

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

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

— جامعة أبي بكر بلقايد — تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen –  
Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

*Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER** en Electrotechnique*

**Spécialité : Réseaux Electriques & Réseaux Electriques Intelligents**

**Par : BOUSMAHA Thawriyyaa et TAHIR Zineb**

### **Etude et Simulation d'une ferme éolienne en vue d'une application hybride**

Soutenu publiquement, le **19/06/2016**, devant le jury composé de :

Mr S.M.MELIANI	Maître de Conférences -A-	Univ. Tlemcen	Président
Mr.M.A.BRIKCINIGASSA	Maître Assistant -A-	Univ. Tlemcen	Encadreur
Mr. A. MECHERNENE	Maitre de Conférences -B-	Univ. Tlemcen	Co-Encadreur
Mr M.C.BENHABIB	Maître de Conférences -A-	Univ. Tlemcen	Examineur
Mr A.GORINE	Maître de Conférences -B-	Univ. Tlemcen	Examineur

# *Remercîment*

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

Nous sommes honorés que Monsieur Sidi Mohamed MELIANI, Maître de Conférence à l'Université Abou Bekr Belkaïd, ait accepté de présider et d'honorer de sa présence le jury de soutenance du présent mémoire de Master. Qu'il trouve ici l'expression de notre reconnaissance et de notre profond respect.

Nous tenons à exprimer nos plus sincères remerciements à notre encadreur, Monsieur Brikci Nigassa Mohammed Amine, Maître Assistant à l'Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen. Nous lui sommes reconnaissant pour la confiance dont il nous a fait preuve, pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail, malgré les charges qu'il assume actuellement et pour ses précieux conseils qui nous ont permis une progression concrète dans ce projet.

En second lieu, nous tenons à remercier notre Co-encadreur Monsieur Abdelkader Mchernene, pour ses précieux conseils et son aide durant toute la période du travail.

Nous sommes honorés que Messieurs Mohamed Choukri BELHABIB, A. Gourine, tout deux Maîtres de Conférence à l'Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen d'aient accepté d'évaluer notre travail en qualité d'examineurs.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Tahir Zineb

Bousmaha Thawriyya

Tlemcen, juin 2016

## *Dédicace*

*Merci Allah, de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire la patience d'aller jusqu'au bout du rêve*

*J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail :*

*- à ceux qui sont toujours dévouée et sacrée pour moi : ceux qui m'ont aidée du mieux qu'ils pouvaient pour réussir ; ceux qui m'ont accompagnée tout au long de ce parcours périlleux ; ceux qui ont toujours été là dans mes moments de détresse, mes très chers parents ;*

*- A mes adorables sœurs Souad, souhila et son épouse et ses enfant hadil, iyad.*

*-mon cher frère Ibrahim ; et sa femme wasfaa*

*- A mon fiancé Abdellatif qui m'a toujours encouragé et soutenue moralement, et a toutes la famille youcefi ;*

*- A ma promo master 2 en Electrotechnique, option RFRFT : cession 2015-2016 ;*

*- A toutes ma famille et mes amies.*

*-A mon binôme Touriya et sa famille*

*Zineb*

## *Dédicace*

*Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour,  
L'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu  
Pour vous Mon père.*

*Que*

*Dieu te garde dans son vaste paradis*

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

*Que Dieu la garde et protège.*

*Je le dédie particulièrement*

*A mon cher frère*

*Omar*

*A MES Très chères sœurs*

*Lila et Amina*

*Qui ont toujours été présentes pour les bons conseils.*

*Enfin je le dédie à mon binôme Zineb et la promo master 2 Option REREI  
année 2015\_2016 ,et à tous mes chères amis que je n'ai pas cités.*

*Thawriyya*

# Table de matière

## Introduction Générale

### Chapitre I : Etat de l'art

I.1. Introduction.....	8
I.2. Potentiel de l'énergie éolienne.....	8
I.2.1. L'énergie éolienne du VIIe siècle à nos jours.....	9
I.2.2. Direction et vitesse du vent.....	10
I.2.3. Taille des aérogénérateurs.....	12
I.2.4. Les Avantages Et Inconvénients de l'énergie Eolienne.....	13
I.3. Principaux Composantes D'une Eolienne.....	14
I.4. Principe de fonctionnement des éoliennes.....	16
I.5. Types d'éoliennes.....	17
I.5.1. Eolienne à Axe Verticale.....	17
I.5.2. Eolienne à Axe Horizontale.....	18
I.6. Classification des éoliennes selon leur vitesse.....	19
I.6.1. Les éoliennes à vitesse fixe.....	19
I.6.2. Les éoliennes à vitesse variable.....	20
I.7. Types des machines.....	21
I.8. Stratégie de commande utilisée pour les éoliennes.....	22
I.8.1. Action a charge partielle.....	22
I.8.1.1. Commande de rapport de vitesse $\lambda$ .....	22
I.8.1.2. Méthode de gradient.....	23
I.8.1.3. Commande par logique floue.....	23
I.8.2. Action en pleine charge.....	23
I.9. L'éolienne Dans le Monde.....	24
I.10. Programme de recherche Eolien en Algérie.....	25
I.11. Conclusion.....	27

### Chapitre II : Modélisation de la turbine

II.1. Introduction.....	33
II.2. Energie cinétique du vent –conversion en énergie mécanique.....	33
II.3. Principe de la loi de BETZ.....	34
II.4. Principe de la vitesse spécifique ou normalisée «Tip-Speed-Ratio».....	37
II.5. Modélisation du multiplicateur.....	37
II.6. Modélisation de l'arbre mécanique.....	38
II.7. Le coefficient de puissance.....	39
• Les expressions du « Cp » pour les éoliennes à vitesse fixe.....	39
• Les expressions du « Cp » pour les éoliennes à vitesse variable.....	40
II.8. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne.....	42
II.9. Schéma synoptique du système complet.....	44
II.10. Commande par MPPT.....	44
• Principe de M.P.P.T.....	44
• Contrôle sans asservissement de la vitesse.....	45
• Contrôle avec asservissement de la vitesse.....	45
II.11. Simulations et interprétations.....	47
a. Simulation de la turbine pour le cas de V=constant.....	47
b. Simulation de la turbine pour le cas de V=variable.....	50
II.12. Conclusion.....	53

<b>Chapitre III : Etude et simulation d'une éolienne (MADA avec turbine)</b>	
III.1 Introduction .....	59
III.2 Description et modélisation de la MADA.....	59
III.3 Topologie et principe de fonctionnement de la MADA .....	59
III.3.1. Structure.....	59
III.3.2. Principe de fonctionnement de la MADA.....	60
III.4 Mode de fonctionnement de la MADA.....	62
III.5 Intérêt de la MADA.....	63
III.6 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation.....	63
III.6.1 Hypothèse.....	63
III.6.2 Mise en équation de la machine asynchrone à double alimentation.....	64
III.6.3 Transformation de Park.....	65
III.7 Commande vectoriel .....	69
• Commande direct .....	72
III.8 Modélisation et Contrôle d'un Onduleur de tension & Redresseur	
MLI.....	73
III.8.1 Onduleur de tension.....	73
III.8.2 Redresseur MLI.....	75
III.8.3 Principe de fonctionnement.....	76
III.8.4 Source d'alimentation.....	76
III.8.5 Commande MLI.....	77
III.9 Résultats de simulations.....	77
III.9.1 Interprétation des résultats.....	79
III.10 Conclusion .....	80

#### **Chapitre IV : Ferme Eolienne**

IV.1 Introduction.....	85
IV.2 Ferme éolienne : le choix des sites .....	85
IV.3 Ferme éolienne en Algérie.....	86
IV.4 Présentation du système étudié.....	87
IV.5 Résultat de simulation .....	88
• Interprétation des résultats.....	92
IV.7 Conclusion.....	93

#### **Chapitre v : Etude et simulation d'un système PV en vue d'une intégration dans un système hybride**

V.1 Introduction.....	98
V.2 Définition du système d'énergie hybride (S.E.H).....	98
V.3 Définition d'une Cellule photovoltaïque .....	99
V.4 Principe de fonctionnement.....	100
V.5 Modélisation d'une cellule photovoltaïque .....	102
• Modèle de cellule.....	102
V.6 Panneau photovoltaïque.....	104
V.7 Simulation et Interprétation.....	104
V.8 Les convertisseurs DC-DC (hacheurs).....	106
V.9 Conclusion.....	110

#### **Conclusion Générale**

111

Annexes

Résumé

## Listes des figures

### Chapitre I

Figure (I-1)	: Historique de l'énergie éolienne.....	10
Figure (I-2)	: Circulation du vent dans le monde.....	11
Figure (I-3)	: Carte de gisement en Algérie.....	11
Figure (I-4)	: Correspondance taille-puissance des éoliennes.....	12
Figure (I-5)	: Composants d'une éolienne.....	14
Figure (I-6)	: Eléments constituant une éolienne.....	15
Figure (I-7)	: Principe de la conversion d'énergie.....	17
Figure (I-8)	: Technologies éoliennes.....	17
Figure (I-9)	: Eoliennes à axe vertical.....	18
Figure (I-10)	: Photographie d'une éolienne à axe horizontal et d'un moulin à vent.....	19
Figure (I-11)	: Capacité éolienne cumulée dans le monde.....	24

### Chapitre II

Figure (II-1)	: Colonne d'air animée d'une vitesse $V$ .....	34
Figure (II-2)	: Tube de courant autour d'une éolienne.....	35
Figure (II-3)	: Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.....	36
Figure (II-4)	: Vitesse de vent $V$ et vitesse tangentielle de l'aubage $\Omega_t R_t$ .....	37
Figure (II-5)	: Modèle de l'arbre et de la turbine éolienne.....	39
Figure (II-6)	: Coefficient de puissance $Cp1$ en fonction de $\lambda$ et $\beta$ .....	39
Figure (II-7)	: Coefficient de puissance $Cp2$ en fonction de $\lambda$ et $\beta$ .....	40
Figure (II-8)	: Coefficient de puissance $Cp1$ en fonction de $\lambda$ et $\beta$ .....	40
Figure (II-9)	: Coefficient de puissance $Cp2$ en fonction de $\lambda$ et $\beta$ .....	41
Figure (II-10)	: Coefficient de puissance $Cp3$ en fonction de $\lambda$ et $\beta$ .....	41
Figure (II-11)	: Coefficient de puissance $Cp4$ en fonction de $\lambda$ et $\beta$ .....	42
Figure (II-12)	: Les Coefficients de puissance $Cp$ en fonction de $\lambda$ et $\beta$ .....	42
Figure (II-13)	: Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent.....	43
Figure (II-14)	: Schéma bloc du modèle de convertisseur éolien.....	44
Figure (II-15)	: Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse mécanique.....	45
Figure (II-16)	: Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse mécanique.....	47
Figure (II-17)	: Profil du vent a Vitesse fixe.....	48
Figure (II-18)	: coefficient $\lambda$ de la turbine« avec $V_v$ fixe ».....	48
Figure (II-19)	: coefficient de puissance $Cp$ de la turbine « avec $V_v$ fixe»... ..	48
Figure (II-20)	: Puissance mécanique de la turbine (watt) « avec $V_v$ fixe ». .....	49
Figure (II.21)	: vitesse de rotation de la turbine (tr/min) « avec $V_v$ fixe».....	49
Figure (II.22)	: couple mécanique de la turbine (N.m) « avec $V_v$ fixe »... ..	49
Figure (II .23)	: Vitesse du vent en fonction du temps.....	50
Figure (II-24)	: coefficient $\lambda$ de la turbine.....	51
Figure (II-25)	: coefficient de puissance $Cp$ de la turbine.....	51
Figure (II-26)	: puissance mécanique de la turbine (watt).....	52
Figure (II-27)	: couple mécanique de la turbine (N.m).....	52
Figure (II-28)	: vitesse de rotation de la turbine (tr/min).....	53
<b>Chapitre III</b>		
Figure (III-1)	: Machine à induction à rotor bobiné.....	60
Figure (III-2)	: Les quatre modes de fonctionnement d'une MADA.....	62
Figure (III- 3)	: Représentation de la MADA dans le système triphasé.....	64
Figure (III-4)	: Schéma bloc de la commande directe.....	73
Figure (III-5)	: Schéma d'un onduleur de tension triphasé alimentant le stator de la machine.....	74

Figure (III-6)	: Structure du redresseur à MLI.....	76
Figure (III-7)	: Puissance active P(Watt) avec régulateur PI.....	78
Figure (III-8)	: Puissance réactive Q (VAR) avec régulateur PI.....	78
Figure (III-9)	: Courant rotorique Iqr Courants (A) avec régulateur PI.....	78
Figure (III-10)	: Courant rotorique Idr (A) avec régulateur PI.....	79
Figure (III-11)	: La variation du couple électromagnétique.....	79
Figure (III-12)	: La variation de la vitesse de rotation.....	79
<b>Chapitre IV</b>		
Figure (IV-1)	: ferme éolienne.....	86
Figure (IV -2)	: Ferme d'éolienne à base de MADA alimentée par un convertisseur Direct.....	87
Figure (IV-3)	: Puissance active P(Watt) avec régulateur PI.....	88
Figure (IV-4)	: Puissance réactive Q (VAR) avec régulateur PI.....	88
Figure (IV-5)	: Tension coté source en fonction du temps.....	89
Figure (IV-6)	: Tension coté charge en fonction du temps.....	89
Figure (IV-7)	: Tension de la ferme en fonction du temps.....	89
Figure (IV-8)	: Courant coté source en fonction du temps.....	90
Figure (IV-9)	: Courant coté charge en fonction du temps.....	90
Figure (IV-10)	: Courant de la ferme en fonction du temps.....	91
Figure (IV-11)	: Tension d'un aérogénérateur en fonction du temps.....	91
Figure (IV-12)	: Tension coté machine en fonction du temps.....	91
Figure (IV-13)	: Tension coté réseaux en fonction du temps.....	92
Figure (IV-14)	: Courant coté réseaux en fonction du temps .....	92
<b>Chapitre v</b>		
Figure (V-1)	: Structure basique d'une cellule solaire .....	74
Figure (V-2)	: Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire.....	75
Figure (V-3)	: Schéma électrique équivalent d'une cellule PV.....	76
Figure (V-4)	: Schéma de simulation du panneau PV BP solar 2150S.....	79
Figure (V-5)	: Caractéristique Courant-Tension du panneau PV.....	79
Figure (V-6)	: Caractéristique Puissance-Tension du panneau PV.....	80
Figure (V-7)	: Circuit électrique de base du hacheur survolteur.....	81
Figure (V-8)	: Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost .....	81
Figure (V-9)	: Ondulation du courant de l'inductance.....	83
Figure (V-10)	: Ondulation sur la tension de condensateur .....	84



## Listes de notations et symboles

$P_v$	: Puissance du vent
$V_v$	: Vitesse du vent
$B$	: Angle de calage
$R$	: Rayon des pales
$P_t$	: Puissance sur l'arbre de la turbine
$P_{mt}$	: Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé
$C_p$	: Coefficient de puissance
$G$	: Rapport de multiplicateur adaptant la vitesse de la turbine à celle de la génératrice.
$\beta_{ref}$	: Angle de calage de référence
MPPT	: Maximum power point tracking
MADA	: Machine Asynchrone à Double Alimentation
MAS	: Machine Asynchrone
MS	: Machine synchrone
CCR	: Convertisseur coté réseau
CCM	: Convertisseur coté machine
$G$	: Glissement
$P_s$	: Puissance active statorique
$Q_s$	: Puissance réactive statorique
PI	: Régulateur proportionnel intégral
FTBO	: Fonction de Transfert Boucle Ouverte
FTBF	: Fonction de Transfert Boucle Fermée
$K_p, K_i$	: Coefficients de proportionnalité et d'intégration
MLI	: Modulation de Largeur d'Impulsion
$F$	: Coefficient de frottement visqueux
$P$	: Nombre de paire de pôles
$L_s$	: Inductance cyclique propre du stator
$L_r$	: Inductance cyclique propre du rotor
$M$	: Inductance cyclique mutuelle
$R_s$	: Résistance statorique

$R_r$	: Résistance rotorique
$\Omega$	: Vitesse de rotation mécanique
$P_n$	: La puissance nominale
$\Omega_{méc}$	: Vitesse de la génératrice
$C_{em}$	: Couple électromagnétique
$\epsilon$	: Epsilon
$(d, q)$	: Axes correspondant au référentiel lié au champ tournant
$(\alpha; \beta)$	: Axes correspondant au référentiel lié au stator
$\Phi_s$	: Flux statorique
$\Phi_r$	: Flux rotorique
$J_{turbine}$	: Inertie de la turbine
$J_{méc}$	: Inertie de la génératrice
Si	: Silicium
Ge	: Germanium
GaAs	: Arséniure de gallium
CdTe	: Tellure de cadmium

# Introduction Générale

Les énergies renouvelables présentent un atout majeur par rapport aux ressources fossiles (pétrole, gaz, charbon). Elles utilisent des ressources présentes dans la nature tel que la chaleur de la terre, les marées, le soleil, le vent, les courants marins, ...

L'énergie est au cœur du développement durable, toute fois la poursuite des schémas énergétiques actuels n'est pas acceptable, vus que cette. Les différents exercices prospectifs montrent qu'ils conduisent à l'accélération du changement climatique, à l'aggravation des pollutions urbaines, essentiellement liées aux transports, et à la réduction des ressources fossiles qui constituent encore aujourd'hui plus des trois quarts des sources énergétiques mondiales.

La nouvelle mouture du programme national de développement des énergies renouvelables revoit à la hausse les capacités de production à partir de sources renouvelables en les portant à 22.000 MW. Les filières solaires photovoltaïques et éoliennes sont particulièrement privilégiées. Ce projet d'envergure permettra de produire, d'ici à 2030, près du tiers des besoins du pays en électricité à partir de sources renouvelables.

Notre mémoire s'intéresse principalement à l'étude des performances d'un système aérodynamique et de son amélioration pour aboutir à l'implémentation d'une ferme éolienne hybride. Pour cela, nous allons présenter le système de conversion d'éolienne utilisant une machine asynchrone à double alimentation comme génératrice. Le choix de la configuration du convertisseur, la commande et la simulation sont décrits dans ce travail. Dans ce contexte notre mémoire est organisée comme suit :

Le chapitre un mettra en relief l'état de l'art des éoliennes en présentant les quelques projets de recherche et de production intégrant l'éolien en Algérie, quelques orientations sur le développement avenir de ce secteur seront présentés ;

Le second chapitre traitera exclusivement la turbine, par la présentation de sa modélisation qui tiendra compte à la fois des vitesses du vent constant ou variable ainsi que l'angle de calage des pâles. Une série de simulation sera présenté pour mettre

en évidence les performances de notre turbine qui devra être utilisé dans le chapitre suivant ;

Le chapitre trois mettra en évidence les performances d'une génératrice à double alimentation avec turbine intégrant un de régulateur PI ;

Le chapitre quatre prendra en charge la modélisation de notre système (Turbine + MADA) où une série de simulation sera effectuée ;

Le chapitre cinq traitera des simulations relatives à une ferme éolienne constituée de 6 aérogénérateur identique décrit le chapitre précédent ;

On va terminer notre travail par une présentation du principe de fonctionnement d'un panneau photovoltaïque en vue d'une intégration à un aérogénérateur pour aboutir à un modèle hybride d'aérogénérateur.

# **Chapitre I**

## **Etat de l'art des éoliennes**

*Table de matière*

**Chapitre I : Etat de l'art**

I.1.	Introduction.....	8
I.2.	Potentiel de l'énergie éolienne.....	8
I.2.1.	L'énergie éolienne du VIIe siècle à nos jours.....	9
I.2.2.	Direction et vitesse du vent.....	10
I.2.3.	Taille des aérogénérateurs.....	12
I.2.4.	Les Avantages Et Inconvénients de l'énergie Eolienne.....	13
I.3.	Principaux Composantes D'une Eolienne.....	14
I.4.	Principe de fonctionnement des éoliennes.....	16
I.5.	Types d'éoliennes.....	17
I.5.1.	Eolienne à Axe Verticale.....	17
I.5.2.	Eolienne à Axe Horizontale.....	18
I.6.	Classification des éoliennes selon leur vitesse .....	19
I.6.1.	Les éoliennes à vitesse fixe.....	19
I.6.2.	Les éoliennes à vitesse variable.....	20
I.7.	Types des machines.....	21
I.8.	Stratégie de commande utilisée pour les éoliennes.....	22
I.8.1.	Action a charge partielle.....	22
I.8.1.1.	Commande de rapport de vitesse $\lambda$ .....	22
I.8.1.2.	Méthode de gradient.....	23
I.8.1.3.	Commande par logique floue.....	23
I.8.2.	Action en pleine charge.....	23
I.9.	L'éolienne Dans le Monde.....	24
I.10.	Programme de recherche Eolien en Algérie.....	25
I.11.	Conclusion .....	27

**Liste des tableaux**

Tableau (I.1)	: L'énergie éolienne à travers le temps .....	9
Tableau (I-3)	: les types des machines.....	21
Tableau (I-4)	: Programme de recherche Eolien en Algérie.....	25

**Listes des figures**

Figure (I-1)	: Historique de l'énergie éolienne.....	10
Figure (I-2)	: Circulation du vent dans le monde.....	11
Figure (I-3)	: Carte de gisement en Algérie.....	11
Figure (I-4)	: Correspondance taille-puissance des éoliennes.....	12
Figure (I-5)	: Composants d'une éolienne.....	14
Figure (I-6)	: Eléments constituant une éolienne.....	15
Figure (I-7)	: Principe de la conversion d'énergie.....	17
Figure (I-8)	: Technologies éoliennes.....	17
Figure (I-9)	: Eoliennes à axe vertical.....	18
Figure (I-10)	: Photographie d'une éolienne à axe horizontal et d'un moulin à vent...	19
Figure (I-11)	: Capacité éolienne cumulée dans le monde.....	24

### **Bibliographie**

- [1] T. Douadi, « Etude et commande d'un système éolien à base d'une génératrice asynchrone », thèse de magistère de l'université de EL Hadj Lakhdar –Batna, option maîtrise d'énergie,
- [2] R. Redjem, « Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne », thèse magistère de l'université de Mentouri –Constantine, option modélisation et commande des machines électriques, 4 juillet 2007
- [3] A. Davigny – « Participation aux services système de fermes d'éolienne à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 2007.
- [4] F. Poitiers, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne », thèse de doctorat de l'université de Nantes, soutenue le 19/12/2003.
- [5] N. LAVERDURE, "Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires", Thèse de Doctorat en Génie Electrique, , France, 2005.
- [6] A. Abdelli – « Optimisation multicritère d'une chaine éolienne passive », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, 2007.
- [7] L. Leclercq – « Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 2004.
- [8] Thèse R .BAÏLE « Analyse et modélisation multi fractales de vitesses de vent application à la prévision de la ressource éolienne », université de Corse le 18 Octobre 20 10.
- [9] K. GHEDAMSI, « Contribution à la modélisation et la commande d'un Convertisseur direct de fréquence. Application à la conduite de la machine Asynchrone », Thèse de Doctorat, ENP Alger (Algérie), 2008.
- [10] N. MEKKAOUI « Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée » Université De Batna. 2004
- [11] L. Khettache « Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique à double alimentation » thèse de magister, université de Batna, 2007.
- [12] M.S. Abdoulaziz « Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne », Mémoire d'ingénieur Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2007.
- [13] A. DAVIGNY « participation aux système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie » , thèse de doctorat , université des science et technologie de lilli, 2007
- [14] L. Chang – « Systèmes de conversion de l'énergie éolienne », IEEE Canadian Review - summer / Eté 2002, pp. 1-5.
- [15] A. Tounzi , « Utilisation de l'énergie éolienne dans la production de l'électricité », Journées du club EEA, 28-29 Janvier, 1999, Paris, France, pp.1-14.
- [16] M. Liserre, R. Cárdenas, M. Molinas, J. Rodríguez, "Overview of Multi-MW Wind Turbines and Wind Parks," *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 4, pp. 1081–1095, April 2011.
- [17] N. Laverdure, I. Valero, S. Bacha, L. Gerbaud, ' « Optimisation de l'interfaçage de puissance dans les systèmes éolien »', GEVIQ'2002, Marseille ,2002
- [18] site: [www.cap-nrj.fr](http://www.cap-nrj.fr) – « Le principe de fonctionnement de l'éolien », consulté décembre 2009.



- [19] Hilloowala RM, Sharaf, « A utility interactive wind energy conversion scheme with asynchronous DC link using a supplementary control loop ». IEEE Transactions on Energy Conversion 9(3) :558\_563, 1994.
- [20] SEMMAR Mohamed « L'énergie éolienne pour prévenir l'avenir sous un climat sain et propre » Bul. Ene. Ren, CDER, N°14, Déc. 2008, p.8-9-10
- [21] B. Multon, «Energie électrique : les enjeux». Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2008.
- [22] E. Muljadi, K. Pierce et P. Migliore – « Control strategy for variable-speed, stall-regulated wind turbines », American Controls Conference, Philadelphia, PA , Juin 24-26, 1998.
- [23] R. Pena, J. C. Clare et G. M. Asher – « A doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters supplying an isolated load from a variable speed wind turbine », IEE Proc-Electr, Power Appl, vol 143, No 5, September 1996.
- [24] <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Les-impacts-lies-a-la-production-d.html>
- [25] <http://www.sonelgaz.dz/?page=article&idb=3>
- [26] [www.explorateurs-energie.ch](http://www.explorateurs-energie.ch)
- [27] <http://www.edf.com/html/panorama/production/renouvelable/hydro/fonctionnement.html>
- [28] <http://etat.geneve.ch/dt/site/protection-environnement/energie/master-content.jsp?ComponentId=kmelia239&pubId=5290&nodeId=1428>
- [29] Site Internet de l'Association Danoise de l'industrie éolienne, <http://www.windpower.org/fr/core.htm>.
- [30] [histoire\\_energie\\_eolienne.txt](#)

## **I.1 Introduction**

Les énergies propres, en particulier l'énergie éolienne est décrite comme étant l'énergie du futur que ce soit sur le plan de la protection de l'environnement que sur un plan économique. Une éolienne a pour mission la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

Avant d'aborder les différents chapitres de notre mémoire, il est judicieux de présenter en premier lieu l'état de l'art des éoliennes, suivi par la présentation du système éolien avec son principe de fonctionnement et domaines d'applications.

## **I.2 Potentiel de l'énergie éolienne**

L'énergie éolienne découle du mouvement de l'air principalement à partir de dispositifs aérogénérateur (éolienne, moulin à vent, ...). Elle peut être utilisée de deux manières : directe et indirecte.

Direct : Conservation de l'énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule, pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour abreuver le bétail, ...) ou pour faire tourner la meule d'un moulin, [1].

Indirect : Transformation en énergie électrique : l'éolienne est accouplée à un générateur électrique pour produire du courant continu ou alternatif, le générateur est relié à un réseau électrique ou est autonome ou avec un dispositif de stockage d'énergie, [1].

Les éoliennes sont conçues de manière à produire des puissances en fonction des vents disponibles sur les sites. Elles fonctionnent avec des puissances nominales correspondant à un certain seuil de vitesse de vent. Cependant, si le vent devient plus violent, la machine subit des contraintes plus importantes. Elle est alors freinée grâce à un système de régulation qui lui permet de rester à la puissance maximale tout en limitant les efforts sur la structure. Au-delà d'un certain seuil, la régulation ne suffit plus. La machine est alors arrêtée pour éviter sa détérioration [2].

**I.2.1 L'énergie éolienne du VII siècle à nos jours [30]**

**Tableau I-1 : L'énergie éolienne à travers le temps**

<b>Années</b>	<b>Domaine d'application / Innovation</b>	<b>Zone géographique / pays</b>
<b>VII siècle</b>	Utilisation de roues à énergie éoliennes rudimentaires composées d'une simple tour supportant des pales.	Perse
<b>1100</b>	Pomper l'eau Moudre le blé (moulins à vent)	Europe
<b>1700</b>	Moudre le grain (apparition des turbines éoliennes)	Canada
<b>1800</b>	Pomper l'eau (moulins à vent)	Amérique
<b>1887</b>	Produire de l'électricité (construite par Charles F. Brush. Composée de 144 pâles et d'un diamètre de 17 m, elle ne produisait que 12 kW)	Amérique
<b>1920</b>	Apparition du concept d'un rotor à axe vertical: éoliennes Darrieux développé par Georges J.M. Darrieux.	France
<b>1930</b>	Eclairage électrique Recharge de batterie des radios à cristal Alimentation des appareils électroménagers et de l'équipement de ferme (A la suite du développement de petites éoliennes)	Canada
<b>1957</b>	Apparition de la turbine Gedser conçue par Johannes Juul (modèle de référence, se compose d'un générateur et de trois Pales à pivot)	Danemark
<b>1971</b>	Parc d'Eoliennes offshore (Premier du genre avec une puissance totale de 5 MW)	Danemark
<b>1984</b>	Projet Éole (la plus grande éolienne à axe verticale de type Darrieux)	Canada
<b>2002</b>	Mise en service du plus grand parc éolien offshore au monde	Danemark
<b>2004</b>	La capacité mondiale d'énergie éolienne dépasse les 39 GW	

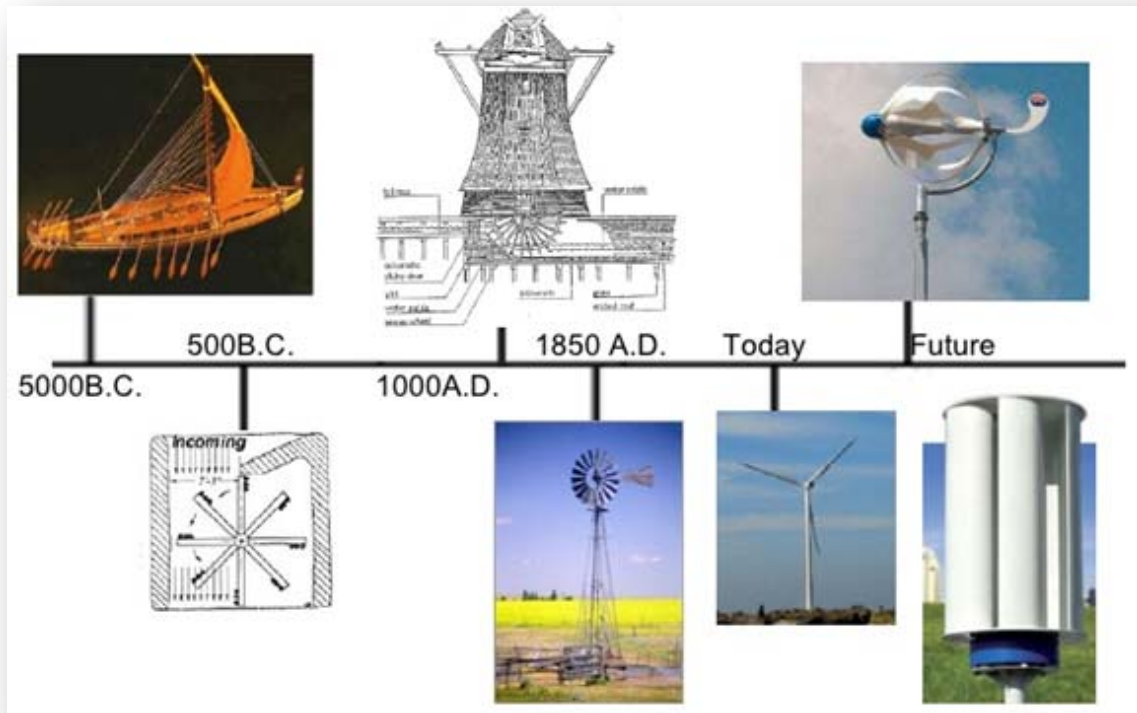


Figure (I-1) : Historique de l'énergie éolienne

### I.2.2 Direction et vitesse du vent [12]

Le vent souffle à partir des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions. Aux latitudes moyennes et grandes, sa direction est cependant modifiée du fait de la rotation de la terre. Dans l'hémisphère Nord, le vent tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre autour des aires cycloniques et dans le sens direct autour des zones anticycloniques.

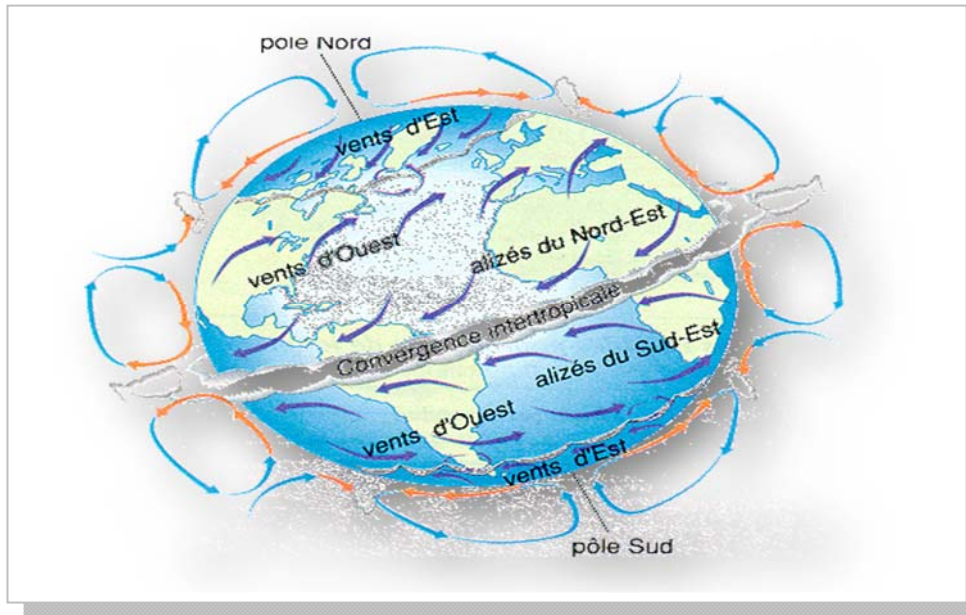


Figure (I-2) : Circulation du vent dans le monde

Dans l'hémisphère Sud, les sens sont inversés par rapport aux précédents. La vitesse du vent est mesurée avec des anémomètres. Une graduation a été établie, selon l'échelle Beaufort qui divise les vents en fonction de leurs vitesses en 17 catégories.

