### III.2 Généralités sur la commande vectorielle :

Les origines de la commande vectorielle contrairement aux idées reçues, remontent à la fin du siècle dernier et aux travaux de Blondel sur la théorie de la réaction des deux axes. Toutefois, compte tenu de la technologie utilisée à cette époque, il n'était pas question de transposer cette théorie au contrôle des machines électriques [9].

Ce n'est que vers les années cinquante, grâce à l'utilisation dans l'Europe de l'Est, et plus particulièrement en Allemagne et en Hongrie, de la méthode de phaseur temporel que germa l'idée de la commande vectorielle appelée également contrôle par flux orienté [9].

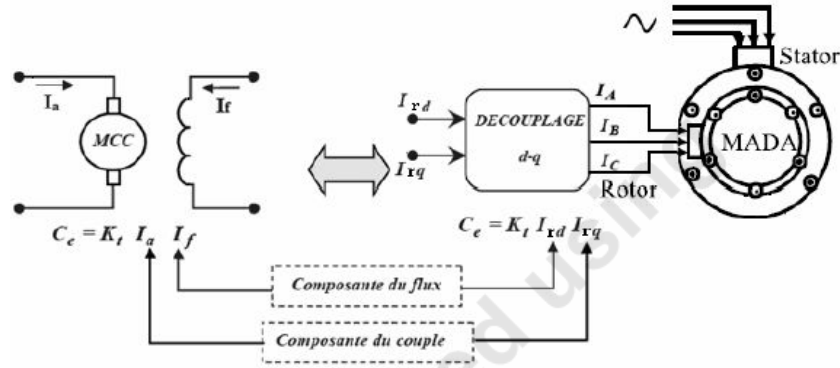
En 1969, les principes de cette commande ont été définis par Hasse et la première publication internationale au sujet de ce type de commande appliquée aux machines à induction est certainement celle de Blaschke en 1971 [9].

#### III.2.1 Principe de la commande vectorielle :

Le but de la commande vectorielle est d'arriver à commander la machine asynchrone comme une machine à courant continu à excitation indépendante où il y a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux (le courant d'excitation), et celle liée au couple (le courant d'induit) [13].

Ce découplage permet d'obtenir une réponse très rapide du couple. Contrairement à la machine asynchrone à cage, où nous avons accès à la mesure des courants au stator seulement, la machine asynchrone à bagues doublement alimentée possède l'avantage de nous offrir la possibilité d'une mesure des courants de deux côtés et par conséquent de pouvoir les contrôler donnant une meilleure flexibilité à la commande de cette dernière [13].

L'objectif pour une commande du MADA est de réaliser l'opération précédente à l'aide de variables de commande similaire comme le montre la figure III-1.



**Figure III-1** Schéma de principe du découplage pour le MADA par analogie avec la machine à courant continu.

### III.2.2 Variantes de la commande vectorielle :

La commande à flux orienté appliquée aux moteurs électriques est utilisée pour obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants. De nombreuses variantes de ce principe de commande ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classifier [9]:

- Suivant la source d'énergie:
  - Commande en tension (Voltage Source Inverter).
  - Commande en courant (Current Controlled Inverter).
- Suivant les opérations désirées pour le flux:
  - Commande vectorielle de flux rotorique;
  - Commande vectorielle de flux statorique;
  - Commande vectorielle de flux d'entrefer (ou de flux magnétisant).
- Suivant la détermination de la position du flux:
  - Directe par mesure ou observation du vecteur de flux (module, phase);
  - Indirecte par contrôle de la fréquence de glissement.

### III.2.3 Procède d'orientation du flux :

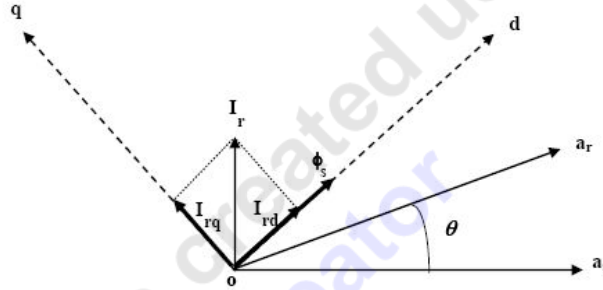
Il existe trois types d'orientation du flux [12]:

- Orientation du flux rotorique avec les conditions  $\phi_{rd} = \phi_r$ ,  $\phi_{rq} = 0$ .
- Orientation du flux statorique avec les conditions  $\phi_{sd} = \phi_s$ ,  $\phi_{sq} = 0$ .
- Orientation du flux d'entrefer avec les conditions  $\phi_{dg} = \phi_g$ ,  $\phi_{qg} = 0$ .

Dans notre cas l'orientation du flux statorique est la méthode choisie.

### III.3 Commande vectorielle par orientation du flux statorique :

La commande par orientation du flux consiste à régler le flux par une composante du courant et le couple par une autre composante. Pour cela, il faut choisir un système d'axe ( $d$ - $q$ ) et une loi de commande assurant le découplage du couple et du flux.



**Figure III-2** Illustration de l'orientation du flux statorique.

Pour simplifier la commande il est nécessaire de faire un choix judicieux de référentiel. Pour cela, on se place dans un référentiel ( $d$ - $q$ ) lié au champ tournant avec une orientation du flux statorique (l'axe  $d$  aligné avec la direction du flux statorique) comme le montre la figure III-2.

