



République Algérienne Démocratique et Populaire



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf
Faculté de Génie Electrique
Département d'Automatique

Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Magister

Spécialité : Ecole Doctorale de Génie Electrique

Option : Automatique

Présenté par

Mr. TARFAOUI BOUMEDIENE

Commande par mode Flou Glissant de la Machine Asynchrone Double Alimentée utilisée en Aérogénérateur

Soutenu le : 19 Octobre 2015

Devant le jury composé de :

Président	Mr OMARI Abdelhafid	Professeur	USTO M.B
Encadreur	Mr HAZZAB Abdeldjebbar	Professeur	UTMBechar
Co-Encadreur	Mr BOUHAMIDA Mohamed	Professeur	USTO M.B
Examineur	Mr MANSOURI Abdellah	Professeur	ENPOran
Examineur	Mr ZEMELACHE MEGUENNI Kadda	Maitre Conf. (A)	USTO M.B

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail,

- *A la tendresse de mon cœur, à qui je dois énormément et que je ne remercierais jamais assez : mes parents : hadj Kaddour et hadja Aicha ;*
- *To my love and life : my wife ;*
- *A mon aîné Badis ;*
- *A ma fille Amani Ahlem ;*
- *Spécial dédicace à mon fils Abdelkader (Kakilou) que j'aime profondément*
- *A mes frères et sœurs ainsi que leurs petites familles.*
- *A tout mes amis du travail.*
- *A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pour réaliser ce mémoire.*

BOUMEDIENE TARFAOUI

Remerciements

Ce travail a été préparé au sein du laboratoire CAOSEE de l'Université de Bechar ;

Je tiens surtout à assurer ma sincère reconnaissance, mon plus grand respect et ma totale gratitude à Mr. A. HAZZAB, mon encadreur à l'Université de Bechar pour tous les efforts, l'aide, le soutien et les encouragements qu'il a montré tout au long de ce travail et aussi pour tant de compréhension, et de disponibilité dont il a fait preuve.

J'exprime ici ma gratitude et ma profonde reconnaissance à mon co-encadreur que je lui dois du respect, Mr. M. BOUHAMIDA Professeur à l'USTO pour ses précieuses remarques fructueuses pour l'achèvement de ce travail.

C'est un honneur pour moi que Mr. A. OMARI Professeur à l'USTO ait accepté d'en assumer la tâche de président.

Messieurs les membres de jury : K. ZEMELACHE MEGUENNI, et A. MANSOURI qui ont bien voulu honoré de participer à mon jury, de juger mon travail, le commenter et l'enrichir par leurs remarques, je les en suis profondément reconnaissant.

Mes sincères gratitudes à MM : I. K. Bousserhane , O.Boughazi, à mes amis A.Brika et M.Belkacem et à tous les enseignants de l'université qui m'ont aidé à réaliser ce travail.

Mes remerciements s'adressent aussi et sans cesse à tous mes amis et collègues de travail de la DDBR, en particulier ceux de la DTE qui m'ont soutenu et aidé à réaliser ce mémoire.

BOUMEDIENE TARFAOUI

Item	Désignation	Page
-	Introduction générale.....	2
<u>CHAPITRE 1 ETAT DE L'ART DE LA MADA</u>		
I.1.	Historique.....	5
I.2.	Introduction.....	7
I.3.	Définition de l'énergie éolienne.....	8
I.4.	L'énergie éolienne à l'échelle mondiale.....	9
I.5.	Développement de l'énergie éolienne dans le monde.....	10
I.6.	Atlas de la vitesse moyenne annuelle du vent	14
I.6.1.	Données utilisées	14
I.6.2.	Atlas de la vitesse du vent	16
I.7.	Emplacement des parcs éoliens.....	16
I.8.	Technologie des éoliennes	17
I.8.1.	Puissance des éoliennes	17
I.8.2.	Différents types d'éoliennes.....	18
I.8.2.1.	Eoliennes à axe vertical.....	19
I.8.2.2.	Eoliennes à axe horizontal	19
I.8.3.	Caractéristiques technologiques des éoliennes	21
I.8.3.1.	Le Mâts (pylônes)	22
I.8.3.2.	La nacelle	22
I.8.3.3.	Le Rotor (moyeu)	22
I.8.3.4.	Les Pales	23
I.8.3.5.	Le multiplicateur	23
I.8.4.	Classement des éoliennes	23
I.8.4.1.	Les éoliennes à vitesse fixe.....	24
I.8.4.1.1.	Les éoliennes à décrochage aérodynamique stall.....	24
I.8.4.1.2.	Les éoliennes à pales orientables pitch.....	24
I.8.4.2.	Les éoliennes à vitesse variable.....	24
I.8.4.2.1.	Principe de fonctionnement.....	24
I.8.4.2.2.	Intérêt de la vitesse variable.....	25
I.8.5.	Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne	26
I.8.5.1.	Les éoliennes à décrochage aérodynamique stall	26
I.8.5.2.	Les éoliennes à pales orientables pitch	26
I.9.	Le génie électrique dans le vent	27
I.9.1.	Direction et vitesse du vent.....	28
I.9.2.	Loi de Betz	29
I.9.3.	Coefficient de puissance.....	30
I.9.4.	Coefficient de couple	32
I.10.	Avantages et Inconvénient de l'énergie éolienne	32
I.10.1.	Avantages	32
I.10.2.	Inconvénients.....	33
I.11.	Conclusion	33

CHAPITRE 2 MODELISATION DU SYSTEME EOLIEN

II.	Modélisation du système éolien	35
II.1.	Modélisation de la MADA.....	36
II.1.1.	Introduction	36
II.1.2.	Description de la MADA.....	36
II.1.3.	Structure de la MADA.....	37
II.1.4.	Modes de fonctionnement de la MADA.....	37
II.1.4.1	Mode moteur	38
II.1.4.2	Mode générateur	38
II.1.5.	Hypothèses simplificatrices de la modélisation.....	39
II.1.6.	Modèle naturel triphasé de la MADA.....	39
II.1.7.	Modèle de la MADA dans le repère de Park.....	41
II.1.8.	Choix du système d'axes.....	43
II.1.9.	Expression du couple électromagnétique.....	44
II.1.10.	Modèle de la MADA sous forme d'état	45
II.2.	Modélisation de la turbine	47
II.2.1.	Introduction	47
II.2.2.	Partie Aérodynamique (le Vent).....	47
II.2.3.	Partie mécanique.....	48
II.2.3.1.	modèle de la turbine.....	48
II.2.3.2.	modèle du Multiplicateur	49
II.2.3.3.	modèle de l'arbre.....	50
II.2.4.	Synthèse du régulateur P-I pour le contrôle de la vitesse.....	51
II.3.	Modélisation de la source d'alimentation	53
II.3.1.	Introduction	53
II.3.2.	Modélisation du redresseur triphasé à diodes	54
II.3.3.	modélisation du filtre	55
II.3.4.	Association onduleur – MADA (rotor)	57
II.3.5.	Stratégie de commande par MLI triangulo-sinusoïdale	61
II.4.	Simulation du système éolien Turbine – MADA.....	63
II.4.1.	Simulation.....	63
II.4.2.	Résultats de simulation.....	64
II.5.	Conclusion.....	67

CHAPITRE 3 COMMANDE VECTORIELLE DE LA MADA

III.1.	Introduction	69
III.2.	Principe de la commande à flux orienté.....	69
III.3.	Stratégie de commande en puissance active et réactive de la MADA...	70
III.3.1.	Relations entre courants statoriques et courants rotoriques.....	70
III.3.2.	Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques.....	73
III.4.	Commande directe	75
III.4.1.	Définition générale.....	75
III.4.2.	Commande directe en puissance active et réactive de la MADA.....	76
III.5.	Commande indirecte	77
III.5.1.	Définition générale.....	77

III.5.2.	Commande indirecte en puissance active et réactive de la MADA.....	77
III.6.	Etude de la régulation pour la commande.....	79
III.6.1.	Synthèse du régulateur Proportionnel-Integral (PI).....	79
III.6.2.	Calcul des régulateurs.....	80
III.7.	Simulation	83
III.7.1.	Suivi de consignes.....	83
III.7.2.	Performances.....	85
III.7.3.	Robustesse.....	86
III.8.	Conclusion.....	88

CHAPITRE 4 COMMANDE PAR MODE GLISSANT DE LA MADA

IV.1.	Introduction.....	90
IV.2.	Théorie de la commande par mode de glissement.....	90
IV.3.	Généralités sur la théorie du contrôle par mode glissant	91
IV.3.1.	Structure par commutation au niveau de l'organe de commande	91
IV.3.2.	Structure par commutation au niveau d'une contre réaction d'état.....	92
IV.3.3	Structure par commutation au niveau de l'organe de commande	92
IV.4.	Conception de la commande par mode de glissement.....	93
IV.4.1.	Choix de la surface de glissement.....	93
IV.4.2.	Conditions de convergence et d'existence.....	94
IV.5.	Calcul de la commande.....	95
IV.6.	Commande de la MADA par mode glissant	98
IV.6.1.	Contrôle de la puissance active	99
IV.6.2.	Contrôle de la puissance réactive	100
IV.7.	Simulation.....	101
IV.7.1.	Suivi de consignes	101
IV.7.2.	Performances.....	102
IV.7.3.	Robustesse.....	103
IV.8.	Conclusion.....	104

CHAPITRE 5 COMMANDE FLOU DE LA MADA

V.1.	Introduction	106
V.2.	Principe généraux de la logique flou 'FLC'	106
V.2.1.	Ensemble flou	107
V.2.2.	Noyau	107
V.2.3.	Support.....	107
V.2.4.	Hauteur.....	107
V.2.5.	Ensemble normalisé	107
V.2.6.	Opérations	108
V.2.6.1.	L'intersection	108
V.2.6.2.	L'union	109
V.2.6.3.	La complémentation	109
V.2.6.4.	Formes de fonctions d'appartenances.....	109
V.2.7.	Illustration	110
V.3.	Structure générale d'un contrôleur flou.....	112
V.3.1.	Interface de fuzzification	113

V.3.2.	Base de règles	113
V.3.3.	Mécanisme d'inférence.....	114
V.3.3.1.	Méthode d'inférence MAX-MIN.....	114
V.3.3.2.	Méthode d'inférence Max-Produit	115
V.3.3.3.	Méthode d'inférence Somme-Produit	116
V.3.4.	Interface de déffuzzification	116
V.4.	Structures de base d'un contrôleur flou.....	117
V.4.1.	Contrôleur flou-PI.....	117
V.4.2.	Contrôleur flou-PD.....	118
V.4.3.	Contrôleur flou-PID.....	118
V.5.	Commande de la MADA par la Logique flou 'FLC'	119
V.5.1.	Configuration de la boucle de puissance.....	119
V.5.1.1.	Choix des variables	119
V.5.1.2.	Choix de l'univers de discours	120
V.5.1.3.	Choix des fonctions d'appartenances.....	120
V.5.1.4.	Choix de la méthode d'inférences.....	120
V.5.1.5.	Choix de la méthode de déffuzzification.....	120
V.6.	Résultats de simulation.....	121
V.6.1 .	Suivi de consigne	122
V.6.2 .	Performance	123
V.6.3 .	Robustesse	123
V.7.	Résultats de simulation.....	125
V.7.1 .	Suivi de consigne	125
V.7.2 .	Performance	125
V.7.3 .	Robustesse	126
V.7.4 .	Tableau comparatif des trois commandes	128
V.8	Conclusion.....	128

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Conclusion générale et perspective	129
--	-----

Liste des figures

Item	Désignation	Page
CHAPITRE 1 ETAT DE L'ART DE LA MADA		
Figure (I.1):	Moulin à vent au XII ^e siècle pour la produire de l'électricité.....	05
Figure (I.2):	Répartition de la puissance éolienne installée dans le monde.....	09
Figure (I.3) :	Evolution des puissances éoliennes installées dans le monde en MW.....	10
Figure (I.4) :	CEEG : Montage des éoliennes au site de Kaberten (Adrar)	12
Figure (I-5) :	Atlas de la vitesse moyenne saisonnière du vent 10 m du sol	16
Figure (I.6) :	Eolienne type : OffShore (Gauche) et OnShore (Droite).....	17
Figure (I.7) :	Taille des éoliennes en m en fonction des puissances en kW.	18
Figure (I.8) :	Technologies Horizontale et Verticale des éoliennes.....	18
Figure (I.9) :	Eoliennes à axe vertical	19
Figure (I.10) :	Eoliennes à axe horizontal	20
Figure (I.11) :	Eoliennes Amont et Aval du vent	20
Figure (I.12) :	Différents composants d'une éolienne.....	21
Figure (I.13) :	Eolienne à vitesse fixe.....	24
Figure (I.14) :	Eolienne à vitesse variable type MAS.....	24
Figure (I.15) :	Eolienne à vitesse variable type MADA.....	25
Figure (I.16) :	Caractéristique puissance générée en fonction de la vitesse de vent.....	25
Figure (I.17) :	Décrochage aérodynamique.....	26
Figure (I.18) :	Pales orientables	26
Figure (I.19) :	Puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent	27
Figure (I.20) :	Variation des vitesses moyenne du vent sur 1 an	29
Figure (I.21) :	La loi de Betz appliquée à une éolienne.....	30
Figure (I.22) :	Coefficient de puissance	31
Figure (I.23) :	Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.....	31
CHAPITRE 2 MODELISATION DU SYSTEME EOLIEN		
Figure (II.1) :	Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	35
Figure (II.2) :	Représentation schématique d'une MADA.....	36
Figure (II.3) :	Fonctionnement de la MADA en mode moteur	38
Figure (II.4) :	Fonctionnement de la MADA en mode générateur.....	38
Figure (II.5) :	Disposition des enroulements de la MADA	42
Figure (II.6) :	Modèle général de la MADA dans l'axe (u,v).....	42
Figure (II.7) :	Configuration d'une éolienne	47
Figure (II.8) :	Coefficient de puissance $C_p=f(\lambda)$	49
Figure (II.9) :	Schéma bloc de la turbine	50
Figure (II.10) :	Schéma bloc de turbine avec asservissement de la vitesse mécanique	51
Figure (II.11) :	Schéma Bloc du correcteur PI.....	51
Figure (II.12) :	Représentation du système d'alimentation de la MADA.....	53

Figure (II.13) :	Représentation du redresseur triphasé à diodes.....	54
Figure (II.14) :	Représentation de la tension de sortie du redresseur.....	55
Figure (II.15) :	Représentation du filtre passe –bas.....	55
Figure (II.16) :	Tension redressée et filtrée à l’entrée de l’onduleur rotorique.....	56
Figure (II.17) :	Schéma d’Association onduleur – MADA	57
Figure (II.18) :	Schéma simplifié d’un onduleur commandé en tension.....	58
Figure (II.19) :	Principe de commande en MLI sinus-triangulaire.....	61
Figure (II.20) :	Tensions simples de la sortie onduleur.....	62
Figure (II.21) :	Schéma global du système éolien "Turbine + MADA"	63
Figure (II.22) :	Caractéristique de la turbine	64
Figure (II.23)	Caractéristique statorique de la MADA	64
Figure (II.24)	Caractéristique rotorique de la MADA	65
Figure (II.25):	Puissance statorique Active et Réactive.....	65
Figure (II.26):	Puissance rotorique Active et Réactive.....	66
Figure (II.27):	Couple électromagnétique et Vitesse mécanique.....	66

CHAPITRE 3 COMMANDE VECTORIELLE DE LA MADA

Figure (III.1):	Schéma de principe du découplage de la MADA par analogie à la MCC	70
Figure (III.2):	Orientation du flux statorique sur l’axe "d".....	71
Figure (III.3):	Schéma Bloc du système à réguler	74
Figure (III.4):	Schéma Bloc de la Commande Vectorielle Directe	76
Figure (III.5):	Bloc de la Commande Vectorielle Indirecte sans boucle de puissance	78
Figure (III.6):	Bloc de la Commande Vectorielle Indirecte avec boucle de puissance.....	78
Figure (III.7):	Contrôle des puissances d’un système régulé par un PI.....	80
Figure (III.8):	Contrôle des courants d’un système régulé par un PI.....	81
Figure (III.9):	Ps et Qs de référence.....	83
Figure(III.10):	Couplage Puissance rotorique au Courant rotorique (Commande Directe).....	84
Figure(III.11):	Couplage Puissance rotorique au Courant rotorique (Commande Indirecte).....	84
Figure(III.12):	Rejet de perturbations (Commande directe).....	85
Figure(III.13):	Rejet de perturbations (Commande Indirecte).....	86
Figure(III.14):	Variation de Rr (+20%).....	86
Figure(III.15):	Variation de Ls (-10%).....	87
Figure(III.16):	Variation de Lr (-10%)	87
Figure(III.17):	Variation de M (+20%)	87