### Carte du vent de l'Algérie

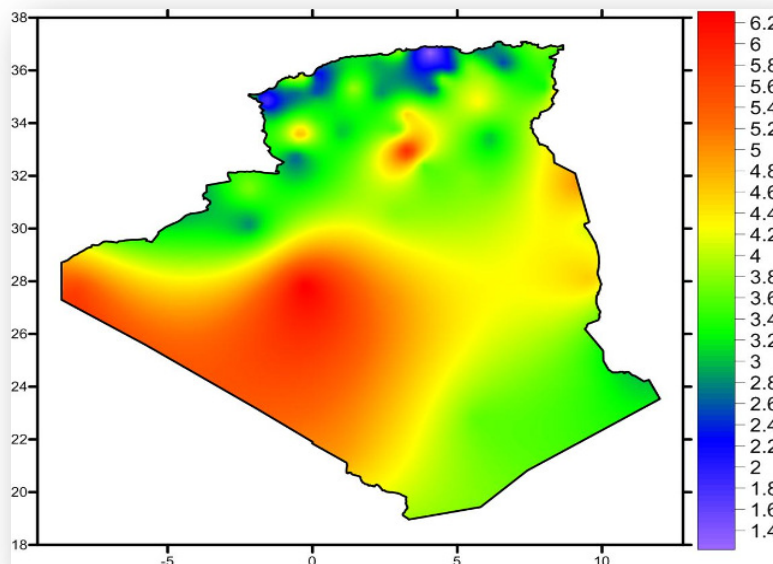


Figure (I-3) : carte de gisement en Algérie

Le Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) en tant que point focal de la recherche dans le domaine des ENR, l'Algérie prévoit d'atteindre à l'horizon 2030 près de 40% de la production nationale d'électricité de sources renouvelables. Bien que le choix de l'énergie solaire soit prédominant, l'énergie éolienne représente le deuxième axe de production de ce programme.

Il est à noter que toute étude d'implantation de ferme éolienne dans une région donnée nécessite des études du gisement éolien pour avoir une connaissance précise de la météorologie au sens large.

### I.2.3 Taille des aérogénérateurs

Un aérogénérateur est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

Selon leur puissance nominale, les éoliennes sont divisées en trois catégories [21]:

- Petite puissance : inférieure à 40 kW
- Moyenne puissance : de 40 kW à quelques centaines de kW
- Grande puissance : supérieure à 1 MW.

La figure (I-4) illustre la correspondance taille-puissance des éoliennes.

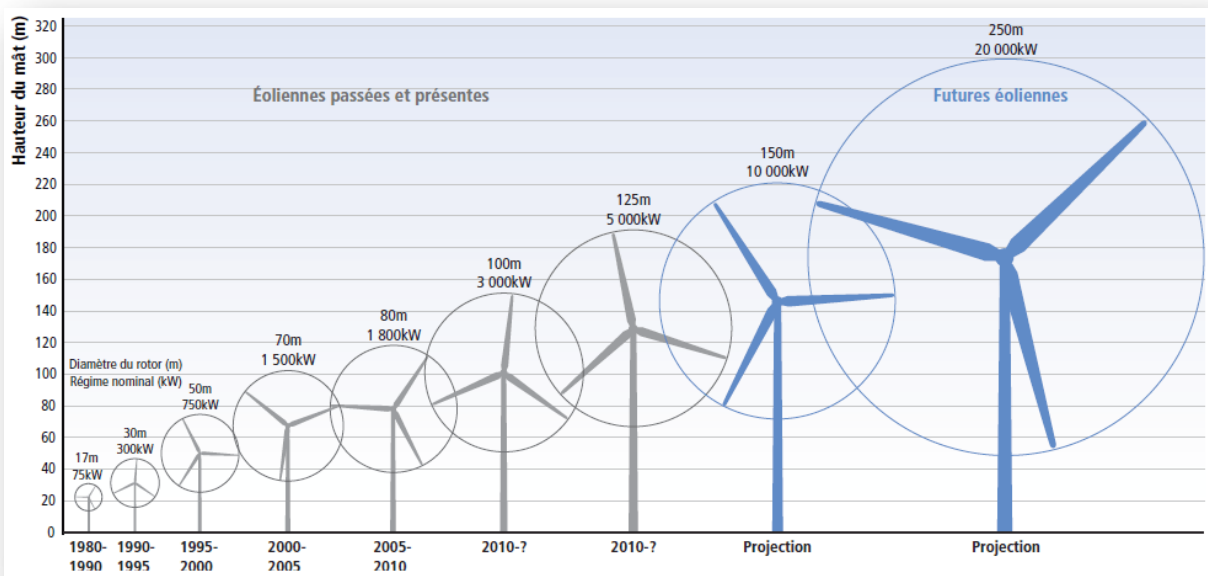


Figure (I-4) : Correspondance taille-puissance des éoliennes.

### I.2.4 Avantages et Inconvénients

La prolifération des aérogénérateurs exploitant l'énergie éolienne est en constante croissance bien qu'elle présente des inconvénients.

- **Avantages**

- L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement [8] [9]
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable.
- L'énergie éolienne ne produit pas de déchets radioactifs.
- Les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plus part des centrales thermiques et nucléaires.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement en comparaison avec les centrales traditionnelles.
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi, les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres.
- Cette source d'énergie peut stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales
- C'est l'énergie la moins chère des énergies renouvelables
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement est faible par rapport à celui des centrales aux énergies plus traditionnelles
- Ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.
- La période de haute productivité se situe en hiver (vent plus forts).

- **Inconvénients**

Les systèmes éoliens présentent certains inconvénients :

- Le bruit. cependant, il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor

- La qualité de la puissance électrique : la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne
- Le coût de l'énergie éolienne est plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés.
- L'impact visuel, ça reste néanmoins un thème subjectif

### I.3 Principaux composants d'une éolienne

Une éolienne est généralement constituée de trois éléments principaux :

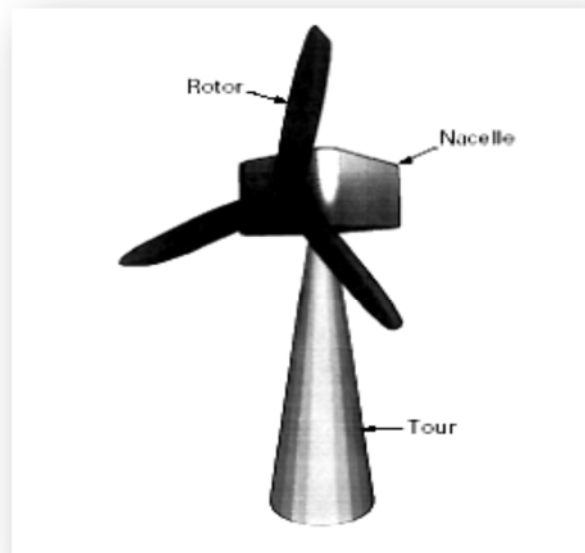


Figure (I-5) : Composants d'une éolienne

- a- Le mat ou la tour** : c'est un tube d'acier, il doit être le plus haut possible pour bénéficier du maximum de l'énergie cinétique du vent et d'éviter les perturbations près du sol.
- b- La nacelle** : Au sommet du mat se trouve la nacelle qui regroupe les éléments mécaniques permettant de coupler la génératrice électrique à l'arbre de l'éolienne.



**c- Le rotor :** Le rotor est un ensemble constitué de pales et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie généralement de 1 à 3, le rotor tripale étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit [29].

Il existe deux types de rotor, les rotors à vitesse fixe et les rotors à vitesse variable.

**c-1 Les rotors à vitesse fixe :** Sont souvent munis d'un système d'orientation de pales permettant à la génératrice(généralement une machine asynchrone à cage d'écurie) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ce système allie ainsi simplicité et faible coût [4].

**c- 2 Les rotors à vitesse variable :** Sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites, la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique) [4].

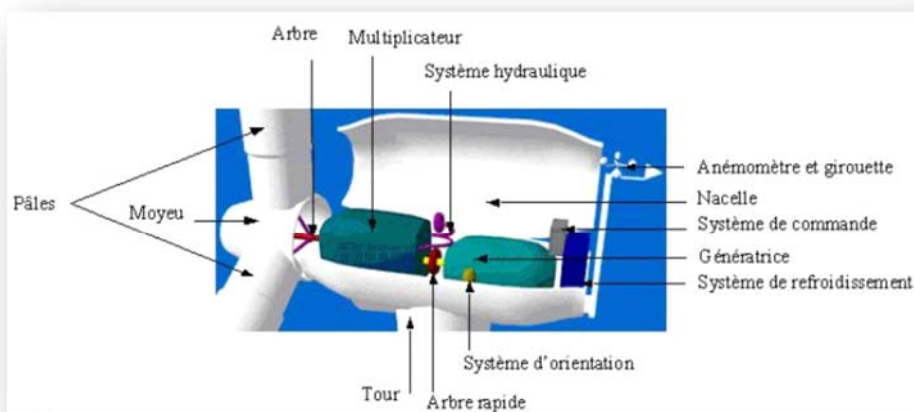


Figure (I- 6) : Eléments constituant une éolienne

**Le multiplicateur :** sert à adapter la vitesse de la turbine éolienne à celle de la génératrice électrique.

**Le système de refroidissement** : se compose généralement d'un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice, et d'un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur.

**La génératrice électrique** : c'est l'élément principal de la conversion mécano-électrique qui est généralement une machine synchrone, asynchrone à cage ou à rotor bobiné. La puissance électrique de cette génératrice peut varier entre quelque kW à 10 MW [16].

**Le système de commande** : qui contrôle en permanence le bon fonctionnement de l'éolienne et qui intervient automatiquement, en cas de défaillance pour l'arrêter.

**L'arbre** : qui relie le moyeu au multiplicateur, il contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.

**Le système d'orientation des pâles** : qui sert à la régulation de la puissance (réglage aérodynamique).

En plus de ces éléments, la turbine est munie des pâles fixes ou orientables et qui tournent à des vitesses nominales inférieures à 40 tr/min.

#### **I.4 Principe de fonctionnement des éoliennes**

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes [17] :

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.

Du fait de la non-maîtrise de l'énergie primaire, qui, de plus, est intermittente, il est difficile d'obtenir une conversion et une transmission de l'énergie régulières, puisque a priori la seule possibilité de stockage est inertielle, au prix d'une accélération de la turbine. Dans ces systèmes, la régularité de la transmission de l'énergie est donc tributaire d'un moyen de stockage en sus de l'inertie naturelle de la turbine.

Le fonctionnement général est illustré par la Figure (1-7). L'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécaniques, électriques ou d'automatique.

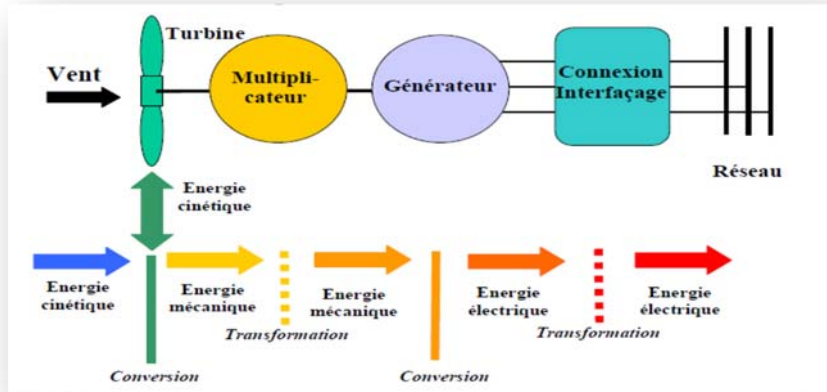


Figure (1-7) : Principe de la conversion d'énergie

## I.5 Types d'éoliennes

Les éoliennes peuvent être classées selon deux catégories : celles à axe vertical et celles à axe horizontal :



Eoliennes à axes horizontal

Eoliennes à axes vertical

Figure (I-8) : technologies éoliennes

### I.5.1 Les éoliennes à axe vertical

Cette technologie d'éoliennes est bien adaptée aux zones de vents perturbés par le relief et végétation. Elles peuvent aisément s'intégrer à l'architecture des bâtiments et sont d'une conception très simple (roue montée sur un axe qui entraîne directement une génératrice). Le principe aérodynamique permet de bons rendements pour des vitesses de vent faible, une autorégulation en vitesse pour les vents forts et un niveau sonore très faible.

Par contre, elles ne conviennent pas pour la conversion de grandes puissances. Ses structures sont employées pour des applications à petite et moyenne puissances, en milieu urbain [6], [18].

Il existe principalement les technologies VAWT (Vertical Axis Wind Turbine) : les turbines Darrieus classiques, à pales droites (H-type) et la turbine de type Savonius. Dans tous les cas, les voilures sont à deux ou plusieurs pales [25].

Outre le caractère vertical de leur axe de rotation, ces aérogénérateurs peuvent être classés selon leur principe de fonctionnement aérodynamique. Ainsi, contrairement aux éoliennes à axe horizontal qui utilisent uniquement la force de portance, les éoliennes à axe vertical de type Savonius utilisent la force de trainée et celles de type Darrieus reposent sur l'effet de portance subi par un profil soumis à l'action d'un vent relatif.



-Turbine Darrieus -



-Turbine Darrieus de type H -



- Turbine Savonius-

**Figure (1-9) : Eoliennes à axe vertical**

### **I.5 .2 Les éoliennes à axe horizontal**

Les turbines à axe horizontal sont de loin les plus utilisées. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent des voilures à deux, trois ou plusieurs pales [25]. Toutefois, les structures les plus courantes sont à trois pales. Une éolienne à axe horizontal est constituée donc d'une hélice perpendiculaire au vent montée sur un mat dont les pales sont profilées de manière aérodynamique telle une aile d'avion. Par conséquent, ce type de turbines doit

toujours être orienté face au vent [7]. Par comparaison à la turbine à axe vertical, pour la même vitesse de vent, les éoliennes à axe horizontal sont capables de produire plus d'énergie car leurs coefficients de puissance atteignent rapidement sa valeur maximale. Par ailleurs, elles ont un coût moindre et une efficacité accrue due à leur position à plusieurs dizaines de mètres du sol [4].



Figure (I-10) : Photographie d'une éolienne à axe horizontal et d'un moulin à vent [26]

## I.6 Classification des éoliennes selon leur vitesse

Aujourd'hui, on peut recenser deux types d'éoliennes raccordées sur les réseaux électriques : les éoliennes à vitesse fixe constituées d'une machine asynchrone à cage d'écureuil et les éoliennes à vitesse variable constituées d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) ou d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP). Ces dernières (MADA et MSAP) sont principalement installées afin d'augmenter la puissance extraite du vent ainsi que pour leurs capacités de réglage [3].

### I.6.1 Les éoliennes à vitesse fixe :

Ce mode de fonctionnement concerne principalement les éoliennes dont la vitesse de rotation est régulée par orientation des pales (pitch control). Généralement, ces éoliennes reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil directement reliée à un

réseau d'énergie [3]. Pour assurer un fonctionnement en générateur, il est nécessaire que la vitesse de rotation de la MAS soit au-delà du synchronisme (glissement négatif) [15].

Outre la simplicité de la connexion, cette solution bénéficie des avantages de la machine asynchrone à cage qui est robuste et a l'avantage d'être standardisée et fabriquée en grande quantité et dans une très grande échelle de puissances.

Par ailleurs, la connexion directe au réseau de ce type de machine est bien plus douce grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor.

Toutefois, la MAS à cage d'écureuil nécessite de l'énergie réactive pour assurer la magnétisation de son rotor. Afin de limiter l'appel d'énergie réactive au réseau.

Les avantages des éoliennes à vitesse fixe utilisant des MAS à cage d'écure ils peuvent se résumer alors dans les points suivants :

- Système électrique simple ;
- Grande fiabilité ;
- Prix modéré.

Leurs inconvénients majeurs résident en :

- Une puissance extraite non optimale : Ce type d'éoliennes n'offre quasiment pas de possibilité de réglage de la puissance générée ;
- L'absence de gestion de l'énergie réactive par le générateur asynchrone : La connexion directe au réseau d'une génératrice asynchrone nécessite l'ajout de bancs de condensateurs afin de limiter la puissance réactive appelée à ce réseau.

### **I.6.2. Les éoliennes à vitesse variable**

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 limite la plage de vitesses de vent exploitable.

Ces deux principaux inconvénients peuvent, en grande partie, être levés grâce à un fonctionnement à vitesse variable qui permet alors de maximiser la puissance extraite du vent [22]. Mais dans ce cas, Une interface d'électronique de puissance entre la génératrice et le

réseau est alors nécessaire [14]. Cette dernière est classiquement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue [4]. Les avantages de cette configuration sont les suivants [23]:

- Augmentation du rendement énergétique ;
- Réduction des oscillations de couple dans le train de puissance ;
- Réduction des efforts subis par le multiplicateur de vitesse et les autres parties mécaniques ;
- Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

L'utilisation de convertisseurs de puissance « complexes » demeure son principal inconvénient.

### I.7 Types des machines [13]

**Tableau (I-2) : les types des machines**

Types d'éolienne	Avantages	Inconvénients
<b>MAS</b> Vitesse fixe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Machines robuste</li> <li>• Faible cout</li> <li>• Pas d'électronique de puissance</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puissance extraite non optimisé</li> <li>• Maintenance de boite de vitesse</li> <li>• Pas de contrôle de l'énergie réactive</li> <li>• Magnétisation de la machine imposée par le réseau</li> </ul>
<b>MADA</b> Vitesse variable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fonctionnement a vitesse variable</li> <li>• Puissance extraite optimisée</li> <li>• Electronique de puissance dimensionnée a 30 % de la puissance nominale</li> <li>• Machine standard</li> <li>• Connexion de la machine plus facile à gérer</li> <li>• Une magnétisation de la machine gérée en cas de défaut sur le réseau</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maintenance de boite de vitesse</li> <li>• Prix de l'électronique de puissance</li> <li>• Contrôle commande complexe</li> <li>• Contact glissant bagues balais</li> </ul>
<b>MSAP</b> Vitesse variable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fonctionnement a vitesse variable sur toute la plage de vitesse</li> <li>• Puissance extraite optimisée pour les vents faibles</li> <li>• Connexion de la machine facile à gérer</li> <li>• Possibilité d'absence de boite de vitesse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prix de l'électronique de puissance</li> <li>• Machine spécifique</li> <li>• Grand diamètre de machine</li> <li>• Electronique de puissance dimensionnée pour la puissance minimale de la génératrice</li> </ul>

## I.8 Stratégie de commande utilisée pour les éoliennes

Il existe deux stratégies de commande suivant les zones de fonctionnement de l'éolienne :

### I.8.1 Action à charge partielle

Elle est utilisée dans la zone 2 du fonctionnement de l'éolienne. L'objectif est de capter le maximum d'énergie possible. Un rendement énergétique maximal est assuré par un rendement aérodynamique maximal. Ce rendement dépend de la vitesse spécifique  $\lambda$ , c'est-à-dire du rapport entre la vitesse en bout de pale (proportionnelle à la vitesse de rotation de l'aérogénérateur) et la vitesse du vent. Pour optimiser la capture de l'énergie contenue dans le vent dans cette zone de fonctionnement, la commande de l'éolienne doit se faire de sorte que la vitesse de rotation du rotor s'adapte à la vitesse du vent afin que la vitesse spécifique soit optimale [52].

Lorsque l'on trace les courbes donnant la puissance extraite en fonction de la vitesse de rotation de la génératrice, pour différentes vitesses de vent, on s'aperçoit qu'elles passent chacune par un unique maximum. Le but de ce contrôle est la recherche permanente de ce maximum, technique que l'on retrouve sous le nom de MPPT (Maximum Power Point Tracking) [5], [7].

Il existe plusieurs techniques pour poursuivre le MPPT. Ces techniques diffèrent selon le type d'informations dont elles ont besoin pour délivrer la référence de vitesse. On peut citer :

**I.8.1.1 Commande de rapport de vitesse  $\lambda$  :** L'objectif prioritaire de cette commande est de maintenir  $\lambda$  à sa valeur optimale  $\lambda = \lambda_{opt}$ . C'est pour cette valeur que le coefficient de puissance est égal à sa valeur maximale. Le but, comme pour les autres méthodes, est donc de rester constamment au point  $(\lambda_{opt}, C_{p\_max})$ . Il s'agit donc de faire varier la vitesse de rotation de la turbine  $\Omega_{tur}$  en fonction des variations de la vitesse du vent  $V$ . Ceci permet de travailler continuellement avec un rendement aérodynamique optimal. C'est un des avantages principaux des éoliennes à vitesse variable par rapport à celles fonctionnant à vitesse fixe [11], [5].

L'avantage de cette méthode est sa simplicité. Cependant, elle dépend fortement de la mesure de la vitesse de vent, c'est-à-dire de la qualité de l'image du vent fournie par



l'anémomètre. De plus, la fiabilité de la méthode tient de la justesse de la courbe de la puissance maximale en fonction de la vitesse du vent [5].

**I.8.1.2 Méthode du gradient :** Cette méthode vient de l'observation de la courbe donnant la puissance extraite en fonction de la vitesse de rotation de la turbine. Pour agir sur la vitesse de rotation  $\Omega_{tur}$  de la turbine, on s'intéresse au sens de variation de la grandeur  $(dP / (d\Omega_{tur}))$ . Ce gradient vaut 0 lorsque l'on a atteint le maximum de la courbe, point ne que l'on recherche. [5].

**I.8.1.3. Commande par logique floue :** Cette méthode est en fait une amélioration des méthodes où l'incrément (ou le décrétement) de vitesse est constant (méthode du gradient, commande en puissance). Par exemple, la méthode du gradient permet de savoir si, au pas suivant, il faut augmenter ou diminuer la référence de vitesse. Cette variation (positive ou négative)  $\Delta\Omega_{tur}$  est constante, choisie de façon à trouver un compromis entre une recherche rapide de l'optimum et des oscillations faibles autour de cet optimum en régime établi. La commande par logique floue reprend les bases de la méthode du gradient pour savoir dans quelle direction aller, mais avec une variation de vitesse de référence  $\Delta\Omega_{tur}$  [5].

**Autres méthodes :** On peut citer deux autres procédés :

- Une méthode dérivée de celle du gradient, en travaillant directement sur la courbe  $C_p(\lambda)$  et en proposant une méthode de recherche à pas adaptatif.
- Une méthode basée sur la théorie des modes glissants, donnant des résultats intéressants au prix de calculs mathématiques importants.

**I.8.2 Action en pleine charge (contrôle de l'angle de calage) :** En charge totale, la vitesse du vent est supérieure à la vitesse nominale (vitesse du vent correspondante à la puissance nominale). L'objectif consiste à limiter la puissance extraite à la valeur correspondante à la puissance nominale de la machine en jouant sur l'angle de calage  $\beta$  des pales [5]. Le mécanisme de positionnement des pales consiste à orienter les pales suivant un angle de référence  $(\beta)_{ref}$  par l'intermédiaire d'un système hydraulique ou électrique. Le choix de cet angle provient en général d'une boucle externe visant à réguler soit la vitesse de la turbine, soit la puissance mécanique générée.

## I.9 L'éolien dans le monde

Avec une capacité mondiale installée de 432.4 GW, l'éolien maintient sa place dans le mix énergétique à long terme.

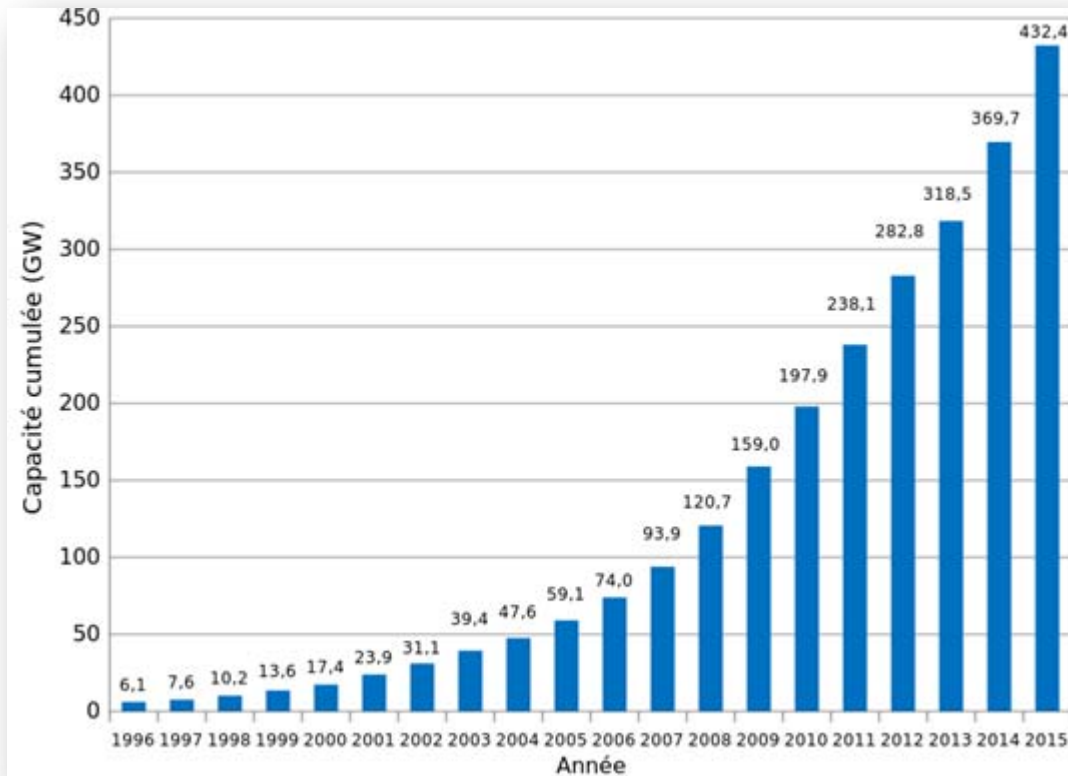


Figure (1-11) : capacité éolienne cumulée dans le monde

**I.10 Programme de recherche Eolien en Algérie**

**Tableau (I-3) : Programme de recherche Eolien en Algérie**

N°	Code du projet	Titre	Structure de recherche	Domiciliation du projet
01	U01/10/02	Etude, réalisation et expérimentation d'une petite éolienne autonome de 5-10 kW sur site d'Adrar	La consommation mondiale de l'énergie a connu une augmentation énorme ces dernières années, à cause de l'industrialisation massive qui a tendance de s'amplifier de plus en plus, et plus précisément dans certaines zones géographiques notamment dans les pays de l'Asie. Les risques de pénurie des matières fossiles et leurs effets sur le changement climatique, dénotent encore une fois de l'importance des énergies renouvelables.	Laboratoire Energie et Environnement, Faculté des Sciences et Sciences d'Ingénieur, Université d'Adrar, 01000 Adrar
02	CR0162/10/18	Application des techniques de réduction des modèles aux énergies Renouvelables	Le projet de recherche proposé portera sur le développement et l'application d'une technique de réduction des modèles (Reduced Order Model ou ROM) à l'étude en Interaction Fluide Structure (IFS) d'une pale d'éolienne et à la caractérisation de l'écoulement dans le sillage des pales.	Centre de Développement des Energies Renouvelables, BP 62. Route de l'Observatoire CP 16340. Bouzareah. Alger
03	U07/10/03	Conception et réalisation d'éoliennes à axe horizontal	Les énergies renouvelables constituent une alternative prometteuse et de substitution des énergies conventionnelles qui continuent de causer de sévères dégâts écologiques et qui sont dans tous les cas des ressources limitées. Parmi ces énergies renouvelables : Le vent.	Laboratoire de Génie Mécanique, Département de Génie Mécanique. Université de Biskra. BP 145 RP, 07000 Biskra, Algérie
04	U06/10/04	Production et amélioration de la qualité d'énergies renouvelables Par de nouvelles machines commandées	Ce projet vise à rassembler différents intervenants (enseignants, chercheurs et doctorants) qui travaillent dans le domaine des nouvelles structures de convertisseurs Adaptées aux énergies renouvelables (ER). Il a pour but de renforcer les collaborations existantes pour aboutir à un niveau de maîtrise conséquent dans ce domaine. L'objectif est de concevoir, modéliser et étudier des chaînes complètes de génération de l'électricité à partir d'ER, essentiellement L'éolien. Cela inclut la conception, l'étude et l'optimisation de structures innovantes, de topologies MSAP ou MRV, adaptées aux fonctionnements lents envisagés, la mise en oeuvre des liaisons adéquates entre la production et la consommation (convertisseurs statiques) et la commande de L'ensemble pour aboutir à une optimisation de la production tout en garantissant une qualité de l'énergie. Ces travaux seraient menés en utilisant différentes approches Analytiques et des outils de simulation numériques. Les résultats seraient, dans la mesure du possible, validés sur des bancs expérimentaux.	Laboratoire de Génie Electrique, Université A.MIRA Béjaïa, 06000 Algérie
05	E312/10/01	Optimisation des parcs éoliens et leur intégration dans le	La croissance constante de la consommation d'énergie sous toutes ses formes et les effets polluants associés, principalement causés par la combustion des énergies fossiles, sont au cœur de la problématique du développement durable et du soin de l'environnement dans une	Laboratoire de Simulation, Commande, Analyse et Maintenance des Réseaux Electriques, ENSET

		réseau Électrique Algérien	discussion pour l'avenir de la planète. Le secteur de la génération électrique est le premier consommateur d'énergie primaire et les deux tiers de ses sources sont des carburants fossiles. Il est techniquement et économiquement capable de faire des efforts importants pour réduire les atteintes de l'activité humaine sur le climat et l'environnement. Une des possibilités est d'accroître le taux de production d'électricité à partir de ressources de type non-fossiles et renouvelables, comme c'est le cas de l'énergie éolienne.	Oran, Bp 1523 El M'naouer Oran, Algérie
06	U21/10/01	Identification, simulation et réglage d'une éolienne contrarotative	Avant-Propos : La libéralisation du marché de l'électricité et le développement de la production décentralisée induisent de nombreux problèmes scientifiques et techniques nouveaux. Ces problèmes sont liés évidemment aux nouveaux types de sources, distribuées géographiquement et se développant rapidement, mais ils concerneront également, d'ici quelques années, la gestion, voire la structure des réseaux d'énergie. Cependant, l'éolien est la piste la plus sérieuse pour atteindre les objectifs fixés en matière de production d'électricité. Le principal inconvénient de cette source d'énergie est l'indisponibilité et l'imprévisibilité du vent.	Laboratoire d'Automatique Appliquée, Route El hadaik Skikda 21000, Département Electronique, Université 20 Aout 1955 Skikda, Algérie
07	E312/10/03	Modélisation, observation et commande des systèmes éoliens	Connue depuis la fin du 19 <sup>ème</sup> siècle, la MADA est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné alimenté par ses deux armatures : le stator et le rotor. Sa première utilisation était en tant que moteur à grande vitesse. Son inconvénient d'instabilité de contrôle l'a fait abandonner pour un certain temps. Récemment des progrès technologiques accélérés au niveau des convertisseurs électroniques et les calculateurs numériques l'a fait regagner sa place dans un grand nombre d'applications.	Laboratoire d'Automatique et d'Analyses des Systèmes, E.N.S.E.T.d'Oran, Département de Génie Electrique, BP 1523 El M'naouer, Es Senia Oran, Algérie
08	U07/10/04	Etude et commande des puissances d'une éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent	Le présent projet fait état des récents développements concernant les systèmes de conversion de l'énergie éolienne ainsi que des avantages sociaux et environnementaux qui y sont associés. Il comporte également une analyse des problèmes liés à l'interconnexion des ressources distribuées, y compris l'énergie éolienne et l'énergie électrique.	Laboratoire de Génie Electrique de Biskra (LGEB) – Université de Biskra, Bp 345 Biskra, Algérie.

## **I.11 Conclusion**

Une brève description du gisement éolien, a été présentée dans ce chapitre. Quelques notions principales sur les différents types d'éoliennes dans le contexte de la génération électrique mais cette étude se limitera uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal. Nous avons décrit les différents éléments d'une éolienne et les principales techniques adoptées pour la régulation de la puissance aérodynamique recueillie par la turbine [10].

Le chapitre suivant est consacré à l'étude de la partie turbine qui est la partie mécanique de l'éolienne qui va être modélisée et simulée.