On obtient:

$$\phi_{sd} = \phi_s \text{ et } \phi_{sq} = 0 \quad (\text{III-1})$$

$$\begin{cases} \phi_{sq} = 0 \Rightarrow i_{sq} = -\frac{M}{L_s} i_{rq} \\ i_{sd} = 0 \\ i_{rd} = \frac{\phi_s^*}{M} \end{cases} \quad (\text{III-2})$$

Et on a l'expression du couple électromagnétique:

$$C_e = \frac{P.M}{L_s} (\phi_{sq} \cdot i_{rd} - \phi_{sd} \cdot i_{rq}) \quad (\text{III-3})$$

En remplaçant l'équation III-1 dans III-3 on trouve:

$$C_e = \frac{P.M}{L_s} (-\phi_s \cdot i_{rq}) = -\frac{P.M}{L_s} \phi_s \cdot i_{rq} \quad (\text{III-4})$$

Alors:

$$i_{rq} = -\frac{L_s}{P.M} \cdot \frac{C_e^*}{\phi_s^*} \quad (\text{III-5})$$

De l'équation II-83 on a:

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s = \left( \frac{R_s M}{L_s} i_{rq} + V_{sq} \right) / \phi_s^* \quad (\text{III-6})$$

D'après les équations des flux statorique on aura:

$$\phi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \Rightarrow i_{sd} = \frac{1}{L_s} (\phi_{sd} - M i_{rd}) \quad (\text{III-7})$$

$$\phi_{sq} = L_s i_{sq} + M i_{rq} \Rightarrow i_{sq} = \frac{1}{L_s} (\phi_{sq} - M i_{rq}) \quad (\text{III-8})$$

On remplace l'équation III-7 dans II-72 et l'équation III-8 dans II-73 on trouve:

$$\dot{\phi}_{sd} = V_{sd} + \frac{M}{T_s} i_{rd} - \frac{1}{T_s} \phi_{sd} \quad (\text{III-9})$$

$$\dot{\phi}_{sq} = 0 = V_{sq} + \frac{M}{T_s} i_{rq} - \omega_s \phi_{sd} \quad (\text{III-10})$$

En exprimant le flux rotorique en fonction de flux statorique  $\phi_{sd}$  et le courant rotorique  $i_{rd}$ :

En remplaçant l'équation III-7 dans l'équation II-57 et l'équation III-8 dans l'équation II-58 on trouve donc les deux équations suivantes:

$$\phi_{rd} = \sigma L_r i_{rd} + \frac{M}{L_s} \phi_{sd} \quad (\text{III-11})$$

$$\phi_{rq} = \sigma L_r i_{rq} + \frac{M}{L_s} \phi_{sq} \quad (\text{III-12})$$

En introduisant les équations III-9, III-11 et III-12 dans l'équation II-75 et dans l'équation II-76 on trouve:

$$V_{rd} = R_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} + \frac{M}{L_s} V_{sd} - (\omega_s - \omega) \sigma L_r i_{rq} \quad (\text{III-13})$$

$$V_{rq} = \left( R_r + \frac{M^2}{L_s T_s} \right) i_{rq} + \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} + \frac{M}{L_s} V_{sq} - \frac{M}{L_s} \omega \phi_{sd} + (\omega_s - \omega) \sigma L_r i_{rd} \quad (\text{III-14})$$

### III.4 Méthodes de la commande vectorielle :

La première appelée méthode directe et la seconde connue sous le nom méthode indirecte.

Dans la commande directe, on effectue une régulation de flux qui nécessite la connaissance de celui-ci, tandis que dans la commande indirecte, on se libère de la connaissance de ce flux en faisant quelques approximations [13].

### III.4.1 Commande vectorielle directe:

Cette méthode a été proposée par Blaschke et rendue publique vers 1970 [13], (Feedback control), elle se base sur la connaissance exacte du flux (statorique dans notre cas) et de sa position.

Il faut donc procéder à une série de mesures aux bornes du variateur. Une première possibilité est de placer des capteurs dans le bobinage statorique et de mesurer directement les composantes du flux de manière à en déduire l'amplitude et la phase. Les capteurs mécaniquement fragiles sont soumis à des contraintes sévères dues aux vibrations et à l'échauffement. En outre, ce mode nécessite l'utilisation d'un moteur équipé de capteurs de flux, ce qui augmente considérablement le coût de sa construction. Par conséquent, dans la grande majorité de cas, on fait appel à des estimateurs ou des observateurs à partir des mesures effectuées sur le variateur [13].

La méthode directe a l'avantage de prendre beaucoup moins les variations de paramètres de la machine [13].

Ce principe de commande est présenté dans le schéma suivant figure III-3.

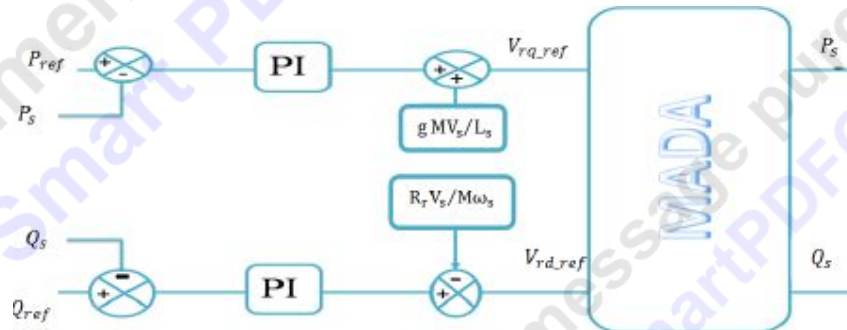


Figure III-3 Schéma de principe de la commande directe.

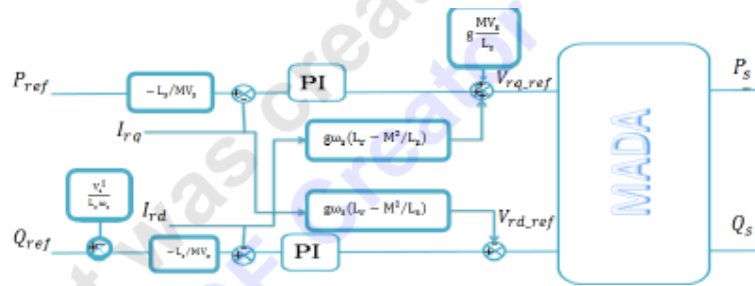
### III.4.2 Commande vectorielle indirecte:

La méthode indirecte consiste à reproduire, en sens inverse, le schéma bloc du système à réguler. On construit ainsi un schéma bloc permettant d'exprimer les tensions en fonction des puissances. On aboutit alors à un modèle qui correspond à celui de la machine mais dans l'autre sens. La commande indirecte va donc contenir tous les éléments présents dans le schéma bloc que la MADA [5].