CHAPITRE 4 COMMANDE PAR MODE GLISSANT DE LA MADA

Figure(IV.1):	Trajectoire d'un système de deuxième ordre à VSC.....	91
Figure(IV.2):	Structure de régulation par commutation au niveau de l’organe de commande	91
Figure(IV.3):	Structure de régulation par commutation au niveau de la contre réaction d’état	92
Figure(IV.4):	Structure de régulation par ajout de la commande équivalente.....	92
Figure(IV.5):	Représentation Fonction « sign » de U_n	96
Figure(IV.6):	Représentation de la commande douce Fonction "sat".....	97
Figure(IV.7):	Représentation de la commande douce ; fonction "Smooth".....	97
Figure(IV.8):	Schéma bloc de la Commande de la MADA avec régulation SMC.....	98

Figure(IV.9):	Schéma bloc de simulation de la MADA par un régulateur SMC	101
Figure(IV.10):	Suivi de consigne Ps de Qs.....	102
Figure(IV.11):	Rejet de perturbations (SMC).....	102
Figure(IV.12):	Variation de Rr (+20%).....	103
Figure(IV.13):	Variation de Ls (-10%).....	103
Figure(IV.14):	Variation de Lr (-10%)	103
Figure(IV.15):	Variation de M (+20%)	104

CHAPITRE 5 COMMANDE FLOU DE LA MADA

Figure(V.1):	Comparaison d'un ensemble classique et d'un ensemble flou	107
Figure(V.2):	Format d'un ensemble flou normalisé.....	108
Figure(V.3):	Intersection de deux sous ensemble flous.....	108
Figure(V.4):	Union de deux sous ensemble flous.....	109
Figure(V.5):	Union et intersection de deux sous ensemble flous.....	109
Figure(V.6):	Représentation des variables binaires.....	110
Figure(V.7):	Représentation des variables floues	110
Figure(V.8):	Fonctions d'appartenance avec trois sous ensembles flous.....	111
Figure(V.9):	Fonctions d'appartenance avec cinq sous ensembles flous.....	112
Figure(V.10):	Structure d'un système de contrôle flou.	112
Figure(V.11):	Etude du comportement du système.....	113
Figure(V.12):	Méthode d'inférence Max-Min.....	115
Figure(V.13):	Méthode d'inférence Max-Prod.....	115
Figure(V.14):	Méthode d'inférence floue somme-Produit.....	116
Figure(V.15):	Schéma de principe d'un contrôleur flou type PI.....	117
Figure(V.16):	Schéma de principe d'un contrôleur flou type PD.....	118
Figure(V.17):	Schéma de principe d'un contrôleur flou type PID.....	118
Figure(V.18):	Schéma bloc de la commande de la MADA.....	120
Figure(V.19):	Fonctions d'appartenance avec cinq sous ensembles flous.....	120
Figure(V.20):	Schéma bloc de la Commande de la MADA avec régulation FLC.....	121
Figure(V.21):	Schéma bloc de simulation de la MADA par un régulateur FLC	122
Figure(V.22):	Suivi de consigne Ps de Qs.....	122
Figure(V.23):	Rejet de perturbations (FLC).....	123
Figure(V.24):	Variation de Rr (+20%).....	123
Figure(V.25):	Variation de Ls (-10%).....	124
Figure(V.26):	Variation de Lr (-10%)	124
Figure(V.27):	Variation de M (+20%)	124
Figure(V.28):	Suivi de consigne Ps de Qs.....	125
Figure(V.29):	Rejet de perturbations	125
Figure(V.30):	Variation de Rr (+20%).....	126
Figure(V.31):	Variation de Ls (-10%).....	126
Figure(V.32):	Variation de Lr (-10%)	127
Figure(V.33):	Variation de M (+20%)	127

Liste des symboles

V_1	La vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur
V_2	La vitesse du vent de l'aérogénérateur en aval.
v_{moy}	La vitesse moyenne du vent
m	La masse de l'air traversant la surface balayée par le rotor
ρ	La masse volumique de l'air
S	La surface balayée par le rotor
P_m	La puissance extraite du vent par la turbine
P_{mt}	La puissance extraite du vent par la turbine non perturbée
β	Angle de calage
R	Longueur de la pale
$C_{aér}$	Le coefficient de couple aérodynamique
C_{mec}	Le couple mécanique de la turbine
K	Rapport de multiplication
C_{em}	Le couple électromagnétique de la génératrice
C_p	Coefficient de puissance de l'aérogénérateur
λ	La vitesse relative de l'éolienne.
$v_{as,r}$	Tension statorique et rotorique triphasée de la phase "a"
$i_{as,r}$	Courant statorique et rotorique triphasé de la phase "a"
$\Phi_{as,r}$	Flux statorique et rotorique de la phase "a"
$V_{ds,r}$	Tension statorique et rotorique diphasée sur l'axe d,
$V_{qs,r}$	Tension statorique et rotorique diphasée sur l'axe q,
$i_{ds,r}$	Courant statorique et rotorique diphasée sur l'axe d,
$i_{qs,r}$	Courant statorique et rotorique diphasée sur l'axe q,
$\Phi_{ds,r}$	Flux statorique et rotorique diphasé sur l'axe d,
$\Phi_{qs,r}$	Flux statorique et rotorique diphasé sur l'axe q,
Ω_{mec}	La vitesse mécanique du générateur
Ω_{ref}	La vitesse mécanique de référence du générateur
Ω_t	La vitesse mécanique de la turbine
$\omega_{s,r}$	Pulsation électrique des grandeurs statoriques et rotorique
P	Nombre de pair de pôles

F	La fréquence statorique
f_c	Coefficient de frottement visqueux
$L_{s,r}$	Inductance propre par phase statorique et rotorique
M_{sr}	Inductance mutuelle stator-rotor
$R_{s,r}$	Résistance par phase statorique et rotorique
M	Inductance mutuelle maximale
θ	Position angulaire phase statorique/rotorique
$\theta_{s,r}$	Position angulaire phase statorique et rotorique sur l'axe d
P_{em}	La puissance électromagnétique
P_s, Q_s	Puissance active et réactive statorique
P_r, Q_r	Puissance active et réactive rotorique
P_{ref}, Q_{ref}	Puissance active et réactive de référence
g	Glissement
K_i	Gain intégral.
ξ	Le coefficient d'amortissement
J	L'inertie totale des parties tournantes
s	Opérateur de Laplace
V_{DC}	Tension de sortie du redresseur
V_{red}	Tension redressée
C	Capacité du filtre
L	Inductance du filtre
I_a	Courant induit
I_f	Courant d'excitation
K	Gain du multiplicateur
g	Glissement
FT_{BO}	Fonction de transfert en boucle ouverte
τ_r	Temps de réponse du système
$e(x)$	erreur entre la variable à réguler et sa référence
$S(x)$	La surface de glissement
u	Le vecteur de commande
U_{eq}	Grandeur de commande équivalente
U_n	Grandeur discontinue

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale :

Depuis l'aube de l'humanité, la production de l'énergie était basée en une grande partie sur les combustibles comme le bois, les fossiles (charbon, pétrole, gaz...), puis l'uranium. Mais le grand problème accompagnant l'utilisation de ces matières est l'émission de gaz et les dégagements massifs de composés divers ; ce qui déséquilibre notre planète et pousse vers un cycle ouvert non renouvelable.

En à peine plus d'un siècle, l'énergie avec l'électricité comme forme moderne a pris une place de premier plan. Sa production couvre le tiers de la consommation énergétique mondiale qui est concentrée principalement dans des machines thermomécanique où la combustion est à sa grande échelle avec l'émission directe de plusieurs millions de tonnes de CO₂ provoquant des degrés élevés de la pollution et de la température ; ainsi que la réduction des réserves naturelles [1].

Alors, on a besoin de chercher d'autres solutions alternatives aux énergies fossiles pour produire l'électricité avec des sources renouvelables non polluantes et plus économiques en exploitant bien les éléments de la nature comme l'eau, le soleil et le vent.

C'est dans cet objectif que vient s'insérer notre étude qui porte sur l'une des énergies renouvelables en développement à ce moment qui est l'énergie éolienne. Nous allons nous intéresser à l'état actuel des avancées technologiques qui ont permis la construction et le bon fonctionnement des aérogénérateurs et leur insertion dans la production électrique.

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

La puissance éolienne installée au monde est de 238351 GW, les 10 premiers pays au monde totalisent 86.4%. C'est le cas de la chine, leader international avec une puissance éolienne installée de 62733MW qui devance les États-Unis avec 46919MW ensuite l'Allemagne avec 29060MW suivie de l'Espagne avec 21674MW, ensuite l'Inde avec 16084MW, la France avec 6800MW, l'Italie avec 6747MW, la Grande Bretagne avec 6540MW, le Canada avec 5265MW, le Portugal avec 4083MW, et le reste du monde avec 32445MW

La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs en Génie Electrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie. Afin de mieux exploiter les ressources éoliennes pour différentes conditions de vent.

Notre étude s'articule autour des chapitres suivants :

✓ Le premier chapitre est consacré à des statistiques sur le développement de l'énergie éolienne dans le monde, puis nous allons nous intéresser à l'état actuel des avancées technologiques qui ont permis la construction et le fonctionnement de ces aérogénérateurs, suivi par un état de l'art sur la conversion électromécanique à travers les différents types de génératrices utilisées et les convertisseurs qui leur sont associés.

Une grande partie des éoliennes installées de nos jours sont équipées de machines asynchrones à double alimentation (MADA). Cette génératrice permet une production d'électricité à vitesse variable, ceci permet alors de mieux exploiter les ressources éoliennes pour différentes conditions de vent.

✓ Le second chapitre est consacré à l'utilisation d'une génératrice asynchrone à double alimentation à vitesse variable dans un système éolien, la topologie et les domaines d'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation

✓ Le troisième chapitre présente une stratégie de commande vectorielle classique en puissances active et réactive statoriques appliquée au MADA, il sera alors possible de donner des valeurs de consignes indépendantes pour la puissance active et la puissance réactive, ceci nous offre la possibilité de régler en permanence la valeur de la puissance réactive que la machine va fournir au réseau. Différentes commandes vont être développées ici, l'une appelée commande directe qui effectue la régulation directement sur les puissances sans rendre en compte les couplages internes existants entre les puissances dans la MADA. Cette solution est simple à mettre en œuvre et permet d'obtenir rapidement des fonctionnements convenables de l'ensemble. Ensuite nous présentons la méthode indirecte qui s'occupe d'abord de réguler les courants rotoriques de la MADA et incorpore ensuite une boucle de régulation des puissances. Cette méthode, plus complexe, donne un fonctionnement similaire à celui de la méthode directe mais permet de maîtriser les courants rotoriques et nous permet le contrôle du facteur de puissance de même le filtrage actif des harmoniques. Dans ce même chapitre nous proposons, une synthèse du régulateur proportionnel intégral (PI), ainsi que les résultats obtenus par simulation.

✓ Les quatrième et cinquième chapitres seront consacrés à la commande robuste, c'est la commande par mode de glissement et logique flou. Cette commande consiste à remplacer les régulateurs proportionnel-intégral (PI) de la puissance active et réactive utilisés dans la commande vectorielle par des régulateurs plus robustes.

Les résultats obtenus en simulation ont été validés comparativement aux travaux des articles cités en bibliographie pour une MADA de 1,5 kW.

Nous finirons ce travail par une conclusion générale qui résume l'ensemble des résultats obtenus, des perspectives espérées sur les travaux futurs dans ce domaine de recherche

CHAPITRE 1

ETAT DE L'ART DE LA MADA

I.1. Historique

Le vent est engendré par les variations de la densité et de la pression de l'air, dues au réchauffement inégal de la terre par le soleil, et par la rotation de la terre; il s'agit donc d'une ressource naturelle renouvelable. Le vent causé par le mouvement de l'air contient une grande quantité d'énergie. Les moulins à vent ont servi pendant des milliers d'années à capturer une partie de cette énergie pour accomplir différents travaux utiles au profit des très anciennes populations.

Ce type de moulins est constitué d'un arbre et de lames horizontaux tournant dans le plan vertical. A partir de la perse et du moyen Orient, les moulins à vent à axe horizontal se sont répandus à travers les pays méditerranéens et l'Europe Centrale.

Le premier moulin à vent à axe horizontal est apparu en Angleterre vers 1180, en France en 1190 en Allemagne en 1222 et au Danemark en 1259. En Europe, les performances des moulins à vent ont été constamment améliorées entre le 12ème et le 19èmesiècle.[23]. Vers 1800, environ 20000 moulins à vent étaient en service en France, et au Pays Bas 90% de l'énergie utilisée dans l'industrie provenait du vent. Vers la fin du 19ème siècle, des moulins à vent d'un rotor de 20 à 30 mètres de diamètre étaient présents en Europe. Ils étaient utilisés non seulement pour moudre les grains de céréales mais aussi pour le pompage d'eau destiné à l'irrigation.

Il ne fait aucun doute que les moulins à vent ont connu dans le passé, un grand succès pour rendre service à l'homme à concrétiser ses besoins en énergie mécanique. Mais avec l'invention de la machine à vapeur, du moteur à explosion et du moteur diesel, le développement de l'électricité, leur exploitation est négligée et souvent abandonnée. L'utilisation du vent semble par conséquent de plus en plus délaissée et son avenir très compromis [2].

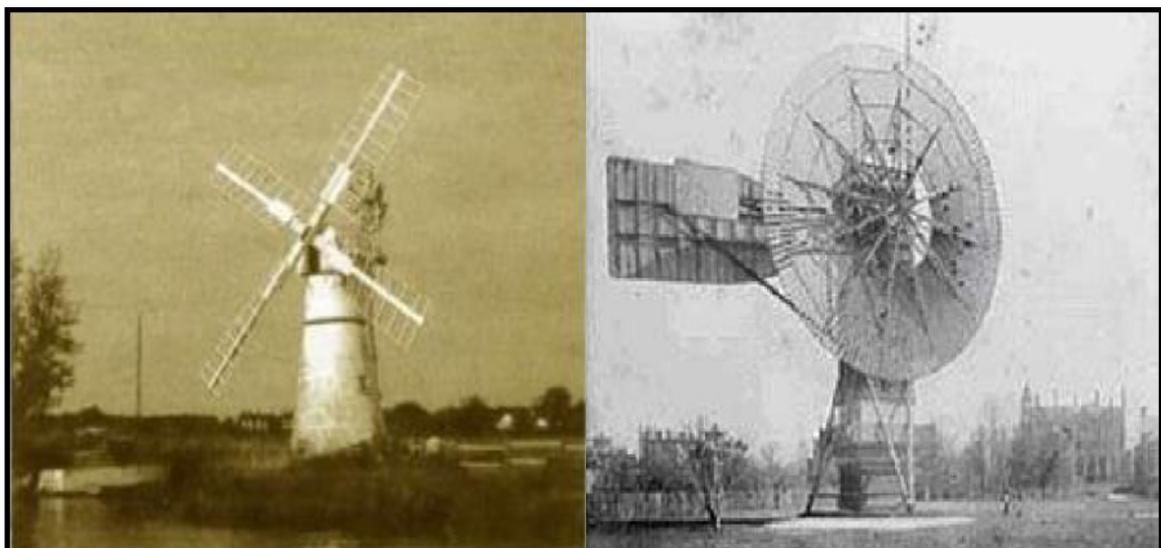


Figure (I.1) : Moulin à vent au XII° siècle pour la produire de l'électricité.[23]

Cependant l'histoire réserve parfois des surprises, car après la crise pétrolière de 1974, avec la diminution du stock mondial en hydrocarbure et surtout la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante et destructive pour l'environnement, l'énergie éolienne revient au premier plan de l'actualité et connaît un développement galopant. On cherche surtout à l'utiliser pour produire de l'énergie électrique suivant le principe exploité dans toutes les centrales électriques conventionnelles. Ainsi la demande mondiale d'éoliennes connaît une croissance rapide depuis une quinzaine d'années ; la majorité de la demande découle du souci d'aménager des centrales électriques utilisant des combustibles « moins polluants ».