# **Chapitre II**

## **Modélisation de la turbine**

**Table de matière**

<b>Chapitre II : Modélisation de la turbine</b>	
II.1.	Introduction..... 33
II.2.	Energie cinétique du vent –conversion en énergie mécanique..... 33
II.3.	Principe de la loi de BETZ..... 34
II.4.	Principe de la vitesse spécifique ou normalisée «Tip-Speed-Ratio»... 37
II.5.	Modélisation du multiplicateur..... 37
II.6.	Modélisation de l’arbre mécanique..... 38
II.7.	Le coefficient de puissance..... 39
	• Les expressions du « Cp » pour les éoliennes à vitesse fixe... 39
	• Les expressions du « Cp » pour les éoliennes à vitesse variable..... 40
II.8.	Régulation mécanique de la puissance d’une éolienne..... 42
II.9.	Schéma synoptique du système complet..... 44
II.10.	Commande par MPPT..... 44
	• Principe de M.P.P.T..... 44
	• Contrôle sans asservissement de la vitesse..... 45
	• Contrôle avec asservissement de la vitesse..... 45
II.11.	Simulations et interprétations..... 47
	a. Simulation de la turbine pour le cas de V=constant..... 47
	b. Simulation de la turbine pour le cas de V=variable..... 50
II.12.	Conclusion..... 53

*Liste des figures*

Figure (II-1)	: Colonne d'air animée d'une vitesse $V$ .....	34
Figure (II-2)	: Tube de courant autour d'une éolienne.....	35
Figure (II-3)	: Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.....	36
Figure (II-4)	: Vitesse de vent $V$ et vitesse tangentielle de l'aubage $\Omega_t R_t$ .....	37
Figure (II-5)	: Modèle de l'arbre et de la turbine éolienne.....	39
Figure (II-6)	: Coefficient de puissance $Cp1$ en fonction de $\lambda$ et $\beta$ .....	39
Figure (II-7)	: Coefficient de puissance $Cp2$ en fonction de $\lambda$ et $\beta$ .....	40
Figure (II-8)	: Coefficient de puissance $Cp1$ en fonction de $\lambda$ et $\beta$ .....	40
Figure (II-9)	: Coefficient de puissance $Cp2$ en fonction de $\lambda$ et $\beta$ .....	41
Figure (II-10)	: Coefficient de puissance $Cp3$ en fonction de $\lambda$ et $\beta$ .....	41
Figure (II-11)	: Coefficient de puissance $Cp4$ en fonction de $\lambda$ et $\beta$ .....	42
Figure (II-12)	: Les Coefficients de puissance $Cp$ en fonction de $\lambda$ et $\beta$ ...	42
Figure (II-13)	: Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent.....	43
Figure (II-14)	: Schéma bloc du modèle de convertisseur éolien.....	44
Figure (II-15)	: Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse mécanique.....	45
Figure (II-16)	: Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse mécanique.....	47
Figure (II-17)	: Profil du vent a Vitesse fixe.....	48
Figure (II-18)	: coefficient $\lambda$ de la turbine « avec $V_v$ fixe ».....	48
Figure (II-19)	: coefficient de puissance $Cp$ de la turbine « avec $V_v$ fixe»...	48
Figure (II-20)	: Puissance mécanique de la turbine (watt) « avec $V_v$ fixe ».....	49
Figure (II.21)	: vitesse de rotation de la turbine (tr/min) « avec $V_v$ fixe»...	49
Figure (II.22)	: couple mécanique de la turbine (N.m) « avec $V_v$ fixe »...	49
Figure (II .23)	: Vitesse du vent en fonction du temps.....	50
Figure (II-24)	: coefficient $\lambda$ de la turbine.....	51
Figure (II-25)	: coefficient de puissance $Cp$ de la turbine.....	51
Figure (II-26)	: puissance mécanique de la turbine (watt).....	52
Figure (II-27)	: couple mécanique de la turbine (N.m).....	52
Figure (II-28)	: vitesse de rotation de la turbine (tr/min).....	53



**Bibliographies**

- [5] N. LA VERDURE, « L'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires » Thèse (2005), Institut national polytechnique de Grenoble, France
- [4] F. POITIERS, « Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne: machine asynchrone à cage autonome, machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau » Thèse N°ED 0366-125 (2003), École Polytechnique de l'Université de Nantes, France.
- [31] M.MAYOUF « contribution a la modélisation de l'aérogénérateur synchrone a aimants permanents » thèse magister de l'université de Biskra, option énergie renouvelable, 2008
- [32] S.BOURDIM « contribution au diagnostic des générateurs utilisés dans les systèmes éoliens », thèse de doctorat en sciences en électrotechnique, de l'université de Batna, Soutenue le 14/06/2015
- [33] F.MAZOUZ « Commande d'un système éolien à base d'un générateur synchrone à aimants permanents » thèse magister de l'université de Batna, option électrotechnique, 2013
- [34] A. Mirecki – « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, 2005
- [35] M.BOUHADOUZA Boubekour « Amélioration de la Stabilité Transitoire des Fermes Eoliennes par l'utilisation du STATCOM » thèse de Magistère, université Ferhat Abbas Sétif, 2011
- [36] Griche I. « Etude de la Stabilité Transitoire des Systèmes Electriques en Présence des Fermes Eoliennes » thèse de magister, Université de Sétif 2008.
- [37] S. NOUHOU, « Étude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne », Thèse (2007), École Nationale Polytechnique, Algérie.
- [38] Vincent ROGEZ « modélisation simplifiée de source de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux. Application à l'intégration d'une production éolienne dans un réseau de distribution insulaire.
- [39] M.Mokhnache, « étude de la stabilité d'une ferme éolienne connectée à un réseau électrique avec des dispositifs FACTS », thèse de magister, université Ferhat Abbas, Sétif, 2012.
- [40] S. El Aimani, Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau moyenne tension. Thèse de doctorat - Spécialité Génie électrique, Ecole Centrale de Lille - Université des Sciences et Technologies de Lille, 2004.
- [41] Gaillard. A. « Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service ». Thèse de doctorat d'état en génie électrique, université Henry Poincaré, Nancy 1. 2010.
- [42] O.FEDDAOUI « Contribution à l'Etude des Systèmes Hybrides de Génération », Application aux Energies Renouvelables Mémoire de Magister, Spécialité : Electrotechnique Option : Commande des Machines Electriques, Université de Souk - Ahras (2013-2014)
- [43] Hamzaoui, et al., «Improvement of the performances MPPT system of wind generation, in» Electronics, Communications and Photonics Conference (SIEPCPC), 2011 Saudi International, 2011, pp. 1-6.
- [45] Aida Baghbany Oskouei <sup>a,\*</sup>, Mohamad Reza Banaei <sup>a</sup>, Mehran Sabahi <sup>b</sup> « Hybrid PV/wind system with quinary asymmetric inverter without increasing DC-link number », ELECTRICAL ENGINEERING 2015
- [46] Lei Tian\*, Qiang Lu, Wen-zhuo Wang « A Gaussian RBF Network Based Wind

- Speed Estimation Algorithm for Maximum Power Point Tracking», ICSGCE 2011: 27–30 September 2011, Chengdu, China
- [47] Sanae Rechka, Gille Roy, Sebastien Denetiere Et Jean Mahseredjian « modélisation de système électromagnétique multi-masse à base de machine asynchrone, à l'aide des outils matlab , avec application aux éoliennes» département de génie électrique ,section énergie électrique école polytechnique de Montréal EPM-RT-2004.
- [48] Nesmat Abu-Tabak. Stabilité dynamique des systèmes électriques multi machines : modélisation, commande, observation et simulation. Automatique / Robotique. Ecole Centrale de Lyon, 2008. Français. <tel-00343722v2>
- [49] O. Barambones, P. Alkorta « Wind turbine output power maximization based on sliding mode control strategy», IEEE 2010, pp.364-369.
- [50] S. J. Chiang, K. T. Chang and C. Y. Yen, “Residential Photovoltaic Energy Storage System”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 45, No. 3, June 1998.

## II.1 Introduction

Une 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. Dans ce chapitre, On s'intéresse essentiellement à la modélisation et au contrôle de la turbine éolienne. Dans la première partie, une étude aérodynamique de la turbine est présentée, en vue de mettre en évidence ces principaux paramètres de fonctionnement, à savoir les coefficients de puissance, le couple et la limite de BETZ. [31]

Différentes fonctions de coefficients de puissance sont décrites dans le but de contrôler la puissance aérodynamique de la turbine, et limiter cette puissance lorsque la vitesse du vent devient trop élevée.

## II.2 Energie cinétique du vent –conversion en énergie mécanique

Le vent est la raison d'être des aérogénérateurs. Son énergie cinétique constitue la source primaire d'énergie. Le vent est en fait un champ de vitesses de déplacement de masses d'air caractérisé par sa vitesse et sa direction qui sont affectées par plusieurs indicateurs/obstacles. [32]

L'énergie cinétique d'une colonne d'air de longueur  $dx$ , de section  $S$ , de masse volumique  $\rho$ , animée d'une vitesse  $v$ , (Voir Figure II-1) s'écrit :

$$dE_c = \frac{1}{2} \rho S dx v^2 \quad (II-1)$$

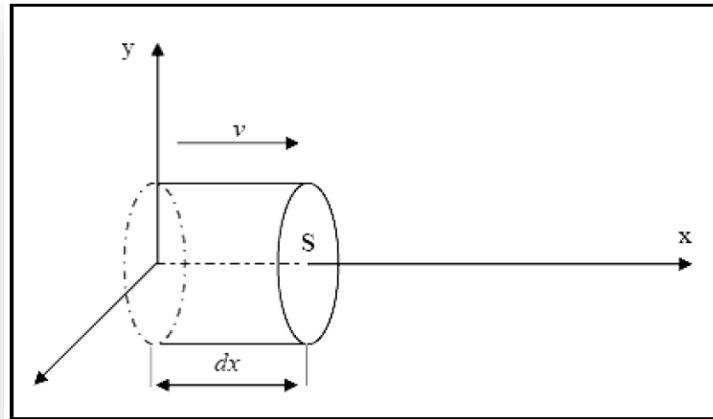


Figure (II-1) : Colonne d'air animée d'une vitesse  $V$  [17]

La puissance  $P_m$  extraite du volume d'air en mouvement est la dérivée de l'énergie cinétique par rapport au temps.

En supposant  $dx=vdt$ , on déduit l'expression de  $P_m$  :

$$P_m = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho S V_v^3 \quad (II-2)$$

- $\rho$  : Masse volumique de l'air (en Kg/m<sup>3</sup>)
- $V_v$  : Vitesse instantanée du vent (en m/s)
- $E_c$  : Energie cinétique en joules
- $S$  : Section de la colonne d'air
- $dx$  : Longueur de la colonne d'air
- $P_m$  : Puissance extrait du volume d'air en mouvement
- $m$  : Masse d'air en mouvement

### II.3 Principe de la loi de BETZ

La loi de BETZ stipule qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de 16/27 soit 59% de l'énergie cinétique contenue dans le vent. Ce fut l'Allemand Albert BETZ qui en 1929, formula la loi de BETZ pour la première fois.

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure (II-2) sur laquelle on a représenté la vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur  $V_1$  et  $V_2$  en aval. [33]

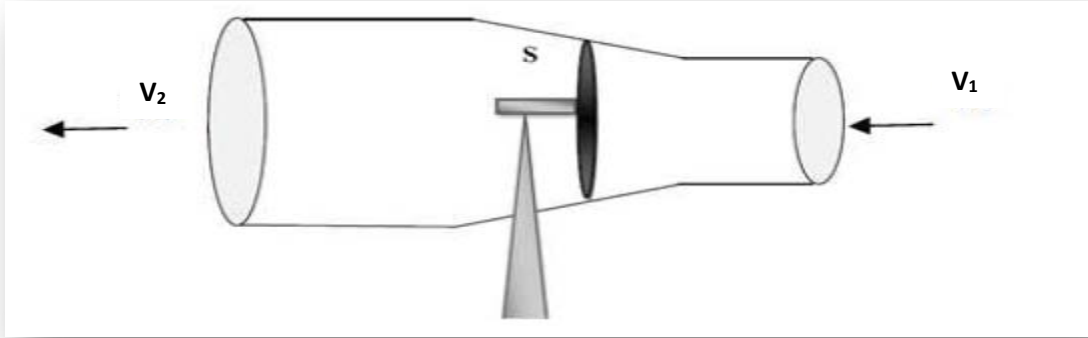


Figure (II-2) : Tube de courant autour d'une éolienne. [33]

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 : [34]

$$m = \frac{\rho S (V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{II-3})$$

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).

$$P_m = \frac{m(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{II-4})$$

Soit en remplaçant  $m$  par son expression

$$P_m = \frac{\rho S (V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (\text{II-5})$$

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

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (II-6)$$

La relation entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2}\right)\right)\left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} \quad (II-7)$$

$V_1, V_2$  : Vitesse du vent respectivement en amont et en aval de l'éolienne

$P_{mt}$  : Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé

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. [31]

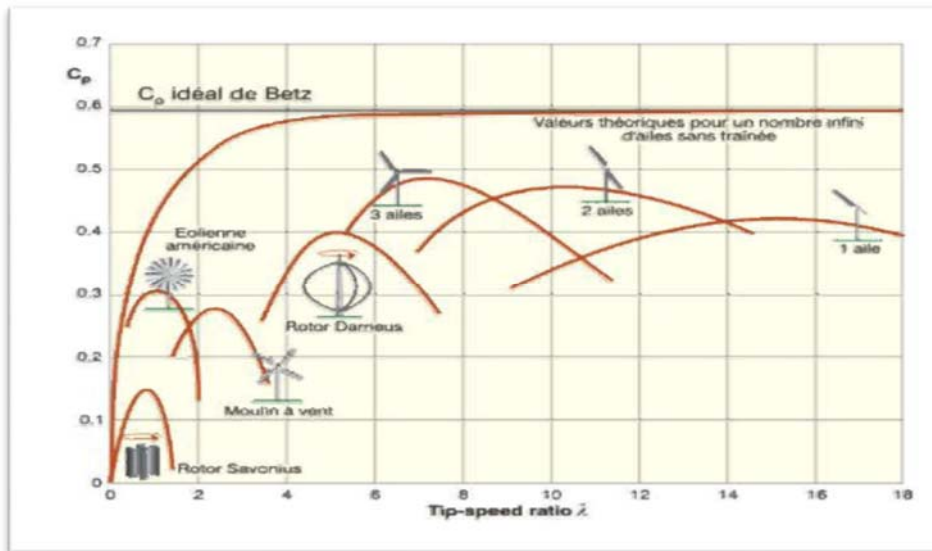


Figure (II-3) : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes [31]

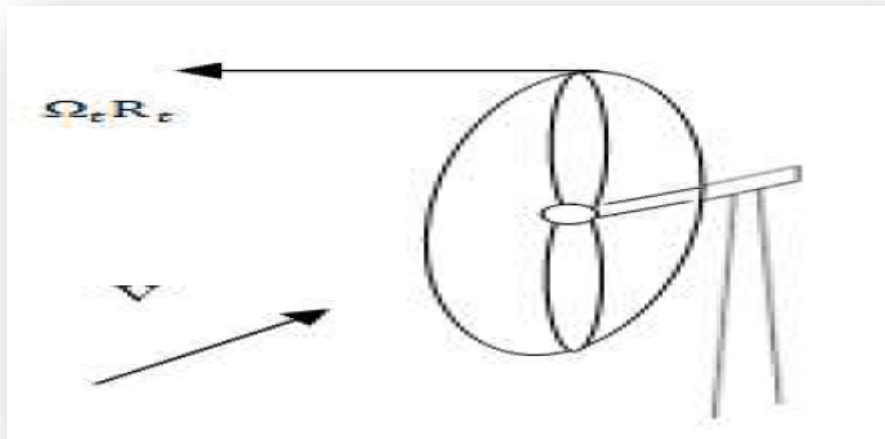
En combinant les équations (II-3), (II- 6) et (II- 7), la puissance mécanique  $P_m$  disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_m = \frac{P_m}{P_{mt}} P_{mt} = C_p P_{mt} = \frac{1}{2} C_p (\lambda, \beta) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (II-8)$$

#### II.4. Principe de la vitesse spécifique ou normalisée « Tip-Speed-Ratio » [31] [33]

On définit la vitesse spécifique ou normalisée  $\lambda$  comme étant le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine  $\Omega_t R_t$  et  $R_t$  sur la vitesse instantanée de vent  $V_v$  (figure (II-4)) et donnée par l'expression suivant

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{V} \quad (\text{II-9})$$



Figure(II-4) : Vitesse de vent  $V$  et vitesse tangentielle de l'aube  $\Omega_t R_t$

#### II.5. Modélisation du multiplicateur

Le multiplicateur adapte une vitesse lente de la turbine à la vitesse de la génératrice. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les deux équations suivantes : [35]

$$C_{méc} = \frac{C_{turbine}}{G} \quad (\text{II-10})$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{méc}}{G} \quad (\text{II-11})$$

Avec:

$G$  : Rapport de multiplicateur adaptant la vitesse de la turbine à celle de la génératrice.

$C_{méc}$  : Couple mécanique

$\Omega_{méc}$  : vitesse de la génératrice (rad/s)

## II.6. Modélisation de l'arbre mécanique [36]

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

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_{méc} \quad (II-12)$$

Avec :

$J_{turbine}$  : inertie de la turbine.

$J_{méc}$  : inertie de la génératrice.

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total ( $C_{méc}$ ) appliqué au rotor :

$$J \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = \sum \text{des couples} = C_{méc} - C_{em} - C_{vis} \quad (II-13)$$

Le couple résistant dû aux frottements est modélisée par un coefficient de frottement visqueux  $f$ , tel que :

$$C_{vis} = f \Omega_{méc} \quad (II-14)$$

$C_{méc}$  : le couple mécanique total appliqué au rotor de l'éolienne ;

$C_{em}$  : le couple électromagnétique ;

$C_{vis}$  : le couple des frottements visqueux (N.m) ;

$f$  : coefficient de frottement visqueux.



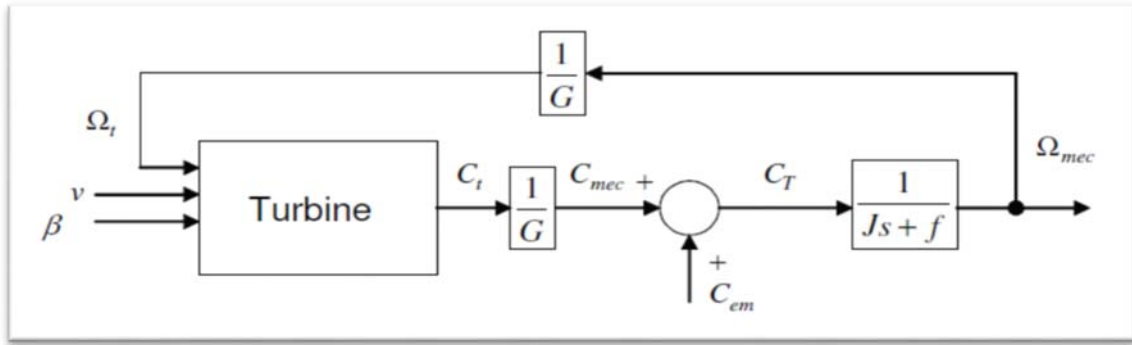


Figure (II-5) : Modèle de l'arbre et de la turbine éolienne

### II.7 Le coefficient de puissance

On retrouve dans la littérature plusieurs types de modélisation du coefficient de puissance, généralement valables pour une turbine particulière : chaque turbine a un comportement spécifique. Ainsi, tout le monde est confronté à ce problème de modélisation du coefficient de puissance.

Après avoir établie une étude comparative sur des expressions approches du coefficient de puissance pour les turbines des éoliennes à vitesse fixe et variable, nous avons pu dégager ses expressions :

- Les expressions du « Cp » pour les éoliennes à vitesse fixe :

On a deux expressions de l'estimation du Cp :

$$Cp1(\lambda, \beta) = 7.95633 \cdot 10^{-5} \lambda^5 - 17.375 \cdot 10^{-4} \lambda^4 + 9.86 \cdot 10^{-3} \lambda^3 - 9.4 \cdot 10^{-3} \lambda^2 + 6.38 \cdot 10^{-2} \lambda + 0.001 \quad (II-15)$$

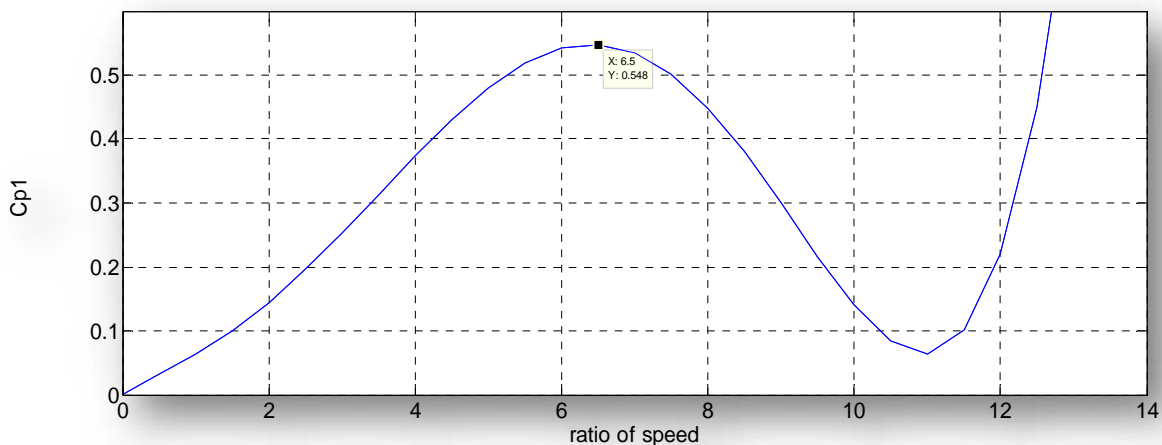


Figure (II-6) : Coefficient de puissance Cp1 en fonction de λ et β

$$Cp\_max = 0.55, \lambda\_opt = 6.5, \beta = 0^\circ$$

$$Cp2(\lambda, \beta) = a_1\lambda + a_2\lambda^2 + a_3\lambda^3 + a_4 \quad (II-16)$$

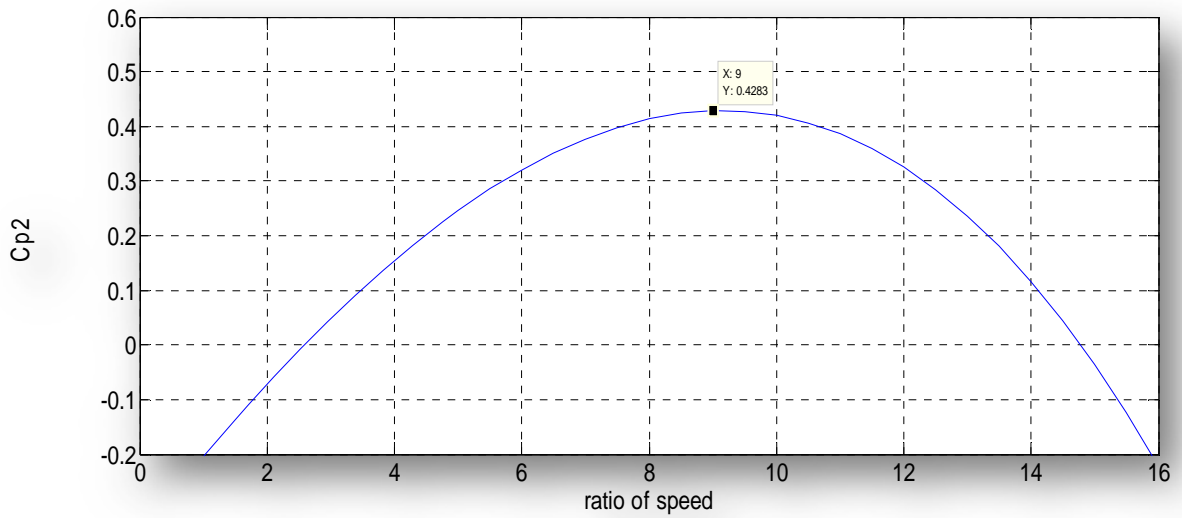


Figure (II-7) : Coefficient de puissance  $Cp2$  en fonction de  $\lambda$  et  $\beta$   
 $Cp\_max=0.43$  ;  $\lambda\_opt=9$  ;  $\beta=0^\circ$

- **Les expressions du «  $Cp$  » pour les éoliennes à vitesse variable**  
 Notre attention s'est portée sur l'étude de quatre fonctions de  $Cp$

$$Cp1(\lambda, \beta) = 0.5176 \left( \frac{116}{\lambda'} - 0.4\beta - 5 \right) \text{Exp} \left( -\frac{21}{\lambda'} \right) + 0.006 \lambda \quad (II-17)$$

Avec

$$\frac{1}{\lambda'} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (II-18)$$

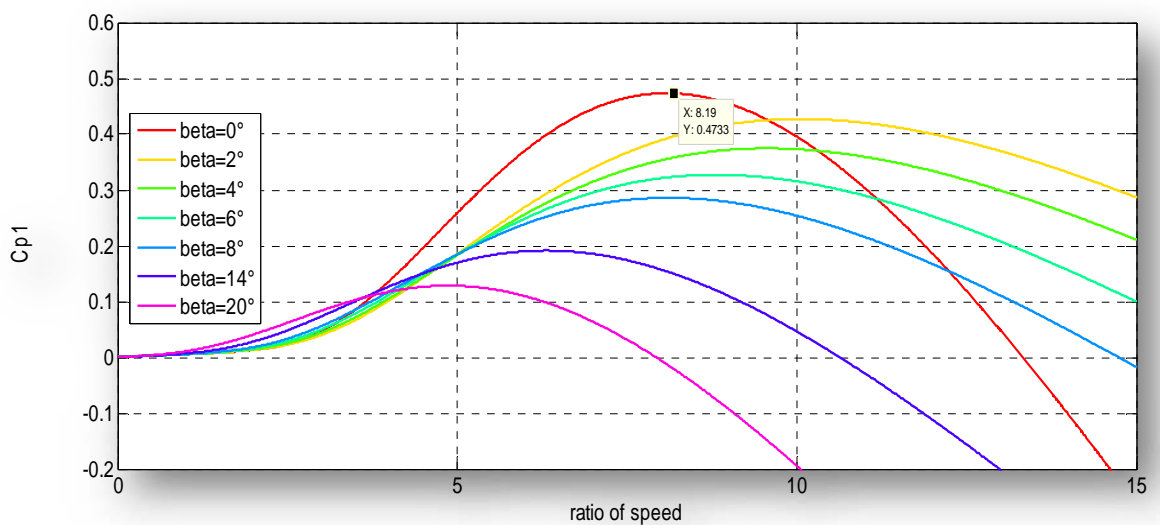


Figure (II-8) : Coefficient de puissance  $Cp1$  en fonction de  $\lambda$  et  $\beta$   
 $Cp\_max=0.47$  ;  $\lambda\_opt=8.19$  ;  $\beta=0^\circ$

$$Cp2(\lambda, \beta) = 0.22 \left( \frac{116}{\lambda'} - 0.4\beta - 5 \right) \cdot \text{Exp} \left( -\frac{12.5}{\lambda'} \right) \quad (\text{II-19})$$

Avec

$$\frac{1}{\lambda'} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (\text{II-18})$$

**Figure (II-9) : Coefficient de puissance Cp2 en fonction de λ et β**  
 Cp\_max=0.43 ; λ\_opt=6.37 ; β=0°

$$Cp3(\lambda, \beta) = 0.73 \left( \frac{151}{\lambda'} - 0.58\beta - 0.002\beta^{2.14} - 13.2 \right) \cdot \text{Exp} \left( -\frac{18.4}{\lambda'} \right) \quad (\text{II-20})$$

Avec

$$\frac{1}{\lambda'} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (\text{II-18})$$

**Figure (II-10) : Coefficient de puissance Cp3 en fonction de λ et β**  
 Cp\_max=0.44 ; λ\_opt=5.72 ; β=0°

$$Cp4 (\lambda, \beta) = (0.44 - 0.0176\beta) \sin\left(\frac{\pi(\lambda-1)}{15-0.3\beta}\right) - 0.00184 (\lambda - 1)\beta \quad (\text{II-21})$$

**Figure (II-11) : Coefficient de puissance  $Cp4$  en fonction de  $\lambda$  et  $\beta$**   
 $Cp\_max=0.44$  ;  $\lambda\_opt=8.6$  ;  $\beta=0^\circ$

**Figure (II-12): Coefficients de puissance  $Cp$  en fonction de  $\lambda$  et  $\beta$**

Sur la figure (II-12) plusieurs courbes sont distinguées, mais nous nous sommes intéressés à celle qui possède le plus haut sommet. Cette courbe est caractérisée par le point optimal. ( $\lambda\_opt = 8.06$ ;  $Cp\_max=0.47$ ;  $\beta=0$ ) qui est le point correspondant au maximum du coefficient de puissance  $Cp$  et donc au maximum de la puissance mécanique récupérée.

## II.8 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne [31] [35] [39] [40]

L'objectif de cette régulation est double, d'une part de protéger l'éolienne contre le vent important et d'autre part de délimiter la puissance développée à une puissance nominale.

On peut définir quatre zones de fonctionnement, qui peuvent être distinguées :

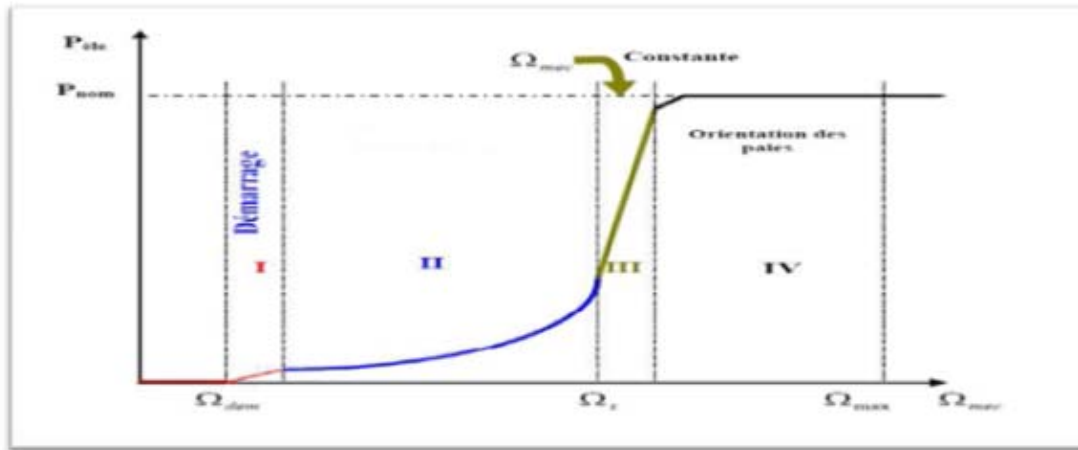


Figure (II-13) : Diagramme de la puissance utile sur l'arbre  
En fonction de la vitesse du vent.

- La phase (**zones I**) de démarrage de la machine. : la production électrique commence lorsque la vitesse mécanique atteint environ 70% de la vitesse de synchronisme de la génératrice. La puissance électrique reste assez faible.
- La phase d'extraction de la puissance maximale (**zones II**) : dans cette zone, la vitesse mécanique varie et peut atteindre une valeur proche de la vitesse nominale. La puissance électrique augmente rapidement. L'angle de calage des pales  $\beta$  constant à sa valeur minimale afin d'obtenir un coefficient de puissance maximal. La puissance maximale est ainsi obtenue pour chaque valeur de la vitesse mécanique et pour des vitesses de vent
- La phase à vitesse mécanique quasi constante (**zones III**): l'angle  $\beta$  de calage des pales varie afin d'obtenir une puissance électrique maximal pour différentes valeur de vent. La puissance électrique augmente très rapidement jusqu'à sa valeur nominale.
- La phase à puissance constante (**zones IV**): lorsque la vitesse du vent augmente encore, l'angle de calage des pales devient important afin de conserver la puissance électrique constante et nominale.

## II.9 Schéma synoptique du système complet

Le schéma bloc du système est donné par la figure (II-14), d'après ce schéma nous pouvons constater que La vitesse de la turbine peut être contrôlée par action sur deux entrées :

- L'angle de calage des pales.
- Le couple électromagnétique de la génératrice.

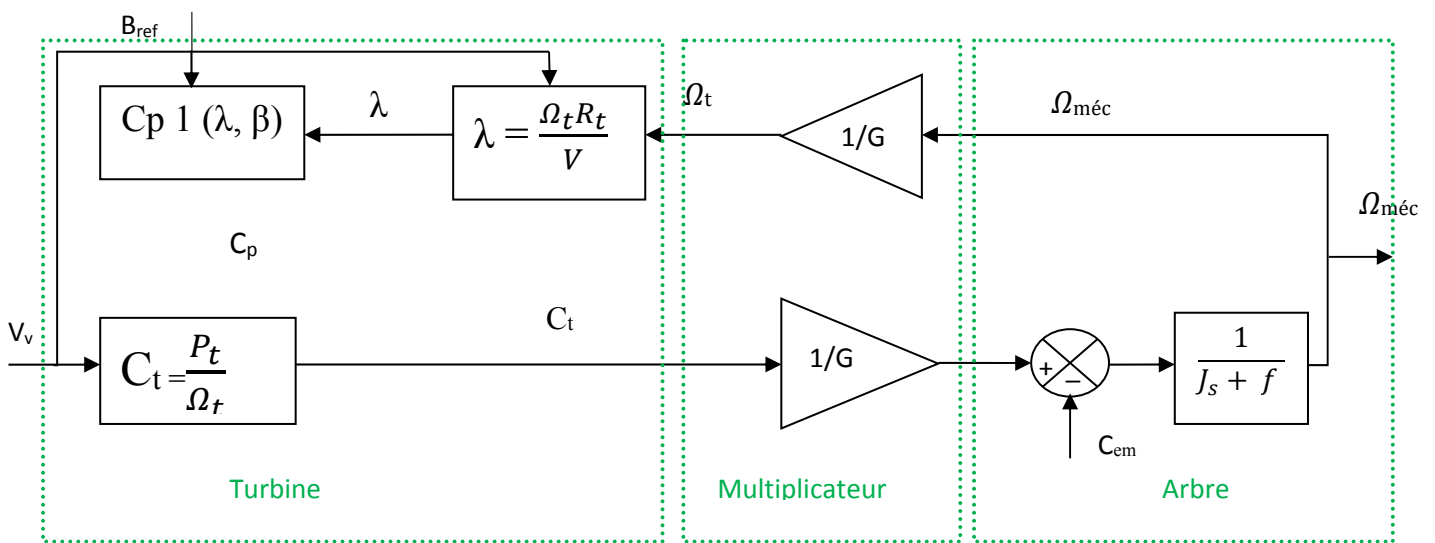


Figure (II-14) : Schéma bloc du modèle de convertisseur éolien

## II.9. Commande par MPPT

### • Principe de M.P.P.T

Le principe de MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) consiste (pour un angle de pale donné) à ajuster en fonction de la vitesse du vent  $V_{vent}$ , la vitesse de rotation de la turbine éolienne à une valeur de référence  $\Omega_{turbine}$  pour maintenir une vitesse relative optimale  $\lambda_{opt}$  et donc un coefficient de puissance maximal  $Cp_{max}$ .

$$\Omega_{turbine\_opt} = \frac{\lambda_{opt} \cdot V_{vent}}{R} \quad (II-22)$$

C'est l'action sur le couple électromagnétique (et donc sur la puissance convertie par la génératrice) qui va permettre d'obtenir  $\Omega_{turbine}$  et ainsi maximiser la puissance extraite avec le maintien de  $Cp_{max}$  [40].