On part donc de la puissance statorique en fonction des courants rotoriques et des expressions des tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques.

**III.4.2.1. Commande indirecte en boucle ouverte :**

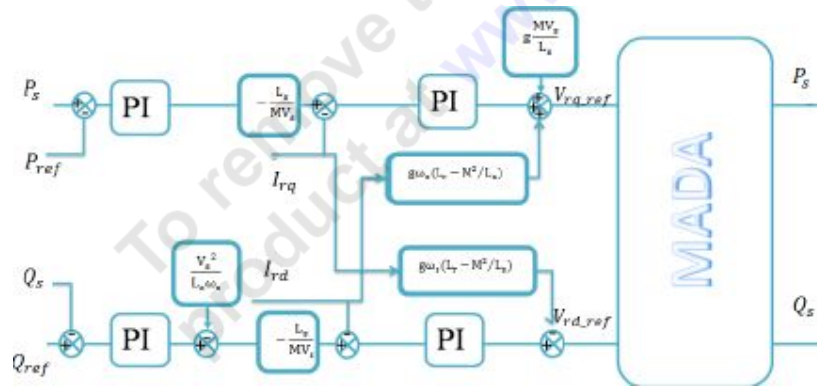
Dans cette méthode, le découplage se fait au niveau des sorties des régulateurs en courants rotoriques sans aucun retour au système, en imposant les tensions de références  $V_{rd}$  et  $V_{rq}$  qui convient. De ce fait, la commande par boucle interne qui contrôle le courant  $I_r$  est alors appliquée à la MADA pour des raisons de sécurité de fonctionnement. En outre, la commande indirecte sans bouclage de puissance (en boucle ouverte) permet de contrôler séparément les courants  $I_{rd}$  et  $I_{rq}$  en boucle fermée et les puissances  $P_s$  et  $Q_s$  en boucle ouverte. Le schéma de cette commande est illustré sur la figure III-4 [5].



*Figure III-4 Schéma de la commande indirecte en boucle ouverte.*

**III.4.2.2. Commande indirecte en boucle fermée:**

Dans cette méthode, le découplage se fait au niveau des sorties des régulateurs en courant rotorique avec un retour du système. Qui permet le réglage des puissances, on distingue donc, une commande par boucle en cascade de la puissance et du courant rotorique pour chaque axe, puisqu'elle permet de contrôler séparément les courants  $I_{rd}$  et  $I_{rq}$  et les puissances  $Q_s$  et  $P_s$  en boucle fermée. Le schéma simplifié de l'ensemble commande est illustré sur la figure III-5 [5].



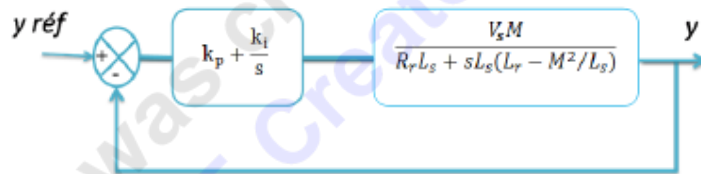
*Figure III-5 Schéma de la commande indirecte en boucle fermée.*

### III.5 Synthèse du régulateur Proportionnel-Integral (PI):

Le régulateur Intégral Proportionnel (PI) a été appliqué pour la commande des machines asynchrone en raison de ses divers avantages. En effet, il permet l'obtention de hautes performances (faible dépassement, écart statique nul et bon rejet de perturbations) [13].

On utilise des régulateurs classiques de type PI. Ce type de régulateur assure une erreur statique nulle grâce à l'action intégrale tandis que la rapidité de la réponse est établie par l'action proportionnelle[5].

Le schéma de la figure III-6 montre une partie de notre système bouclé par un régulateur PI dont la fonction de transfert est de la forme  $K_p + \frac{K_i}{S}$ .



**Figure III-6** Schéma bloc d'un système régulé par un PI.

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

$$FTBO = \frac{S + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{S}{K_p}} \cdot \frac{\frac{V_s M}{L_s (L_r - M^2 / L_s)}}{S + \frac{R_r}{(L_r - M^2 / L_s)}} \quad (III-15)$$

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

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{R_r}{(L_r - M^2 / L_s)} \quad (III-16)$$

Fonction de transfert en boucle ouverte devient alors:

$$FTBO = F_0(t) = \frac{\frac{V_s M}{L_s (L_r - M^2 / L_s)}}{\frac{S}{K_p}} \quad (III-17)$$

En boucle fermée, on obtient la fonction de transfert suivante :

$$FTBF = \frac{F_0(t)}{1 + F_0(t)} = \frac{1}{1 + \tau_r S} \quad (\text{III-18})$$

Avec:

$$\tau_r = \frac{1}{K_p} \frac{L_s (L_r - M^2 / L_s)}{V_s M} \quad (\text{III-19})$$

$\tau_r$  : est le temps de réponse du système

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

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

$$K_i = \frac{1}{\tau_r} \frac{R_r L_s}{V_s M} \quad (\text{III-21})$$

### III.6 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 [1].

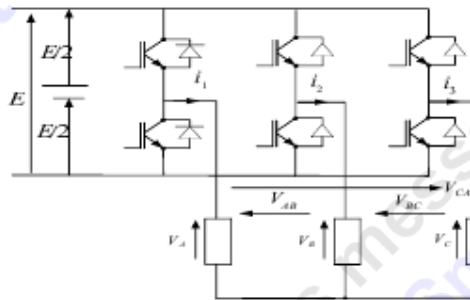


Figure III-7 Onduleur triphasé à deux niveaux

### III.7 Modulation de largeur d'impulsion MLI :

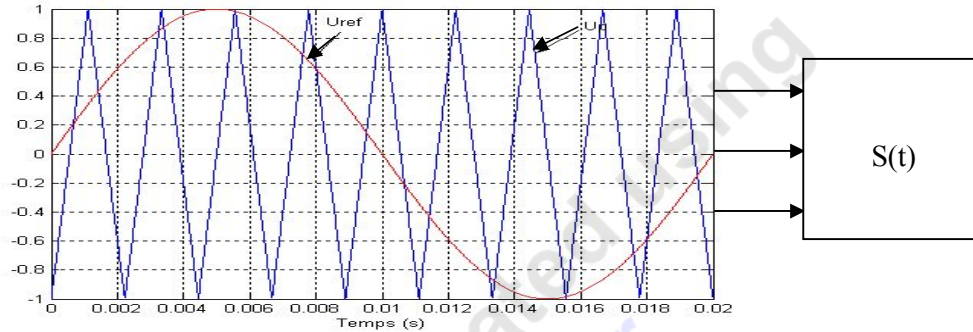
#### III.7.1 Principe général :