On aménage maintenant des parcs à éoliennes multi-pales produisant plusieurs mégawatts. Au cours des dix dernières années, la puissance typique de génération d'électricité pour une seule éolienne est passée d'environ 100 kW à 2 MW ou davantage. Entre 1995 et la fin de 2011, environ 76% des nouvelles connections d'aérogénérateurs au réseau étaient installées en Europe [3].

Le développement de l'énergie éolienne est extrêmement rapide dans certains pays. La puissance installée mondiale a augmenté de 20,3 % entre 2010 et 2011.

Certaines éoliennes produisent uniquement de l'énergie mécanique, sans production d'électricité, notamment pour le pompage de l'eau dans des lieux isolés. Ce mode de fonctionnement correspond à celui des moulins à vent d'autrefois, qui entraînaient le plus souvent des meules de pierre ; en effet, la plupart des 20 000 moulins à vent à la fin du XVIII^e siècle en France servaient à la minoterie.

Pour le stockage énergie éolienne en 2011 : une autre méthode utilisée pour exploiter et stocker les productions excédentaires des éoliennes consiste à les coupler à des techniques de pompage-turbinage au sein de centrales hydro-éoliennes.

Une ferme éolienne génère de l'électricité grâce à des aérogénérateurs. Cette électricité est utilisée à 70% pour pomper de l'eau vers une retenue d'altitude. Les 30% restants sont envoyés sur le réseau. Lors des périodes de vent moindre, l'eau de la retenue est turbinée dans une unité hydroélectrique et stockée dans une retenue basse. L'électricité obtenue est envoyée sur le réseau.

I.2. Introduction

Bien que connue et exploitée depuis longtemps, l'énergie éolienne fut complètement négligée pendant l'ère industrielle, au profit quasi exclusif, si l'on excepte l'hydroélectricité, des énergies fossiles. L'énergie cinétique du vent peut être convertie directement en énergie mécanique et être utilisable par exemple dans les anciens moulins à vent ou pour actionner des pompes. Mais, de nos jours, on la transforme en énergie électrique par l'emploi d'aérogénérateurs. Le nouvel intérêt porté à l'énergie éolienne depuis la moitié des années 70 résulte de deux préoccupations : d'une part, la protection de l'environnement et l'économie des combustibles fossiles qui en résulte. D'autre part, l'évolution des technologies rend la conversion de cette énergie de plus en plus rentable et donc son utilisation devient économiquement compétitive par rapport aux sources traditionnelles de même puissance. Bien que les aérogénérateurs aient atteint une certaine maturité technique, la technologie des aérogénérateurs continue d'évoluer [2]. Les éoliennes de dernière génération fonctionnent à vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de diminuer les efforts mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe. C'est le développement des variateurs électroniques qui permet de contrôler la vitesse de rotation des éoliennes à chaque instant. Le vent est une grandeur aléatoire, de nature très fluctuante. Les variations de la puissance résultante des fluctuations du vent constituent la perturbation principale de la chaîne de conversion éolienne. De ce fait, les éoliennes sont considérées comme des génératrices de puissance variable. Connectées sur un réseau électrique, les générateurs éoliens n'imposent pas l'amplitude de la tension et ne règlent pas le rapport puissance-fréquence, autrement dit, elles ne participent pas aux services systèmes, et donc perturbent d'autant plus la stabilité des réseaux que leur taux de pénétration est important. Avec l'utilisation de l'électronique de puissance, de nouvelles technologies sont apparues pour optimiser cette génération d'énergie.

L'objectif principal des systèmes éoliens est la transformation d'une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. L'énergie éolienne, non polluante et économique a suscité un très grand intérêt et a exigé aux constructeurs de réfléchir toujours à de nouvelles solutions robustes, permettant l'extraction du maximum d'énergie et l'étude des différents systèmes réalisables.

Dans cette partie Outre leur principe de fonctionnement et caractéristiques mécaniques, nous nous intéressons à l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique.

En effet, il existe deux types d'éoliennes à savoir les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal. Ainsi dans ce qui suit nous allons énoncer en première partie une généralité sur les différents types d'éoliennes, ensuite nous allons nous intéresser plus particulièrement aux éoliennes rapides à axe horizontal qui sont non seulement les plus répandues, mais aussi les plus efficaces.

I.3. Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément est appelé éolien. Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, ce système connus sous l'appellation anglaise *Wind Energy Conversion Systems* (WECS). Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique et, d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable. Pour parvenir à cet objectif idéal, une éolienne doit comporter :

- Un système qui permet de la contrôler mécaniquement (orientation des pales de l'éolienne, orientation de la nacelle).
- Un système qui permet de la contrôler électriquement (Machine électrique associée à l'électronique de commande).

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [4].

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

De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores. On distingue deux grands types d'éoliennes :

- Les éoliennes à axe vertical : ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance. En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mât, souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal [4].
- Les éoliennes à axe horizontal : beaucoup plus largement employées, même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentent un rendement aérodynamique plus élevé, démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol [5].

Outre l'aspect visuel des éoliennes, leur impact sur l'environnement est réduit. Une éolienne ne couvre qu'un pourcentage très réduit de la surface totale du site sur laquelle elle est implantée, permettant alors à la plupart des sites de conserver leurs activités industrielles ou agricoles. Leurs nuisances sonores sont de plus relativement faibles.

I.4. L'énergie éolienne à l'échelle mondiale

L'énergie éolienne est utilisée par l'homme depuis très longtemps déjà. Elle remplaça les rames pour faire avancer les navires, elle fut utilisée pour actionner les meules des moulins, elle permet encore le pompage d'eau pour abreuver les bêtes dans les champs. Depuis plus de 100 ans, elle est utilisée pour produire de l'électricité, source d'énergie fondamentale dans notre société actuelle. En effet, on utilise l'électricité pour la plupart de nos activités, que ce soit dans le domaine domestique ou industriel. L'énergie éolienne est considérée comme la plus prometteuse des énergies renouvelables à développer pour remplacer le charbon, le pétrole, le gaz et même le nucléaire. Ainsi l'homme a souvent besoin d'énergie électrique dans des proportions faibles ou importantes selon l'utilisation qu'il en fait :

- ✓ Pour faire fonctionner des stations météo ou toutes autres installations électriques isolées à faible consommation, une éolienne de petite taille peut fournir cette énergie tout au long de l'année [1].
- ✓ Pour alimenter en éclairage des maisons ou villages dans des contrées isolées exposées au vent, des installations d'éoliennes de quelques mètres de diamètre sont choses courantes.
- ✓ Pour alimenter en électricité des villes tout en produisant une énergie propre, on utilise des éoliennes de plusieurs dizaines de mètres de diamètre pouvant produire jusqu'à 4.5 MW

À titre de comparaison, la puissance installée en énergie nucléaire est de **21 000 MW** en Allemagne, de **63 000 MW** en France et de **98 000 MW** aux Etats-Unis (Chiffres de 2003).

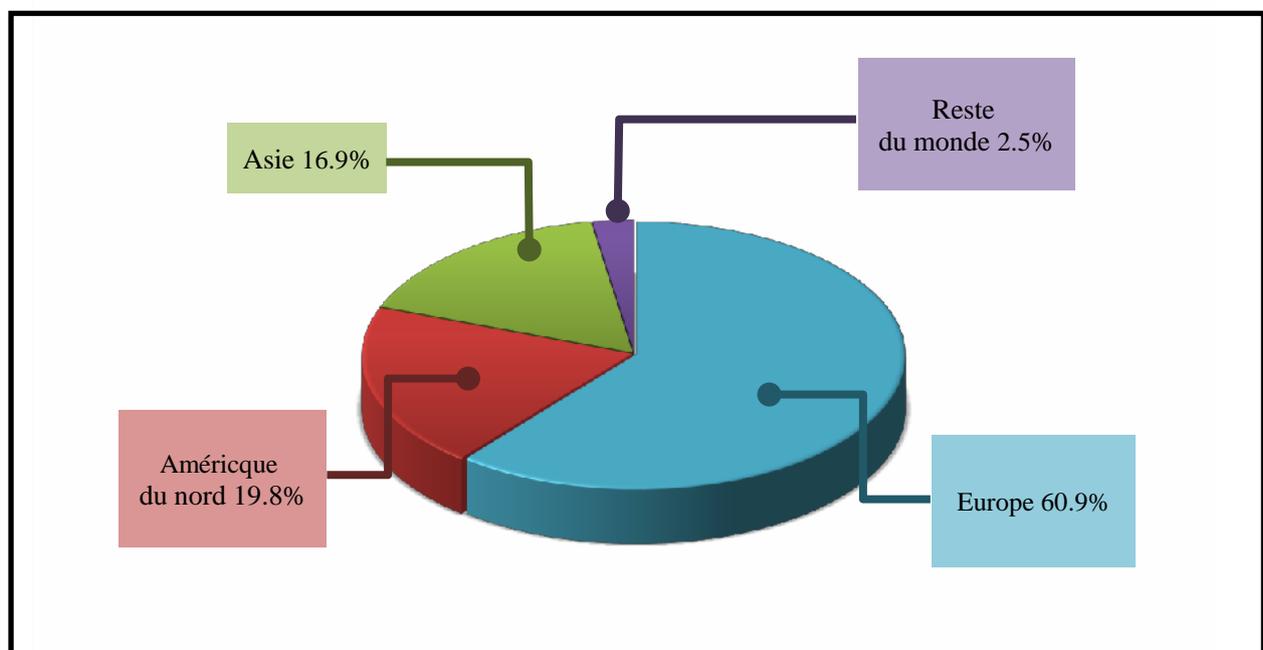


Figure (I.2) Répartition de la puissance éolienne installée dans le monde en MW. [63][64][65]

I.5. Développement de l'énergie éolienne dans le monde

Depuis ces dernières années, la production d'électricité par l'énergie éolienne s'est considérablement développée dans le monde entier figure (I.3). Ceci est principalement dû à deux raisons :

- Produire une énergie propre.
- Trouver une source d'énergie durable alternative aux combustibles fossiles.

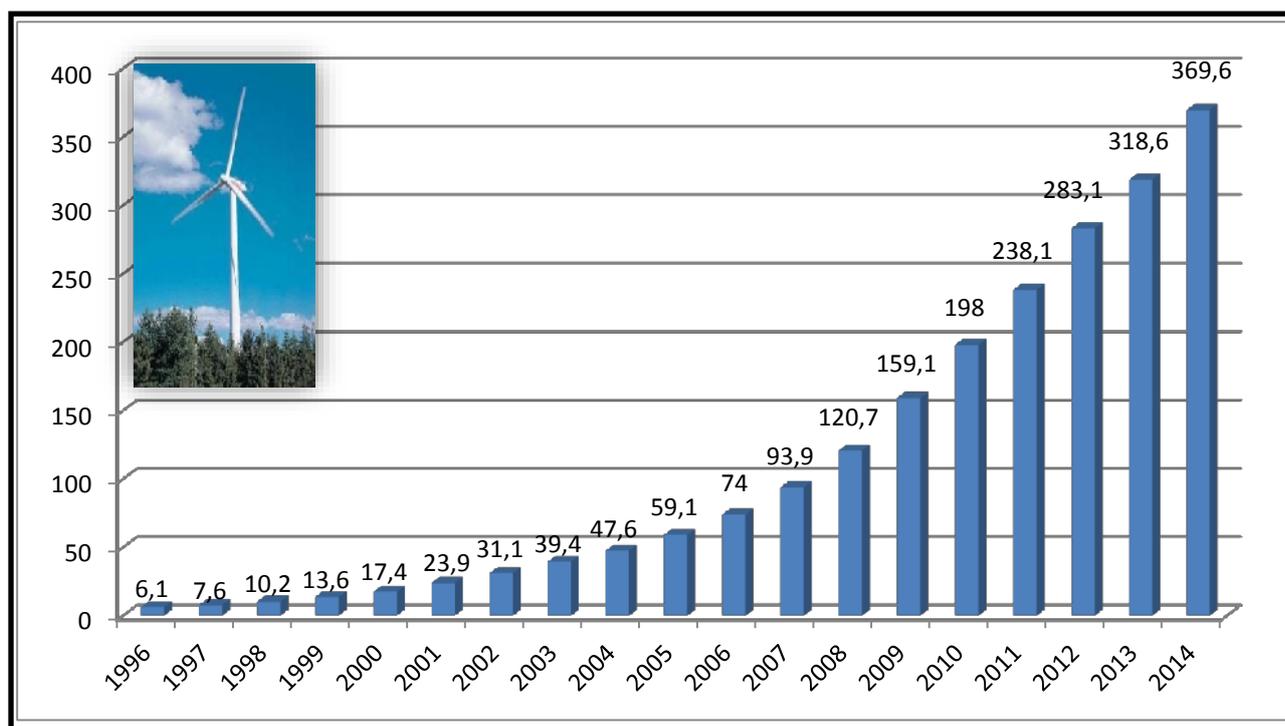


Figure (I.3) Evolution des puissances éoliennes installées dans le monde en MW. [63][64][65]

Des recherches sont en cours pour stocker une partie de la production sous forme d'hydrogène par exemple.

La France, par sa politique de production nucléaire (98 000 MW), est en retard face à ses voisins Européens (Tableau I.1) avec 6800 MW installés jusqu'en 2011.

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

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

- Pour faire fonctionner des stations météo ou toutes autres installations électriques isolées à faible consommation, une éolienne de petite taille peut fournir cette énergie tout au long de l'année.

- Pour alimenter en éclairage des maisons ou villages dans des contrées isolées exposées au vent, des installations d'éoliennes de quelques mètres de diamètre sont choses manière courantes.

- Pour alimenter en électricité des villes tout en produisant une énergie propre, on utilise des éoliennes de plusieurs dizaines de mètres de diamètre pouvant produire une puissance plus de 4 MW [1].

Le rang des pays leader à produire de l'énergie éolienne est donné dans le tableau ci-après :

Rang Pays	(fin 2011)	Puissance (MW)
1	Chine	62733
2	Etats Unis	46919
3	Allemagne	29060
4	Espagne	21674
5	Inde	16084
6	France	6800
7	Italie	6747
8	Royaume Unie	6540
9	Canada	5265
10	Portugal	4084
11	Reste du monde	32445
	Total	238351

Tableau (I.1) : Puissance éolienne installée dans le monde en MW [62] [63] [64]

En Afrique Le Maroc, deuxième producteur d'énergie éolienne du continent après l'Egypte, avait (en 2007) 140 MW de puissance installée et a atteint 480 MW en 2012. Cette production va s'accroître dans les années à venir pour maintenir le Maroc le premier producteur d'énergie éolienne en Afrique. Le plus grand parc éolien marocain est composé de 165 aérogénérateurs

Les sites des parcs éoliens sont situés dans les régions nord et sud du pays telles que : Tinguir, Boujdour, Tarfaya, Laayoune (Tiskrad et Foum-El-Wad), Bouzerktoun, Sendouk, Nouinouich, Fardiwa, Aïn-Armel, Haouma, Fnideq et le site de Midelt. Le projet de Tarfaya, en production concessionnelle, est d'une puissance totale de 200 MW, extensible à 300 MW et mis en service en 2012.

Le Maroc vise en 2020 des parcs éoliens fournissant 12% de sa consommation d'électricité, soit environ 2 000 MW.

Trois raisons principales plaident en faveur d'un développement des énergies renouvelables en Algérie [8] :

- Elles constituent une solution économiquement viable pour fournir des services énergétiques aux populations rurales isolées notamment dans les régions du Grand Sud,
- Elles permettent un développement durable du fait de leur caractère inépuisable, et de leur impact limité sur l'environnement et aussi leurs contribuent à la préservation de nos ressources fossiles,
- La valorisation de ces ressources énergétiques ne peut qu'avoir des retombées positives en matière d'équilibre régional et de création d'emplois.

L'énergie éolienne en Algérie a été exploitée uniquement et seulement pour le pompage de l'eau, la première expérience a été effectuée à Adrar en 1957 à ksar Sidi-Aïssa pour l'irrigation de 50 Hectares de terres agricoles [8].

L'Algérie est confrontée actuellement à une obligation stratégique de la diversification de ses sources d'énergie, non seulement en termes de moyens financiers dont l'objectif n'est pas uniquement d'économiser ses réserves énergétiques, mais aussi de bénéficier le plus rapidement du transfert technologique dans ce domaine en partenariat avec les firmes internationales leaders.

Devant les recommandations des pouvoirs publics (Loi du 03 Février 2011), SONELGAZ ambitionne d'atteindre en 2015 un taux d'intégration de 6 % pour la production de l'énergie électrique à travers l'utilisation de l'énergie solaire et éolienne et prévoit de porter ce chiffre à 10 % en 2027.