Dans cette partie, différentes stratégies de commande pour contrôler le couple électromagnétique afin de régler la vitesse de rotation de manière à maximiser la puissance électrique produite. On distingue deux familles de structures de commande [49] sont appliquées :

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

➤ **Contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation [32]**

Il consiste à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée, et à régler le couple électromagnétique de manière à fixer la vitesse mécanique à une vitesse de référence.

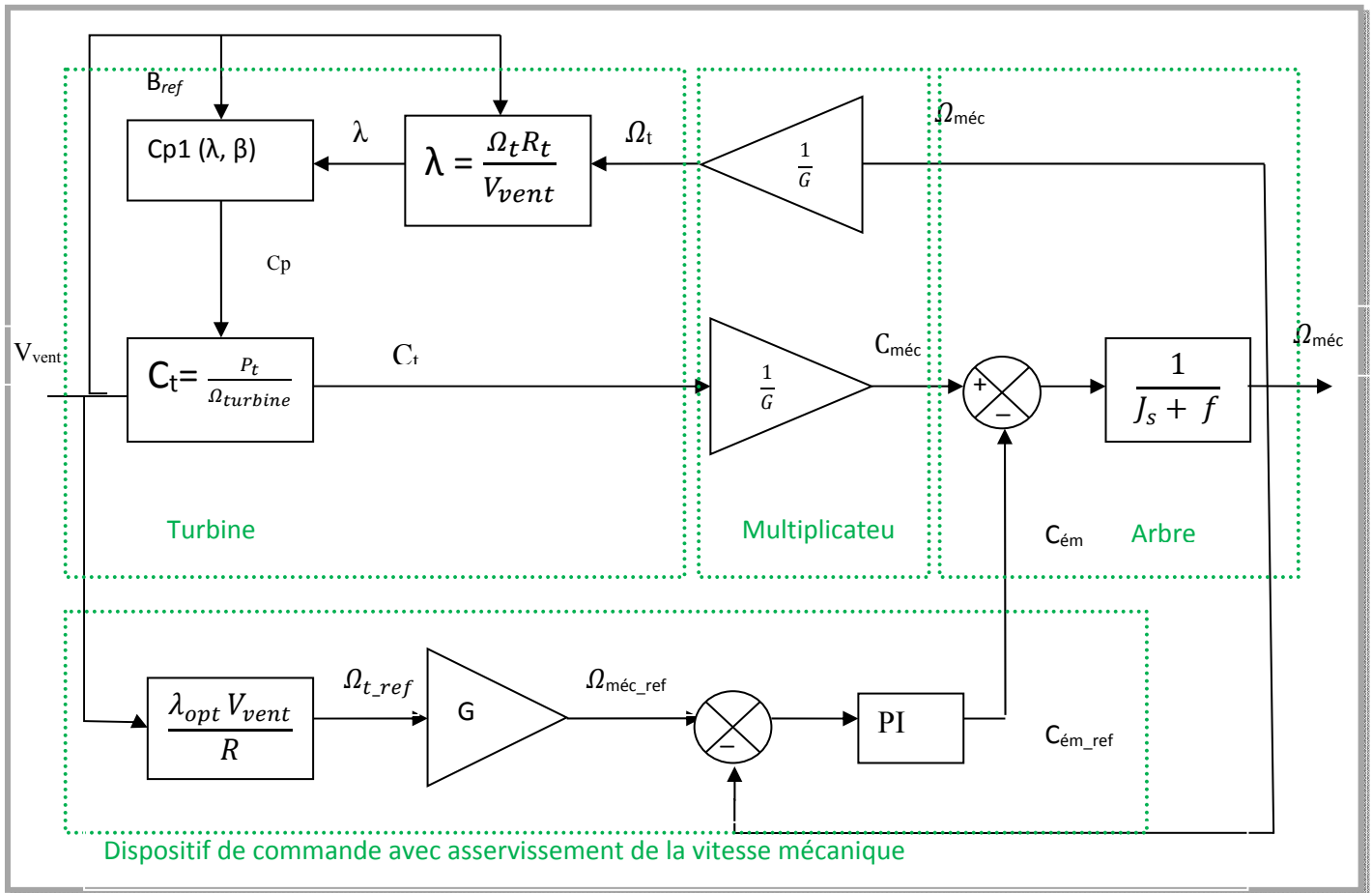


Figure (II-15) : Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse mécanique

➤ **Contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation**

Ce mode de contrôle repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent [41], à partir de l'équation dynamique de la turbine, on obtient l'équation décrivant le régime permanent de l'aérogénérateur :

$$J \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = \sum \text{des couples} = 0 = C_{méc} - C_{em} - C_{visq} \quad (II-23)$$

Si on néglige l'effet du couple visqueux. ( $C_{visq} \approx 0$ ) on obtient :

$$C_{méc} = C_{em} \quad (II-24)$$

Donc le couple électromagnétique de référence est estimé en fonction du couple aérogénérateur :

$$C_{ém\_ref} = \frac{C_{aéro}}{G} \quad (II-25)$$

Le couple aérogénérateur est lui-même estimé en fonction de la vitesse du vent et la vitesse de la turbine:

$$C_{aéro\_estimé} = \frac{1}{2} \rho C_p (\lambda, \beta) S V_{vent\_estimé}^3 \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (II-26)$$

La mesure de la vitesse du vent étant délicate, une estimation de sa valeur peut être obtenue à partir de l'équation :

$$V_{vent\_estimé} = \frac{\Omega_{turbine\_estimé} \cdot R}{\lambda} \quad (II-27)$$

On obtient donc une relation globale de commande :

$$C_{ém\_ref} = \frac{1}{2} C_p (\lambda, \beta) \rho \pi R^5 \frac{\Omega_{méc}^2}{G^3 \lambda^3} \quad (II-28)$$



Pour extraire le maximum de puissance générée ; Il faut fixer le ratio de vitesse à  $\lambda_{opt}$  qui correspond au maximum du coefficient de puissance  $Cp_{max}$ .

Le couple électromagnétique de référence doit alors être réglé à la valeur suivante :

$$C_{ém\_ref} = \frac{1}{2} Cp(\lambda, \beta) \rho \pi R^5 \frac{\Omega_{méc}^2}{G^3 \lambda_{opt}^3} \quad (II-29)$$

La Figure suivante présente le principe du contrôle MPPT de la turbine éolienne sans asservissement de la vitesse de rotation.

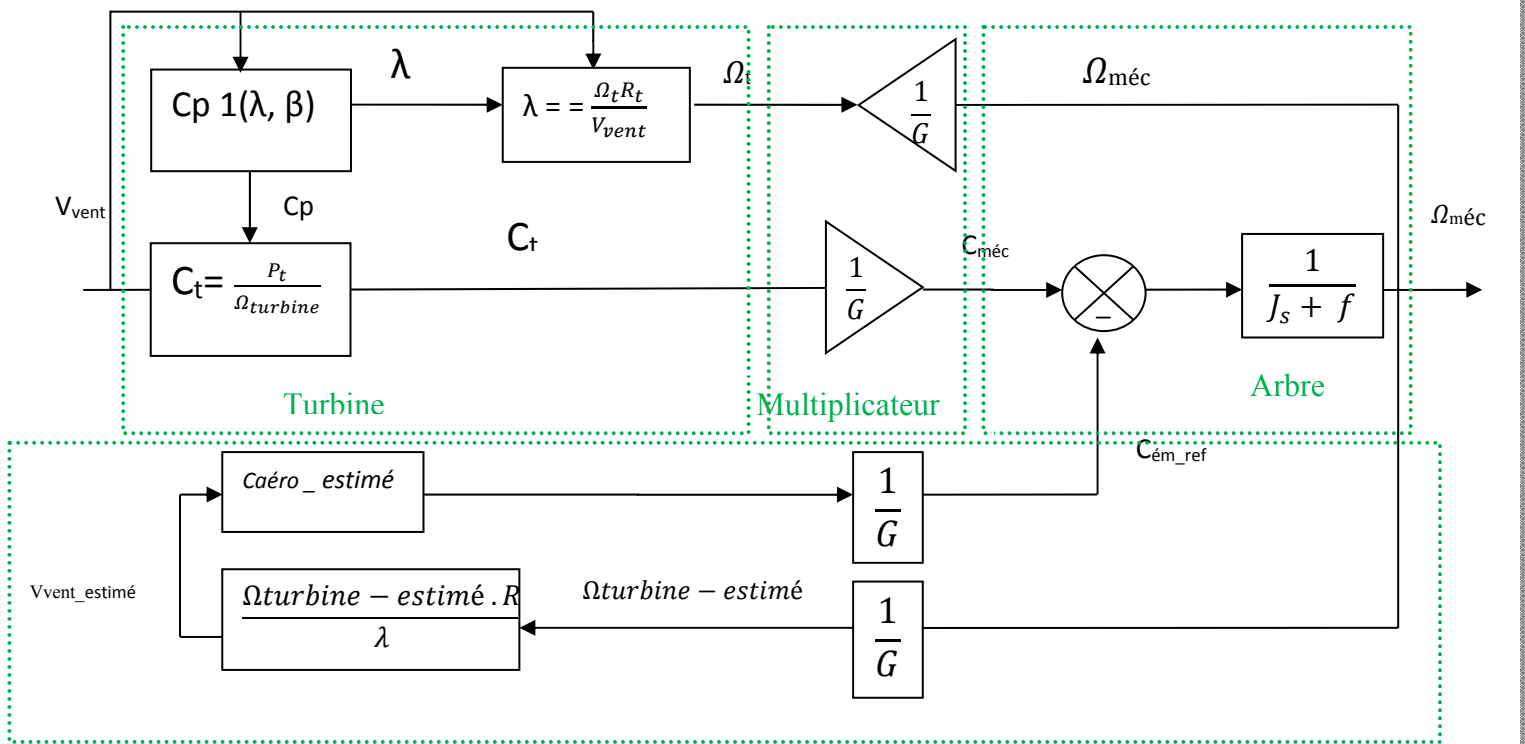


Figure (II-16) : Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse mécanique

## II.11. Simulations et interprétations

Pour la simulation de la turbine éolienne on considère deux cas :

### a. Simulation de la turbine pour le cas de $V_v$ fixe

On a fixé la vitesse du vent a 4.5 m/s et on a obtenues le profil du vent suivent :

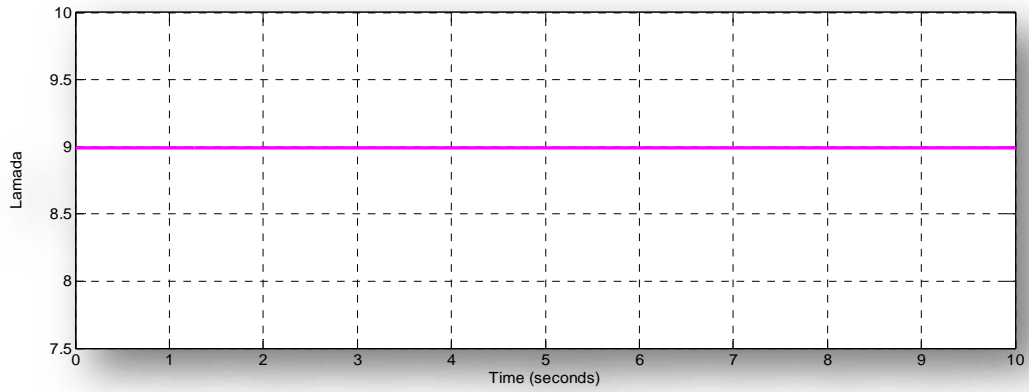


Figure (II- 17) : Profil du vent a Vitesse fixe

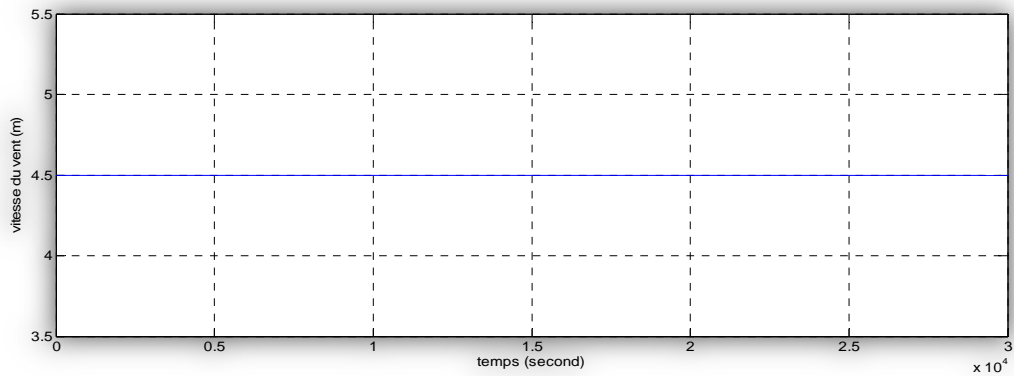


Figure (II-18) : coefficient  $\lambda$  de la turbine « avec  $V_v$  fixe »

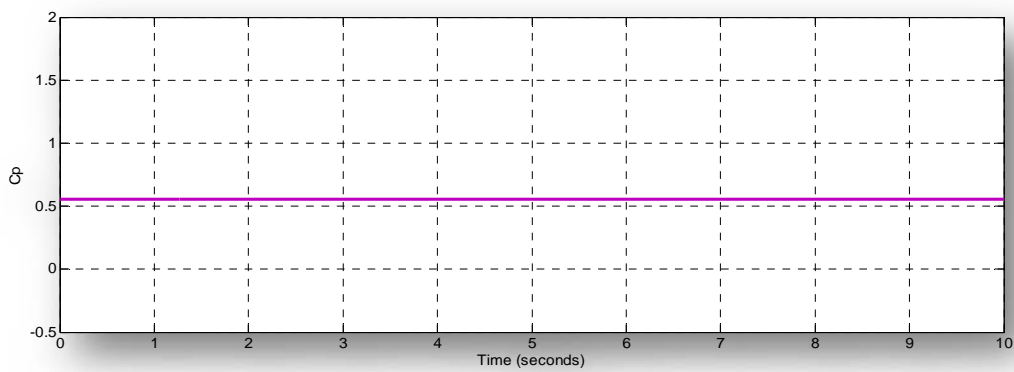


Figure (II-19) : coefficient de puissance  $C_p$  de la turbine « avec  $V_v$  fixe »

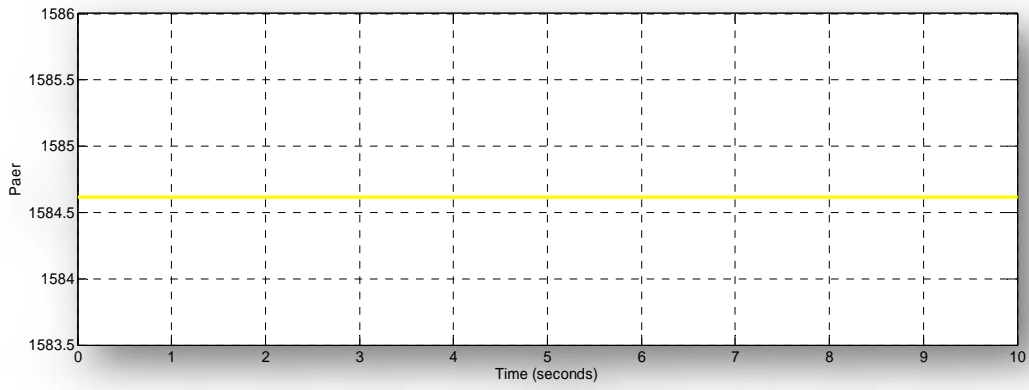


Figure (II-20) : Puissance mécanique de la turbine (watt) « avec  $V_v$  fixe »

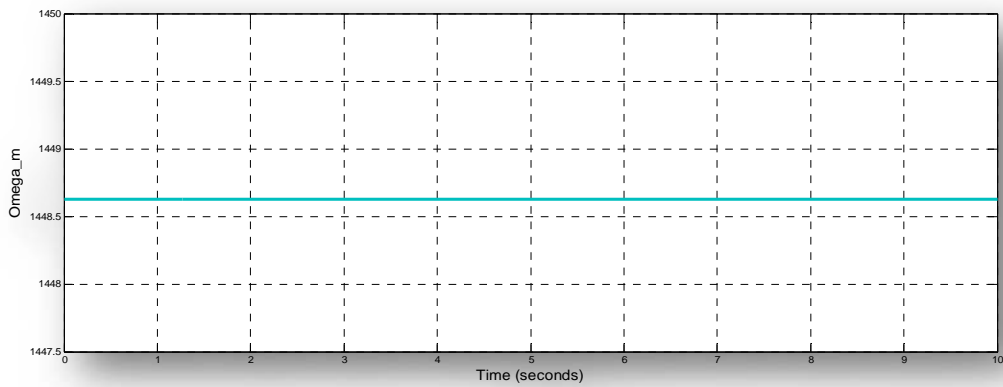


Figure (II.21) : vitesse de rotation de la turbine (tr/min) « avec  $V_v$  fixe»

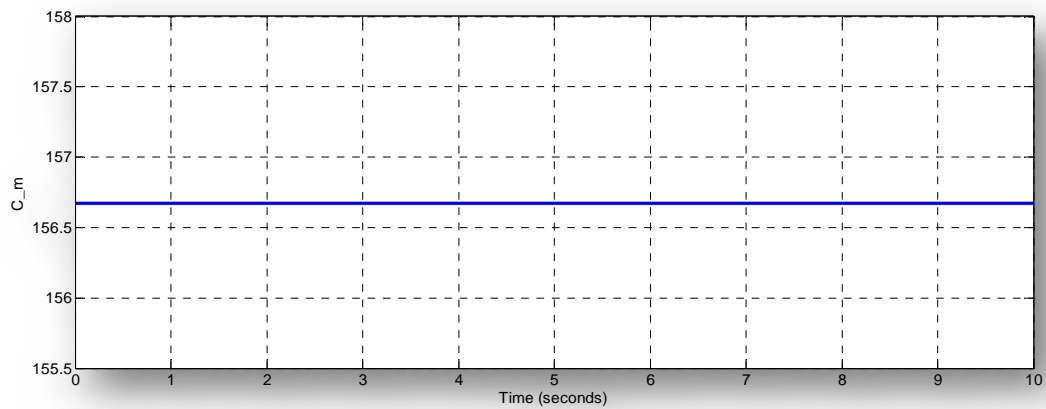


Figure (II.22): couple mécanique de la turbine (N.m) « avec  $V_v$  fixe »

## Interprétation

Les figures ci-dessous montre l'évolution des paramètres de la turbine en fonction du temps, pour une vitesse du vent fixe avec asservissement ; on remarque que toutes les allures des courbes prennent une forme constante vue qu'on ait dans le cas de vitesse de vent constante.

### b. Simulation de la turbine pour le cas de V variable

#### o Profile du vent

Le modèle comportemental du vent peut donc être simplifié considérablement. La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps. [42][50]

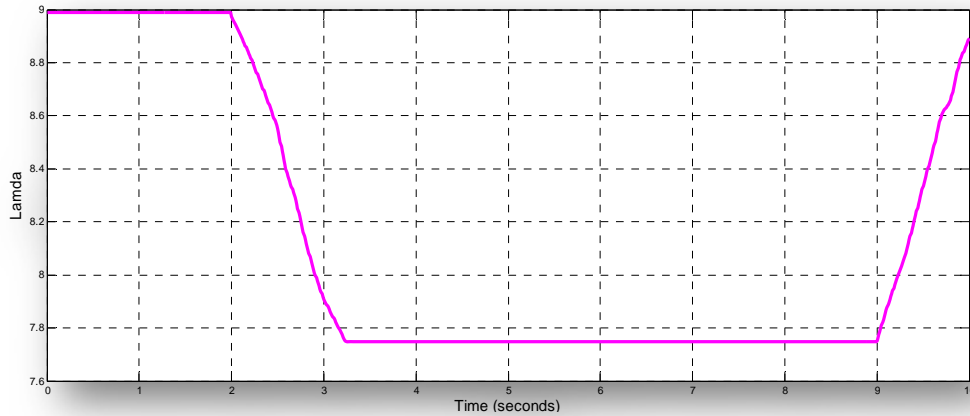
$$V=f(t) \quad (II-30)$$

La vitesse du vent peut être modélisée par :

$$V(t) = 8 + 0.2\sin(0.1047 t) + 2\sin(0.2665 t) + \sin(1.2930 t) + 0.2\sin(3.6645.t) \quad (II-31)$$

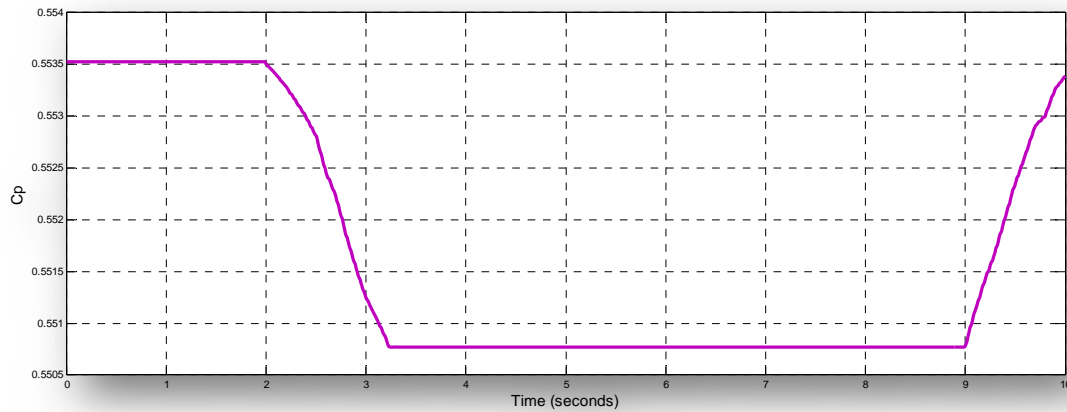
On a simulé le modèle de profil de vent considéré comme représenté dans la référence

**Figure (II .23) : Vitesse du vent en fonction du temps**



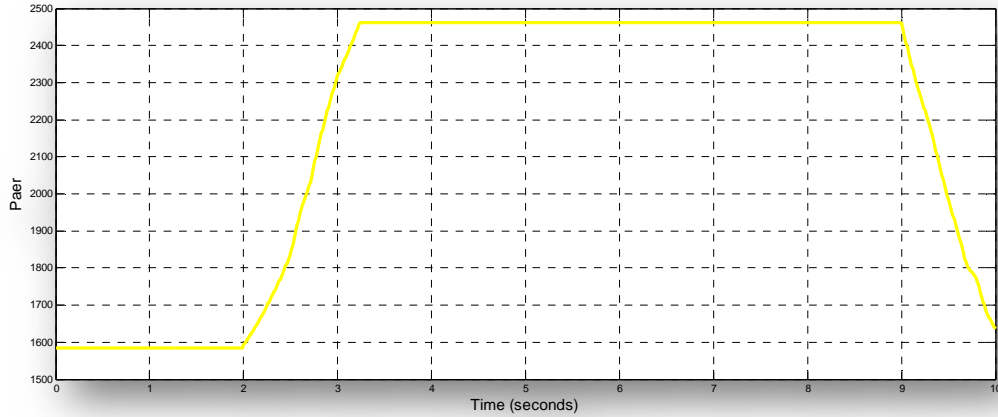
**Figure (II-24) : coefficient  $\lambda$  de la turbine**

La figure (II-24) montre l'évolution du coefficient  $\lambda$  en fonction du temps, pour une vitesse du vent variable et  $\beta$  variable, l'allure de la courbe prend une valeur entre [7,75 ; 9] ce qui montre clairement l'influence du profil du vent sur le coefficient  $\lambda$  de la turbine.



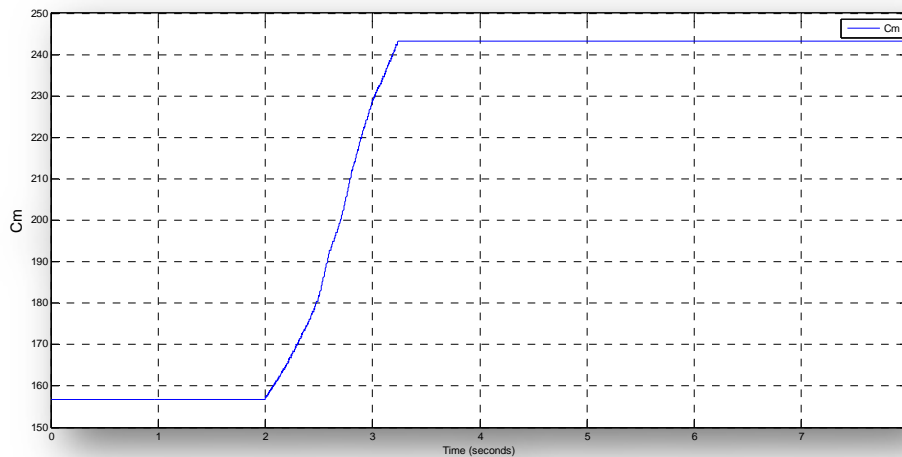
**Figure (II-25) : coefficient de puissance  $C_p$  de la turbine**

La figure (II-25) met en évidence l'évolution du coefficient de puissance  $C_p$  en fonction du temps, pour un une vitesse du vent variable et  $\beta$  variable, le coefficient  $C_p$  a une allure variable, et il varie autour de la valeur  $C_p=0.55$  ce qui montre clairement l'influence du profil du vent sur le coefficient de puissance  $C_p$  de la turbine.



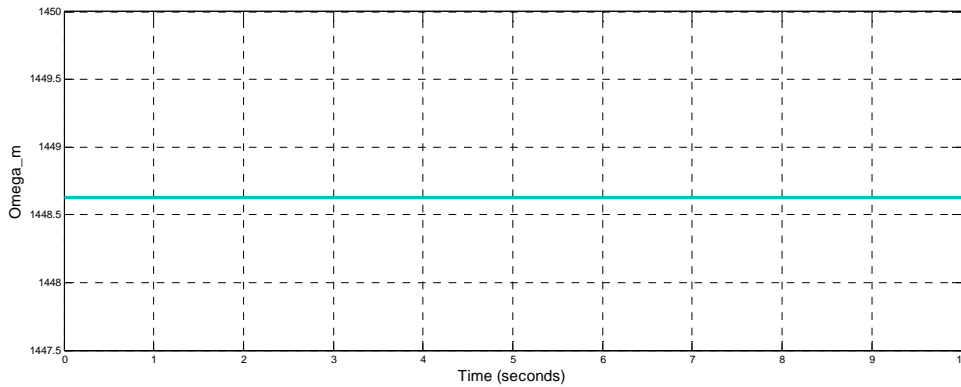
**Figure (II-26) : puissance mécanique de la turbine (watt)**

La Figure (II-26) montre l'évolution de la puissance mécanique de la turbine en fonction du temps pour un vent de vitesse variable et  $\beta$  variable, l'allure de la courbe est variable entre l'intervalle [1580 ; 2490].



**Figure (II-27): couple mécanique de la turbine (N.m)**

La figure (II-27) montre l'évolution du couple mécanique de la turbine en fonction du temps, pour une vitesse du vent variable et  $\beta$  variable, l'allure de la courbe prend toujours une forme variable environ [157 243].



**Figure (II-28) : vitesse de rotation de la turbine (tr/min)**

La figure (II-28) illustre l'évolution de la vitesse de rotation de la turbine en fonction du temps pour une vitesse du vent variable et  $\beta$  variable, l'allure de la courbe prend une forme constante environ ( $\Omega = 1448,6$  tr/min).

Pour la vitesse de rotation de la turbine (tr/min) « avec  $Vv$  variable » on remarque que la vitesse reste constante.

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons déduit les caractéristiques principales de la turbine éolienne après une étude aérodynamique. La deuxième partie de ce chapitre a été consacré à l'étude des différents coefficients de puissances et structures rencontrées dans la littérature à savoir les éoliennes à vitesse fixe et les éoliennes à vitesse variable où les  $Cp\_max$  et les  $\lambda\_opt$  de chacune a été présenté.

A partir de cette étude nous nous sommes intéressés aux éoliennes à vitesse variable celle qui possède le plus haut sommet. Nous avons aussi expliqué les zones de fonctionnement et détaillé la zone particulière (zone II), où la maximisation de l'énergie extraite du vent a été effectuée.

Nous avons pu valider le model de notre turbine, ce qui nous permettra de l'utilisé dans le chapitre suivant.

# **Chapitre III**

## **Etude et simulation d'une éolienne**

### **(MADA avec Turbine)**



**Table de matière**

**Chapitre III : Etude et simulation d'une éolienne (MADA avec turbine)**

III.1	Introduction .....	59
III.2	Description et modélisation de la MADA.....	59
III.3	Topologie et principe de fonctionnement de la MADA .....	59
III.3.1.	Structure.....	59
III.3.2.	Principe de fonctionnement de la MADA.....	60
III.4	Mode de fonctionnement de la MADA.....	62
III.5	Intérêt de la MADA.....	63
III.6	Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation .....	63
III.6.1	Hypothèse.....	63
III.6.2	Mise en équation de la machine asynchrone à double alimentation.....	64
III.6.3	Transformation de Park.....	65
III.7	Commande vectoriel .....	69
	• Commande direct .....	72
III.8	Modélisation et Contrôle d'un Onduleur de tension & Redresseur MLI.....	73
III.8.1	Onduleur de tension.....	73
III.8.2	Redresseur MLI.....	75
III.8.3	Principe de fonctionnement.....	76
III.8.4	Source d'alimentation.....	76
III.8.5	Commande MLI.....	77
III.9	Résultats de simulations.....	77
III.9.1	Interprétation des résultats.....	79
III.10	Conclusion .....	80

**Liste des figures**

Figure (III-1)	: Machine à induction à rotor bobiné.....	60
Figure (III-2)	: Les quatre modes de fonctionnement d'une MADA .....	62
Figure (III- 3)	: Représentation de la MADA dans le système triphasé.....	64
Figure (III-4)	: Schéma bloc de la commande directe.....	73
Figure (III-5)	: Schéma d'un onduleur de tension triphasé alimentant le stator de la machine.....	74
Figure (III-6)	: Structure du redresseur à MLI.....	76
Figure (III-7)	: Puissance active P(Watt) avec régulateur PI.....	78
Figure (III-8)	: Puissance réactive Q (VAR) avec régulateur PI.....	78
Figure (III-9)	: Courant rotorique $I_{qr}$ Courants (A) avec régulateur PI.....	78
Figure (III-10)	: Courant rotorique $I_{dr}$ (A) avec régulateur PI.....	79
Figure (III-11)	: La variation du couple électromagnétique.....	79
Figure (III-12)	: La variation de la vitesse de rotation.....	79

**Bibliographie**

- [4] F.POITIERS, Etude et commande de génératrice asynchrone pour L'utilisation de l'énergie
- [10] N. MEKKAOUI « Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée » UNIVERSITE DE BATNA. 2004
- [31] M.MESSAOUD , »Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone a aimants Permanents », Mémoire de Magister, Université de Batna ,2008.
- [40] S. El Aimani, Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau moyenne tension. Thèse de doctorat - Spécialité Génie électrique, Ecole Centrale de Lille -Université des Sciences et Technologies de Lille, 2004.
- [42] O. Feddaoui « Contribution a l'étude des systèmes hybrides de génération : application aux énergies renouvelables » Thèse de Magister, option : commande des machines électriques, université de Souk-Ahras , 2014
- [51] Y. Elbia « Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté ». Thèse de magister en électrotechnique, option commande électrique. Université Hadj lakhdar, BATNA, 2009
- [52] B. Kelkoul « Etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation » Thèse de magister API option automatique. Université, Tlemcen, 2011.
- [53] B. TOUAL « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable ». Thèse de magister en électrotechnique, option machines électrique. Université Hadj lakhdar , Batna 2010.
- [54] M-K. Touati « Étude D'une Génératrice Éolienne Connectée Au Réseau Électrique ». Thèse de magister en électrotechnique, option Réseaux électrique. Université Hadj lakhdar , Batna 2015.
- [55] Y. Alhassoun, « Etude et Mise en Œuvre de Machines à Aimantation Induite Fonctionnant à Haute Vitesse », Thèse de doctorat, Université de Toulouse 27 Mai 2005.
- [56] N.GHEDBANE ET A.MEDJADI «Commande de la Machine Asynchrone à Double Alimentation à base d'un régulateur *RST* », Mémoire d'ingénieur université Med Boudiaf de M'sila ,2005.
- [57] MELLOUL Ahmed « Simulation et diagnostic d'une machine asynchrone à double alimentation d'une éolienne ». Thèse de magister en électrotechnique, option Diagnostic des Machines Electriques. UNIVERSITE FERHAT ABBAS,SETIF 2011.
- [58] I. HAMZAOUI « Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur » Thèse de Magister, ENP d'Alger, 2008.

- [59] M-A. HASSAD « Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques. ». Thèse de magister en électrotechnique, option Commande électrique. Université SETIF 2012.
- [60] N. HAMDI « Modélisation et commande des génératrices éoliennes » thèse de magister, Option : Machines électriques, université Université MENTOURI de CONSTANTINE, 2008.
- [61] R. Azzazia « Etude et commande d'une machine asynchrone a double alimentation alimentée par un convertisseur multi-niveaux », Mémoire Magister 2008 ,Université de Boumerdes .Algérie
- [62] L. Baghli « Contribution à la Commande de la Machine Asynchrone, Utilisation de la Logique Floue, des Réseaux de Neurones et des Algorithmes Génétique », Thèse de Doctorat, Université de Henri Poincaré, Nancy-I, France, 1999.
- [63] P-E.VIDAL « Commande non- linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation », l'institut national Polytechnique de Toulouse, France, Thèse de doctorat 2004.
- [64] Telli Abderahim « étude et commande d'une éolienne a vitesse variable intégrée au réseaux MT » , Thèse de magister en électrotechnique ,option réseaux électrique ,université d'Oran 2012
- [65] K. GHEDAMSI, « Contribution à la modélisation et la commande d'un convertisseur direct de fréquence. Application à la conduite de la machine asynchrone », Thèse de Doctorat, ENP Alger (Algérie), 2008.
- [66] H. Camblong « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable », Thèse de doctorat, 18 décembre 2003, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux
- [67] H.S.vicators , J.A Tegopoulos , Fellon .IEEE « Transient State Analysis of A Doubly .FED induction generator under Three Phase short circuit» IEEE national Technical University of Athens, Département of électrique engineering 106 82. Athens .GREECE .IEEE .Transactions on Energy conversion, Vol. 6, NO. 1, March 1991.
- [68] Karim Belmokhtar, Mamadou Lamine Doumbia, IEEE Member, Kodjo Agbossou, « Modélisation et commande d'un système éolien à base de machine asynchrone à double alimentation pour la fourniture de puissances au réseau électrique », Département de génie électrique et de génie informatique, Université du Québec à Trois-Rivières
- [69] O. Carlson, A. Grauers, J. Svensson , A.Larsson , « A comparison of electrical systems for variable speed operation of wind turbines », European wind energy conf., 1994, p. 500-505.
- [70] Guy Sturtzer Eddie Smigiel, « Modélisation et commande des moteurs triphasés », Ellipses édition marketing S.A. 2000.