La modulation de largeur d'impulsion triangulo-sinusoidal est réalisée par la comparaison d'une onde modulée basse fréquence avec une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersections entre la porteuse et la modulante, la fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse [16].

Cette -MLI- sert à remédier ces problèmes et elle a les avantages suivantes :

- ❖ Variation de la fréquence de la tension de sortie.

- ❖ Elimination de certaines harmoniques de tension.
- ❖ Elle repousse les harmoniques vers des fréquences plus élevées.



**Figure III-8** Principe de la MLI sinusoïdale.

Avec :

$V_{réf}$  : la tension référence.

$V_p$  : la tension porteuse.

$S(t)$  : est le signal -MLI- résultant.

### III.7.2 Propriétés:

Pour optimiser la MLI en utilise deux paramètres caractérisant cette commande[16] :

$m$  : L'indice de modulation c'est le rapport de la fréquence de la porteuse  $f_p$  sur celle du

référence  $f_{réf}$   $\left( m = \frac{f_p}{f_{réf}} \right)$ .

$r$  : Le taux de la modulation (le coefficient de réglage en tension). C'est le rapport des amplitudes de tension de la référence  $V_{réf}$  sur celle de la porteuse  $V_p$ ,  $\left( r = \frac{V_{réf}}{V_p} \right)$ .

### III.8 Résultats de Simulation et Interprétations :

La simulation est réalisée avec un aérogénérateur à vitesse variable de 4 kW. Ce dernier est modélisé et accouplée à une MADA par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse. D'où elle convertit toute la puissance maximale (M.P.P.T.), extraite du vent en une puissance électrique injectée au réseau et considérée négativement. Dans le cas de ce travail, on adopte la méthode de l'effet Stall qui consiste à caller les pales sur une orientation fixe ( $\beta=2^\circ$ ) en profitant de leur design (profil adapté au vent). En effet, un essai en boucle fermée de la MADA sans asservissement de vitesse a été réalisé ( $C_e = C_r$ ), afin de connaître,

pour chaque vitesse de vent, quelle est la référence de puissance active à imposer à la MADA, pour que le coefficient de puissance soit toujours maximal avec  $\lambda_{optimal}$  [5].

Les figures suivantes présentent les résultats obtenus par simulation avec les mêmes paramètres de la turbine et générateur (voir annexe).

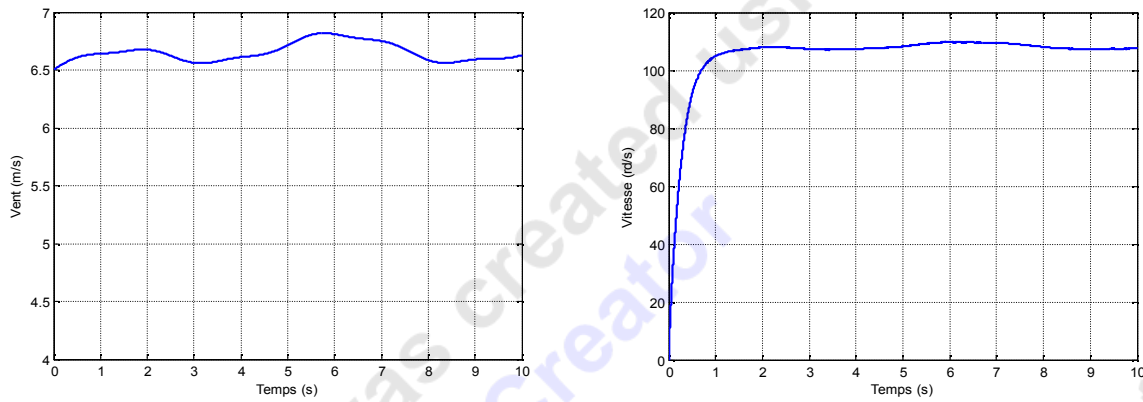


Figure III-9 Profil du vent appliqué et la vitesse de rotor (rd/s).

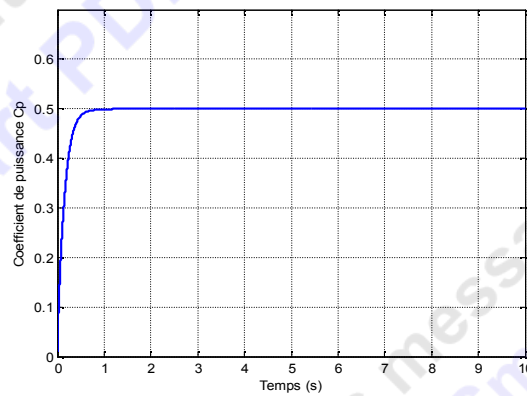


Figure III-10 Coefficient de puissance de la turbine.