Figure (I.4) : CEEG : Montage des éoliennes au site de Kaberten (Adrar) 2013 [62].

Pour des besoins de production d'électricité à une échelle industrielle, SONELGAZ est en voie d'installation d'une ferme éolienne de 10,2 MW à la wilaya d'Adrar plus précisément au site de Kabertene étant donné que le régime de vent est modéré avoisinant 6 m/s selon la carte des vents établie par le CDER dans cette région voir figure (I.5) dont les données géo-techniques sont les suivantes :

- Maître d'ouvrage : Sonelgaz,
- Constructeur : Vergnet France,
- Cout d'investissement : 3050 MDA,
- Site Onshore : Kabertene wilaya d'Adrar,
- Altitude d'environ : 260 m
- Superficie totale : 33 Hectares
- Puissance installée : $12 \times 0,850 = 10,2$ MW
- Diamètre des pales : 25 m
- Hauteur du mât : 80 m
- Mise en service prévue : 2014

Un autre projet en cours de réalisation d'une centrale CSP (Concentration Solar Power) à Beni Abbes (Wilaya de Bechar) pour une capacité installée de 150 MW sur une superficie de 450 hectares (Ratio : 3 hectare/MW)

A titre indicatif, le tableau suivant donne un aperçu sur les EnR (Eolien, PV et SCP) en Algérie avec un objectif d'atteindre une puissance installée d'environ 40% par rapport au parc de production national d'ici l'horizon 2030.

Période	Eolien	Photovoltaïque	CSP
2012-2015	50	240	300
2016-2021	340	760	1670
2022-2030	1600	1800	5200

Tableau (I.2) : CEEG : Puissance éolienne installée dans l'Algérie en MW [62]

Perspectives de l'entreprise SONELGAZ :

- ❖ **2012-2015** : lancement des études pour la mise en place de l'industrie éolienne.
- ❖ **2016-2021** : Construction d'une usine de fabrications de mats et de rotors d'éoliennes ainsi la création d'un réseau de sous-traitance nationale pour la fabrication des équipements de la nacelle.

Résultats attendus

- Economies de 600 milliards de dinars de m³ de gaz naturel (GN) : la moitié de ce volume sera conservée pour les prochaines décennies et l'autre moitié exportée générera des recettes supplémentaires pour le pays.
- Création de plus de 100 000 emplois direct et indirect qui sera mis en place par le Fonds National des EnR (créé par la loi de finance 2010).

I.6. Atlas de la vitesse moyenne annuelle du vent

Pour connaître l'importance du vent en un point donné, il suffit de déterminer la vitesse moyenne arithmétique annuelle pondérée, calculée sur un échantillon de 10 années minimum. Cette dernière donne un ordre de grandeur de la vitesse du vent sur un site donné. Par ailleurs, les vents varient différemment selon la saison, la journée et l'année. Cette variation doit être déterminée puisqu'elle permet d'adapter le dimensionnement des systèmes éoliens aux besoins énergétiques qui peuvent varier suivant les saisons, la journée ou l'année.

I.6.1. Données utilisées

Pour l'établissement de l'atlas de la vitesse moyenne annuelle, les vitesses moyennes de 44 stations de l'Office National de Météorologie ont été utilisées. Les mesures prélevées toutes les trois heures et pendant au moins 10 années sans interruption, de 44 stations de mesures, représentant presque toutes les zones topographiques du pays sont traitées statistiquement (voir tableau 1.1)[12]

Le tableau suivant représente les Caractéristiques des sites et stations étudiés :

N°	Nom	Degré du sites sur la Longitude	Degré du sites sur la latitude	V (m/s)
1	Adrar	0.28	27.82	5.9
2	Alger	3.25	36.72	3.2
3	Annaba	7.82	36.82	2.4
4	Batna	6.18	35.55	4.2
5	Béchar	-2.3	31.62	3.6
6	Béjaia	5.6	36.72	4.2
7	Beni Abbès	-2.10	30.08	1.7
8	Ben Saf	-1.35	35.3	2.8
9	Biskra	5.73	34.8	4.1
10	Bordj Bou Arreridj	4.67	36.07	3.4
11	Chlef	1.33	36.10	2.8
12	Constantine	6.62	36.10	2.6
13	Djanet	9.28	24.33	2.3
14	Djelfa	3.25	34.68	2.7
15	El Bayadh	1.00	33.67	3.9

16	El Goléa	2.87	30.57	3.0
17	El Kheiter	4.70	34.15	4.6
18	El Oued	6.78	33.50	3.7
19	Ghardai	3.80	32.40	4.6
20	Guelma	7.43	36.47	1.8
21	Hassi Messaoud	6.15	31.67	4.1
22	In Amenas	9.63	28.05	4.3
23	In Oussera	2.52	35.55	3.0
24	In Salah	2.47	27.20	4.4
25	In Sefra	-0.60	32.75	3.0
26	Ksar El Chellala	2.32	35.17	3.4
27	Maghnia	-1.78	34.82	2.7
28	Mascara	0.15	35.22	2.4
29	Mechria	-0.27	33.55	3.8
30	Miliana	2.23	36.30	2.6
31	Mostaganem	0.12	35.83	1.0
32	M Sila	4.50	35.67	4.1
33	Oran	-0.62	35.63	4.1
34	Oum El Bouaghi	7.11	35.87	2.1
35	Saida	7.11	34.87	2.6
36	Sétif	5.25	36.18	3.1
37	Skikda	6.90	36.88	2.9
38	Tamanrassa	5.52	22.78	2.9
39	Tébessa	8.12	35.42	2.8
40	Tiaret	1.47	35.37	4.7
41	Timimoun	0.28	29.25	5.1
42	Tindouf	-8.10	27.67	4.6
43	Tlemcen	-1.28	34.95	2.3
44	Touggourt	6.13	33.12	3.3

Tableau (I.3) : Caractéristiques des sites et stations étudiés en Algérie [12]

I.6.2. Atlas de la vitesse du vent

En utilisant la même gamme de couleurs, les atlas vents saisonniers de l'Algérie sont représentés en figures (I.4). On remarque qu'en général, les périodes estivales et printanières sont plus ventées que le reste de l'année, [59].

Dans l'atlas établis les zones les plus ventées ont Adrar, Timimoune et InSalah.

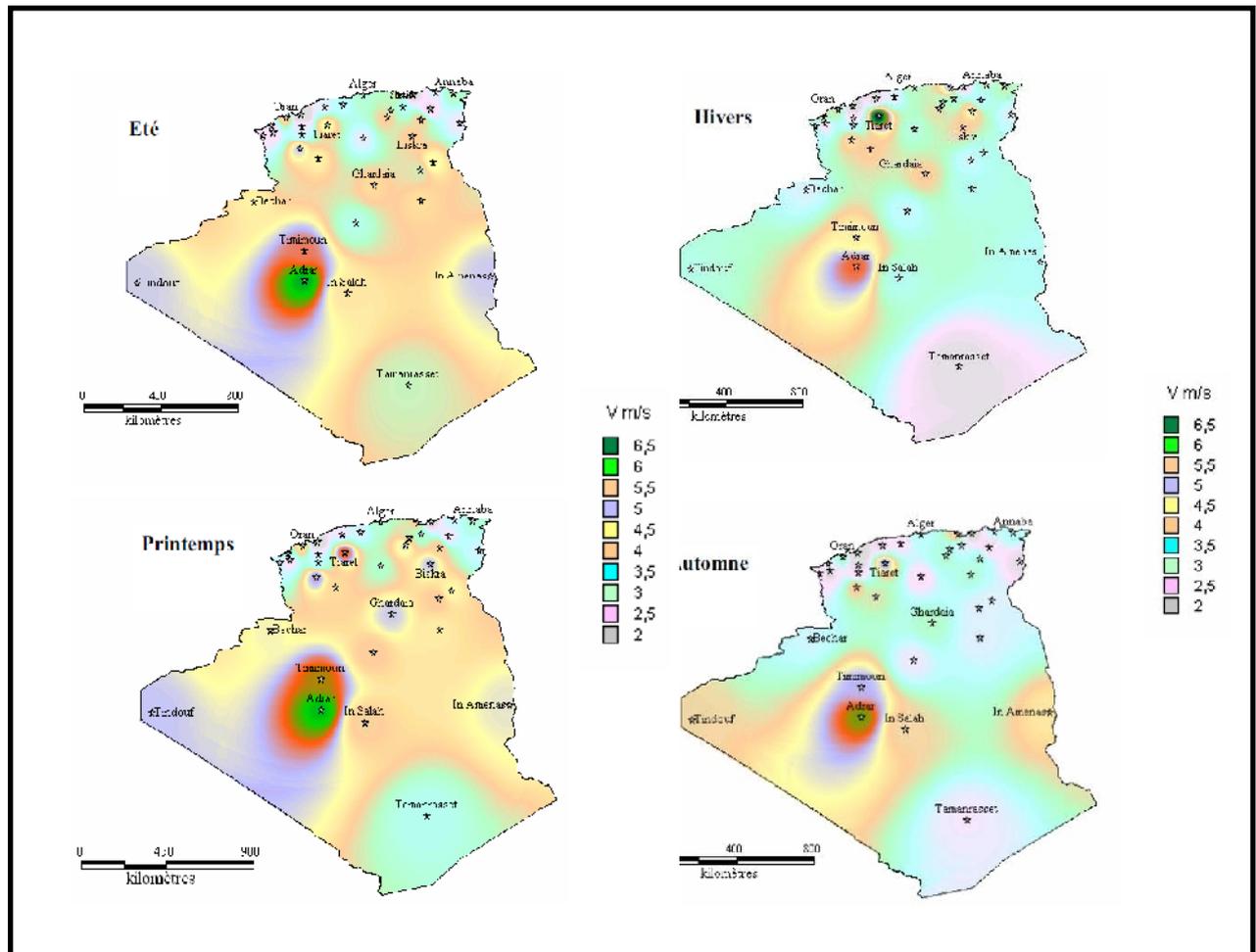


Figure (I.5) : Atlas de la vitesse moyenne saisonnière du vent 10 m du sol [59].

I.7. Emplacement des parcs éoliens

Les parcs éoliens se situent naturellement là où il y a un niveau de vent suffisant tout au long de l'année pour permettre une production maximale. Les côtes, les bords de mers et les plateaux offrent des conditions intéressantes en terme de vent mais il faut aussi tenir compte de l'impact sur le paysage. Pour ces raisons, lorsque c'est possible, des parcs éoliens offshore sont construits (540 MW offshore installés en Europe fin 2003). Ces derniers comportent des dizaines d'éoliennes comme on peut le voir sur la figure (I.5).



Figure (I.6) : Eolienne type : OffShore (Gauche) et OnShore (Droite) [6]

I.8. Technologie des éoliennes

I.8.1. Puissance des éoliennes

L'objectif principal des systèmes éoliens est la transformation d'une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. L'énergie éolienne, non polluante et économique, a suscité un très grand intérêt et a exigé aux constructeurs de réfléchir toujours à de nouvelles solutions robustes, permettant l'extraction du maximum d'énergie et l'étude des différents systèmes réalisables.

Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale.

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 kW
Moyenne	12 à 45 m	40 kW à 1 MW
Grande	46 m et plus	1 MW

Tableau (I.4) : Différents catégories des éoliennes

A titre de comparaison, le tableau ci-dessous propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice [14].

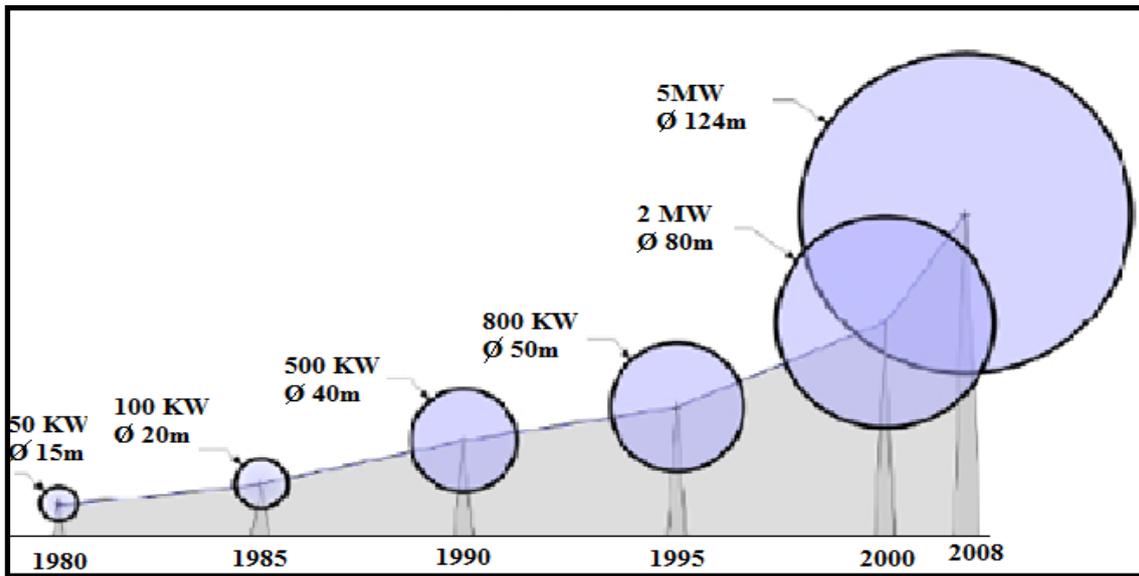


Figure (I.7) : Taille des éoliennes en m en fonction des puissances en kW [15].

I.8.2. Différents types d'éoliennes

Généralement il y a deux types d'installations des éoliennes : l'éolienne qui n'est pas raccordée au réseau dite « individuelle » est installée en site isolé ; le deuxième mode concerne les éoliennes regroupées sous forme de fermes éoliennes installées sur la terre ou de plus en plus en mer avec les fermes éoliennes « offshore » où la présence du vent est plus régulière.

Selon la position géométrique et le type d'arbre, les éoliennes se différencient principalement figure (I.7) [6][16][35] en :

- Eoliennes à axe vertical ;
- Eoliennes à axe horizontal (plus utilisées) ;

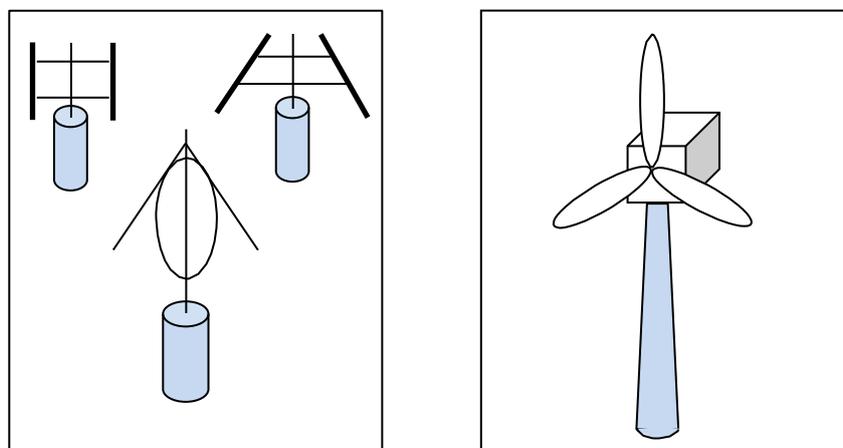


Figure (I.8) : Technologies Horizontale et Verticale des éoliennes. [19]

I.8.2.1. Eoliennes à axe vertical :

Les principaux capteurs à axe vertical sont le rotor de Savonius, le rotor de Darrieus et le capteur à ailes battantes. Il existe également les capteurs à traînée différentielle comme le moulinet, les machines à écran et les machines à clapets battants. Les pylônes des éoliennes à axe vertical sont courts, entre 0,1 et 0,5 fois la hauteur du rotor. Cela permet de placer tout le dispositif de conversion de l'énergie (génératrice, multiplicateur, etc.) au pied de l'éolienne, facilitant ainsi les opérations de maintenance. De plus, il n'est pas nécessaire d'utiliser un dispositif d'orientation du rotor. Cependant, les vents sont faibles à proximité du sol, ce qui induit un moins bon rendement car l'éolienne subit les turbulences du vent. De plus, ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mât subit de fortes contraintes mécaniques. Pour ces raisons, de nos jours, les constructeurs d'éoliennes privilégient les éoliennes à axe horizontal.