### **III.1 Introduction :**

L'emploi des génératrices asynchrones est largement répandu pour la production de l'énergie électrique d'origine éolienne, particulièrement dans des régions isolées. Afin de permettre une production d'électricité optimale pour différentes vitesses de vent et de vitesses de l'éolienne, nous avons choisi de travailler avec la machine asynchrone à double alimentation (MADA) qui présente plusieurs avantages en comparaison avec la machine à cage [52].

Dans ce chapitre, on se propose de modéliser la chaîne de conversion éolienne à vitesse variable de puissance de 5KW, Cette modélisation est établie en termes d'équations différentielles et est basée essentiellement sur la transformation de Park. Puisque les machines asynchrones dans les systèmes industriels ne sont pas directement alimentées par le réseau électrique, un onduleur de tension est prévu [52].

Les lois de commande scalaires sont encore utilisées, mais la commande vectorielle permet d'améliorer les performances de cette machine [51].

### **III.2 Description et modélisation de la MADA**

La MADA a une double accessibilité au stator et au rotor. Dans son fonctionnement, elle s'apparente au fonctionnement de la machine synchrone avec une vitesse constante du fait de l'imposition des fréquences aux deux armatures et le caractère asynchrone est lié à la différence de vitesse entre le champ statorique et le rotorique. Sa magnétisation est donnée par la contribution des deux armatures alimentées par des sources à courant alternatif. [10]

### **III.3. Topologie et principe de fonctionnement de la MADA**

**III.3.1. Structure :** La Machine Asynchrone à Double Alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles

viennent s'insérer les enroulements. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écurie 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 figure (III.1).[54]

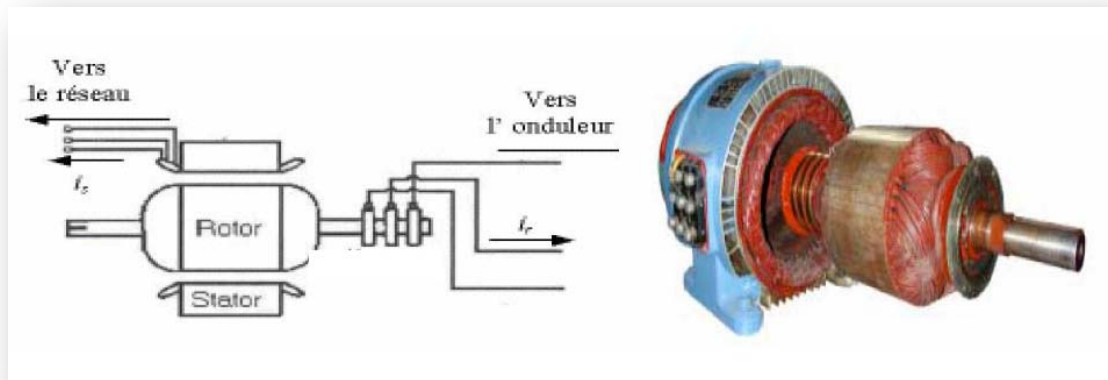


Figure (III-1) : Machine à induction à rotor bobiné [31] [38] [16]

### III.3.2 Principe de fonctionnement de MADA [59]

Pour expliquer son principe de fonctionnement, on néglige toutes les pertes. En prenant en compte cette hypothèse.

- La puissance  $P$  est fournie au stator et traverse l'entrefer, une partie de cette puissance fournie,  $(1-g)P$ , (puissance mécanique), le reste,  $g.P$  sort par les balais (grandeurs alternatives de fréquence  $gf$ ). Ces grandeurs de fréquence variable sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique, auquel elle est renvoyée, par l'intermédiaire du deuxième convertisseur. Ce réseau reçoit donc  $(1+g).P$ . [40]
- Les bobinages du rotor sont donc accessibles grâce à un système de balais et de collecteurs ;
- Une fois connecté au réseau, un flux magnétique tournant à vitesse fixe apparaît au stator. Ce flux dépend de la réluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage et donc du courant statorique. [31][56]
  - Le flux magnétique généré par le stator crée des f.é.m. dans le bobinage du rotor. Le rapport entre les f.é.m. crée au rotor et au stator :

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{N_r}{N_s} \cdot \frac{W_s - W_{mec}}{W_s} \quad (III.1)$$

En définissant le glissement par:

$$g = \frac{W_s - W_{mec}}{W_s} \quad (III.2)$$

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{N_r}{N_s} \cdot g \quad (III.3)$$

Les courants au stator et au rotor sont définis comme dans le cas d'un transformateur parfait :

$$\frac{i_r}{i_s} = \frac{N_r}{N_s} \quad (III.4)$$

Donc, le rapport entre la puissance  $P_r$  au rotor et la puissance  $P_s$  au stator devient :

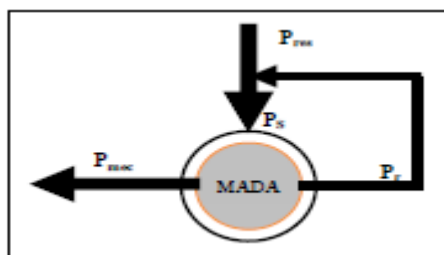
$$\frac{P_r}{P_s} = \frac{i_r}{i_s} \cdot \frac{E_r}{E_s} = g \quad (III.5)$$

Cette équation montre que pour une puissance constante transmise au stator, plus on transmet de la puissance par le rotor et, plus on augmente le glissement. La pulsation au stator (imposée par le réseau) étant supposée constante, il est donc possible de contrôler la vitesse de la génératrice en agissant simplement sur la puissance transmise au rotor via le glissement  $g$  [4].

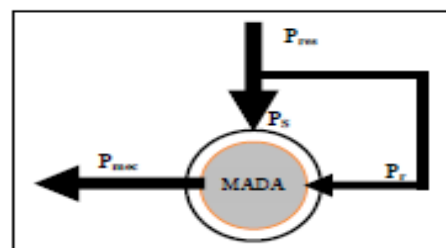
### III.4 Modes de fonctionnement de la MADA [57]

Comme la machine asynchrone à cage, la MADA fonctionne en moteur et en générateur, la différence réside dans le fait que pour la MADA ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement. Dans le cas d'une MADA c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionnement en hyper ou hypo synchrone aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur [58].

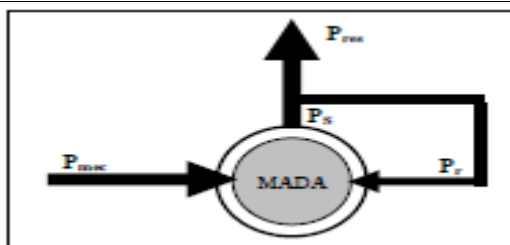
Cette propriété fondamentale a fait de la MADA le choix par excellence des entraînements à vitesse variable et surtout ces dernières années pour la génération d'énergie éolienne à vitesse variable. La figure (III.2) montre les différents modes de fonctionnement de la MADA, en moteur hypo synchrone ou hyper synchrone dans les quadrants **a** et **b** respectivement et en générateur hypo synchrone ou hyper synchrone dans les quadrants **c** et **d** respectivement. Seuls les quadrants c et d sont exploitables pour la production de l'énergie électrique, donc nous nous intéressons dans notre étude à ces deux quadrants pour la production d'énergie éolienne.



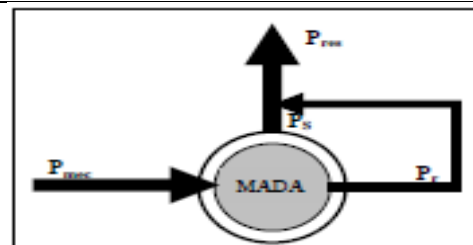
a- Le fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.



b- Le fonctionnement en mode moteur hyper synchrone



c-Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone



d-Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone

Figure (III-2) Les quatre modes de fonctionnement d'une MADA [59]



### III.5 Intérêt de la MADA

Le principal avantage de la MADA est la possibilité de fonctionner à vitesse variable. Les machines asynchrones à vitesse fixe doivent fonctionner au voisinage de la vitesse de synchronisme car la fréquence est imposée par le réseau. La vitesse du rotor est quasi constante. Le système de la MADA permet de régler la vitesse de rotation du rotor en fonction de la vitesse du vent. En effet la MADA permet un fonctionnement en génératrice hypo synchrone et hyper synchrone. On arrive ainsi à extraire le maximum de puissance possible. L'intérêt de la vitesse variable pour une éolienne est de pouvoir fonctionner sur une large plage de vitesses de vent, et de pouvoir en tirer le maximum de puissance possible, pour chaque vitesse de vent [67] [40] [60]

### III.6 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

Avant d'aborder la commande vectorielle de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA), il faut réaliser sa modélisation. Cette dernière va nous permettre de comprendre ses principes de fonctionnement physique et d'établir un modèle pour réaliser sa commande vectorielle ainsi que sa simulation en régimes dynamique et permanent. [4] [52]

**III.6.1 Hypothèses [6] :** La machine que nous allons étudier a une mise en équations correspondant à la structure de principe représentée par la figure (III.3). Les armatures statorique et rotoriques sont munies chacune d'un enroulement triphasé. Les trois enroulements du stator  $a_s$ ,  $b_s$ , et  $c_s$  sont représentés schématiquement à côté de leurs axes magnétiques respectifs ; il en est de même pour les enroulements rotoriques  $a_r$ ,  $b_r$  et  $c_r$ . Le symbole  $\theta$  représente l'angle entre les phases statorique et rotoriques.

Pour l'étude de la MADA idéalisée, on émet les hypothèses simplificatrices suivantes :

1. Les forces magnétomotrices créées par chaque phase du stator ou du rotor ont une forme sinusoïdale.

2. L'effet de la variation de température sur les résistances statorique et rotoriques est négligeable.
3. Le circuit magnétique est non saturé. L'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
4. On néglige l'effet de peau.

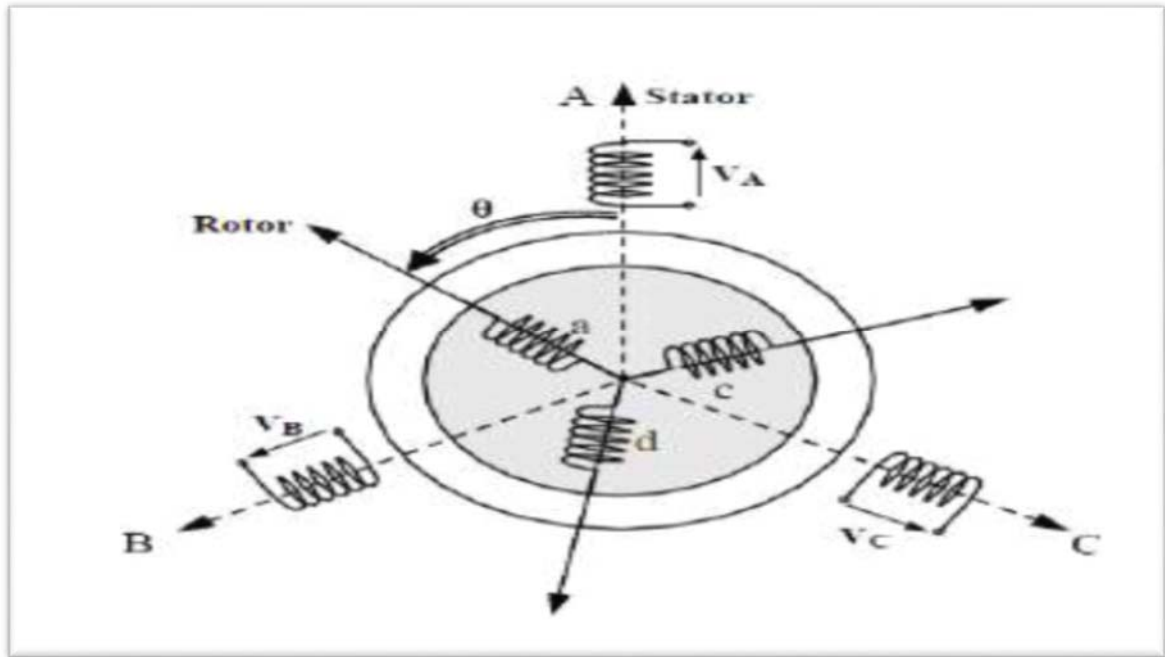


Figure (III- 3) : Représentation de la MADA dans le système triphasé.

### III.6.2 Mise en équation de la machine asynchrone à double alimentation :

Les équations générales de la machine asynchrone à rotor bobiné dans un repère triphasé s'écrivent [62] :

$$\begin{cases} [V_s]_3 = R_s [I_s]_3 + \frac{[d\Phi_s]_3}{dt} \\ [V_r]_3 = R_r [I_r]_3 + \frac{[d\Phi_r]_3}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

Avec :

$R_s$  et  $R_r$  respectivement les résistances statorique et rotorique par phase.

$L_s$ ,  $l_r$ : Inductances propres statorique et rotorique.

$M_s, M_r$ : Inductances mutuelles entre deux phases statoriques et deux phases rotorique.

$M_{sr}$  : Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

Les flux statoriques et rotorique s'expriment en fonction des courants en faisant intervenir les différentes inductances :

$$\begin{cases} [\Phi_s]_3 = L_s[I_s]_3 + M[I_s]_3 \\ [\Phi_r]_3 = M[I_s]_3 + L_r[I_r]_3 \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} L_s = I_s + M_s \\ L_r = I_r + M_r \\ M = \frac{3}{2}M_{sr} \end{cases}$$

Où :

$L_s, L_r$  et  $M$  représentent respectivement les inductances cycliques statorique, rotorique et magnétisante exprimées en fonction des inductances propres et mutuelles.

**III.6.3 Transformation de Park** : La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasée - biphasée, suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère (abc) vers le repère ( $\alpha\beta$ ), puis vers le repère dq). Le repère ( $\alpha\beta$ ) est toujours fixe par rapport au repère (abc); par contre le repère (dq) est mobile; il forme avec le repère fixe ( $\alpha\beta$ ) un angle, appelé angle de la transformation de Park ou angle de Park [61], [62], [53], [63].

La transformation de Park consiste à transformer les enroulements statoriques et rotorique en enroulements orthogonaux équivalents, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système.

#### III.6.3.1 Matrices de passage

On utilise la transformation de Park qui conserve la puissance instantanée.

$$[P] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.8})$$

De même pour la transformée inverse

$$[P]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.9})$$

Soit

$$[V_{abc}] = [P]^{-1}[V_{adq}] \quad (\text{III.10})$$

**Remarque :** l'angle  $\theta$  qui sert à la transformation de Park est a priori quelconque. Il dépend du choix référentiel.

Pour les grandeurs statoriques :  $\theta = \theta_s$

Et pour les grandeurs rotorique :  $\theta = \theta_s - \theta_m$

### III.6.3.2 Modèle de la machine dans le référentiel (d, q) lié au champ tournant

Après l'application de transformation de Park on trouve Le système d'équation (III.11) qui représente le modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère (d, q) lié au champ tournant [58].

$$\begin{aligned}
 V_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs} \\
 V_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} - \omega_s \Phi_{ds} \\
 V_{dr} &= R_r i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \Phi_{qr} \\
 V_{qr} &= R_r i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \Phi_{dr}
 \end{aligned} \tag{III.11}$$

Pour les grandeurs statoriques :

$$\theta = \theta_s \Rightarrow \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \tag{III.12}$$

Et pour les grandeurs rotorique :

$$\theta = \theta_s - \theta_m \Rightarrow \frac{d\theta}{dt} = \frac{d(\theta_s - \theta_m)}{dt} = \omega_s - \omega_m \tag{III.13}$$

La composante homopolaire du système (III.13) est nulle pour un système équilibré.

### III.6.3.3 Équation des tensions

Equation des tensions au stator :

$$[V_{sabc}]_3 = [R_s] \cdot [I_{sabc}]_3 + \frac{d}{dt} [\Phi_{sabc}]_3 \tag{III.14}$$

On écrit d'autre part :

$$[V_{abc}] = [P]^{-1} [V_{sodq}] \quad \text{et} \quad [i_{abc}] = [P]^{-1} [i_{sodq}] \tag{III.15}$$

$$[P]^{-1}[V_{sodq}] = [P]^{-1}[R_s] \cdot [I_{sodq}] + \frac{d}{dt} ([P]^{-1}[\Phi_{sodq}]) \quad (\text{III.16})$$

On multiplie à gauche par [P]. On obtient alors :

$$[V_{sodq}] = [R_s] \cdot [I_{sodq}] + [P] \frac{d}{dt} ([P]^{-1})[\Phi_{sodq}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sodq}] \quad (\text{III.17})$$

On démontre que :

$$[P] \frac{d[P]^{-1}}{dt} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{III.18})$$

On obtient donc les équations suivantes, où  $\theta_s$  est l'angle électrique dont la référence est au stator ; on pose  $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s$  en appliquant la transformation de Park aux équations de la machine asynchrone à double alimentation, on trouve :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} (\Phi_{ds}) - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d}{dt} (\Phi_{qs}) - \omega_s \Phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{III.19})$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d}{dt} (\Phi_{ds}) - \omega_s \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d}{dt} (\Phi_{qs}) - \omega_s \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.20})$$

### III.6.3.4 Équations des flux

On utilise encore la transformation de Park dans les relations donnant les flux.

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.21})$$

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_s i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.22})$$

### III.7 Commande vectorielle de la MADA [68]

Les stratégies de commande de la MADA se reposent sur deux approches différentes [40] :

- Le contrôle du flux en boucle fermée, où la fréquence et la tension sont considérées variables (réseau instable).
- Le contrôle du flux en boucle ouverte lorsque la tension et la fréquence sont constantes (réseau stable).

Dans notre étude, la fréquence et la tension sont constantes. On peut constater, d'après la relation (III-11), le fort couplage entre les flux et les courants.

En effet, le couple électromagnétique est le produit croisé entre les flux et les courants statoriques, ce qui rend la commande de la MADA particulièrement difficile. Afin de simplifier la commande, nous approximations son modèle à celui de la machine à courant continu qui a l'avantage d'avoir un découplage naturel entre les flux et les courants. Pour cela, nous appliquons la commande vectorielle, aussi appelée commande par orientation du flux. Nous choisissons un référentiel diphasé  $dq$  lié au champ tournant. Le flux statorique  $\Omega_s$  est orienté suivant l'axe  $d$ . Ainsi, nous pourrions écrire :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = \Phi_s \\ \Phi_{qs} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.26})$$

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} = \Phi_s \\ \Phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.27})$$

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{\Phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{dr} \\ i_{qs} = -\frac{M}{L_s} i_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.28})$$

L'expression du couple électromagnétique devient alors :

$$C_{em} = -P \cdot \frac{M}{L_s} \Phi_{ds} \cdot i_{qr} \quad (\text{III.29})$$

Dans le domaine de la production de l'énergie éolienne, ce sont des machines de moyenne et de forte puissance qui sont surtout utilisées. Ainsi, nous négligeons la résistance statorique. En prenant le flux statorique constant, nous pourrions écrire :

$$\begin{cases} v_{ds} = 0 \\ v_{qs} = V_s = \omega_s \Phi_s \end{cases} \quad (\text{III.30})$$

$V_s$  est la tension du réseau.

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = \Phi_s = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \\ \Phi_{qs} = 0 = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.31})$$

D'après la relation (16), on remarque qu'en contrôlant la grandeur en quadrature du courant rotorique ( $i_{qr}$ ), on peut contrôler le couple électromagnétique de la MADA.

La commande vectorielle de la MADA permet d'écrire les expressions des puissances.



$$\left\{ \begin{array}{l} P_s = v_{qs} i_{qs} = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} \cdot i_{qr} \\ Q_s = v_{qs} i_{ds} = V_s \left( \frac{\Phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{dr} \right) = \frac{V_s \cdot \Phi_s}{L_s} - \frac{V_s \cdot M}{L_s} i_{dr} \\ P_r = v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr} \\ Q_r = v_{qr} i_{dr} - v_{dr} i_{qr} \end{array} \right. \quad (III.32)$$

Les puissances actives et réactives peuvent s'écrire :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_s = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} \cdot i_{qr} \\ Q_s = \frac{V_s \cdot \Phi_s}{L_s} - \frac{V_s \cdot M}{L_s} i_{dr} \\ P_r = g \cdot \frac{V_s \cdot M}{L_s} \cdot i_{qr} \\ Q_r = g \cdot \frac{V_s \cdot M}{L_s} \cdot i_{dr} \end{array} \right. \quad (III.33)$$

Les puissances totales mise en jeu par l'aérogénérateur sont représentées par les équations (III.34) et (III.35).

$$P_t = P_s + P_r = (g - 1) \cdot V_s \cdot \frac{M}{L_s} i_{qr} \quad (III.34)$$

$$Q_t = Q_s + Q_r = \frac{V_s \cdot \Phi_s}{L_s} + (g-1) \cdot V_s \cdot \frac{M}{L_s} i_{dr} \quad (III.35)$$

Le principe de la commande vectorielle en puissance est utilisé. Il consiste à faire suivre à la MADA une consigne en puissance, avec la meilleure dynamique électrique, en tenant compte de la limite de fréquence de commutation des interrupteurs des convertisseurs de puissance.

Le schéma de principe de la commande vectorielle est illustré sur la figure 4. Des régulateurs de puissance de type PI sont utilisés. Ils permettent d'atteindre à la fois une bonne dynamique et une bonne robustesse.

Dans le but d'avoir un facteur de puissance unitaire côté stator, on maintient la puissance réactive statorique mise en jeu nulle ( $Q_s = 0$ ). La puissance active de référence à imposer à la MADA est définie par l'équation (III.36) [49] :

$$P_s^{ref} = \eta \cdot P_{mec\_opt} \quad (III.36)$$

Avec  $\eta$ : rendement de la MADA et des deux convertisseurs de puissance.

- **Commande directe des puissances [64]**

Si l'on observe les équations :

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{dr} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \Phi_{qr} = \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (III.23)$$

On s'aperçoit que les courants rotoriques sont liés aux puissances actives et réactives par le terme  $\frac{M v_s}{L_s}$ .

De plus, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés dans le système :

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{di_{dr}}{dt} - g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \\ v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{di_{qr}}{dt} - g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{dr} + g \omega_s \frac{M v_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (III.24)$$

Disparaissent en régime permanent nous pouvons donc écrire :

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} - g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \\ v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{dr} + g \frac{M v_s}{L_s} \end{cases} \quad (III.25)$$

$V_{dr}$  et  $V_{qr}$  sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus. L'effet du terme de couplage  $g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s})$  est minime pour des faibles glissements et peut être compensé par une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande.

En revanche, le terme  $g \frac{MV_s}{L_s}$  représente une force électromotrice dont l'influence n'est pas négligeable, le système de contrôle devra donc compenser cette perturbation. Ainsi, on obtient un modèle plus simple permettant le contrôle direct et indépendant des puissances active et réactive en utilisant un seul régulateur sur chaque axe (Figure III-4).

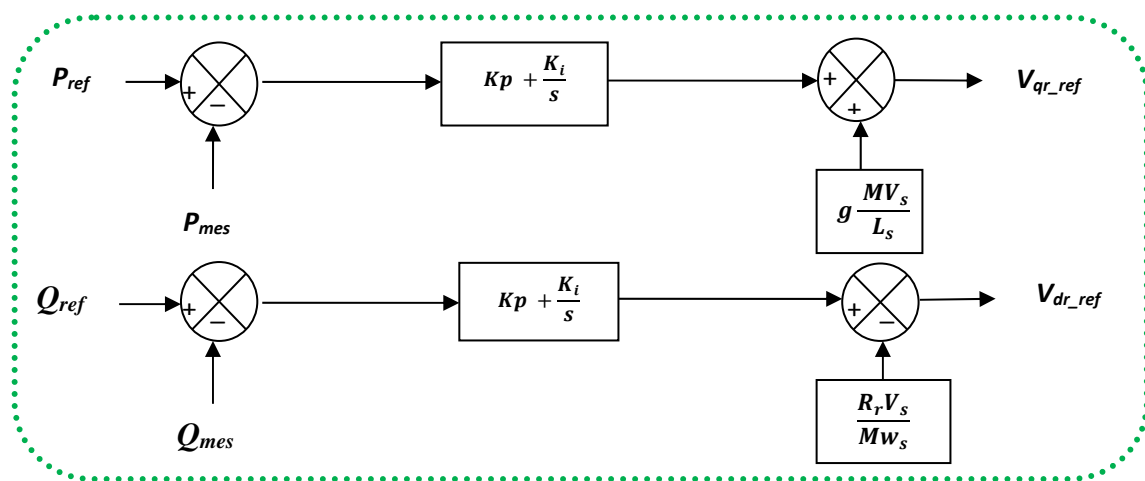


Figure (III-4) : Schéma bloc de la commande directe

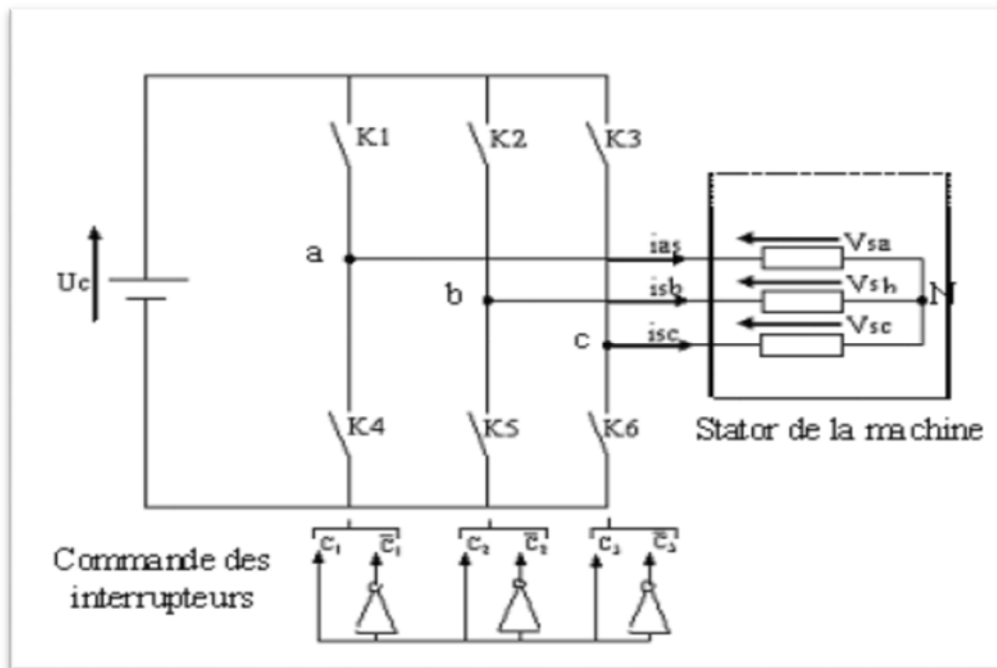
### III.8 Modélisation et Contrôle d'un Onduleur de tension & Redresseur MLI

#### III.8.1 Onduleur de tension

L'onduleur de tension est un convertisseur statique constitué de cellules de commutation généralement à transistors ou des thyristors GTO pour les grandes puissances. Il est constitué de trois bras, de deux interrupteurs pour chacun. Pour

assurer la continuité en courants chaque interrupteur est monté en antiparallèle avec une diode de récupération.

Les interrupteurs (K1, K4), (K2, K5), (K3, K6) sont contrôlés de manière complémentaire pour éviter le court-circuit de la source [50], [51]. Le schéma structurel d'un tel convertisseur statique est illustré par la figure (III-5).



**Figure (III-5) : Schéma d'un onduleur de tension triphasé alimentant le stator de la machine**

Pour simplifier la modélisation de l'onduleur on supposera que les interrupteurs sont idéaux (temps de commutation nul, pertes négligeables), la charge triphasée est équilibrée, couplée en étoile avec un neutre isolé.

L'objectif de la commande est de trouver la bonne combinaison de contrôle des interrupteurs, de façon à reconstituer la forme de 3 signaux sinusoïdaux. Soit  $CK$ , les signaux de commande des bras  $K$  de l'onduleur avec  $K \in \{1,2,3\}$ .

$CK = 1$  Si l'interrupteur en haut d'un bras est fermé et celui en bas est ouvert ;

$CK = 0$  Si l'interrupteur en haut est ouvert et celui en bas est fermé.

Si la charge connectée à l'onduleur est équilibrée ( $V_{sa} + V_{sb} + V_{sc} = 0$ ) alors :

$$\begin{cases} V_{aN} = V_{sa} = \frac{U_c}{3} (2 \cdot C_1 - C_2 - C_3) \\ V_{bN} = V_{sb} = \frac{U_c}{3} (2 \cdot C_2 - C_1 - C_3) \\ V_{cN} = V_{sc} = \frac{U_c}{3} (2 \cdot C_3 - C_2 - C_1) \end{cases} \quad (\text{III.37})$$

Sous formes matricielle :

$$[C_k] = [C_1 C_2 C_3]^t; [V_{sabc}] = [V_{sa} V_{sb} V_{sc}]^t \quad (\text{III.38})$$

Où  $V_{sabc}$  est le vecteur des tensions simples à la sortie de l'onduleur, donné par:

$$\begin{aligned} [V_{sabc}] &= \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot U_c \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} \\ &= U_c \cdot [T_s] \cdot [C_k] \end{aligned} \quad (\text{III.39})$$

### III.8.2 Redresseur à MLI [64]

Les redresseurs à MLI utilisent des composants à commutation forcée réversibles qui permettent non seulement de réduire les harmoniques en prélevant des courants d'allure sinusoïdale mais aussi d'autoriser un flux bidirectionnel de l'énergie. Le convertisseur peut alors travailler en redresseur ou en onduleur et garder une tension continue régulée aux bornes du condensateur.

La figure (III-6), présente la structure d'un redresseur à MLI triphasé, qui peut être décomposé en trois étages : La source, le convertisseur et la charge

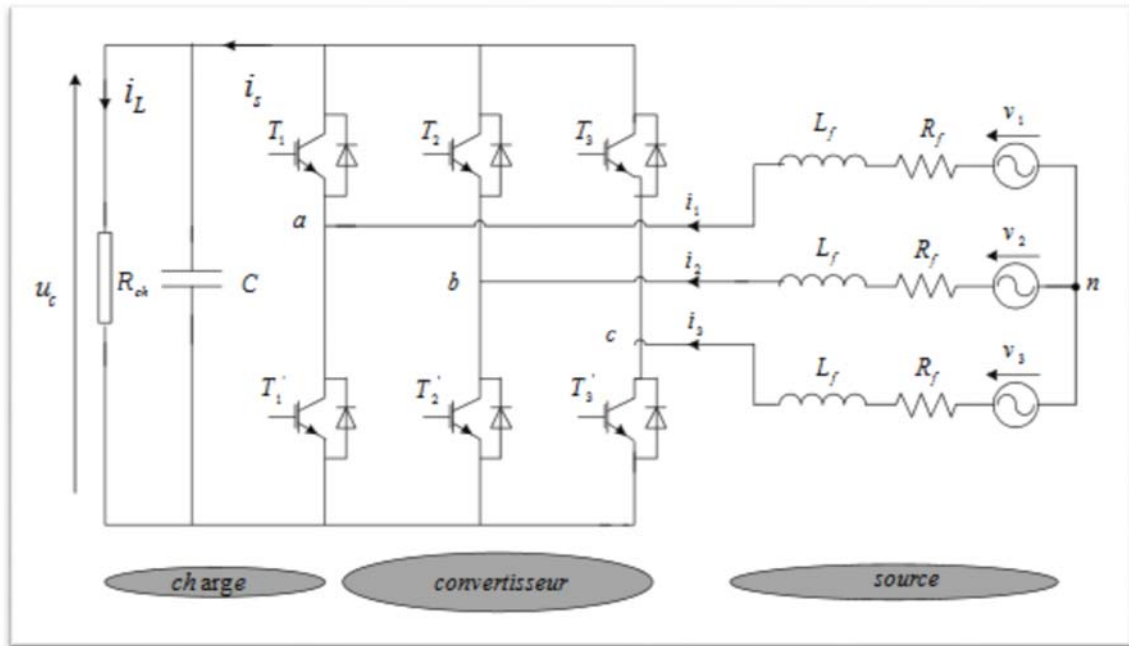


Figure (III-6) : Structure du redresseur à MLI

### III.8.3 Principe de fonctionnement

Contrairement aux redresseurs classiques, les redresseurs MLI sont réalisés à l'aide de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. La possibilité de commande à l'ouverture permet un contrôle total du convertisseur, parce que les interrupteurs peuvent être commutés, selon les besoins, aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture [66].

Le redresseur de tension fonctionne en gardant la tension du bus continu à une valeur de référence désirée, en utilisant une commande en boucle fermée. Pour accomplir cette tâche, la tension du bus continu  $U_{dc}$  est capturée puis comparée avec une référence  $U_{dref}$ , le signal d'erreur produit de cette comparaison est employé pour commuter les six interrupteurs du redresseur à la fermeture et à l'ouverture utilisant un contrôleur PI.