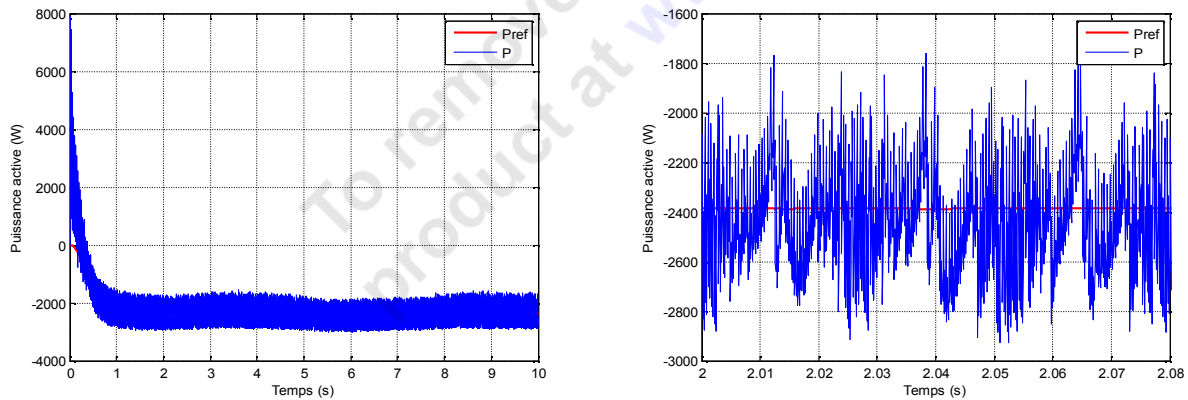


Figure III-11 Puissance active statorique et sa référence avec zoom.

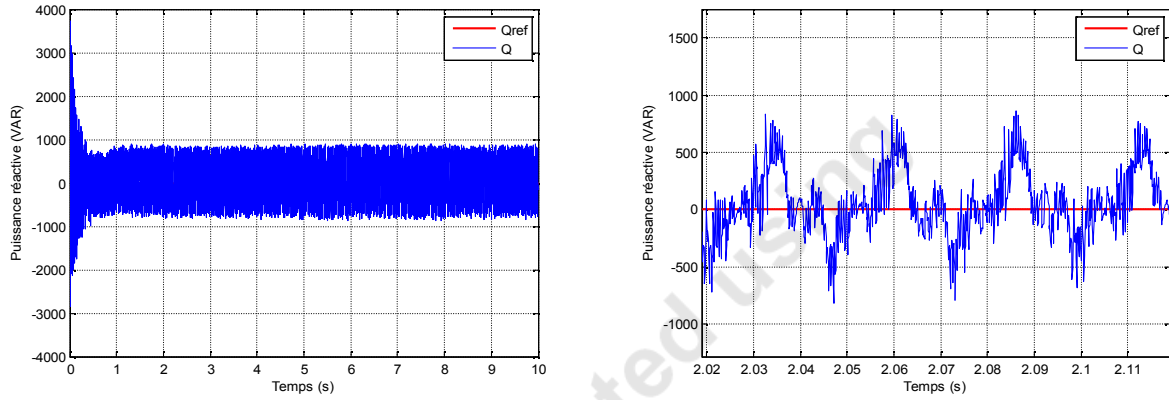


Figure III-12 Puissance réactive générée par MADA et sa référence avec zoom.

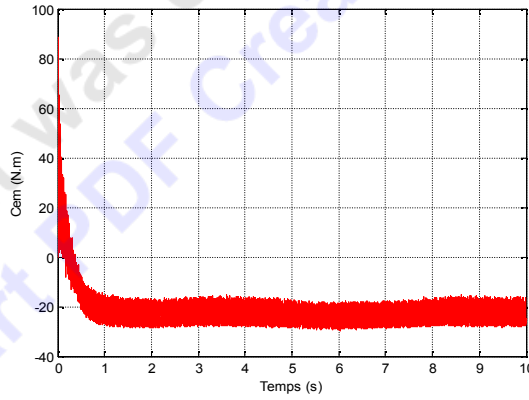


Figure III-13 Couple électromagnétique.

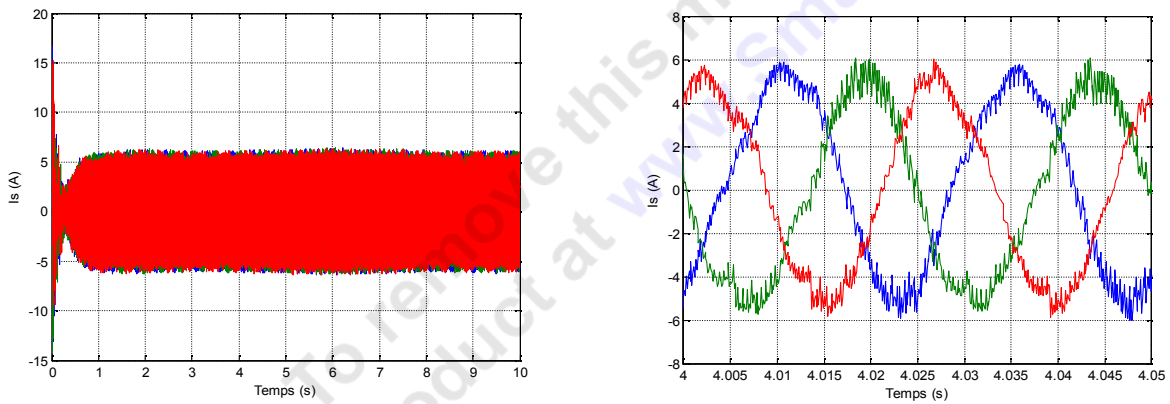
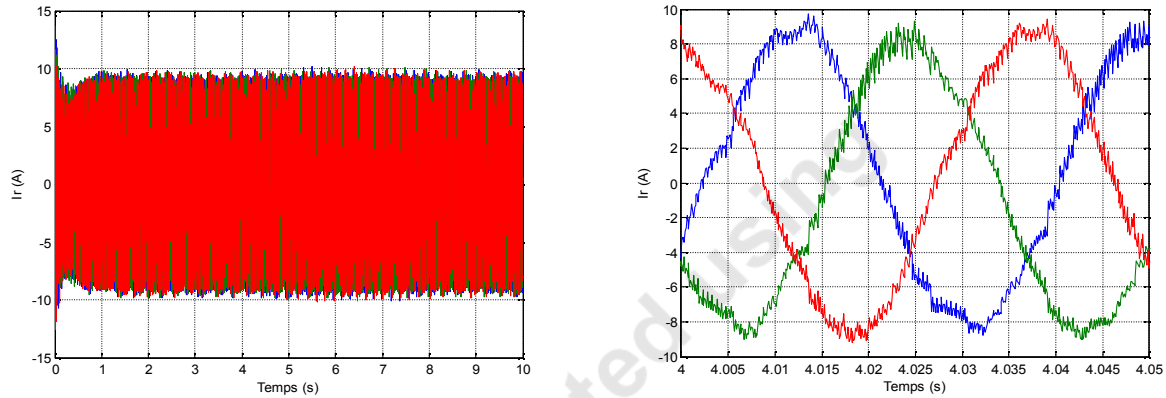


Figure III-14 Courant statorique avec zoom.