Les deux types des structures d'éoliennes à axe vertical les plus répandues reposent sur les principes de traînée différentielle ou de la variation cyclique d'incidence figure (I.8):

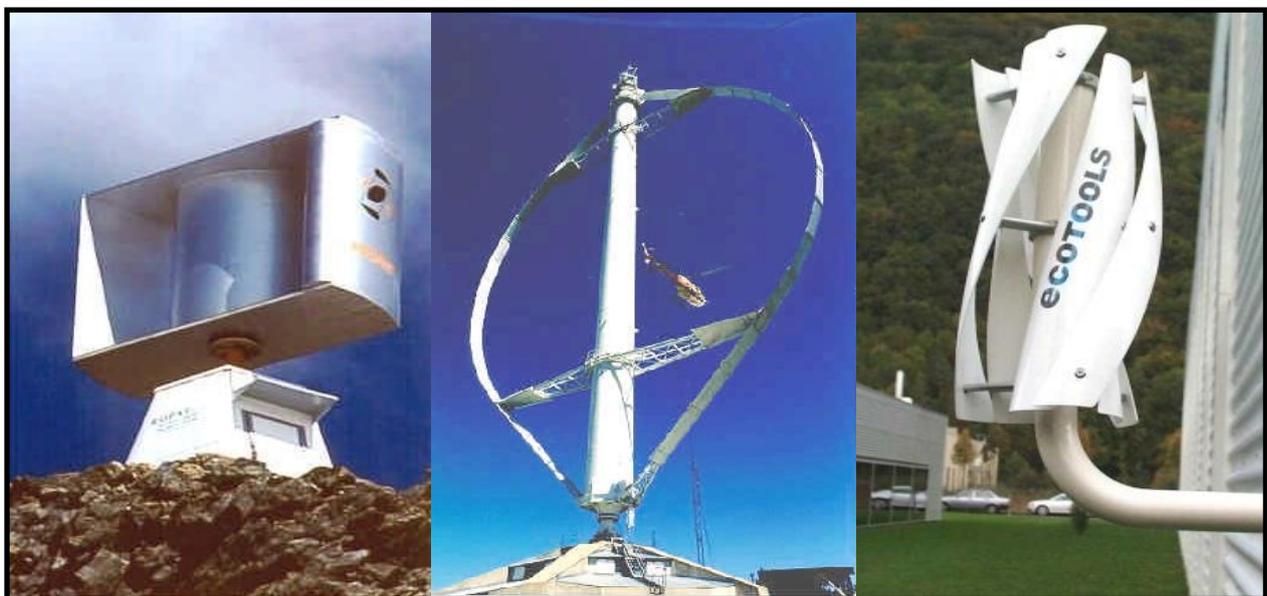


Figure (I.9) : Eoliennes à axe vertical [20].

I.8.2.2. Eoliennes à axe horizontal

Ce sont les capteurs actuellement les plus répandues car leur rendement est supérieur à celui de tous les autres capteurs figure (I.9). Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, ou des hélices multi-pales pour le pompage de l'eau.

On peut distinguer les capteurs éoliens dont l'hélice est en amont par rapport au vent, « *hélice au vent* », et ceux dont l'hélice est en aval par rapport au vent, « *hélice sous le vent* » figure (I.10). Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles sont constituées d'une à trois pales profilées aérodynamiquement. Le plus souvent le rotor de ces éoliennes est tripale, car trois pales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales. Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical ; elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques.



Figure (I.10) : Eoliennes à axe horizontal [20].

On distingue dans les éoliennes à axes horizontal, la direction en amont ou en aval du vent :

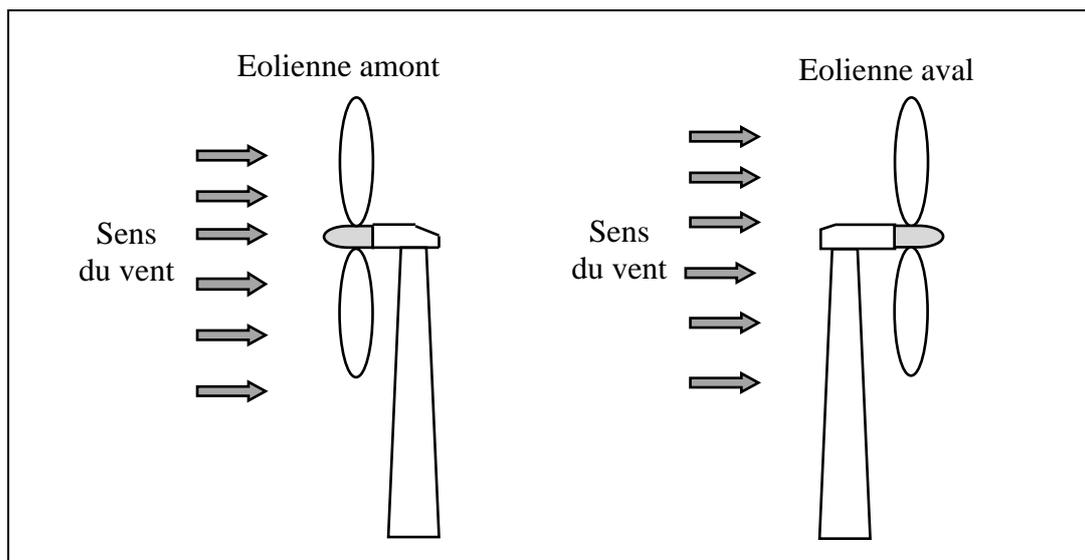


Figure (I.11) Eoliennes Amont et Aval du vent [20].

I.8.3. Caractéristiques technologiques des éoliennes

Les éoliennes à axe horizontal sont généralement constituées de trois éléments principaux :



Figure (I.12) : Différents composants d'une éolienne [6]

I.8.3.1. Le Mâts (pylônes)

Les mâts peuvent être réalisés en acier ou en béton armé. Ils peuvent être autoporteurs et auto résistants ou haubanés, ils doivent être de hauteur importante pour bénéficier au maximum de l'énergie de vent. Actuellement les mats en caisson, souvent en acier et fortement ancrés au sol, sont très répandus pour les éoliennes de forte puissance.

Pour les supports autoporteurs, ils doivent être correctement calculés de façons à résister au moment dû à la trine en tête du support pour les vents forts et à ce que les fréquences propres soient bien découplées des fréquences d'excitations dues à l'aérogénérateur, [21].

Les pylônes des machines à axe vertical sont courts, entre 0,1 et 0,5 fois la hauteur du rotor. Ils sont le plus souvent du type haubané. Les problèmes de corrosion et de montage sont les paramètres principaux dans le choix de la solution à adopter.

Le mât peut être réalisé par de tube en acier ou en béton armé, il doit être de hauteur importante pour bénéficier au maximum de l'énergie de vent. Actuellement les mats, souvent en acier et fortement ancrés au sol, sont très répandus pour les éoliennes de forte puissance Les pylônes des machines à axe vertical sont courts, et sont le plus souvent du type haubané. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur [5] [22].

I.8.3.2. La nacelle

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

I.8.3.3. Le Rotor (moyeu)

Le rotor ou l'hélice d'une éolienne est constitué de pales montées sur un moyeu, (le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3) il assure une fonction essentielle : transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. [24].

L'énergie captée par l'éolienne est en fonction de la surface balayée par l'hélice et la vitesse de vent. Plus le diamètre du rotor est grand et plus la surface balayée est importante

Regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur, système de commande, système de refroidissement, frein à disque différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge.

I.8.3.4. Les Pales

Les pales sont une partie très importante des éoliennes. De leur nature dépendront le bon fonctionnement et la durée de vie du capteur ainsi que le rendement du moteur éolien. Plusieurs éléments caractérisent ces pales : la longueur, la largeur, le profil, les matériaux et le nombre. Parmi ces éléments, certains sont déterminés par les hypothèses de calcul, puissance et couple et d'autres sont choisis en fonction de critères tels que : coûts, résistance au climat.

Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites tels la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique).

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 [21]

I.8.3.5. Le multiplicateur :

Les rotors dont le diamètre est supérieur à 5 m ont des vitesses de rotation trop faibles pour pouvoir entraîner directement un alternateur classique. Il est donc indispensable pour ces machines d'interposer entre l'aéromoteur et l'alternateur un multiplicateur [8].

3 types de multiplicateurs peuvent être utilisés avec les aéromoteurs :

- Le plus simple est le multiplicateur à engrenages à un ou plusieurs trains de roues dentées cylindriques ; d'une réalisation économique il est tout de même encombrant pour un rapport de multiplication élevé.
- L'utilisation de trains planétaires permet de réaliser des multiplications élevées sous un encombrement réduit. Leur utilisation se généralise ; cette technique permet de réaliser des rapports de multiplication élevés sous un encombrement réduit et avec un bon rendement de transmission. Les axes d'entrée et de sortie sont colinéaires voir coaxiaux.
- Le réducteur à couple conique permet une disposition de l'arbre de sortie perpendiculaire à l'arbre d'entrée.

I.8.4. Classement des éoliennes

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

I.8.4.1. Les éoliennes à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau. Sa vitesse $\Omega_{méc}$ est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice figure (I.13).

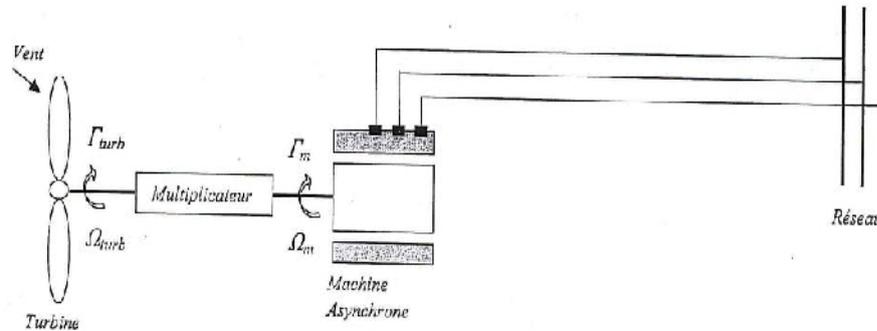


Figure (I.13) : Eolienne à vitesse fixe [6]

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

I.8.4.2. Les éoliennes à vitesse variable

I.8.4.2.1. Principe de fonctionnement

Les deux structures existantes des éoliennes à vitesse variable sont présentées ci après :

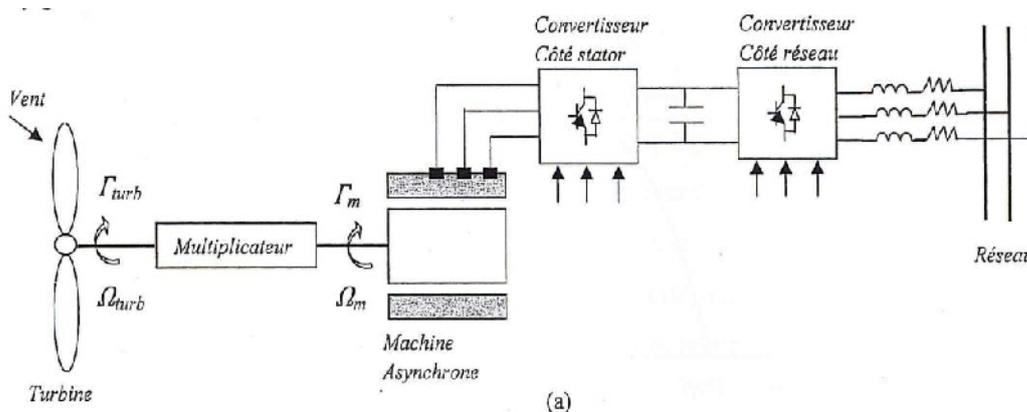


Figure (I.14) : Eolienne à vitesse variable type MAS [6]

La configuration de la figure (I.14), est basée sur une machine asynchrone à cage, pilotée au stator de manière à fonctionner à vitesse variable, par des convertisseurs statiques.

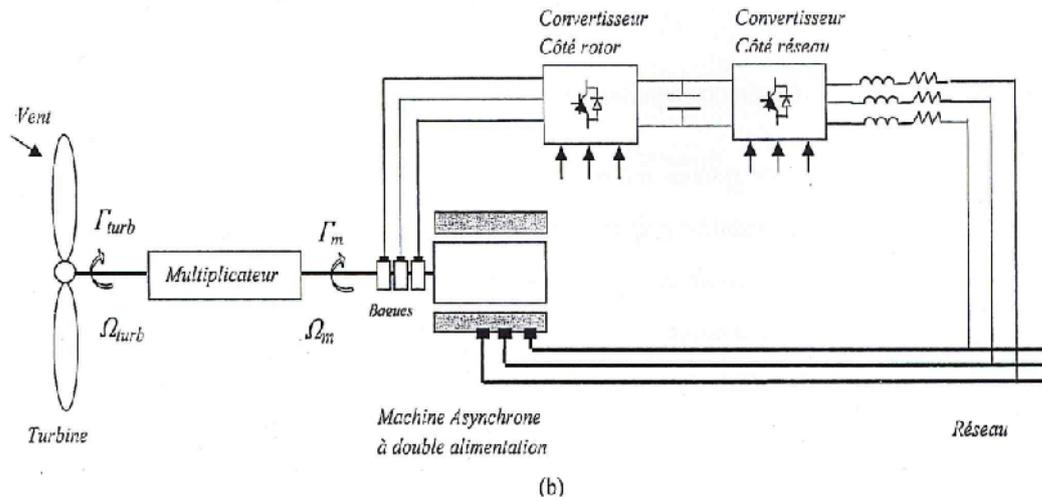


Figure (I.15) : Eolienne à vitesse variable type MADA [6]

La configuration de la figure (I.15), est basée sur une machine asynchrone à double alimentation et à rotor bobiné. La vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance, situés au circuit rotorique.

I.8.4.2.2. Intérêt de la vitesse variable

La caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse est représentée sur la figure (I.16). Pour une vitesse de vent V_1 et une vitesse mécanique de la génératrice Ω_1 ; on obtient une puissance nominale P_1 (point A). Si la vitesse du vent passe de V_1 à V_2 , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance P_2 se trouve sur la 2ème caractéristique (point B). La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure Ω_2 . Il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée

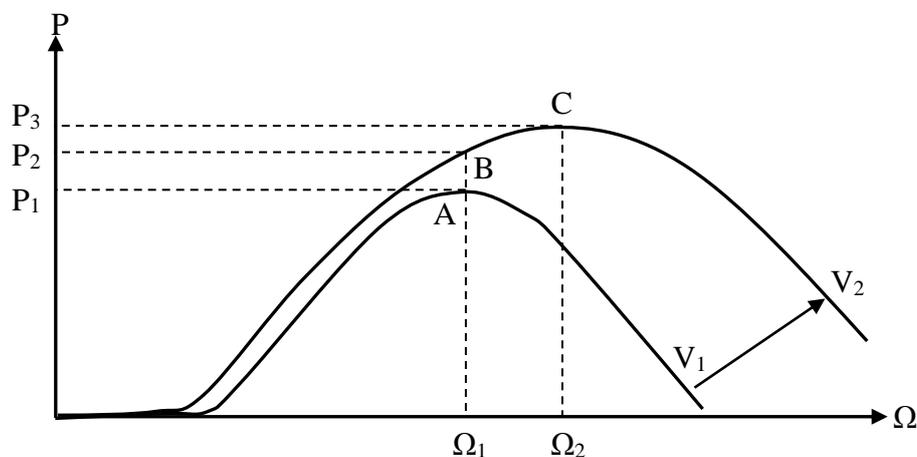


Figure (I.16) : Caractéristique puissance générée en fonction de la vitesse de vent. [6]

I.8.5. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

I.8.5.1. Les éoliennes à décrochage aérodynamique stall

Ce type de régulation est utilisé pour la plupart des éoliennes car il a l'avantage de ne pas nécessiter de pièces mobiles et de système de régulation dans le rotor. Les pales de l'éolienne sont fixes par rapport au moyeu de l'éolienne. Elles sont conçues spécialement pour subir des décrochages lors de vents forts. Le décrochage est progressif lorsque le vent atteint sa vitesse critique figure (I.17).