### III.8.4 La source d'alimentation

C'est une tension triphasée supposée parfaitement sinusoïdale et équilibrée en série avec une résistance  $r$  et une inductance  $l$  représentant respectivement la résistance et l'inductance totales de la ligne

Les tensions de la ligne sont données par :

$$\begin{cases} V_1 = ri_1 + l \frac{di_1}{dt} + V_{an} \\ V_2 = ri_2 + l \frac{di_2}{dt} + V_{bn} \\ V_3 = ri_3 + l \frac{di_3}{dt} + V_{cn} \end{cases} \quad (\text{III.40})$$

Où  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$  et  $V_{cn}$  sont les tensions simples par rapport au neutre de la source à l'entrée du convertisseur. Et les courants de chaque phase sont alors donnés par le système d'équations différentielles suivant :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-r}{l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-r}{l} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-r}{l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} + \frac{1}{l} \begin{bmatrix} V_1 - V_{an} \\ V_2 - V_{bn} \\ V_3 - V_{cn} \end{bmatrix} \quad (\text{III.41})$$

### III.8.5 Commande à MLI

La méthode de la MLI à porteuse triangulaire utilisée dans cette commande, Basée sur la comparaison des tensions de références avec une onde triangulaire (porteuse) d'une amplitude et d'une fréquence fixes. Les signaux de commande des interrupteurs du redresseur MLI sont obtenus à partir des intersections des tensions de références avec la porteuse.

### III.9 Résultats de simulation avec régulateur PI classique

Les résultats de simulation illustrés dans les figures ci-dessous sont ceux obtenus par le modèle d'une machine de puissance 5Kw.

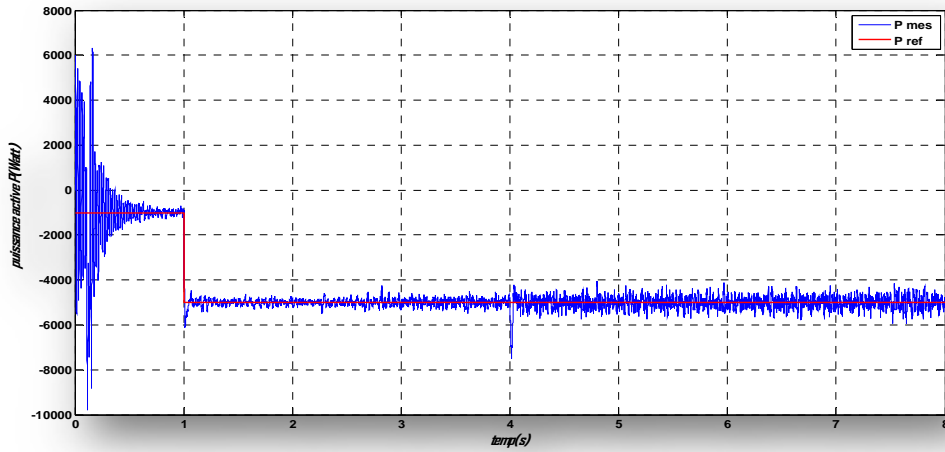


Figure (III-7) : Puissance active P(Watt) avec régulateur PI

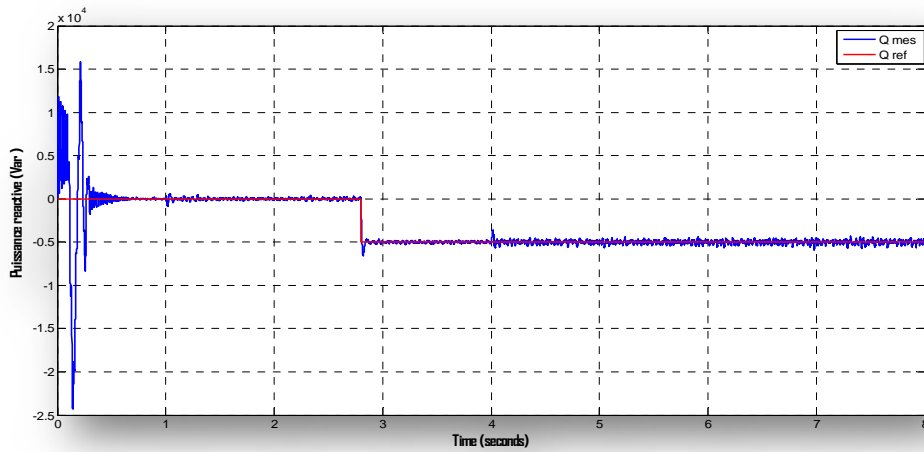


Figure (III-8) : Puissance réactive Q (VAR) avec régulateur P

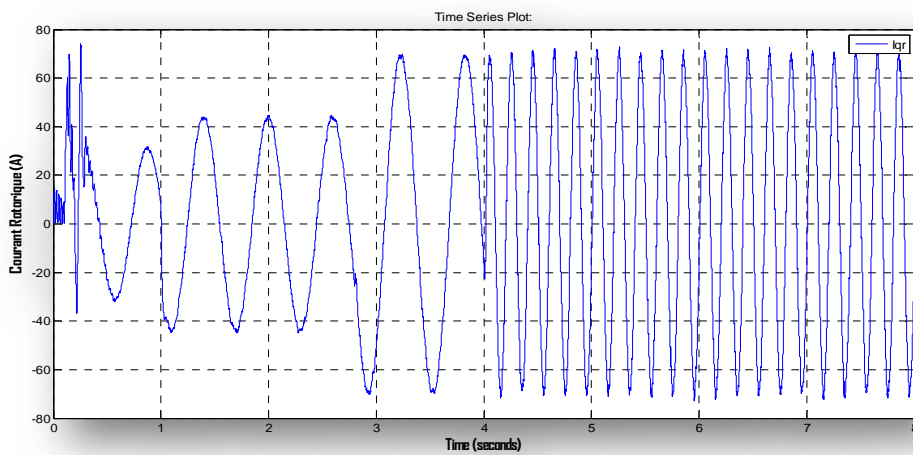


Figure (III-9) : Courant rotorique  $I_{qr}$  courants avec régulateur PI



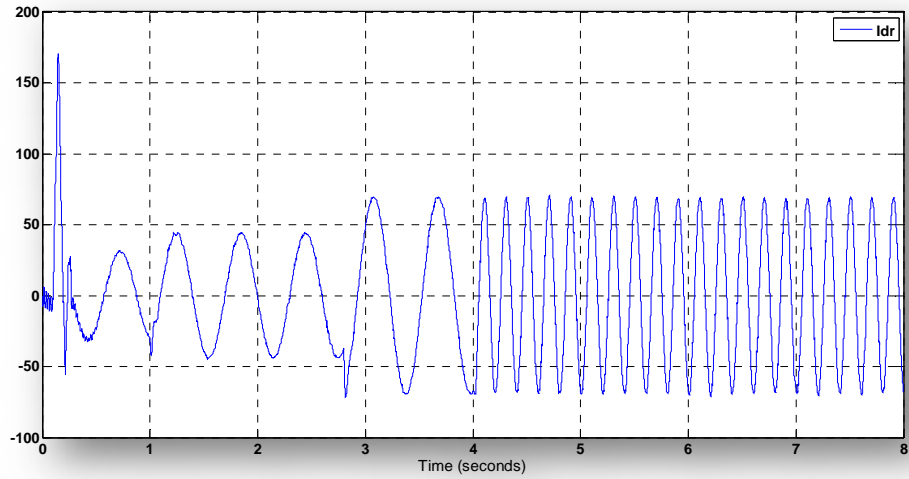


Figure (III-10) : Courant rotorique  $I_{dr}$  avec régulateur PI

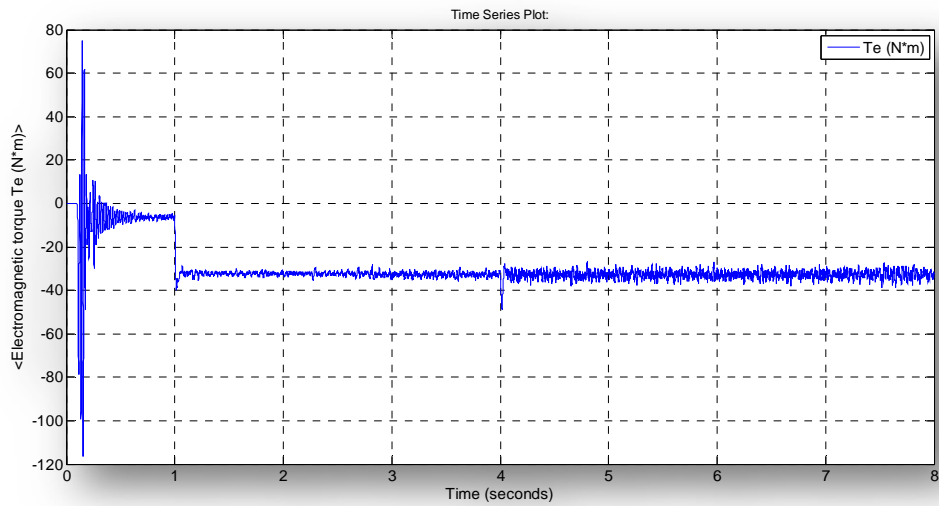


Figure (III-11) : La variation du couple électromagnétique

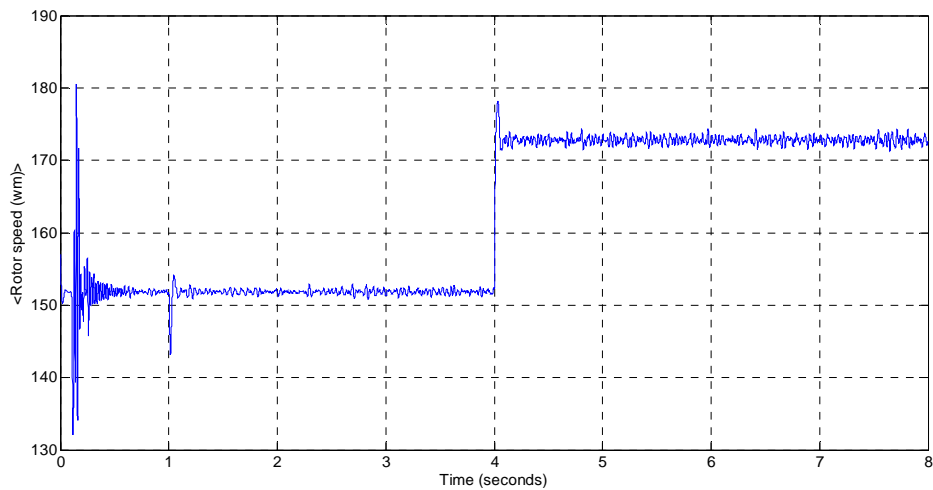


Figure (III-12) : La variation de la vitesse de rotation

### 9.1 Interprétation des résultats

Les résultats de simulation de la machine asynchrone à double alimentation et présentée sur les figures (III-7), (III-8), (III-9), (III-10), (III-11), (III-12), concernant respectivement la puissance active et la puissance réactive, les courants rotoriques le couple électromagnétique et la vitesse.

Dans cet essai, nous allons observer le comportement des puissances débitées par la MADA dans le cas où un échelon de puissance lui est imposé :

A  $t=1s$  pour la puissance active et à  $t=2.8s$  pour la puissance réactive.

Un échelon de vitesse est appliqué à  $t=4s$

On remarque que la puissance active qui est présenté sur la figure (III-7) présente un régime transitoire qui est fixé après une durée de 1s avec des pics ( $P_{\max}=6.5.10^3$  et  $P_{\min}=-9.10^3$ ), à l'application d'échelon (la consigne) à  $t = 1 s$  au système tel que la puissance passe de (-1000 à -5000 Watt), remarquons aussi un suivie de consigne sur la même Figure montre que la puissance débitée par la MADA atteint bien la valeur désirée (-5000Watt) sauf qu'il ya un dépassement d'une période de 0.5s dû à l'application d'une puissance réactive à  $t=1 s$ .

Il en est de même pour la puissance réactive (Figure III.8), on a constaté un suivie de consigne. Il y a une réponse à l'échelon introduit à  $t=2.8s$  pour atteindre la valeur souhaitée (-5000 Watt).

La Figure (III.11) montre que pendant le régime dynamique, le couple électromagnétique est négatif, il atteint au démarrage une valeur maximale.

On constate ainsi l'importance des courants rotoriques (Figure III.9) et (Figure III.10) pendant le démarrage, après un temps égal à environs 4 s, ils se stabilisent.

### III.10 Conclusion :

Dans ce chapitre on a modélisé le système global d'une éolienne de 5kW de puissance à vitesse variable et on a simulés le système complet (turbine+MADA), avec un profil de vent aléatoire appliqué au système. Cette modélisation nous a montré un fort couplage entre les puissances actives et réactive.

# **Chapitre IV**

## **Ferme Eolienne**

*Table de matière*

IV.1	Introduction.....	85
IV.2	Ferme éolienne : le choix des sites .....	85
IV.3	Ferme éolienne en Algérie.....	86
IV.4	Présentation du système étudié.....	87
IV.5	Résultat de simulation .....	88
	• Interprétation des résultats.....	92
IV.7	Conclusion.....	93

*Liste des figures*

Figure (IV-1)	: ferme éolienne.....	86
Figure (IV -2)	: Ferme d'éolienne à base de MADA alimentée par un convertisseur direct	87
Figure (IV-3)	: Puissance active P(Watt) avec régulateur PI.....	88
Figure (IV-4)	: Puissance réactive Q (VAR) avec régulateur PI.....	88
Figure (I V-5)	: Tension coté source en fonction du temps.....	89
Figure (I V-6)	: Tension coté charge en fonction du temps.....	89
Figure (I V-7)	:Tension de la ferme en fonction du temps.....	89
Figure (I V-8)	:Courant coté source en fonction du temps.....	90
Figure (I V-9)	: Courant coté charge en fonction du temps.....	90
Figure (I V-10)	: Courant de la ferme en fonction du temps.....	91
Figure (I V-11)	: Tension d'un aerogénérateur en fonction du temps.....	91
Figure (I V-12)	: Tension coté machine en fonction du temps.....	91
Figure (I V-13)	: Tension coté réseaux en fonction du temps.....	92
Figure (I V-14)	: Courant coté réseaux en fonction du temps .....	92

***Bibliographie***

- [71] Tarak Ghennam, « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes a base de machine asynchrone a double alimentation. » Autre. Ecole Centrale de Lille; Ecole Militaire polytechnique Alger, 2011
- [72] Michaël PIERROT, l'énergie éolienne et son fonctionnement Futura-Sciences, 05/08/2006
- [73] <http://www.cder.dz>

## **IV.1 Introduction**

Depuis ces dernières années, la connexion des fermes éoliennes de moyenne et grande puissance au réseau électrique a entraîné de nombreux problèmes pour la gestion du réseau électrique en raison de la nature variable de la ressource éolienne. Depuis quelques années, technique de commande sont établies pour gérer et contrôlé ses fermes vus qu'ils constituent une source d'énergie intermittente. [71]

Dans ce chapitre, nous allons étudier les cas où d'une ferme d'éolienne connectée au réseau électrique et alimentant des charges non linéaires. L'intérêt de notre étude se porte en premier lieu sur la ferme éolienne elle-même, de sorte à pouvoir palier aux différentes difficultés de simulation et en second lieux de mesurer l'influence des charges non linéaires sur la qualité des caractéristiques électrique de notre ferme éolienne.

## **IV.2 Ferme éolienne : le choix des sites [72]**

Le choix de l'emplacement d'une ferme éolienne est complexe et ne laisse pas de place au hasard. Il est important de noté que la puissance délivrée par une éolienne augmente avec le cube de la vitesse du vent : si le vent double, la puissance augmente d'un facteur  $2 \times 2 \times 2 = 8$  ! C'est pourquoi, il est conseillé d'identifier des sites soumis à des vents forts et réguliers.

En moyenne, les vents doivent avoir une vitesse d'une quinzaine de km/h pour commencer à fournir de l'électricité pour des éoliennes spécifique. Mais il s'agit d'un minimum et les éoliennes acceptent des vents bien plus forts. Mais ils ne doivent pas être non plus trop puissants, ce qui use trop vite les mécaniques et même provoquer la destruction des éoliennes.

Les zones potentielles font l'objet d'études précises : mesures, observation de la végétation ou même modélisations. Les éoliennes sont implantées à des distances régulières (quelques mètres près) tenant compte à la fois du relief en plus des turbulences que peuvent provoqué chaque éolienne sur sa voisine.



**Figure (IV-1) : ferme éolienne**

### **IV.3 Ferme éolienne en Algérie [73]**

Etude technico-économique d'une Ferme éolienne de puissance totale de 50 MW connectée au réseau de la région d'Adrar :Ce travail a pour objectif de réaliser une étude technico économique d'une ferme éolienne dans la région d'Adrar. Le travail débutera par une étude statistique qui permettra de déterminer les moyennes de la vitesse du vent et du potentiel énergétique disponible.

Par la suite le gisement éolien de toute la zone sera calculé à l'aide du logiciel WASP en utilisant les données concernant la vitesse et direction du vent provenant des stations météo voisines, ainsi que la carte topographique. Ceci nous permettra de dégager toutes les locations favorables au projet et en plus de sélectionner le type d'aérogénérateur le plus appropriés aux conditions du site, pour garantir un meilleur rendement.

Pour la totalité des sites sélectionnés, on procédera à une étude approfondie de l'ensemble des facteurs qui influencent la production électrique que sont :

- La densité de l'air en raison de son influence sur les performances des machines,
- L'infrastructure nécessaire pour le raccordement au réseau électrique,
- L'emplacement des turbines pour réduire l'effet de sillage, etc.

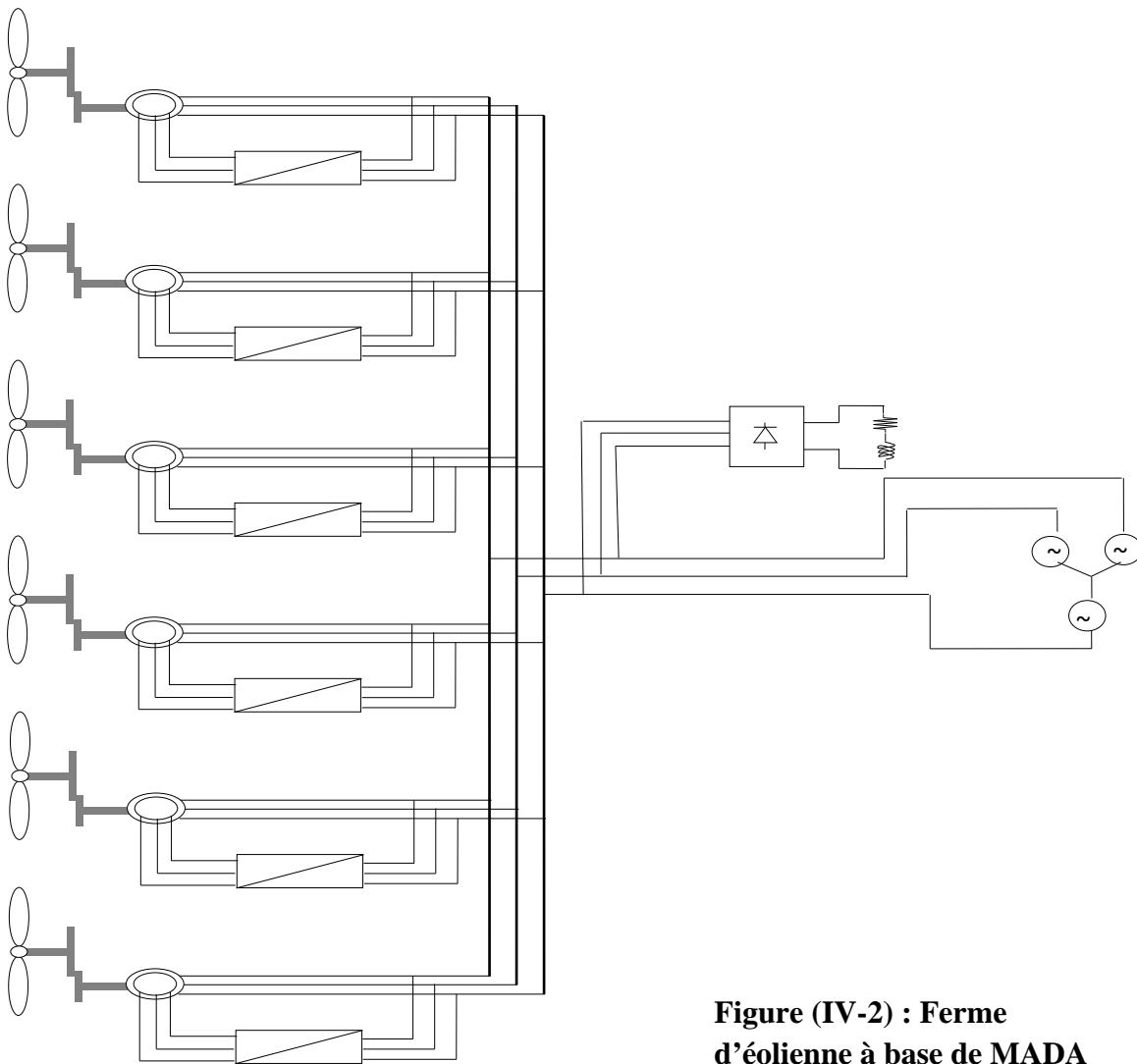
Le logiciel Windpro sera utilisé pour accomplir ce travail et trouver ainsi la meilleure configuration possible du parc éolien et qui soit la moins onéreuse tout en assurant une production électrique élevée.



Sur le plan économique, on évaluera tous les coûts liés à l'achat et installation des turbines, l'infrastructure nécessaire pour le raccordement au réseau. Sans oublier les opérations d'exploitation et de maintenance. Cela permettra d'obtenir le prix de revient du KWH pour sélectionner le site le plus approprié au projet.

#### IV.4 Présentation du système étudié

Le système étudié est composé d'une ferme d'éoliennes alimentant des charges non linéaires est constituée de plusieurs éoliennes (6 éoliennes) avec un convertisseur direct (figure V-1), chaque éolienne a une puissance de 5 kW, ce qui donne une puissance de 30 kW à la sortie de la ferme.



**Figure (IV-2) : Ferme d'éolienne à base de MADA alimentée par un convertisseur direct**

### IV.5 Résultat de simulation

Nous soumettons l'ensemble des six éoliennes constituant notre ferme éolienne à la même commande directe de façon indépendante, et avec les mêmes variations de de puissances actives, réactive et vitesse. Il est à noter aussi que nous considérant que les six éoliennes reçoivent le même profile de vent que ce soit au niveau vitesse et orientation.

Il est à noter que le déroulement des simulations ne pouvez se faire sur de petits ordinateurs mais cela a nécessité d'un ordinateur assez performant pour prendre en charge les six éoliennes avec leur turbine.

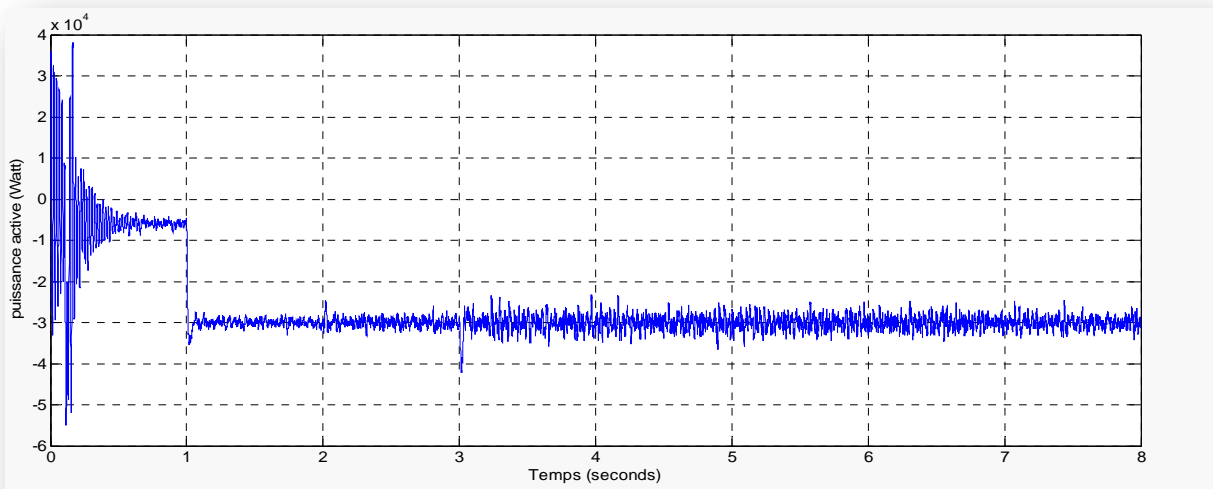


Figure (IV-3) : Puissance active  $P$ (Watt) avec régulateur PI

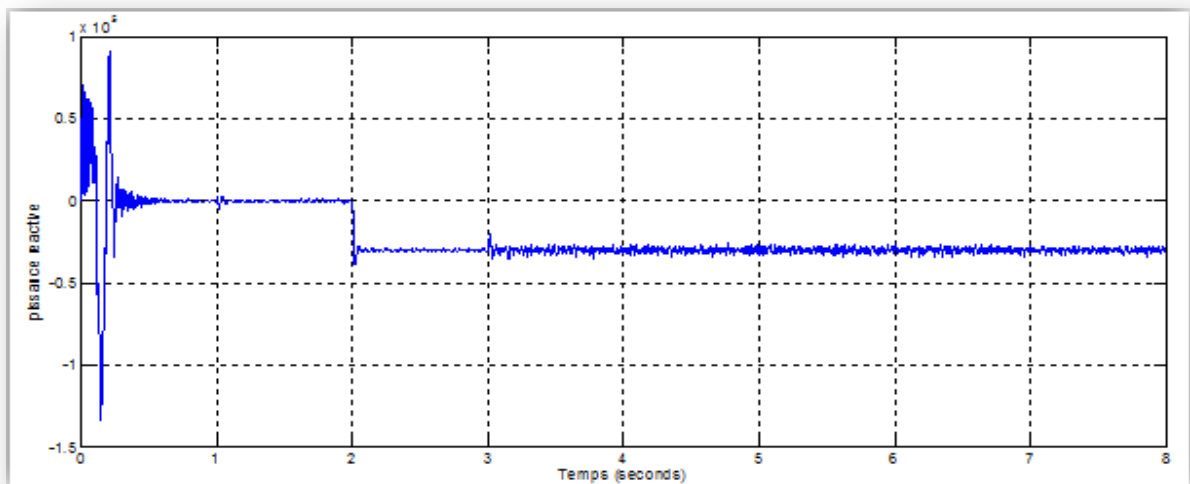


Figure (IV-4) : Puissance réactive  $Q$  (VAR) avec régulateur PI

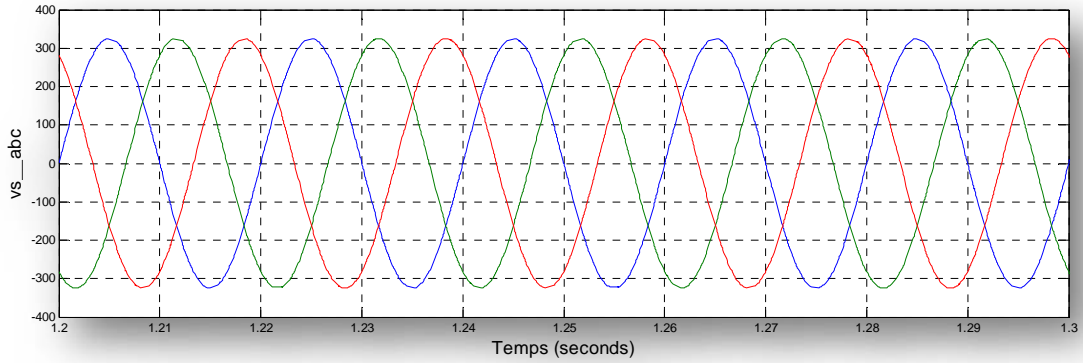


Figure (IV-5) : Tension coté source en fonction du temps

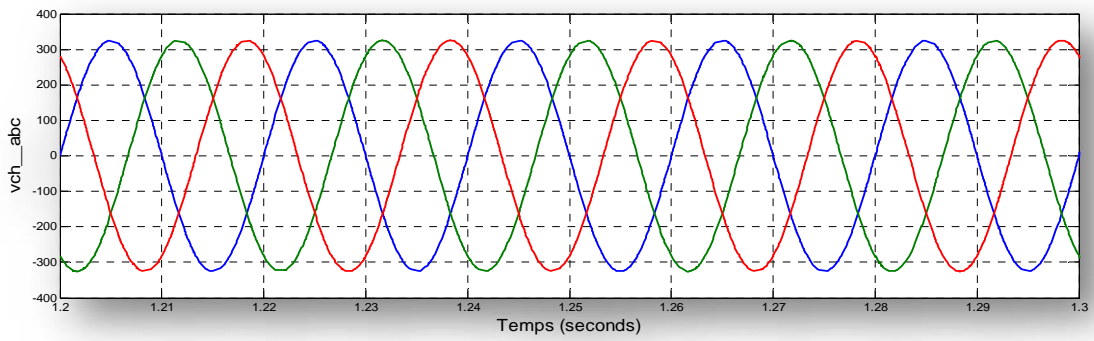


Figure (IV-6) : Tension coté charge en fonction du temps

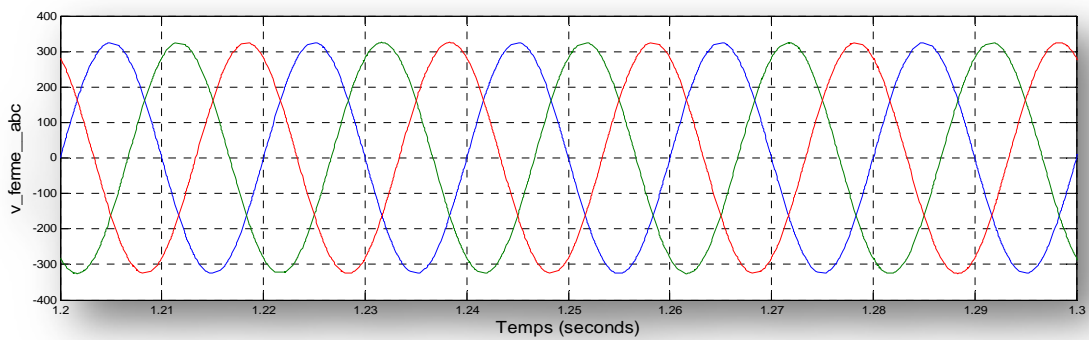


Figure (IV-7) : Tension de la ferme en fonction du temps

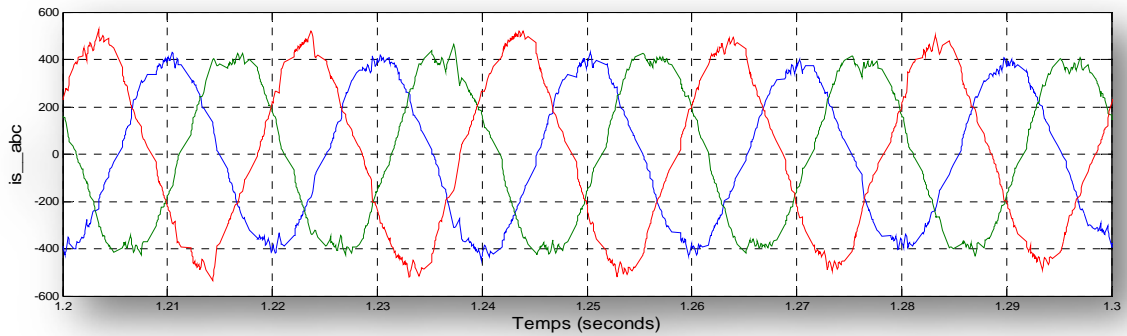


Figure (I V-8) : Courant coté source en fonction du temps

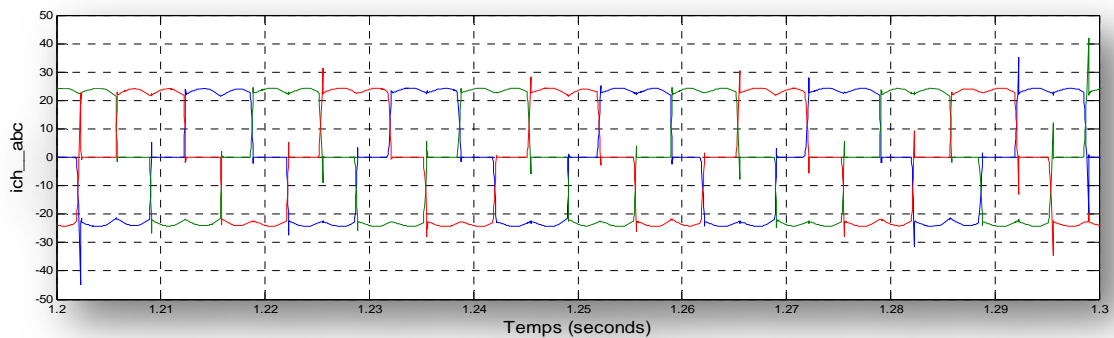


Figure (I V-9) : Courant coté charge en fonction du temps

Interpretation des résultats : .

Les Tensions sont en phase , notre système est synchronisé non perturbé .

Pour ce qui est de courant, nous remarquons qu'ils sont perturbés en raison du fait que les charges sont non-linéaires (Redresseur à diode), ce qui a entraîné une perturbation coté source.