*Figure III-15 Courant rotorique avec zoom.*

- Figure III-9 : présente le profil du vent supposé et appliqué à la turbine éolienne et la vitesse de rotor (rd/s). Les variations de la vitesse du générateur sont adaptées à la variation de la vitesse du vent.
- Figure III-10 : à travers l'évolution du coefficient de puissance, nous pouvons remarquer que celui-ci est dans le voisinage de sa valeur maximale théorique ( $C_p \approx 0,548$ ).
- Figure III-11 : présente la puissance électrique produite par le GADA. Cette puissance reflète également la variation de la vitesse du vent, ce qui est confirmé par le zoom ainsi présente la poursuite de la puissance du GADA à la puissance de référence imposée par les variations du vent.
- Figure III-12 : représente la puissance réactive injectée au réseau, avec la référence de la puissance réactive fixée à zéro. Quant à la puissance réactive, elle demeure proche du zéro qui a pour conséquence la faible incidence de la machine sur la qualité du réseau (un facteur de puissance unitaire au stator).
- Figure III-13 : présente le couple électromagnétique que produite par le GADA.
- Figure III-14 et Figure III-15 : montrent respectivement les courants statorique et rotorique ont pris leurs formes sinusoïdales et sont aussi adaptés à la variation de la vitesse de rotor, et la fréquence rotorique dépend de la vitesse de rotation de l'éolienne.

### III.9 Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons exposé le principe de la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique. Ainsi, on a représenté trois modes de contrôle ont été représentés. Un mode direct dans lequel les puissances sont mesurées et comparées à leurs références. Un autre indirect où les courants rotoriques sont utilisés pour commander les puissances. Un troisième a pour rôle d'améliorer le suivi de consigne de la commande précédente en y ajoutant une boucle de puissance. Où nous nous intéressons sur le deuxième mode.

On a modélisé le système global turbine-Machine d'une éolienne de 4kW de puissance à vitesse variable. La machine asynchrone à double alimentation est contrôlée à l'aide de régulateurs PI. Malgré plusieurs avantages (simplicité, rapidité, coûts), la variation de la vitesse du vent impose un contrôle complexe.

## CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce mémoire a été consacré à l'étude d'éoliennes à vitesse variable basées sur des machines asynchrones (MAS-MADA). Les problématiques abordées dans ce mémoire nous ont permis d'étudier deux modes de fonctionnement des machines asynchrones utilisées dans les systèmes éolien, ainsi que la réalisation d'un simulateur physique de turbine éolienne.

Le premier chapitre rappelle les concepts fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique et dresse un état de l'art sur les différentes associations machines électriques – convertisseurs pouvant être accouplées à une éolienne. On a présenté l'état de l'art sur les différents types d'éoliennes existantes, les différentes génératrices utilisées, notre étude a été orientée vers un système éolien d'axe horizontal de puissance fonctionnant à vitesse variable à base d'une MADA pilotée au rotor, par un convertisseur MLI.

Le deuxième chapitre de ce mémoire est consacré la modélisation de systèmes éoliens. On a comme objectif la modélisation de différents composants de la production décentralisée de l'énergie éolienne. Il est noté que l'utilisation de la MADA dans les éoliennes connaît une évolution très rapide à cause de ses performances vis-à-vis des autres machines, et aussi grâce aux progrès technologiques. Néanmoins, il en demeure quelques problèmes notamment liés aux contacts mécaniques (bagues). Ainsi la majeure partie des éoliennes modernes industrielles est constituée de génératrice asynchrone à double alimentation car elle apporte non seulement des solutions aux variations incessantes du vent, mais aussi permet un transfert optimal de la puissance au réseau.

Afin de contrôler l'échange de puissances active et réactive entre la machine et le réseau on a utilisée une commande vectorielle. Nous avons effectué une synthèse du régulateur PI et testé et comparé ses performances en suivi de consigne, face aux perturbations et aux variations de paramètres. Le régulateur s'est montré le plus efficace dans le cas du contrôle indirect. Pour le contrôle direct, le modèle servant de base au calcul du régulateur est simplifié et, même si la précision statique est meilleure, les performances transitoires du régulateur sont moins bonnes que dans le cas du contrôle indirect.

**Difficultés rencontrées:**

Au cours de notre travail nous n'avons pas échappés à quelques problèmes :  
Le choix des paramètres du correcteur de type proportionnel-intégral à été fait par plusieurs essais, ceci réside dans le fait de chercher les paramètres qui donnent le réglage le plus optimal, tout en simulant pour avoir réponse plus rapide sans qu'il y ait de dépassement.

**Suggestions et perspectives:**

Suite aux résultats obtenus dans cette étude, des perspectives intéressantes pouvant contribuer à l'amélioration du fonctionnement de la MADA sont envisageables:

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

## Annexe

### A. Les Paramètres utilisés [8]:

#### A.1 les Paramètres de la Turbine:

- Nombre de pales = 3.
- Rayon de la surface balayée par les pales :  $R= 3\text{m}$ .
- Gain du multiplicateur :  $G= 5.4$ .
- Densité de l'air à  $15^{\circ}\text{C}$  :  $\rho = 1.22 \text{ kg.m}^{-3}$ .