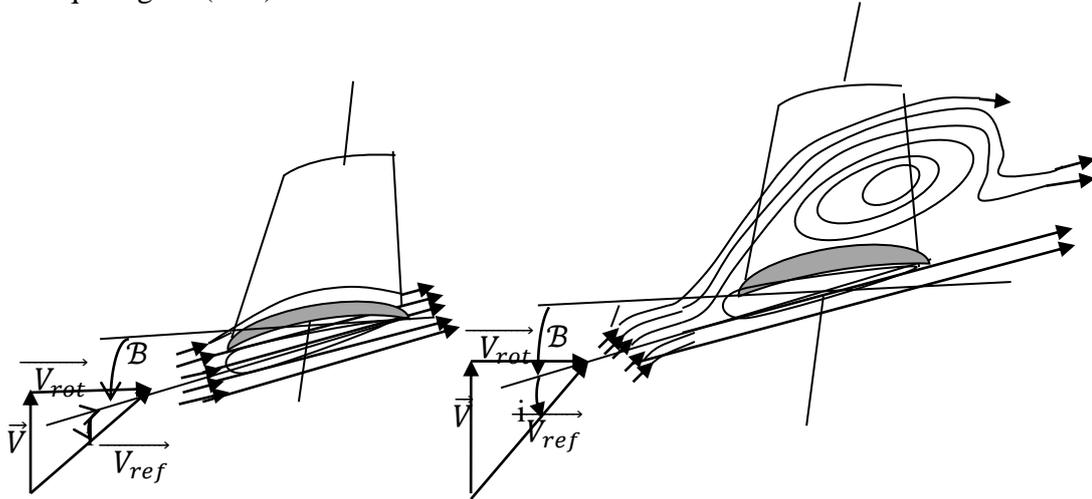


Figure (I.17) : Décrochage aérodynamique « Stall » [23]

I.8.5.2. Les éoliennes à pales orientables pitch

Ce système de régulation pivote les pales de quelques degrés à chaque variation de la vitesse du vent pour que les pales soient toujours positionnées à un angle optimal par rapport au vent, de façon à extraire la puissance maximale à tout moment figure (I.18). C'est à dire il faut varier l'angle de calage des pales pour profiter au maximum du vent instantané et limiter la puissance pour des vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale.

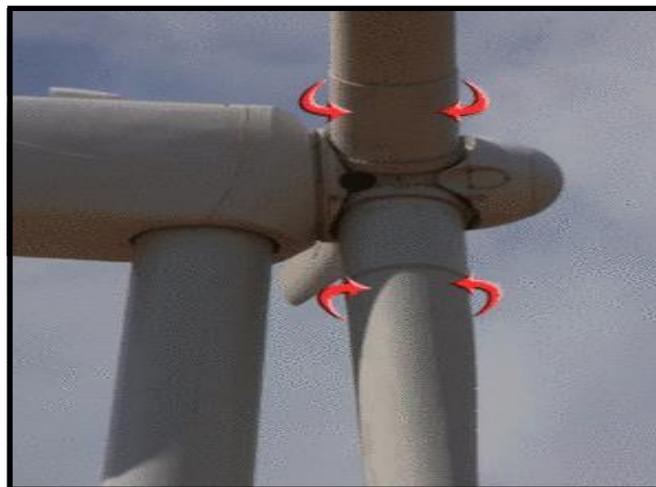


Figure (I.18) : Pâles orientables « Pich » [23]

A coté de la vitesse nominale V_n , on spécifie aussi [5] [6].

- La vitesse de démarrage V_d qui représente la vitesse de début de fonctionnement ;
- La vitesse maximale du vent V_{max} pour laquelle la turbine ne convertit plus d'énergie éolienne, pour des raisons de sécurité de fonctionnement.

Les vitesses V_d , V_n et V_{max} définissent quatre zones de fonctionnement sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent voir figure (I.19) :

- La zone I: où $P_t = 0$, la turbine ne fonctionne pas ;
- La zone II: la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent
- La zone III: la vitesse de rotation est maintenue constante et la puissance P_t fournie reste égale à P_{tn} ;
- La zone IV: il faut arrêter le transfert d'énergie par un système de sureté.

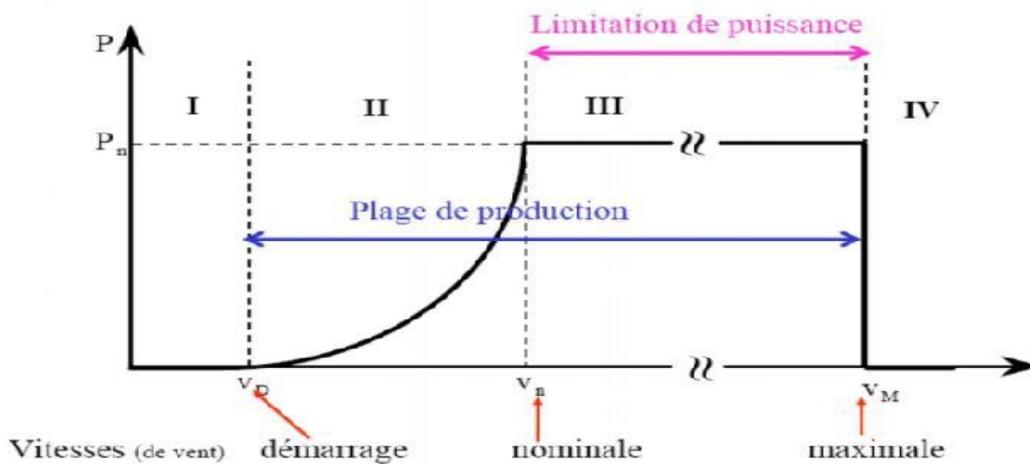


Figure (I.19) : Puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent [4][5]

I.9. Le génie électrique dans le vent

Le vent souffle là où l'air présente des différences de température et de pression et se dirige toujours des hautes pressions vers les basses pressions. Si la terre ne tournait pas, l'air se déplacerait directement (en ligne droite) des centres de haute pression (anticyclone) vers les centres de basse pression (cyclone) mais à cause de cette rotation du globe, l'air est forcé de suivre une trajectoire courbe, légèrement infléchie vers la basse pression (force de Coriolis) [26]. Le choix géographique d'un site éolien est important dans un projet de production d'énergie éolienne. Pour déterminer l'énergie qui pourra être effectivement extraite du gisement éolien il faudrait déterminer les caractéristiques du vent dans ce site. Pour connaître les propriétés d'un site, nous devons faire des mesures de la vitesse du vent ainsi que de sa direction, sur une grande période du temps.

La figure (I.20) donne le relevé des variations des vitesses moyennes sur un site donné pour une période d'une année. ($V_{max} = 7,4 \text{ m/s}$ en Nov, Déc et Jan)

La vitesse du vent varie selon les zones géographiques et les saisons, elle est sur tout élevée pendant la période d'hiver et au niveau des mers. Le vent est défini par sa direction et sa vitesse.

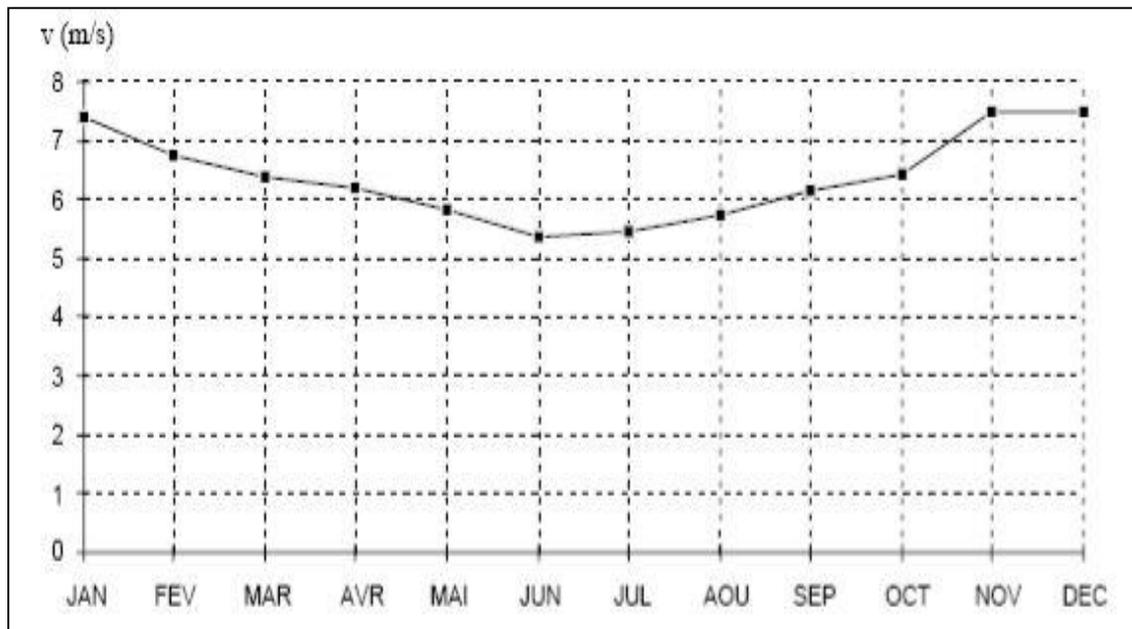


Figure (I.20) : Variation des vitesses moyenne du vent sur 1 an [63][64][65].

I.9.1. Direction et vitesse du vent

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

La vitesse du vent est mesurée avec des anémomètres. Il en existe plusieurs types classés en deux catégories principales :

- les anémomètres à rotation ;
- les anémomètres à pression.

Une graduation a été établie, selon l'échelle Beaufort qui divise les vents en fonction de leurs vitesses en 17 catégories dont nous citons quelques unes au tableau ci après [2],[27].

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

Tableau (I.5) : Echelle de Beaufort [6]

En effet, pour implanter un parc éolien, la prospection des sites possibles constitue le premier travail à effectuer pour juger de la capacité de production d'une centrale éolienne. Des relevés météorologiques complets sur les sites présumés doivent être effectués au moins pendant une année pour déterminer la possibilité ou non d'implanter le parc. Non seulement il faut connaître la vitesse moyenne du vent, mais aussi sa variation en fonction de l'altitude.

Les vents les plus intéressants qui donnent finalement le plus d'énergie annuelle, sont les vents réguliers qui ont une vitesse de 6 à 10 m/s. [5]

I.9.2. Loi de Betz

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure (I.21) [28] sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval.

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 soit :

$$V_m = \frac{1}{2}(V_1 + V_2) \quad (1.1)$$

Ainsi, la masse de l'air traversant la surface balayée par le rotor est donnée par :

$$m = \frac{1}{2}\rho S(V_1 + V_2) \quad (1.2)$$

ρ : est la masse volumique de l'air.

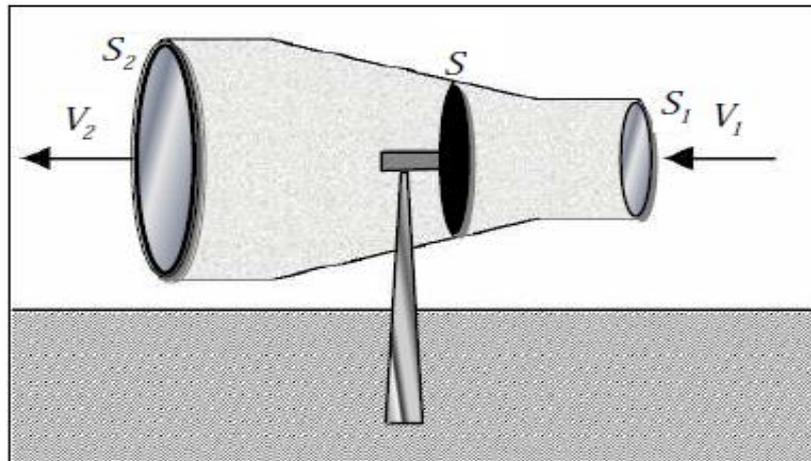


Figure (I.21) : La loi de Betz appliquée à une éolienne. [6] [9] [34]

De plus, la puissance extraite du vent par la turbine selon la seconde loi de Newton est exprimée par la relation suivante :

$$P_m = \frac{1}{2}m(V_1^2 - V_2^2) \quad (1.3)$$

En remplaçant m par son expression dans (1.3) on obtient :

$$P_m = \frac{1}{4}\rho S(V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2) \quad (1.4)$$

Comparons maintenant ce résultat avec la puissance totale d'un flux d'air non perturbé traversant une même surface S sans la présence du rotor qui perturbe le vent. Nous notons cette puissance par P_{mt} , et elle est donnée par :

$$P_{mt} = \frac{1}{2}\rho S V_1^3 \quad (1.5)$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et celle du vent non perturbé est exprimé par :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{V_1^2}{V_2^2}\right) \left(1 + \frac{V_1}{V_2}\right) \quad (1.6)$$

I.9.3. Coefficient de puissance

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation citée plus haut [21], on s'aperçoit que le ratio $\frac{P_m}{P_{mt}}$ en fonction de $\frac{V_1}{V_2}$ appelé aussi coefficient de puissance C_p qui présente un maximum de $16/27$ soit $0,59$ pour $\frac{V_1}{V_2} = \frac{1}{3}$.

C'est cette limite théorique appelée limite de Betz figure (I.22) qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée.

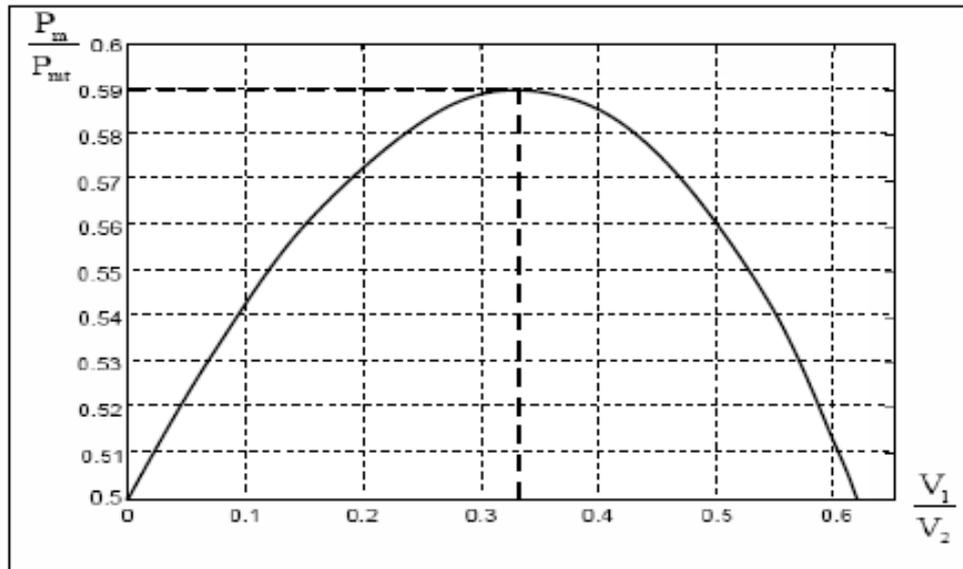


Figure (I.22) : Coefficient de puissance [6][8][34]

Ainsi le coefficient de puissance C_p de l'aérogénérateur est exprimé par la relation suivante :

$$C_p = \frac{P_m}{P_{mt}}, \text{ Avec } C_p < 1 \quad (1.7)$$

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 λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent. figure (I.23)

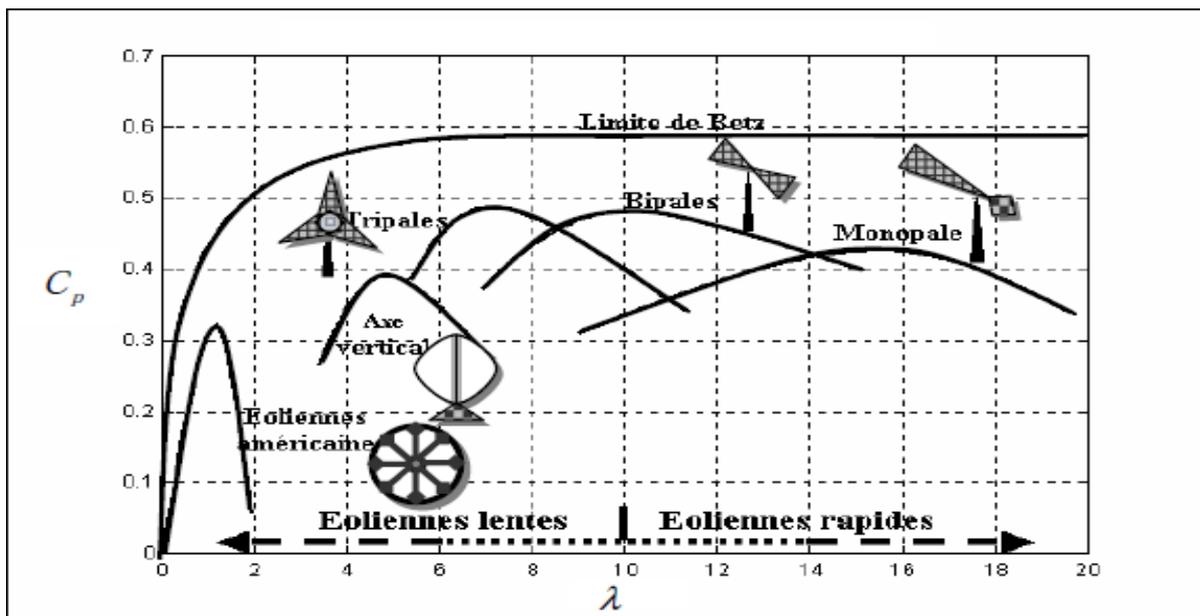


Figure (I.23) : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes [6][8][34]

I.9.4. Coefficient de couple

Le coefficient de couple C_m est assez proche du coefficient de puissance C_p où l'expression du couple aérodynamique est la suivante :

$$C_{aér} = \frac{P_t}{\Omega_t}$$

$$\text{Or } \Omega_t = \frac{\lambda \cdot v}{R_t} \text{ et } P_t = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_t^2 \cdot v^3$$

D'où

$$C_{aér} = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{R_t \cdot P_t}{\lambda \cdot v} = \frac{C_p}{\lambda} \frac{1}{2} \rho \pi R_t^3 v^2 \quad (1.8)$$

La valeur du coefficient de couple C_m est déterminée par [5][28]:

$$C_m = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{C_{aér}}{\frac{1}{2} \rho S_t R_t v^2} \quad (1.9)$$

I.10. Avantages et Inconvénient de l'énergie éolienne

I.10.1. Avantages

- L'énergie éolienne est d'un intérêt d'environnement contrairement à d'autres sources polluantes (pas d'émission de gaz à effet de serre : CO2).
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- L'énergie éolienne n'est pas une énergie à risque contrairement à l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs nuisible à la vie.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement en ne laissant pas de trace.
- 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.
- C'est l'énergie bon marché (coût de production moins chère).
- L'énergie éolienne s'intègre facilement dans un système électrique existant déjà.
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle.

-lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2% du sol environ est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et d'autres utilisations ;

I.10.2 Inconvénients

Mêmes s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques inconvénients :

- L'impact visuel, reste néanmoins un thème subjectif.
- Le bruit 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, et celle-ci doit donc être limitée.
- La qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suite, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.
- Le cout de l'énergie éolienne reste relativement plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés.
- Le bruit peut être d'origine mécanique ou d'origine aérodynamique. Les éoliennes installées actuellement produisent un bruit de 55 dB à leurs pieds ;
- La réception des ondes hertziennes peut être perturbée, ce qui provoque une image bruitée sur les récepteurs.
- Des flashes très puissants sont émis toutes les cinq secondes en haut des mats éoliens à la demande de l'aviation civile. Ces flash perturbent la quiétude nocturne de la campagne et sont une pollution lumineuse supplémentaire

I.11. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de dresser un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique pour son utilisation à la production de l'énergie électrique. Il a été aussi mis l'accent sur les différents types et technologies des éoliennes selon les positions des arbres et leurs situations par rapport au vent.

Le deuxième chapitre de nos travaux, sera consacré à la modélisation et la simulation de la machine asynchrone à double alimentation intégré dans un système éolien.

CHAPITRE 2

MODELISATION DU SYSTÈME EOLIEN

- GÉNÉRATEUR
- TURBINE
- ALIMENTATION

II. MODELISATION DU SYSTEME EOLIEN

L'éolienne est constituée d'une partie tournante, le rotor, qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et ainsi la puissance mécanique obtenue, est transformée soit en puissance hydraulique par une pompe, soit en puissance électrique par une génératrice. [5].

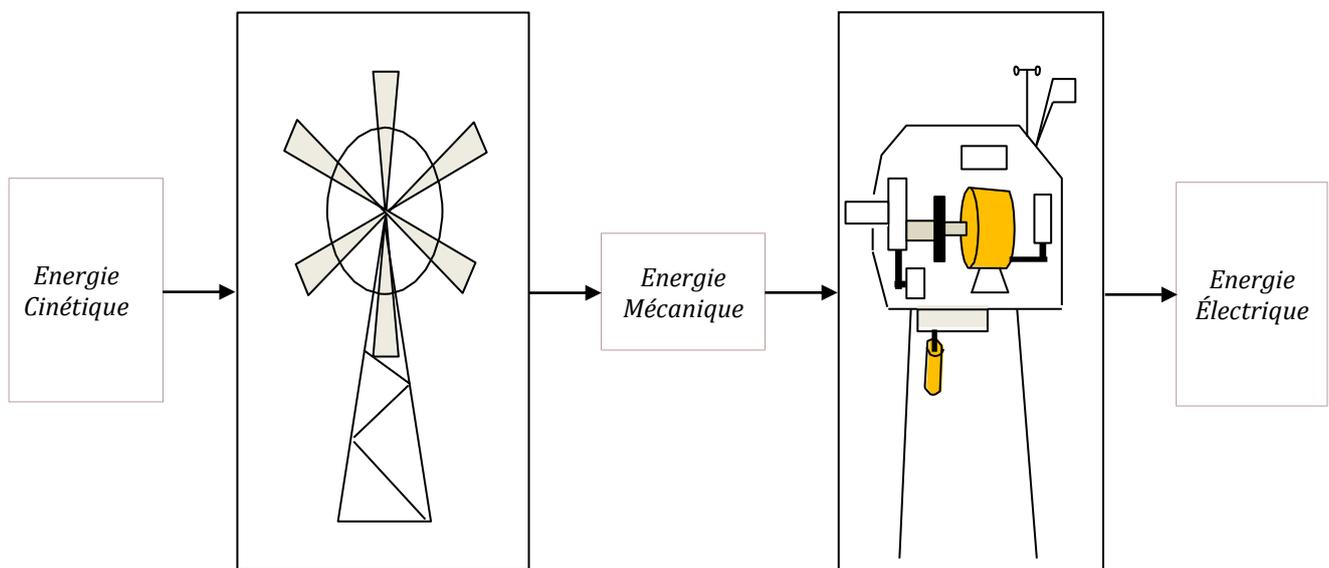


Figure (II.1) : Conversion de l'énergie cinétique du vent [18]

Deux types de machines électriques peuvent être utilisés dans l'industrie des éoliennes (système aérogénérateur) :

- Machines synchrones,
- Machines asynchrones (simple alimentation : MAS ou double alimentation : MADA).

Dans notre étude nous nous intéresserons à la machine asynchrone doublement alimentée.

La modélisation du système éolien s'articule sur quatre parties à savoir :

- Le vent
- La MADA : Stator et Rotor
- La Turbine : Partie aérodynamique et partie mécanique
- La source d'alimentation

II.1. Modélisation de la MADA

II.1.1. Introduction

La modélisation d'un système quelconque est indispensable pour l'étude et la maîtrise de son fonctionnement et lorsqu'on souhaite lui appliquer une commande particulière. D'autre part, elle est une phase primordiale dans le développement de la conception des systèmes.

Les progrès de l'informatique et du génie des logiciels permettent de réaliser des modélisations performantes et d'envisager l'optimisation de la conception.

Ainsi, la modélisation permet de guider les développements par une quantification des phénomènes. En outre, elle est d'un apport précieux qui permet de restituer une image que l'on peut observer expérimentalement et de prévoir des comportements les plus variés du système modélisé que ceux de l'observation expérimentale.

L'étude et la modélisation des systèmes présentent un grand intérêt en raison des impératifs techniques et économiques et conduisent à concevoir et à exploiter le matériel au voisinage des limites technologiques.

On va présenter dans cette section la modélisation du système éolien étudié, constitué principalement d'une MADA et d'une turbine éolienne.

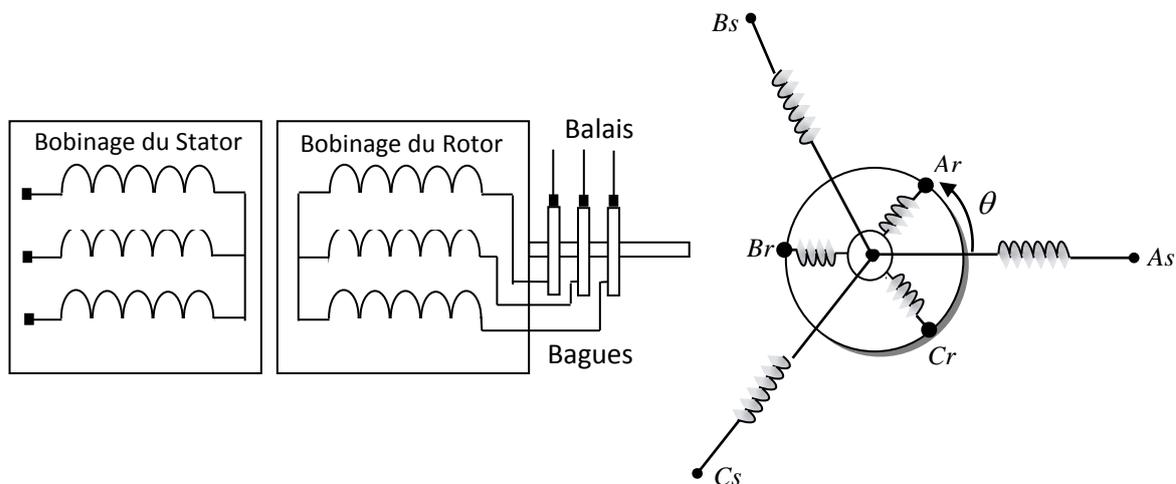


Figure (II.2) : Représentation schématique d'une MADA [18][19]

II.1.2. Description 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 rotor. Sa magnétisation est donnée par la contribution des deux armatures alimentées par des sources à courant alternatif. Ce fonctionnement peut être éventuellement résumé par le terme de "machine synchrone à excitation alternative" [15] [36]

II.1.3. Structure de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation est une machine triphasée à courant alternatif avec deux enroulements triphasés accessibles. Son stator est identique à celui de la machine triphasée asynchrone à cage d'écuriel (MAS) constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées, munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements [29] et son rotor se diffère radicalement puisqu'il n'est pas composé d'aimants ou d'une cage d'écuriel mais 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 (II.2)

Son circuit statorique est connecté directement au réseau électrique. Un second circuit placé au rotor est également relié au réseau mais par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance.

Etant donné que la puissance rotorique qui transite est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance.

C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance. Une seconde raison est la possibilité de régler la tension au point de connexion où est injectée cette génératrice [1] [2] [24] [30] [31] [32].

II.1.4. Modes de fonctionnement de la MADA

Le fonctionnement de la MADA est basé sur le principe d'interaction électromagnétique ; le stator est alimenté par un courant triphasé de fréquence f , ce qui donne naissance à un champ tournant dans l'entrefer à la vitesse angulaire Ω_s , tel que [37]

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{P} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{P} \quad (2.1)$$

Avec P : nombre de paire de pôles.

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

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

II.1.4.1. Mode moteur

- **Hypo-synchrone:** La figure (II.3.a) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement en mode moteur en dessous de la vitesse de synchronisme.
- **Hyper-synchrone:** La figure (II.3.b) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. On a alors un fonctionnement en mode moteur en dessus de la vitesse de synchronisme. La MAS à cage ne peut pas fonctionner dans ce mode.

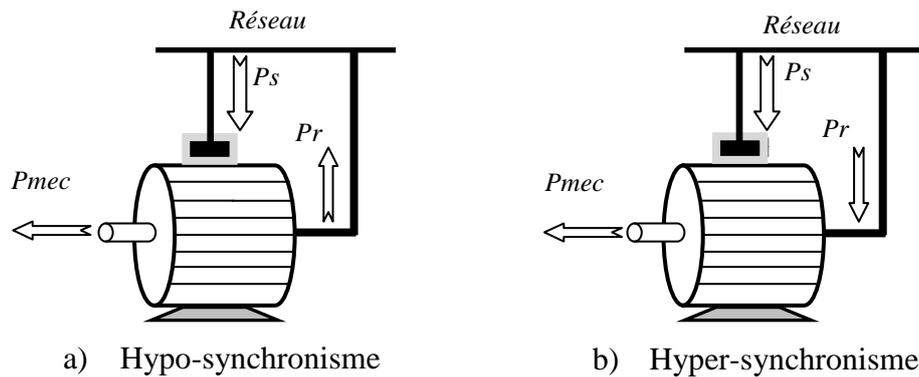


Figure (II.3) : Fonctionnement de la MADA en mode moteur [19]

II.1.4.2 Mode générateur :

- **Hypo-synchrone :** La figure (II.4.a) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est réabsorbée par le rotor. Nous avons dans ce cas un fonctionnement en mode générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La MAS à cage, ne peut pas fonctionner dans ce mode.
- **Hyper-synchrone :** La figure (II.4.b) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a ainsi un fonctionnement générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme [A1 16].

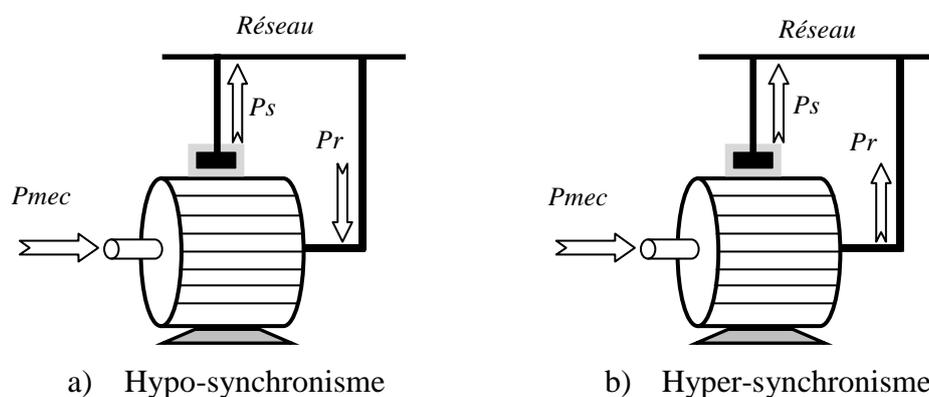


Figure (II.4) : Fonctionnement de la MADA en mode générateur [19]

Mode	Vitesse	Pmec	Ps	Pr
Moteur (Cem > 0)	$s < 0$ ($\omega_m > \omega_s$) (hyper-synchronisme)	> 0 (La MADA délivre la puissance mécanique)	> 0 (La MADA reçoit la puissance via le stator)	> 0 (La MADA reçoit la puissance via le rotor)
Moteur (Cem > 0)	$s > 0$ ($\omega_m < \omega_s$) (hypo-synchronisme)	> 0 (La MADA délivre la puissance mécanique)	> 0 (La MADA reçoit la puissance via le stator)	< 0 (La MADA délivre la puissance via le rotor)
Générateur (Cem < 0)	$s < 0$ ($\omega_m > \omega_s$) (hyper-synchronisme)	< 0 (La MADA reçoit la puissance mécanique)	< 0 (La MADA délivre la puissance via le stator)	< 0 (La MADA délivre la puissance via le rotor)
Générateur (Cem < 0)	$s > 0$ ($\omega_m < \omega_s$) (hypo-synchronisme)	< 0 (La MADA reçoit la puissance mécanique)	< 0 (La MADA délivre la puissance via le stator)	> 0 (La MADA reçoit la puissance via le rotor)

Tableau (II.1) : Fonctionnement Hyper-Hypo Synchrone de la MADA [19]

II.1.5. Hypothèses simplificatrices de la modélisation

A cause de la répartition des enroulements de la MADA et la géométrie propre complexe et afin de faciliter les difficultés, on prend quelques hypothèses simplificatrices avancées habituellement pour modéliser les machines électriques en vu de leur commande en général : [38][39][40][41]

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligeable ; La force magnétomotrice a une répartition spatiale sinusoïdale;
- La machine à une construction symétrique;
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables ;
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau (effet pelliculaire).

II.1.6. Modèle naturel triphasé de la MADA

L'étude des machines sous leurs formes géométries réelles sont trop complexes pour se prêter à une analyse tenant compte de leurs configurations exactes. On doit donc développer un modèle dont le comportement soit aussi proche que possible de celui de l'original.