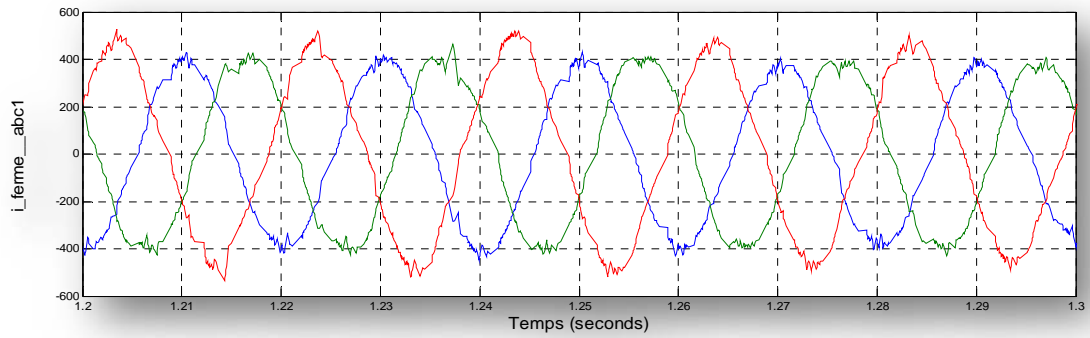


Figure (I V-10) : Courant de la ferme en fonction du temps

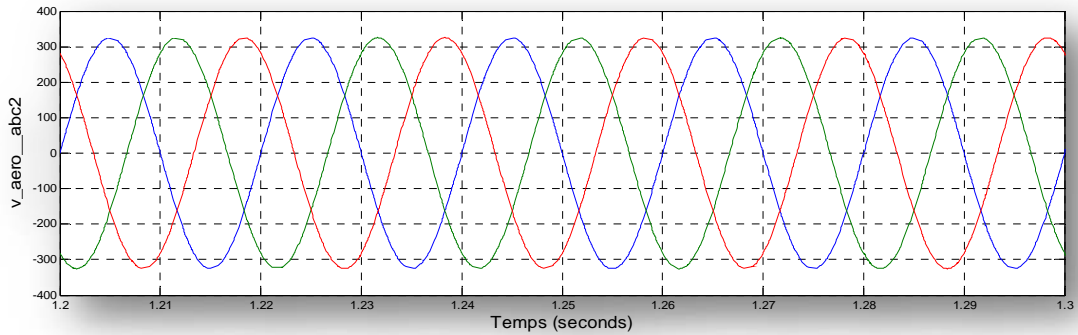


Figure (I V-11) : Tension d'un aerogénérateur en fonction du temps

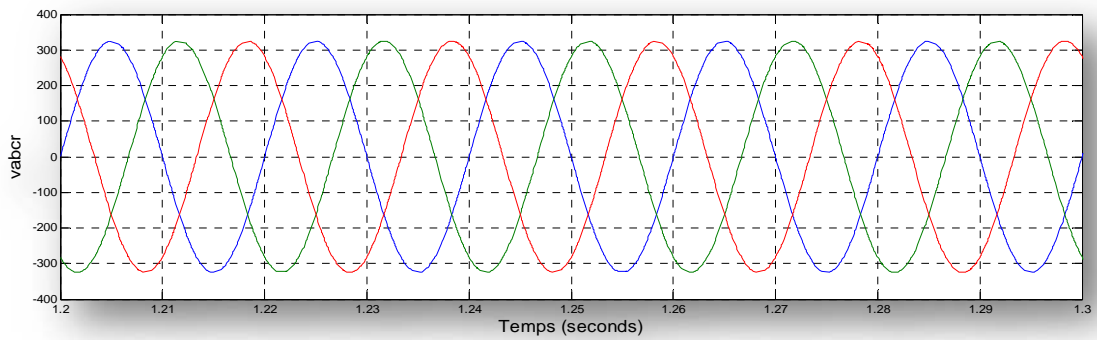
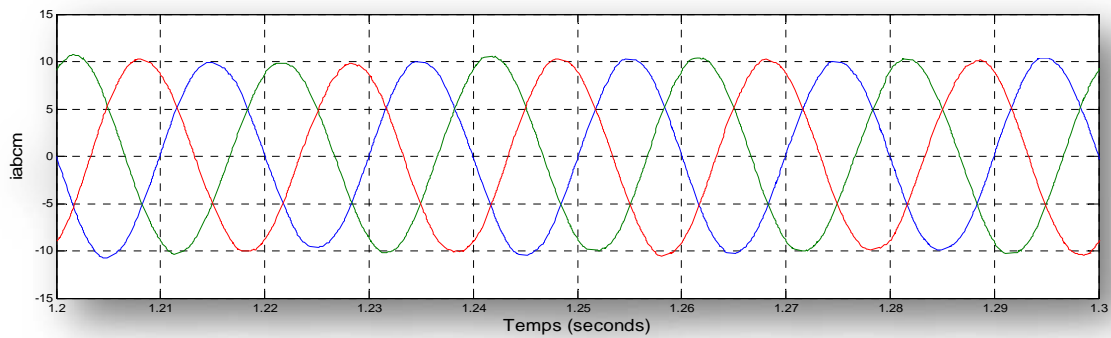
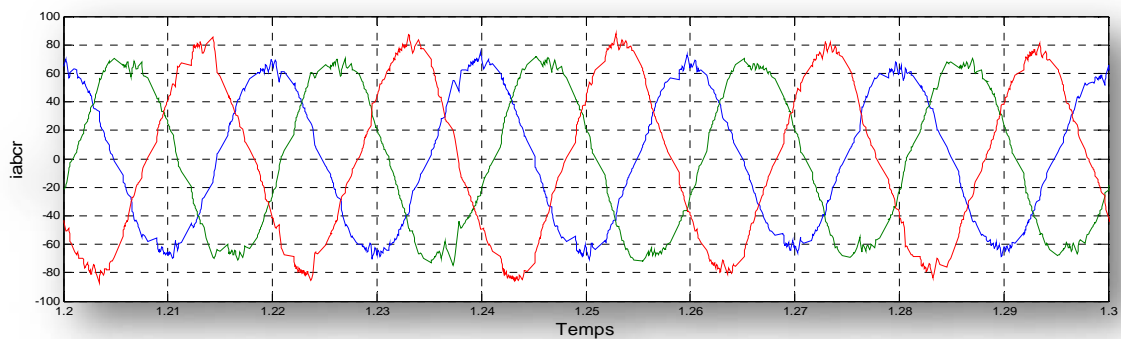


Figure (I V-13) : Tension coté réseaux en fonction du temps



**Figure (I V-13) : Courant coté machine en fonction du temps**



**Figure (I V-14) : Courant coté réseaux en fonction du temps**

### Interprétation des résultats

Les résultats de simulation de la ferme éolienne dotée de six éoliennes de même type sont illustrés dans les figures :

- (IV-3) : la puissance active
- (IV-4) : la puissance réactive

Dans cet essai, nous allons observer le comportement de la puissance débitée par la ferme éolienne dans le cas où un échelon de puissance est appliqué de façon instantanée aux machines :

Les temps d'application des échelons sont définis comme suite :

- A  $t=1s$  : variation de la puissance active
- A  $t=2s$  : variation de la puissance réactive
- A  $t=3s$  : variation de la vitesse appliquée

Les résultats ainsi obtenus dans l'ensembles des figures est à l'identique du chapitre précédent, cependant la différence subsiste aux niveaux des grandeurs où nous somme passé de 5 KW à 30 KW mais avec des perturbations six fois plus importante.

#### **IV.7 conclusion**

Dans ce chapitre, après avoir effectué plusieurs simulations nous avons pu faire fonctionner une ferme éolienne de six éoliennes avec leur turbine.

Nous nous sommes atteler à valider le model de sorte à vérifier que nous avons belle et bien une sommation des puissances d'éoliennes

En t avons étudié le cas où une ferme d'éoliennes est branchée au réseau et alimente directement des charges non linéaires avec un convertisseur direct.

Les résultats de simulation qu'on a obtenus pour un parc éolien sont les mêmes que les résultats d'une seule éolienne avec MADA sauf ils ont avec des grandes perturbations. Pour résoudre ce problème, nous superposé d'utilisé un filtre actif parallèle.

**Chapitre V**  
**Etude et simulation d'un système PV**  
**en vue d'une intégration dans un**  
**Système hybride**



*Table de matière*

**Chapitre v : Etude et simulation d'un système PV en vue d'une intégration dans un système hybride**

V.1	Introduction.....
V.2	Définition du système d'énergie hybride (S.E.H).....
V.3	Définition d'une Cellule photovoltaïque .....
V.4	Principe de fonctionnement.....
V.	Modélisation d'une cellule photovoltaïque .....
▪	Modèle de cellule.....
V.6	Panneau photovoltaïque.....
V.7	Simulation et Interprétation.....
V.8	Les convertisseurs DC-DC (hacheurs).....
V.9	Conclusion.....

*Liste des tableaux*

Tableau V-1	Caractéristiques électriques du PB 2150S .....	78
-------------	--	----

*Liste des figures*

Figure (V-1)	Structure basique d'une cellule solaire .....
Figure (V-2)	Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire .....
Figure (V-3)	Schéma électrique équivalent d'une cellule PV .....
Figure (V-4)	Schéma de simulation du panneau PV BP solar 2150S .....
Figure (V-5)	Caractéristique Courant-Tension du panneau PV .....
Figure (V-6)	Caractéristique Puissance-Tension du panneau PV .....
Figure (V-7)	Circuit électrique de base du hacheur survolteur .....
Figure (V-8)	Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost
Figure (V-9)	Ondulation du courant de l'inductance .....
Figure (V.10)	Ondulation sur la tension de condensateur .....

***Bibliographie***

- [74] M.Blhadj « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome » Mémoire de Magister Centre Universitaire de Bechar 2007-2008.
- [75] I.Bendjamaa « Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque » Mémoire de Magister Université Abou-Baker Blkaid-Tlemcen 2011/2012.
- [76] W.Bensaci « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT » Mémoire de Master Université Kasdi Merbah-Ouargla 2011/2012.
- [77] N. Abouchabana, « Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT », Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.
- [78] Mme.OBEIDI, « Commande des hacheurs MPPT par logique floue », Ecole Nationale Polytechnique Mémoire de Magister, 2006.
- [79] M.N.Mchalikh et CH.Hmada « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau » Mémoire de Master Université Kasdi Merbah–Ouargla 2013.
- [80] D. REKIOUA, Z. ROUMILA et T. REKIOUA, « Etude d'une centrale hybride photovoltaïque - éolien – diesel », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11 N°4 623 – 633, 2008.
- [81] A. Labrouet et M. Viloz, « Energie Solaire Photovoltaïque » (3e édition), Paris,(2006).
- [82] D. SAHEB-KOUSSA, M.BELHAMEL, « Production d'électricité sans interruption moyennant un système hybride (éolien – photovoltaïque – diesel) » Revue des Energies Renouvelables, ICRES-07 Tlemcen 121 – 128, 2007.

## **V.1 Introduction**

Pour un développement durable, le recours à l'utilisation des systèmes énergétiques à sources d'énergies renouvelables est devenu de plus en plus pertinent.

Les solutions technologiques proposées par les générateurs hybrides, présentent par un intérêt considérable par leur flexibilité incomparable, leur souplesse de fonctionnement et leur prix de revient attractif.

Cependant, ces solutions exigent au préalable un dimensionnement basé sur une connaissance approfondie du gisement en énergies renouvelables du site d'implantation à l'amont, une gestion rigoureuse de l'énergie électrique produite à l'aval et un savoir-faire que seule l'expérience dans l'ingénierie des systèmes énergétiques pourra assurer. Cette gestion rigoureuse de l'énergie s'appuie sur l'intelligence des dispositifs de régulation et de contrôle rendu possible grâce à des logiciels très performants. Ces installations hybrides devraient connaître, à moyen terme un intérêt certain grâce à leur flexibilité vis-à-vis des sources d'énergie primaire.

Nous allons présenter dans ce chapitre les différentes caractéristiques du système hybride éolien-photovoltaïque, en ce basant sur les différents éléments constitutifs de ce système.

## **V.2 Définition du système d'énergie hybride (S.E.H) :**

Le système hybride de production de l'énergie dans sa vue la plus générale, est celui qui combine et exploite plusieurs sources disponibles facilement mobilisables [82]. Il consiste en l'association de deux ou plusieurs technologies complémentaires de manière à accroître la fourniture d'énergie par une meilleure disponibilité. Les sources d'énergie comme le soleil et le vent ne délivrent pas une puissance constante, et leur combinaison peut permettre de parvenir à une production électrique plus continue. Dans bien de régions, les journées ensoleillées

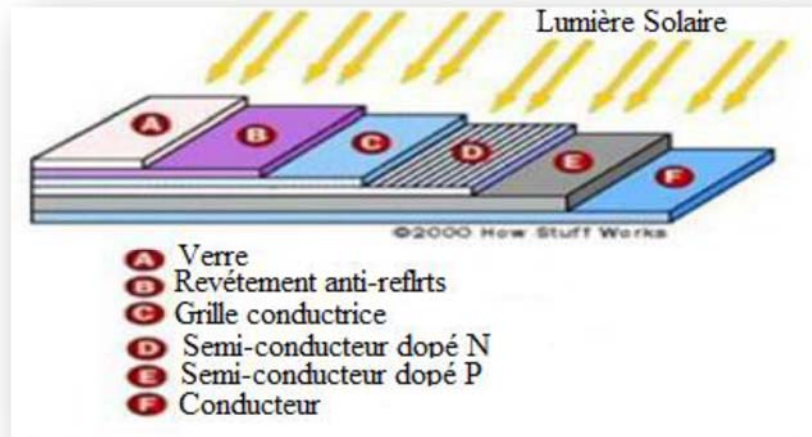
sont en général caractérisées par une activité éolienne faible alors que les vents forts sont observés plutôt lors de journées nuageuses ou la nuit [80].

### **V.3 Définition d'une Cellule photovoltaïque :**

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation Photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement

L'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- d'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.
- d'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- d'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.
- les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.



**Figure (V-1) : Structure basique d'une cellule solaire**

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule [74]

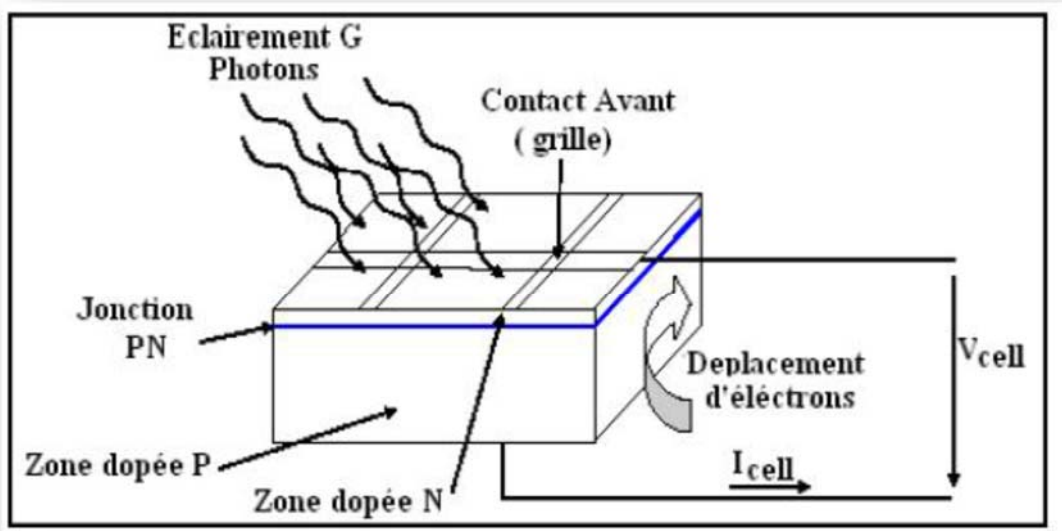
#### **V.4 Principe de fonctionnement**

Il existe différentes techniques permettant la conversion directe de la lumière solaire en électricité, la plus connue est la conversion photovoltaïque effectuée à l'aide de matériaux semi-conducteurs tel que le silicium (Si), le germanium (Ge), le sélénium (Se) ou les composés semi-conducteurs tels que l'arséniure de gallium (GaAs), le tellure de cadmium (CdTe). Les cellules solaires de type GaAs sont très coûteuses dans leur fabrication, leur utilisation est aujourd'hui essentiellement limitée aux applications spatiales. La majorité des cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir du silicium cristallin, car il possède la caractéristique d'être non toxique contrairement au cadmium ou au sélénium, en plus, il permet d'atteindre des efficacités de conversion remarquables, il constitue environ 28 % de l'écorce terrestre sous forme de composés (silicates, silice), ce qui en fait une source quasi inépuisable.

La cellule solaire à semi-conducteur est un dispositif permettant de débiter un courant électrique dans une charge externe lorsque celui-ci est exposé à la lumière, son principe de fonctionnement se résume comme suit :

Lorsque la cellule est exposée au rayonnement solaire, les photons d'énergie ( $E_{ph} = h\nu$ ) pénétrant dans la cellule solaire transmettent leur énergie aux atomes de la jonction. Si cette énergie est suffisamment élevée, elle peut faire passer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction du matériau semi-conducteur et créer ainsi des paires «électron- trou». Les électrons (charges N) et les trous (charges P), sont alors maintenus séparés par un champ électrique qui constitue une barrière de potentiel.

Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel et un courant électrique circule. Figure (I -2) [75].



**Figure (V-2) : Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire**

Les cellules les plus répandus actuellement sont à base de silicium (différence de potentiel de (0.6 V) [75].

## V.5 Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

### Modèle de cellule :

Une cellule photovoltaïque a un comportement équivalent à une source de courant shuntée par une diode figures (V-3). Le modèle est complété par une résistance série  $R_s$  due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière et une résistance parallèle ou shunt  $R_{sh}$  qui provient des contacts métalliques et des résistances de fuite sur la périphérie de la cellule. [81].

Il existe plusieurs schéma d'une cellule photovoltaïque et nous avons utilisé le modèle basé sur le schéma d'une cellule photovoltaïque complète vu sa simplicité.

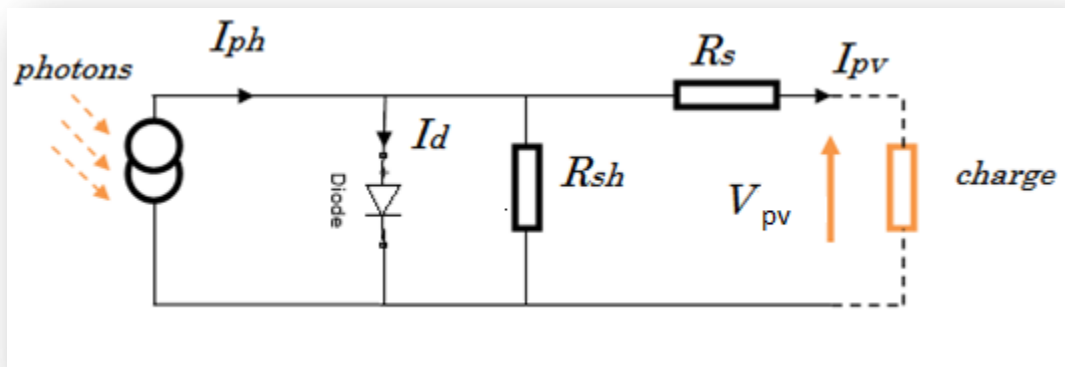


Figure (V-3) : Schéma électrique équivalent d'une cellule PV

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (V.1)$$

$I_{pv}$  : Courant généré par la cellule photovoltaïque ;

$I_{ph}$  : Photon courant créé par la cellule ;

$I_d$  : Le courant circulant dans la diode ;

$I_{sh}$  : Le courant circulant dans la résistance  $R_{sh}$  ;

$I_{os}$  : le courant de court-circuit de la cellule à la température de référence  $T_r$  et l'éclairement de référence ;

$K$  : la constante de Boltzmann  $1.3854e-23J/K$  ;

$V_{pv}$  : la tension aux bornes de cette même cellule ;



Le courant passant par la résistance  $R_{sh}$  est donné par :

$$I_{sh} = \frac{V_d}{R_{sh}} \quad (\text{V.2})$$

Le courant de la jonction  $I_d$  est donné par :

$$I_d = I_s (e^{\frac{V_d}{V_{th}}} - 1) \quad (\text{V.3})$$

Avec :

$$V_{th} = \frac{A.K.T_{mod}}{q} \quad (\text{V.4})$$

$$T_{mod} = T_c + T_{ref} + G \left( \frac{NOCT-20}{800} \right) \quad (\text{V.5})$$

Le courant de saturation dépend de la température, son expression est sous la forme :

$$I_s = I_{os} \left( \frac{T_{mod}}{T_r} \right)^3 e^{\frac{q.Eg}{A.K} \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_{mod}} \right)} \quad (\text{V.6})$$

Avec NOCT étant Condition de température nominale de fonctionnement de la cellule qui est donnée par le constructeur (Data-Sheet).

La tension  $V_d$  est donnée par :

$$V_d = V_{pv} + R_s I_{pv} \quad (\text{V.7})$$

Le photon-courant est proportionnel a l'éclairement et dépend aussi de la température. Son expression est la suivante :

$$I_{ph} = [I_{cc} + K_i (T_{mod} - T_r)] \frac{G}{G_0} \quad (\text{V.8})$$

En remplaçant dans (V.1) les équations (V.2), (V.3) et (V.8), nous obtenons :

$$I_{pv} = [I_{cc} + k_i (T_{mod} - T_r)] \frac{G}{G_0} - I_s \left( e^{\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_{th}}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \quad (\text{V.9})$$

## V.6 Panneau photovoltaïque

Nous avons choisi Le BP Solar 2150S. Qui est un panneau photovoltaïque composé de 72 cellules monocristallines en série, ayant une puissance maximale de 150w et considéré dans les conditions standards (STC : Standard Test Conditions)  $G = 1000 \text{W/m}^2$ ;  $T_c = 25^\circ\text{C}$ . Pour réaliser la modélisation de ce module, nous avons utilisé MATLAB comme outil de tests et de simulation.

**Tableau V-1 : Caractéristiques électriques du PB 2150S**

Grandeurs	Valeurs
Puissance nominale	150 W
Tension au MPP ( $V_{pm}$ )	34.0 V
Courant au MPP ( $I_{pm}$ )	4.45 A
Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )	4.75 A
Tension du circuit ouvert ( $V_{co}$ )	42.8 V
Coefficient de température de ( $I_{cc}$ )	$(0.065 \pm 0.015)\% / ^\circ\text{C}$
Coefficient de température de ( $V_{co}$ )	$-(160 \pm 20) \text{ mV} / ^\circ\text{C}$
Coefficient de température de puissance	$-(0.5 \pm 0.05)\% / ^\circ\text{C}$
NOCT	$47 \pm 2^\circ\text{C}$

## V.7 Simulation et interprétation

Pour l'analyse du fonctionnement du panneau photovoltaïque choisi, basé sur le modèle précédemment une série de simulations été réaliser et les résultats obtenus sont présentés :

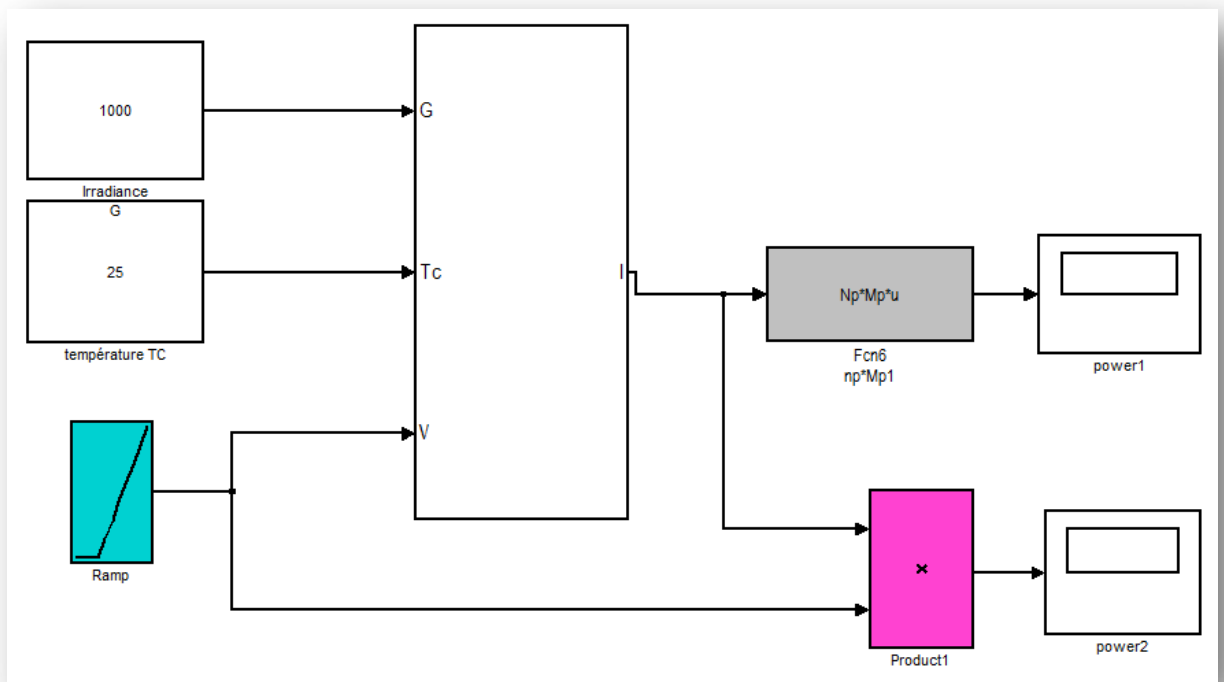


Figure (V-4) : Schéma de simulation du panneau PV BP solar 2150S

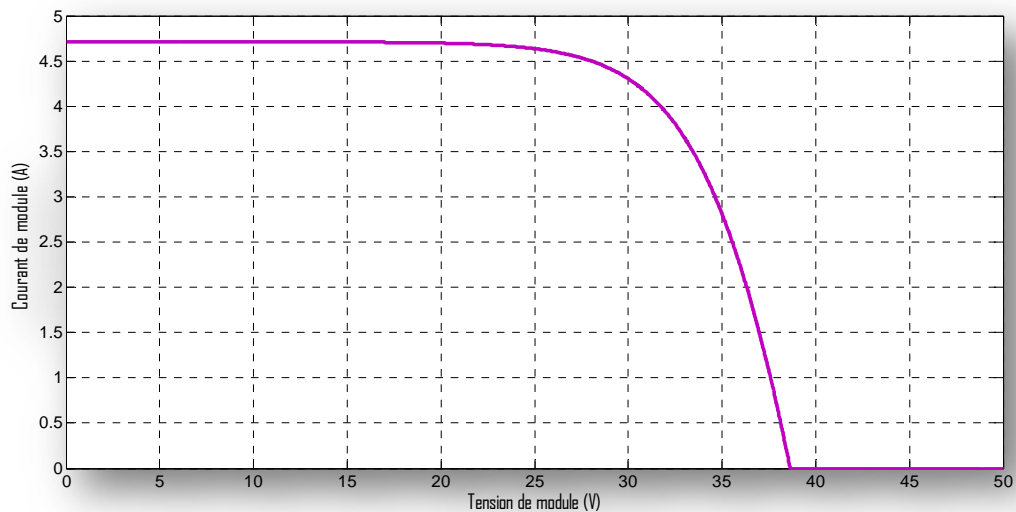
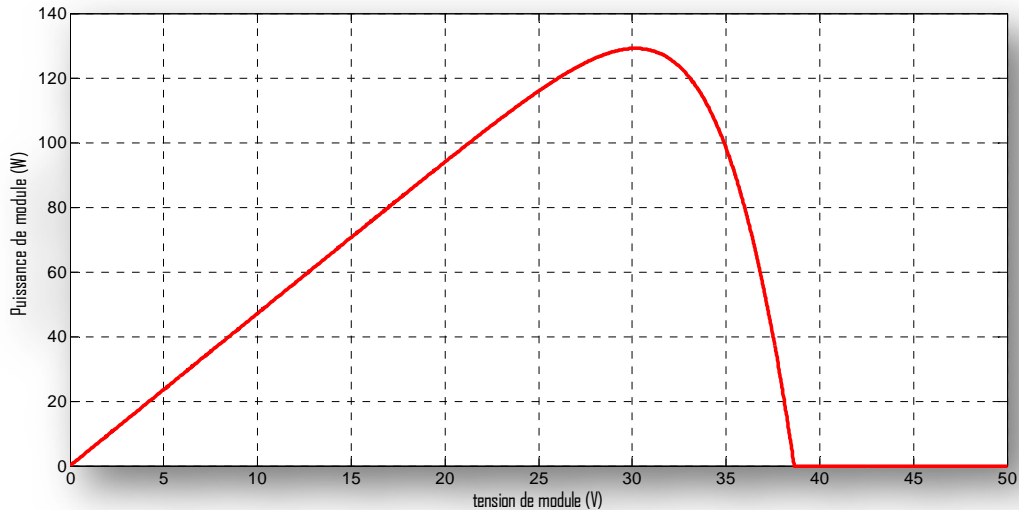


Figure (V-5) : Caractéristique Courant-Tension du panneau PV

Figure (V-5) présente la caractéristique Courant-Tension du panneau PV pour l'éclairement  $G = 1000 \text{ W/m}^2$  et de température  $T_c = 25^\circ\text{C}$



**Figure (V-6) : Caractéristique Puissance-Tension du panneau PV**

Figure (V-6) présente la caractéristique Puissance-Tension du panneau PV pour l'éclairement  $G = 1000 \text{ W/m}^2$  et de température  $T_c = 25^\circ\text{C}$

### **V.8 Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)**

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu- continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé [75].

L'hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs [75].

- **Le hacheur survolteur (Boost):**

Le convertisseur Boost est connu par le nom d'élévateur de tension. Le schéma de la figure (V-7), représente le circuit électrique du Boost. Au premier temps ( $\alpha T$ ), le transistor (S) est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période. Ensuite, le transistor (S) s'ouvre et l'inductance (L) s'opposant à la diminution de courant (IL), génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge (R) à travers la diode (D).[78]

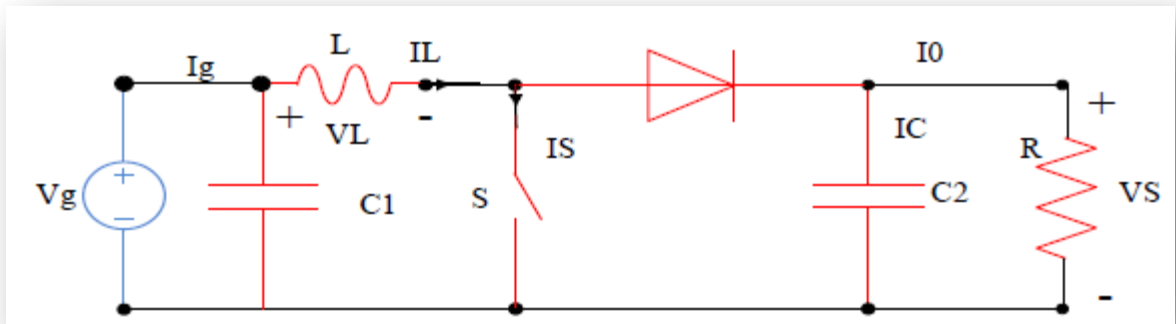


Figure (V-7) : Circuit électrique de base de l'hacheur survolteur

**Fonctionnement :**

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée, le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle. Pendant le temps, l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à  $V_o (1 - \alpha) = V_i$ . [79]

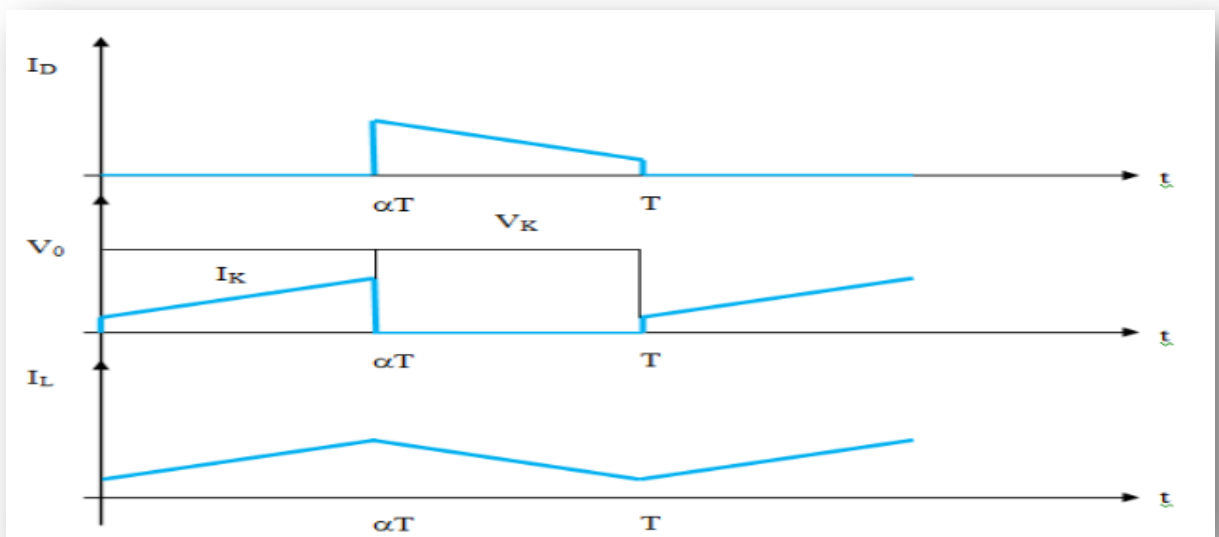


Figure (V-8) : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost

### Détermination des paramètres de l'hacheur Boost

Les calculs des paramètres de l'hacheur Boost se fait à l'aide des formules ci-dessous :

- Le rapport cyclique ( $\alpha$ ) :

$$V_{pv} = V_c \frac{1}{1-\alpha} \rightarrow \alpha = 1 - \frac{V_c}{V_{pv}} \quad (\text{V.16})$$

- Résistance (R) :

$$P_c = \frac{V_c^2}{R} \rightarrow R = \frac{V_c^2}{P_c} \quad (\text{V.17})$$

- L'inductance (L) :

Sachant que le courant aux bornes de l'inductance est représenté par la figure suivante :

Nous aurons ainsi :

$$\Delta i_L = \frac{1}{2} (i_L(\alpha T_s) - i_L(0)) \quad (\text{V.18})$$

Ainsi l'inductance (L) peut être calculée comme suit :

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \rightarrow V_{pv} = L \frac{di_L}{dt} \quad (\text{V.19})$$

En utilisant  $V_L(t) = V_{pv}$  dans le premier sous-intervalle. Le courant  $i_L$  à la fin de la première période est donné par :

$$i_L(\alpha T_s) = i_L(0) + \frac{V_{pv}}{L} (\alpha T_s) \quad (\text{V.20})$$

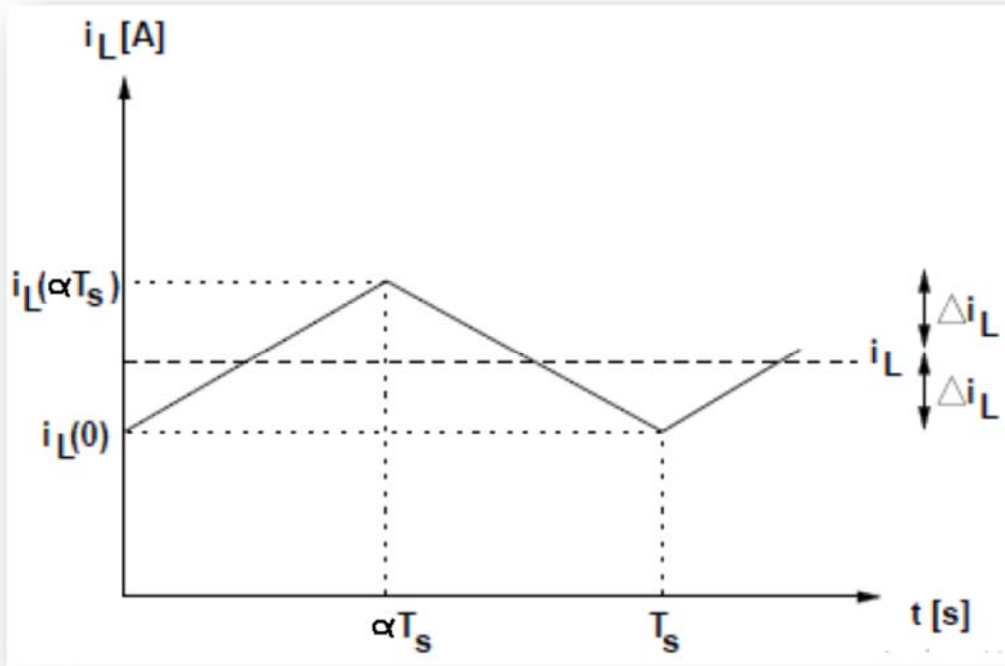


Figure (V-9) : Ondulation du courant de l'inductance

Si on remplace ce dernier dans la première équation on obtient :

$$\Delta i_L = \frac{1}{2} \frac{V_{pv}}{L} (\alpha T_s) \quad (V.21)$$

Et on en déduit la formule utilisée pour calculer la valeur de L'inductance L :

$$L = \frac{V_{pv}}{2\Delta i_L F_s} \alpha \quad (V.22)$$

Avec  $F_s = \frac{1}{T_s}$

- Capacité (C) :

Sachant que la tension aux bornes du condensateur est représentée par la figure suivante :

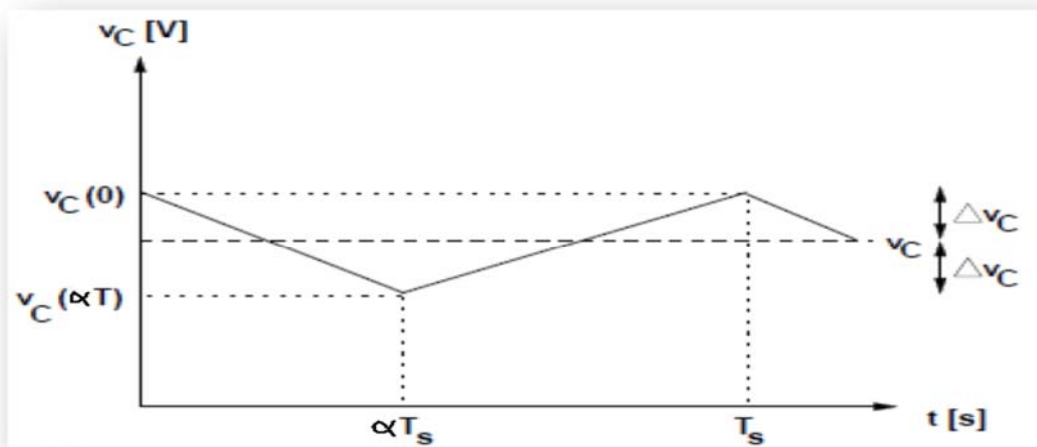
Nous aurons ainsi :

$$i_c = C \frac{dV_c}{dt}$$

$$\int_{-\Delta V_c}^{\Delta V_c} V_c = \frac{1}{c} \int_0^{\alpha T_s} i_c dt \quad (V.23)$$

$$-2\Delta V_c = -\frac{1}{c} \frac{V_s}{R} \alpha T_s$$

$$C = \frac{V_c}{2\Delta V_c R F_s} \alpha \quad (V.24)$$



**Figure (V-10) : Ondulation sur la tension de condensateur**

## **V.9 Conclusion**

Ce chapitre nous a permis de donner un aperçu général sur le système d'énergie hybride (S.E.H) qui combine deux systèmes très populaires actuellement dans le marché de la production d'énergie électrique d'origine renouvelable, les systèmes photovoltaïques et les systèmes éoliens.