#### A.2 Constantes mécaniques :

- Moment d'inertie de la turbine:  $J_{turbine}= 0.2 \text{ kg.m}^2$ .
- Coefficient de frottement visqueux :  $f=0.001 \text{ N.m.s/rd}$ .

#### A.3 Les Paramètres Électrique:

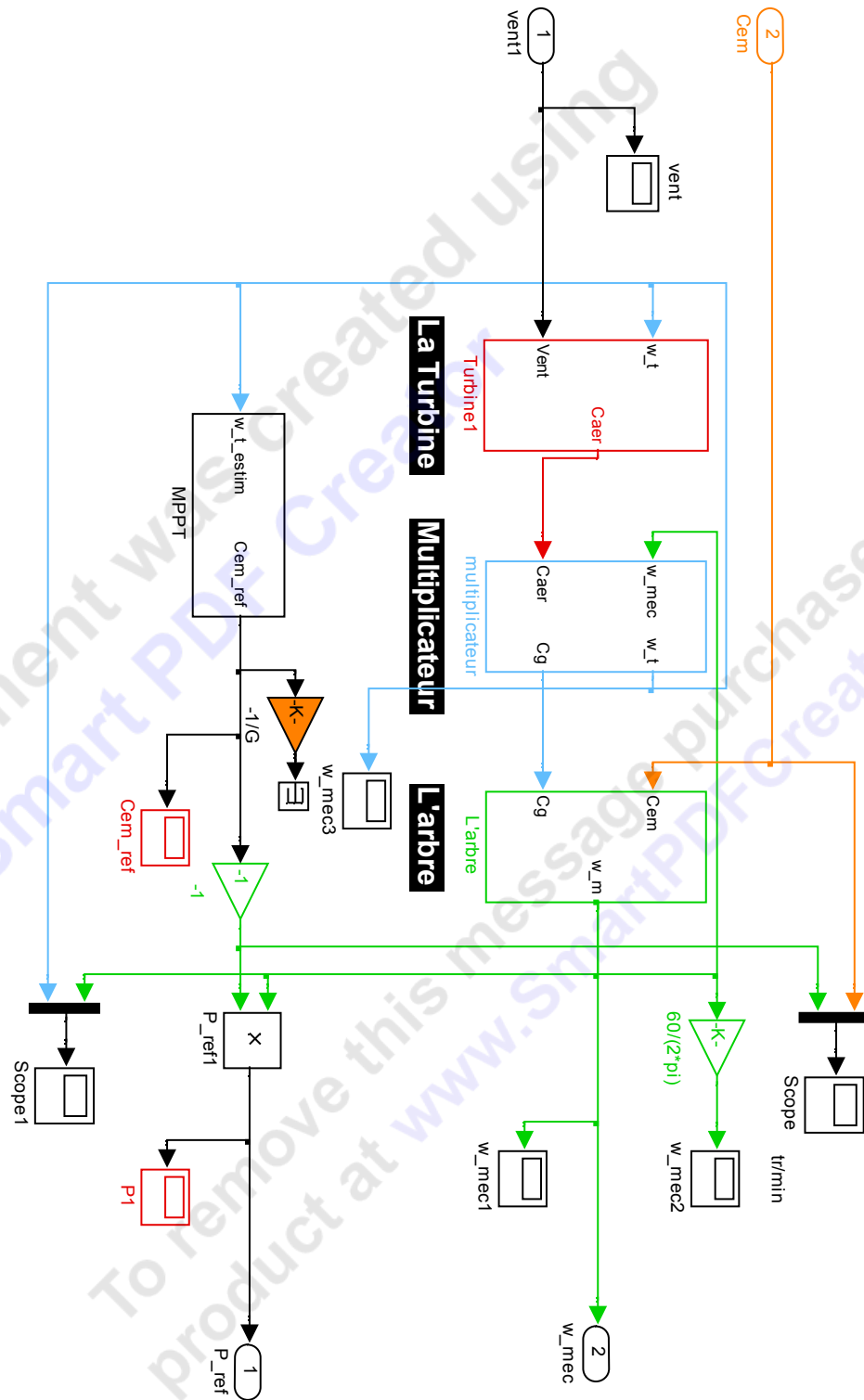
4 kW ; 220/380 V ; 50 Hz ; 15/8.6 A ; 152.0531 rad/s

- $R_s$  (Résistance du stator) =  $1.2 \Omega$
- $R_r$  (Résistance du rotor) =  $1.8 \Omega$
- $L_s$  (Inductance du stator) =  $0.1554 \text{ H}$
- $L_r$  (Inductance du rotor) =  $0.1568 \text{ H}$
- $M$  (Inductance mutuelle) =  $0.15$
- $P$  (Nombre de paire de pole) =  $2$ .

#### A.4 Paramètres des régulateurs:

- $K_p=710.64$ .
- $K_i=2000$ .

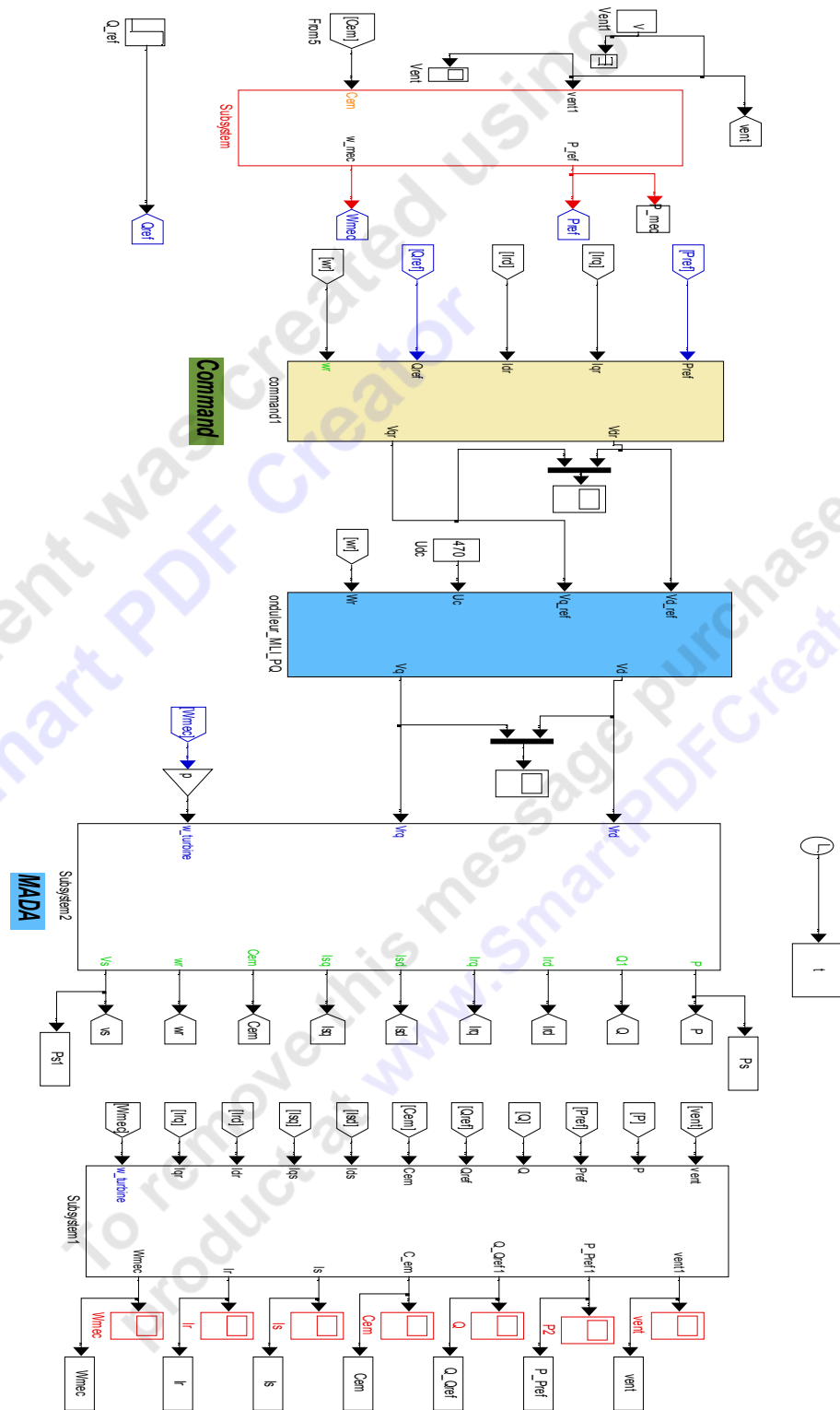
## B. Le modèle de la turbine éolienne sous SIMULINK/MATLAB:





**D. Le modèle de la chaîne globale sous SIMULINK/MATLAB:**

la Turbine



---

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] **I. HAMZAOUI**, «Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur », *Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2008.*
- [2] **M. Mayouf**, «Contribution à la Modélisation de l'Aérogénérateur Synchrone à Aimants Permanents», *Mémoire de Magistère, Université Batna, 2008.*
- [3] **F. Poitiers**, «Etude et Commande de Génératrice Asynchrones pour l'utilisation de l'Energie Eolienne -Machine asynchrone à cage autonome -Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », *Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, 2003.*
- [4] **A. SAKI, M. BELAIDI**, «Etude d'un Générateur Asynchrone dans La Production d'Energie Electrique par Eolienne», *Mémoire d'ingénieur, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger 2006.*
- [5] **H. CHERIFE, K. SLIMANI, S. LAICHE**, «Modélisation d'une Centrale éolienne », *Mémoire d'ingénieur, Centre Universitaire d'El oued, 2010.*
- [6] **N. MEKKAOUI**, «Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini - Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée», *Mémoire de Magistère, Université Batna, 2004.*
- [7] **S. EL AIMANI**, «Modélisation De Différentes Technologies D'Eoliennes Integrees Dans Un Réseau De Moyenne Tension», *Thèse de Doctorat, Ecole Centrale De Lille, 2004.*
- [8] **S. Drid**, «Contribution à la modélisation et à la commande robuste d'une machine à induction double alimentée à flux orienté avec optimisation de la structure d'alimentation: théorie et expérimentation», *Thèse de Doctorat, Université Batna, 2005.*
- [9] **Y. Elbia**, «Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté», *Mémoire de Magistère, Université Batna, 2009.*
- [10] **V. Paul-Etienne**, «Commande non - Linéaire d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation», *Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2004.*
- [11] **A. Boyette**, «Contrôle - commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne», *Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2006.*

- 
- [12] **Y. BEKAKRA**, «Etude et Commande du Moteur Asynchrone à Double Alimentation (MADA) par Différentes Techniques Avancées», *Mémoire de Magistère, Centre Universitaire d'El oued, 2010.*
- [13] **G. Salloum**, «Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation», *Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Mars 2007.*
- [14] **A. KOUKA, M. HAMIDATOU, T. MESSAI Med**, «Commande De La Machine Asynchrone à Double Alimentation par Logique Floue», *Mémoire d'ingénieur, Centre Universitaire d'El oued, 2010.*
- [15] **S. Mekhtoub**, «Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne», *Mémoire d'ingénieur, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger 2007.*
- [16] **S. HAMIDATOU, Y.DJABALLAH, A. MESSAI BELGACEM** «diagnostic des défauts d'un onduleur de tension », *Mémoire de Licence, Centre Universitaire d'El oued, 2010.*
- [17] **L. KHETTACHE**, «Etude et Commande d'un Système Eolien à Base d'une Machine Electrique Double Alimentée», *Mémoire de Magistère, Université Batna 2007.*
- [18] **A. DAVIGNY**, «Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie», *Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, décembre 2007.*
- [19] **R. AZAIZIA**, «Etude et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation Alimentée par un Convertisseur Multiniveaux», *Mémoire de Magistère, Université Boumerdes, 2008*