### **Conclusion générale :**

Au cours de notre mémoire, nous avons établi dans un premier temps une vue générale sur les systèmes éoliens. En deuxième temps, on a abordé une modélisation du système à étudié intégrant une turbine avec machine asynchrone à double alimentation pour pouvoir aboutir en dernier à la réalisation d'une ferme éolienne à six aérogénérateurs en vue d'intégrer une alimentation de condensateur de l'onduleur par panneaux photovoltaïque.

Le premier chapitre a traité des généralités sur des différents types d'éoliennes existant : les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal. Nous avons également traité les avantages et les inconvénients des éoliennes et nous avons présenté les programmes de recherche de l'énergie éolienne en Algérie

Dans le chapitre deux, et après avoir présenté l'étude et la simulation d'un aérogénérateur en faisant une étude comparative sur les coefficients de puissances que ce soit à vitesse fixe ou variable, ce qui nous a permis d'identifier la méthode et le  $C_p$  optimale pour la suite du travail.

Dans le chapitre trois, nous avons effectué la modélisation et simulation du système complet (MADA + Turbine) soumise à des vitesses du vent variable pour une commande directe. Nos résultats ont été très satisfaisants vu que nos puissances actives et réactives de la MADA ont suivi les consignes respectivement.

Pour ce qui est du chapitre quatre, nous avons étudié une ferme éolienne à six turbines qui alimente directement des charges non linéaires avec un convertisseur direct. Les résultats de simulation de notre ferme éolienne ont présenté certains dysfonctionnements (Courant important côté réseau) .

Enfin, le dernier chapitre a été réservé à l'étude d'un système hybride, on a modélisé une cellule photovoltaïque utilisant le panneau photovoltaïque du type « Bp 2150 S » et présentation d'un hacheur Boost afin de présenter la configuration potentiel d'un aérogénérateur hybride.

En perspective, il existe différentes pistes de développement, à savoir :

- Validé le model complet de la MADA avec turbine en donnant une certaine attention aux grandeurs de courant coté réseau ;
- Etablir un meilleur dimensionnement du système éolien ;
- Intégré une commande intelligente à nos MADA ;
- Validé l'intégré du système photovoltaïque à notre aérogénérateur.

## *Bibliographie*

- [1] T. Douadi, « Etude et commande d'un système éolien à base d'une génératrice asynchrone », thèse de magistère de l'université de EL Hadj Lkhdar –Batna, option maitrise d'énergie,
- [2] R. Redjem, « Etude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne », thèse magistère de l'université de Mentouri –Constantine, option modélisation et commande des machines électriques, 4 juillet 2007
- [3] A. Davigny – « Participation aux services système de fermes d'éolienne à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 2007.
- [4] F.Poitiers, «Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne», thèse de doctorat de l'université de Nantes, soutenue le 19/12/2003.
- [5] N. LAVERDURE, "Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires", Thèse de Doctorat en Génie Electrique, , France, 2005.
- [6] A. Abdelli « Optimisation multicritère d'une chine éolienne passive », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse,France, 2007.
- [7] L. Leclercq – « Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 2004.
- [8] Thèse R .BAÏLE «Analyse et modélisation multi fractales de vitesses de vent application à la prévision de la ressource éolienne», université de Corse le 18 Octobre 20 10.
- [9] K.GHEDAMSI, « Contribution à la modélisation et la commande d'un Convertisseur direct de fréquence. Application à la conduite de la machine Asynchrone », Thèse de Doctorat, ENP Alger (Algérie), 2008.
- [10] N.MEKKAOUI« Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée » Université De Batna. 2004
- [11] L. Khettache « Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique à double alimentation » thèse de magister, université de Batna, 2007.
- [12] M.S.Abdoulaziz« Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne », Mémoire d'ingénieur Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2007.
- [13] A.DAVIGNY« participation aux système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie » ,thèse de doctorat ,université des science et technologie de lilli,2007
- [14] L. Chang – « Systèmes de conversion de l'énergie éolienne », IEEE Canadian Review - summer / Eté 2002, pp. 1-5.
- [15] A. Tounzi , « Utilisation de l'énergie éolienne dans la production de l'électricité », Journées du club EEA, 28-29 Janvier, 1999, Paris, France, pp.1-14.
- [16] M. Liserre, R. Cárdenas, M. Molinas, J. Rodríguez,"Overview of Multi-MW Wind Turbines and Wind Parks," *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 4, pp. 1081–1095, April 2011.

- 
- [17] N.laverdure, I. Valero, S. Bacha, L.Gerbaud, ' « Optimisation de l'interfaçage de puissance dans les systèmes éolien »', GEVIQ'2002, Marseille ,2002
- [18] site: [www.cap-nrj.fr](http://www.cap-nrj.fr) – « Le principe de fonctionnement de l'éolien », consulté décembre 2009.
- [19] Hilloowala RM,Sharaf, « A utility interactive wind energy conversion scheme with asynchronous DC link using a supplementary control loop ».IEEE Transactions on Energy Conversion 9(3) :558\_563,1994.
- [20] SEMMAR Mohamed « L'énergie éolienne pour prévenir l'avenir sous un climat sain et propre » Bul. Ene. Ren, CDER, N°14, Déc. 2008, p.8-9-10
- [21] B. Multon, «Energie électrique : les enjeux». Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2008.
- [22] E. Muljadi, K. Pierce et P. Migliore – « Control strategy for variable-speed, stall-regulated wind turbines », American Controls Conference, Philadelphia, PA , Juin 24-26, 1998.
- [23] R. Pena, J. C. Clare et G. M. Asher – « A doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters supplying an isolated load from a variable speed wind turbine », IEE Proc-Electr, Power Appl, vol 143, No 5, September 1996.
- [24] <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Les-impacts-lies-a-la-production-d.html>
- [25] <http://www.sonelgaz.dz/?page=article&idb=3>
- [26] [www.explorateurs-energie.ch](http://www.explorateurs-energie.ch)
- [27] <http://www.edf.com/html/panorama/production/renouvelable/hydro/fonctionnement.html>
- [28] [http://etat.geneve.ch/dt/site/protection-environnement/energie/master-content.jsp?](http://etat.geneve.ch/dt/site/protection-environnement/energie/master-content.jsp?ComponentId=kmelia239&pubId=5290&nodeId=1428)  
Component Id=kmelia239& pubId=5290&nodeId=1428
- [29] Site Internet de l' Association Danoise de l'industrie éolienne,  
<http://www.windpower.org/fr/core.htm>.
- [30] [histoire\\_energie\\_eolienne.txt](#)
- [31] M.MAYOUF « contribution a la modélisation de l'aérogénérateur synchrone a aimants permanents » thèse magister de l'université de Biskra, option énergie renouvelable, 2008
- [32] S.BOURDIM « contribution au diagnostic des générateurs utilisés dans les systèmes éoliens », thèse de doctorat en sciences en électrotechnique, de l'université de Batna, Soutenue le 14/06/2015
- [33] F.MAZOUZ « Commande d'un système éolien à base d'un générateur synchrone à aimants permanents » thèse magister de l'université de Batna, option électrotechnique ,2013
- [34] A. Mirecki – « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, 2005
- [35] M.BOUHADOUZA Boubekeur « Amélioration de la Stabilité Transitoire des Fermes Eoliennes par l'utilisation du STATCOM »**thèse** de Magistère, université Ferhat Abbas Sétif, 2011

- 
- [36] Griche I. « Etude de la Stabilité Transitoire des Systèmes Electriques en Présence des Fermes Eoliennes » thèse de magister, Université de Sétif 2008.
- [37] S. NOUHOU, «Étude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne»,Thèse (2007), École Nationale Polytechnique ,Algérie.
- [38] Vincent ROGEZ « modélisation simplifiée de source de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux. Application à l'intégration d'une production éolienne dans un réseau de distribution insulaire.
- [39] M.Mokhnache, « étude de la stabilité d'une ferme éolienne connectée à un réseau électrique avec des dispositifs facts », thèse de magister, université Ferhat Abbas, Sétif, 2012.
- [40] S. El Aimani, Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau moyenne tension. Thèse de doctorat - Spécialité Génie électrique, Ecole Centrale de Lille -Université des Sciences et Technologies de Lille, 2004.
- [41] Gaillard. A. « Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service ». Thèse de doctorat d'état en génie électrique, université Henry Poincaré, Nancy 1. 2010.
- [42] O.FEDDAOUI« Contribution à l'Etude des Systèmes Hybrides de Génération » , Application aux Energies Renouvelables Mémoire de Magister ,Spécialité : Electrotechnique Option : Commande des Machines Electriques ,Université de Souk - Ahras (2013-2014)
- [43] Hamzaoui, et al., «Improvement of the performances MPPT system of wind generation, in» Electronics, Communications and Photonics Conference (SIEPC),2011 Saudi International, 2011, pp. 1-6.
- [45] Aida Baghbany Oskouei <sup>a,\*</sup>, Mohamad Reza Banaei <sup>a</sup>, Mehran Sabahi <sup>b</sup> « Hybrid PV/wind system with quinary asymmetric inverter without increasing DC-link number», ELECTRICAL ENGINEERING 2015
- [46] Lei Tian\*, Qiang Lu, Wen-zhuo Wang « A Gaussian RBF Network Based Wind Speed Estimation Algorithm for Maximum Power Point Tracking», ICSGCE 2011: 27–30 September 2011, Chengdu, China
- [47] Sanae Rechka, Gille Roy, Sebastien Dennetiere Et Jean Mahseredjian « modélisation de système électromagnétique multi-masse à base de machine asynchrone, à l'aide des outils matlab , avec application aux éoliennes» département de génie électrique ,section énergie électrique école polytechnique de Montréal EPM-RT-2004.
- [48] Nesmat Abu-Tabak. Stabilité dynamique des systèmes électriques multi machines : modélisation, commande, observation et simulation. Automatique / Robotique. Ecole Centrale de Lyon, 2008. Français. <tel-00343722v2>
- [49] O. Barambones, P. Alkorta « Wind turbine output power maximization based on sliding mode control strategy», IEEE 2010, pp.364-369.
- [50] S. J. Chiang, K. T. Chang and C. Y. Yen, “ Residential Photovoltaic Energy Storage System ”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 45, No. 3, June 1998.

- 
- [51] Y. Elbia « Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté ». Thèse de magister en électrotechnique, option commande électrique. Université Hadj lakhdar, BATNA, 2009
- [52] B. Kelkoul « Etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation » Thèse de magister API option automatique . Université , Tlemcen, 2011.
- [53] B. TOUAL «Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable ». Thèse de magister en électrotechnique, option machines électrique. Université Hadj lakhdar , Batna 2010.
- [54] M-K. Touati « Étude D'une Génératrice Éolienne Connectée Au Réseau Électrique». Thèse de magister en électrotechnique, option Réseaux électrique. Université Hadj lakhdar , Batna 2015.
- [55] Y. Alhassoun, « Etude et Mise en Œuvre de Machines à Aimantation Induite Fonctionnant à Haute Vitesse », Thèse de doctorat, Université de Toulouse 27 Mai 2005.
- [56] N.GHEDBANE ET A.MEDJADI«Commande de la Machine Asynchrone à Double Alimentation à base d'un régulateur *RST* »,Mémoire d'ingénieure université Med Boudiaf de M'sila ,2005.
- [57] MELLOUL Ahmed «Simulation et diagnostic d'une machine asynchrone à double alimentation d'une éolienne ». Thèse de magister en électrotechnique, option Diagnostic des Machines Electriques. UNIVERSITE FERHAT ABBAS,SETIF 2011.
- [58] I. HAMZAOUI « Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur » Thèse de Magister, ENP d'Alger, 2008.
- [59] M-A. HASSAD «Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques.». Thèse de magister en électrotechnique, option Commande électrique. Université SETIF 2012.
- [60] N. HAMDI «Modélisation et commande des génératrices éoliennes » thèse de magister, Option : Machines électriques, université Université MENTOURI de CONSTANTINE, 2008.
- [61] R. Azzazia « Etude et commande d'une machine asynchrone a double alimentation alimentée par un convertisseur multi-niveaux », Mémoire Magister 2008 ,Université de Boumerdes .Algérie
- [62] L. Baghli « Contribution à la Commande de la Machine Asynchrone, Utilisation de la Logique Floue, des Réseaux de Neurones et des Algorithmes Génétique », Thèse de Doctorat, Université de Henri Poincaré, Nancy-I, France, 1999.

- [63] P-E.VIDAL « Commande non- linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation », l'institut national polytechnique de Toulouse, France, Thèse de doctorat 2004.
- [64] Telli Abderahim « étude et commande d'une éolienne a vitesse variable intégrée au réseaux MT » , Thèse de magister en électrotechnique ,option réseaux électrique ,université d'Oran 2012
- [65] K. GHEDAMSI, « Contribution à la modélisation et la commande d'un convertisseur direct de fréquence. Application à la conduite de la machine asynchrone », Thèse de Doctorat, ENP Alger (Algérie), 2008.
- [66] H. Camblong « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable », Thèse de doctorat, 18 décembre 2003, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux
- [67] H.S.vicators , J.A Tegopoulos , Fellow .IEEE « Transient State Analysis of A Doubly .FED induction generator under Three Phase short circuit» IEEE national Technical University of Athens, Département of électrique engineering 106 82. Athens .GREECE .IEEE .Transactions on Energy conversion, Vol. 6, NO. 1, March 1991.
- [68] Karim Belmokhtar, Mamadou Lamine Doumbia, IEEE Member, Kodjo Agbossou, « Modélisation et commande d'un système éolien à base de machine asynchrone à double alimentation pour la fourniture de puissances au réseau électrique », Département de génie électrique et de génie informatique ,Université du Québec à Trois-Rivières
- [69] O. Carlson, A. Grauers, J. Svensson , A.Larsson , « A comparison of electrical systems for variable speed operation of wind turbines », European wind energy conf., 1994, p. 500-505.
- [70] Guy Sturtzer Eddie Smigiel, « Modélisation et commande des moteurs triphasés », Ellipses édition marketing S.A. 2000.
- [71] Tarak Ghennam, « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes a base de machine asynchrone a double alimentation. » Autre. Ecole Centrale de Lille; Ecole Militaire polytechnique Alger, 2011
- [72] Michaël PIERROT, l'énergie éolienne et son fonctionnement Futura-Sciences, 05/08/2006
- [73] <http://www.cder.dz>
- [74] M.Blhadj « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome » Mémoire de Magister Centre Universitaire de Bechar 2007-2008.



- [75] I.Bendjamaa « Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque »Mémoire de Magister Université Abou-Baker Blkaid-Tlemcen 2011/2012.
- [76] W.Bensaci « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT » Mémoire de Master Université Kasdi Merbah-Ouargla 2011/2012.
- [77] N. Abouchabana, « Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT », Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.
- [78] Mme.OBEIDI, « Commande des hacheurs MPPT par logique floue », Ecole Nationale Polytechnique Mémoire de Magister, 2006.
- [79] M.N.Mchalikh et CH.Hmada « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau » Mémoire de Master Université Kasdi Merbah–Ouargla 2013.
- [80] D. REKIOUA, Z. ROUMILA et T. REKIOUA, « Etude d'une centrale hybride photovoltaïque - éolien – diesel », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11 N°4 623 – 633, 2008.
- [81] A. Labrouet et M. Viloz, « Energie Solaire Photovoltaïque » (3e édition), Paris,(2006).
- [82] D. SAHEB-KOUSSA, M.BELHAMEL, « Production d'électricité sans interruption moyennant un système hybride (éolien – photovoltaïque – diesel) » Revue des Energies Renouvelables, ICRES-07 Tlemcen 121 – 128, 2007.

## ANNEXE A

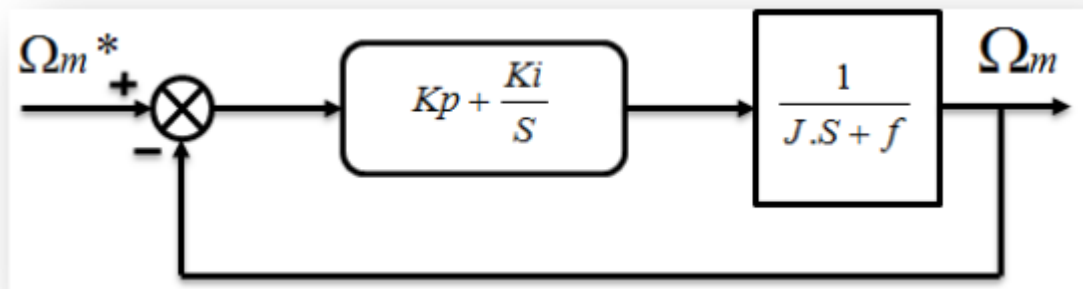
### A.1 Identification des régulateurs

Les régulateur classique permet de contrôler la précision et la rapidité des systèmes asservis, ils sont le prisés dans l'industrie. Nous avons travaillé avec deux régulateur, Régulateur Proportionnelle-Intégral PI et régulateur Intégral-Propotionnelle IP

### A.2 Régulateur de vitesse de la turbine:

#### A.2.1 Régulateur PI :

Notre système est corrigé par un régulateur de type proportionnel intégral (PI) dont la fonction de transfert est de la forme  $\left[K_p + \frac{K_i}{S}\right]$ . La figure II.11 montre l'asservissement de la vitesse  $\Omega_m$ -ref en boucle fermé.



**Figure A.1 :** Système à régulé par PI

La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par :

$$FTBO = \frac{K_p \cdot S + K_i}{S} + \frac{1}{J \cdot S + f}$$

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par la formule suivante :

$$FTBO = \frac{\frac{K_p \cdot S + K_i}{J}}{S^2 + \frac{K_p + f}{J} \cdot S + \frac{K_i}{J}}$$

Sachant que la pulsation naturelle et le coefficient d'amortissement sont donnés par :

$$\omega_n^2 = \frac{K_i}{J} \Rightarrow \omega_n = \sqrt{\frac{K_i}{J}}$$

Et :

$$\xi = \frac{K_p + f}{2 \cdot \omega_n \cdot J}$$

Donc les paramètres du régulateur deviennent alors:

$$K_p = 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot J - f \qquad K_i = j \cdot \omega_n^2$$

## ANNEXE B

### B.1 Régulation de puissance :

Le schéma bloc de régulation de puissance active et réactive avec un régulateur PI représenté par la figure B.1

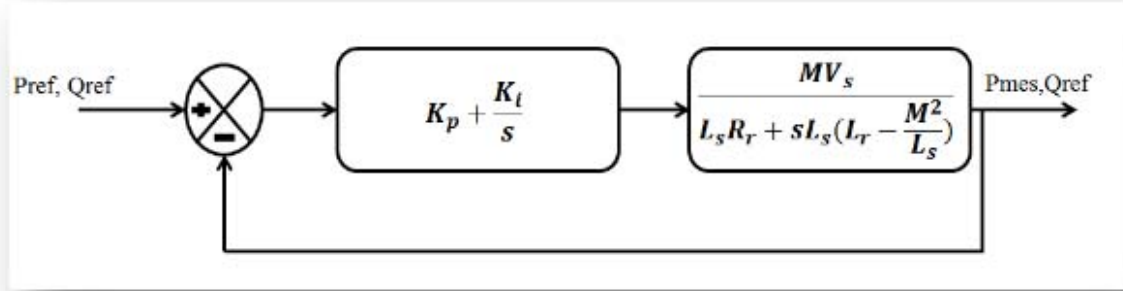


Figure B.1: Schéma d'un Régulateur PI de puissance

La fonction de transfère en boucle ouvert est:

$$FTBO = \frac{M \cdot V_s (K_p \cdot S + K_i)}{s \left[ L_s + R_r + sL_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \right]}$$

La fonction de transfère en boucle fermé est donner par :

$$FTBF = \frac{(K_p \cdot S + K_i) M \cdot V_s}{sL_s R_r + S^2 L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) + (K_p \cdot S + K_i) M \cdot V_s}$$

$$FTBF = \frac{(K_p \cdot S + K_i) M \cdot V_s}{S^2 L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) + s(L_s R_r + M \cdot V_s K_p) \cdot MV_s K_i}$$

$$FTBF = \frac{\frac{(K_p \cdot S + K_i) M \cdot V_s}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{s^2 + s \frac{(L_s R_r + M \cdot V_s K_p)}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} + \frac{MV_s K_i}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}$$

On a l'équation :

$$FT = \frac{K \omega_n^2}{s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2}$$

Par identification de l'équation (B.5) avec l'équation (B.4) on obtient :

$$2\xi\omega_n = \frac{(L_s R_r + M \cdot V_s K_p)}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \Rightarrow 2\xi\omega_n \cdot L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) = (L_s R_r + M \cdot V_s K_p)$$

$$K_p = \frac{2\xi\omega_n \cdot L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) - L_s R_r}{M V_s}$$

$$\omega_n^2 = \frac{M V_s K_i}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}$$

$$K_i = \frac{\omega_n^2 \cdot L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{M V_s}$$

## B.2 Régulation de vitesse :

Le régulateur de vitesse permet de déterminer couple de référence, afin de maintenir la vitesse correspondant. La dynamique de vitesse est donnée par l'équation mécanique suivant:

$$C_{em} - C_r = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega \Rightarrow C_{em} - C_r = J \cdot \Omega_s + f \cdot \Omega$$

$$\Rightarrow C_{em} - C_r = (J_s + f) \Omega$$

$$\Rightarrow \Omega = \frac{C_{em} - C_r}{(J_s + f)} = \frac{C_{ref}}{(J_s + f)} = \frac{\omega}{p}$$

$$\frac{\omega}{C_{ref}} = \frac{p}{(J_s + f)}$$

La régulation de vitesse avec régulateur PI est représentée par la figure B.2.

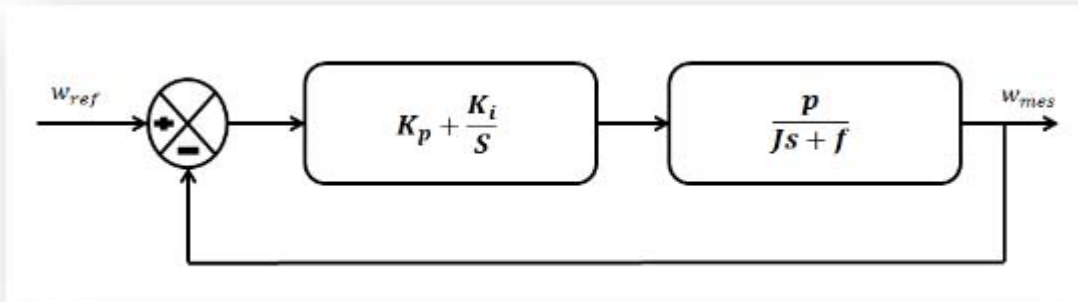


Figure B.2: Schémas d'un régulateur PI de vitesse.

La fonction de transfère en boucle ouvert est:

$$FTBO = \frac{(sK_p + K_i)p}{s(JS + f)}$$

La fonction de transfère en boucle fermé est donnée par :

$$FTBF = \frac{(sK_p + K_i)p}{s(JS + f) + (sK_p + K_i)p}$$

$$FTBF = \frac{(sK_p + K_i)p}{Js^2 + s(f + pK_p) + K_i p}$$

$$FTBF = \frac{\frac{(sK_p + K_i)p}{J}}{s^2 + \frac{s(f + pK_p)}{J} + \frac{K_i p}{J}}$$

Par identification de l'équation B.5 avec l'équation B.13 nous obtenons :

$$2\xi\omega_n = \frac{(f + pK_p)}{J} \Rightarrow K_p = \frac{2\xi\omega_n J - f}{p}$$

$$\omega_n^2 = \frac{K_i p}{J} \Rightarrow K_i = \frac{\omega_n^2 J}{p}$$

### B.3 Régulation de la tension du bus continue :

La régulation des transites de puissance permet d'imposer le courant capacitif au bus continu. Le réglage du bus continu est alors réalisée au moyen d'une boucle de régulation, permet de maintenir une tension constante du bus continue, avec deux types de correcteur PI et IP générant la référence de la tension a injecté dans le condensateur C

Il est à noter que le réglage du bus continu est donc réalisé par une boucle externe de régulation

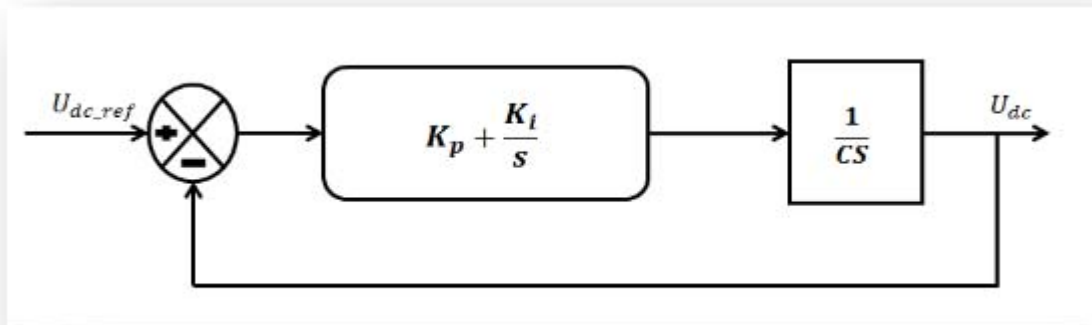


Figure. B.3: Commande en boucle fermée de la tension Du bus continu avec régulateur PI

La fonction de Transfer en boucle ouvert est comme suit :

$$FTBO = \frac{K_p s + K_i}{C \cdot s^2}$$

La fonction de Transfer en boucle fermé est comme suit :

$$T(S) = FTBF = \frac{K_p s + K_i}{C \cdot s^2 + K_p s + K_i}$$

On divise le dénominateur et le numérateur de l'équation par C est en trouve:

$$T(S) = \frac{\frac{K_p s + K_i}{C}}{s^2 + \frac{K_p}{C} \cdot s + \frac{K_i}{C}}$$

Après identification du dénominateur de l'équation avec celui de la fonction de transfert du second ordre utilisé précédemment, nous obtenons :

$$2\xi\omega_n = \frac{K_p}{C} \qquad \omega_n^2 = \frac{K_i}{C}$$

Donc :

$$K_p = 2\xi\omega_n \cdot C \qquad K_i = \omega_n^2 \cdot C$$

Paramètres	
Partie mécanique (Turbine)	Vitesse du vent =4.5m/s <i>Angle de calage = 0 °</i> <i>Densité de l'air <math>\rho=1.25</math></i> <i>Gain du multiplicateur :15</i> R=30 m ro=1.25; G=15; R=4; c=114.6; J=1000 fv=0.0024; epsilon=0.7;
Partie électrique (MADA)	Tension du réseau : $V_s =230$ Pn = 5 kw p=2 Vdc=400 V Rs= 0.455 $\Omega$ Rr= 0.19 $\Omega$ j=0.03125 f=6.73e-3; Ls= 0.069977 H Lr= 0.0213H M= 0.034024 H wn=170 sigma=1-(m <sup>2</sup> /(ls*lr)) epsilon=0.707; C=12e-3; Rf=0.1; Lf=1e-3 J=1000 kg.m2 f= 0.0024

## **Résumé**

A travers notre mémoire nous nous sommes penchés sur l'étude et simulation d'une ferme éolienne à vitesse variable. Pour ce faire, dans un premier temps on a modélisé chacune des parties mécaniques et électriques (Turbines, arbre mécanique, multiplicateur, machine asynchrone double alimentation (MADA), suite à quoi on a validé le modèle (turbine + mada) afin d'extraire le maximum de la puissance (MPPT) et d'avoir le meilleur rendement possible, pour cela deux algorithmes de commandes ont été établis (avec et sans asservissement de la vitesse de rotation) où un seul type de régulateur a été utilisé (PI). Ainsi une commande directe en puissance active et réactive statorique de la MADA en mode continu a été élaborée. En suite on s'intéresse à la modélisation et aux performances de la ferme vis-à-vis des puissances active et réactive en vue de son intégration dans un réseau électrique triphasé équilibré alimentant sur une charge non linéaire. Notre ferme éolienne est constituée de 6 turbines montées parallèles. Nous avons terminé notre travail par une brève présentation d'une cellule photovoltaïque en vue de l'intégrer à une éolienne pour obtenir en dernier lieu un système hybride.

### **mots clés :**

Energie éolienne, Turbine, MADA, MPPT, ferme éolienne, cellule photovoltaïque, système hybride

### **Abstract :**

Through our memory, we are to look at the study and simulation of a wind farm at variable speed. In a first step, was modeled each of the mechanical and electrical parts of our system (Turbines, mechanical shaft, gearbox, DFIG) whereupon, we validated the model (turbine + dfig) to extract the maximum power (MPPT) and to have the best possible performance. For this objective, two algorithms were established controls (with and without rotation speed control) where only one controller type was used (PI). Thus direct control of active power and reactive stator of DFIG in continuous mode was developed. As a result, it was interested in modeling and firm performance about their active and reactive power in view of its integration in an electrical network connected to different non-linear load. Our wind farm consists of six parallel mounted turbines. We finished our work by a brief presentation of a photovoltaic cell for the integrated a wind turbine for last a hybrid system.

**Keywords:** Wind Power Turbine MADA, MPPT, wind farm, solar cell, hybrid system.