Ces modèles ont pour objet de réduire le modèle naturel en un modèle simple qui traduit le fonctionnement de la machine.

Comme toutes les autres machines, la machine asynchrone double alimentée (MADA) est une machine réversible qui peut fonctionner en mode génératrice (GADA). En cas où on inverse son couple en injectant un couple moteur au lieu d'un couple résistant au niveau de son arbre, elle garde toujours son propre modèle.

En prenant en compte les hypothèses simplificatrices citées précédemment, on peut exprimer le modèle de cette machine en se basant sur les relations suivantes :

$$\text{Grandeur statoriques : } \begin{cases} [V_s] = [v_{as}, v_{bs}, v_{cs}]^t \\ [I_s] = [i_{as}, i_{bs}, i_{cs}]^t \\ [\Phi_s] = [\Phi_{as}, \Phi_{bs}, \Phi_{cs}]^t \end{cases} \quad (2.2)$$

$$\text{Grandeur rotoriques : } \begin{cases} [V_r] = [v_{ar}, v_{br}, v_{cr}]^t \\ [I_r] = [i_{ar}, i_{br}, i_{cr}]^t \\ [\Phi_r] = [\Phi_{ar}, \Phi_{br}, \Phi_{cr}]^t \end{cases} \quad (2.3)$$

Voici alors les équations des tensions statoriques et rotoriques :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d[\Phi_s]}{dt} \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d[\Phi_r]}{dt} \end{cases} \quad (2.4)$$

Les flux statoriques et rotoriques en fonction des courants, des inductances propres et des inductances mutuelles, sont exprimés par les équations suivantes :

$$\begin{cases} [\Phi_s] = [L_s][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [\Phi_r] = [M_{rs}][I_s] + [L_r][I_r] \end{cases} \quad (2.5)$$

Avec

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [L_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = M \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Où :

$[R_s]$ et $[R_r]$: Matrices des résistances propres statorique et rotorique.

$[L_s]$ et $[L_r]$: Matrices des inductances cycliques statorique et rotorique.

$[M_{sr}]$ et $[M_{rs}]$: Matrices des inductances mutuelles stator-rotor et rotor-stator.

R_s et R_r : Résistances par phase respectivement statorique et rotorique.

L_s et L_r : Inductances propres par phase respectivement statorique et rotorique.

M_s et M_r : Inductance mutuelle entre deux phases stator-stator et rotor-rotor.

M : Inductance mutuelle maximale entre une phase statorique et une phase rotorique.

θ : est l'écart angulaire entre une phase statorique et une phase rotorique.

D'autre part, l'équation fondamentale de rotation du rotor (équation mécanique) est donnée par: [42]

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = C_{em} - C_r - f_c \cdot \Omega_r \quad (2.9)$$

$$\Omega_r = \frac{\omega_r}{p} \quad (2.10)$$

II.1.7. Modèle de la MADA dans le repère de Park

Après établissement du modèle électromagnétique de la machine dans le repère triphasé en tenant compte des hypothèses simplificatrices, on peut noter sa complexité, ce qui nous oblige à faire appel à des modèles plus simples dans des repères à nombre d'axes réduits permettant facilement la traduction mathématique de la machine, l'étude et l'analyse des on régime transitoire.

Parmi ces modèles, on cite celui le plus utilisé dit modèle de Park. Ce modèle a la possibilité de faire une transformation d'un système triphasé (a,b,c) en un système équivalent biphasés généralisé (u,v) et inversement, avec la création des mêmes forces magnétomotrices du champ électromagnétique tournant.[43]

Ainsi, la transformation de Park permet de transformer les enroulements statoriques et rotoriques triphasés en des enroulements statoriques et rotoriques biphasés orthogonaux, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système précédent.

Pour réaliser cette transformation algébrique on utilise les matrices de Park directe (2.11) et inverse (2.12) [39]:

$$[MP(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Et

$$[MP(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

La figure (II.5) représente la disposition des enroulements triphasés statoriques et rotoriques (a, b, c) repérés dans un système à axes réunis ainsi que celle d'axes fictifs (u, v) de la MADA.

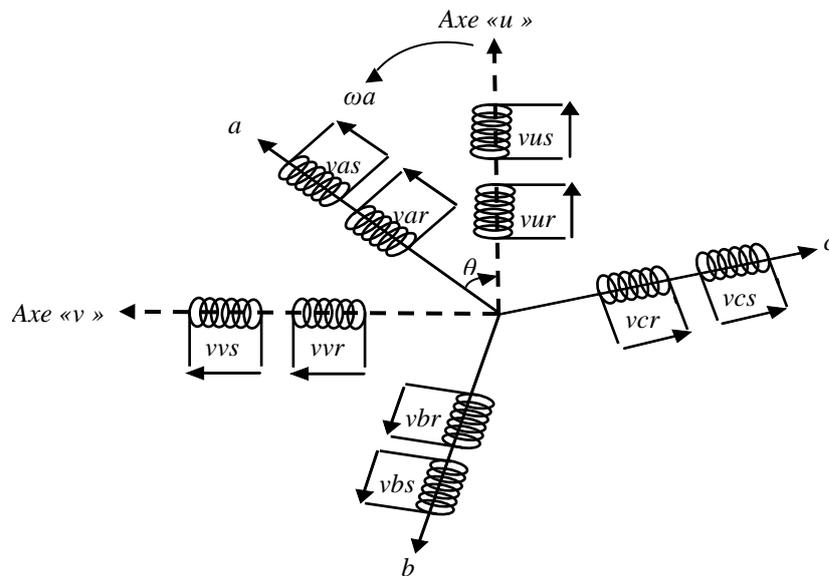


Figure (II.5) : Disposition des enroulements de la MADA [19]

A partir de cette figure, on peut distinguer :

- L'axe direct indice « u » ;
- L'axe en quadrature « indice v ».

Dans le cas de la figure (II.5), on ne peut pas distinguer la composante homopolaire dont l'axe peut être choisi orthogonal au plan (ou, ov). La projection des grandeurs réelles (a, b, c) sur le repère (u, v) se fait en utilisant la matrice de Park comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_u \\ V_v \\ V_0 \end{bmatrix} = [MP(\theta)] \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \tag{2.13}$$

Et inversement :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = [MP(\theta)]^{-1} \begin{bmatrix} V_u \\ V_v \\ V_0 \end{bmatrix} \tag{2.14}$$

D'autre part, la figure (II.6) représente le modèle de la MADA dans le système d'axes (u,v) tournant à la vitesse

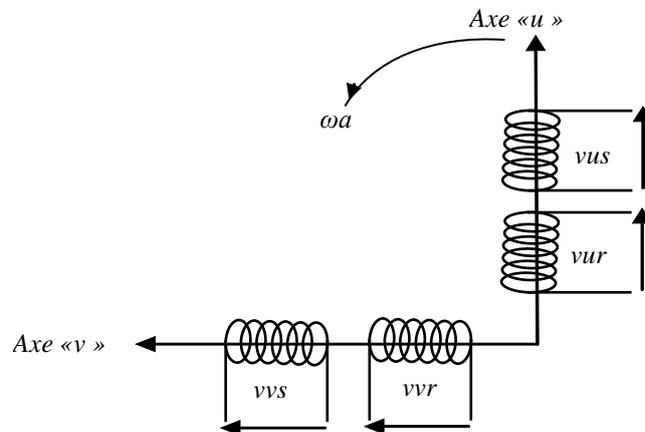


Figure (II.6) : Modèle général de la MADA dans l'axe (u, v) [19]

Après développement et simplification, les tensions statoriques et rotoriques sont exprimées par l'ensemble des équations suivantes:

$$\begin{cases} V_{us} = R_s i_{us} + \frac{d}{dt} \Phi_{us} - \omega_a \Phi_{vs} \\ V_{vs} = R_s i_{vs} + \frac{d}{dt} \Phi_{vs} - \omega_a \Phi_{us} \\ V_{ur} = R_r i_{ur} + \frac{d}{dt} \Phi_{ur} - (\omega_a - \omega_r) \Phi_{vr} \\ V_{vr} = R_r i_{vr} + \frac{d}{dt} \Phi_{vr} - (\omega_a - \omega_r) \Phi_{ur} \end{cases} \quad (2.15)$$

De même, on peut déduire les équations des flux dans le repère de Park à partir des relations suivantes :

$$\begin{cases} \Phi_{us} = L_s i_{us} + M i_{ur} \\ \Phi_{vs} = L_s i_{vs} + M i_{vr} \\ \Phi_{ur} = L_r i_{ur} + M i_{us} \\ \Phi_{vr} = L_r i_{vr} + M i_{vs} \end{cases} \quad (2.16)$$

II.1.8.Choix du système d'axes

Pour étudier la théorie des processus transitoires des machines électriques, on utilise un des trois référentiels d'axes de coordonnées qui sont des cas particuliers du système d'axes généralisé (u, v).

Les équations des tensions sont affectées, par le choix du référentiel, c'est-à-dire de la vitesse de rotation ω_a . (arbitraire)

Référentiel lié au stator : Ce système est utilisé pour étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines électriques (l'axe $u=\alpha$ et l'axe $v=\beta$) ;

⇒ Le système d'axes (α, β) qui est immobile par rapport au stator : $\omega_a = 0$.

Référentiel lié au rotor : Ce système d'axes est utilisé pour étudier les processus transitoires dans les machines synchrones et asynchrones avec une connexion non symétrique des circuits du rotor (l'axe $u=x$ et l'axe $v=y$) ;

⇒ Le système d'axes (x, y) qui est immobile par rapport au rotor : $\omega_a = \omega_r$

Référentiel lié au champ tournant : Dans ce référentiel, le système d'axes (d, q) tourne à la même vitesse du champ électromagnétique. (l'axe $u=d$ et l'axe $v=q$) ;

⇒ Le système d'axes (d, q) qui est immobile par rapport au champ tournant : $\omega_a = \omega_s$

L'utilisation de ce dernier système est recommandée généralement pour étudier les machines asynchrones, en particulier celles qui sont commandées par des convertisseurs de fréquence [[39].

Dans ce système (d, q) lié au champ tournant, on exprime les équations par :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + \omega_s \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (2.17)$$

De la même manière, on déduit les relations des flux dans ce système par :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (2.18)$$

II.1.9. Expression du couple électromagnétique

L'expression de la puissance instantanée de la machine est donnée comme suit [A44] :

$$P(t) = [(V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs}) + (V_{dr} i_{dr} + V_{qr} i_{qr})] \quad (2.19)$$

En remplaçant V_{ds} , V_{qs} , V_{dr} , V_{qr} par leurs expressions, on aura :

$$P(t) = P_{js}(t) + P_{jr}(t) + P_{mgs}(t) + P_{mgr}(t) + P_{em}(t) \quad (2.20)$$

Avec :

$P_{js}(t) = [R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2)]$: représente la puissance dissipée en pertes Joule dans les enroulements du stator ;

$P_{jr}(t) = [R_r (i_{dr}^2 + i_{qr}^2)]$: représente la puissance dissipée en pertes Joule dans les enroulements du rotor ;

$P_{mgs}(t) = [\Phi_{ds} i_{ds} + \Phi_{qs} i_{qs}]$: représente l'échange d'énergie électromagnétique avec la source statorique ;

$P_{mgr}(t) = [\Phi_{dr} i_{dr} + \Phi_{qr} i_{qr}]$: représente l'échange d'énergie électromagnétique avec la source rotorique ;

$P_{em}(t) = [\omega_s (\Phi_{ds} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds}) + (\omega_s - \omega_r) \Phi_{dr} i_{qr} - (\omega_s - \omega_r) \Phi_{qr} i_{dr}]$: représente la puissance électromagnétique.

En utilisant les expressions des flux magnétiques présentées dans l'ensemble d'équations (2.18), et en effectuant les opérations nécessaires de calcul, on obtient la puissance électromagnétique sous une autre forme, soit :

$$P_{em}(t) = \omega_r (\Phi_{ds} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds}) \quad (2.21)$$

$$\text{Sachant que : } \begin{cases} P_{em} = \Omega_r \cdot C_{em} \\ \omega_r = p \cdot \Omega_r \end{cases}$$

On déduit l'expression du couple électromagnétique :

$$C_{em} = p(\Phi_{ds}i_{qs} - \Phi_{qs}i_{ds}) \quad (2.22)$$

Il est à noter que dans le cas d'un fonctionnement en génératrice, celui-ci possède une valeur négative

Les puissances actives et réactives statoriques et rotoriques sont exprimées par :

$$\text{Puissance statorique : } \begin{cases} P_s = (V_{ds}i_{ds} + V_{qs}i_{qs}) \\ Q_s = (V_{qs}i_{ds} - V_{ds}i_{qs}) \end{cases} \quad (2.23)$$

$$\text{Puissance rotorique : } \begin{cases} P_r = (V_{dr}i_{dr} + V_{qr}i_{qr}) \\ Q_r = (V_{qr}i_{dr} - V_{dr}i_{qr}) \end{cases} \quad (2.24)$$

II.1.10. Modèle de la MADA sous forme d'état :

Pour obtenir le modèle complet de la MADA, on remplace les expressions des flux dans les équations de tension. On obtient quatre équations électriques en fonction des composantes des courants et/ou flux statoriques et rotoriques. L'association de l'équation mécanique aux quatre équations électriques donne le modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère de Park.

En se basant sur les équations (2.17) et (2.18), on peut écrire :

$$\begin{cases} \frac{di_{ds}}{dt} = -\frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{\tau_s} + \frac{1}{\tau_r} \right) i_{ds} + (\omega_s - \omega_r) i_{qs} + \frac{1}{\sigma L_s \tau_r} \Phi_{ds} + \frac{\omega_r}{\sigma L_s} \Phi_{qs} + \frac{1}{\sigma L_s} V_{ds} - \frac{M}{\sigma L_s L_r} V_{dr} \\ \frac{di_{qs}}{dt} = -(\omega_s - \omega_r) i_{ds} - \frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{\tau_s} + \frac{1}{\tau_r} \right) i_{qs} - \frac{\omega_r}{\sigma L_s} \Phi_{ds} + \frac{1}{\sigma L_s \tau_r} \Phi_{qs} + \frac{1}{\sigma L_s} V_{qs} - \frac{M}{\sigma L_s L_r} V_{qr} \\ \frac{d\Phi_{ds}}{dt} = -R_s i_{ds} + \omega_s \Phi_{qs} + V_{ds} \\ \frac{d\Phi_{qs}}{dt} = -R_s i_{qs} - \omega_s \Phi_{ds} + V_{qs} \\ \frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{3p}{2J} [(\Phi_{ds}i_{qs} - \Phi_{qs}i_{ds})] - \frac{1}{j} C_r - \frac{f_r}{j} \Omega_r \end{cases} \quad (2.25)$$

Le système d'équation devient ainsi sous forme d'état :

$$\dot{X} = f(X) \quad (2.26)$$

$$\begin{cases} \dot{X} = \frac{dX}{dt} \\ X = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad \Phi_{ds} \quad \Phi_{qs}]^t \\ U = [V_{ds} \quad V_{qs} \quad V_{dr} \quad V_{qr}]^t \end{cases} \quad (2.27)$$

Les matrices A et B sont déterminés par le calcul matriciel suivant :

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{\tau_s} + \frac{1}{\tau_r} \right) & (\omega_s - \omega_r) & \frac{1}{\sigma L_s \tau_r} & \frac{\omega_r}{L_s \sigma} \\ -(\omega_s - \omega_r) & -\frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{\tau_s} + \frac{1}{\tau_r} \right) & -\frac{\omega_r}{\sigma L_s} & \frac{1}{\sigma L_s \tau_r} \\ -R_s & 0 & 0 & \omega_s \\ 0 & -R_s & -\omega_s & 0 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & -\frac{M}{\sigma L_s L_r} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & -\frac{M}{\sigma L_s L_r} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Le système d'équation (2.25), peut être mit sous la formes simplifiée suivantes :

$$\begin{cases} \frac{di_{ds}}{dt} = a_{11}i_{ds} + a_{12}i_{qs} + a_{13}\Phi_{ds} + a_{14}\Phi_{qs} + b_{11}V_{ds} + b_{13}V_{dr} \\ \frac{di_{qs}}{dt} = a_{21}i_{ds} + a_{22}i_{qs} + a_{23}\Phi_{ds} + a_{24}\Phi_{qs} + b_{22}V_{qs} + b_{24}V_{qr} \\ \frac{d\Phi_{ds}}{dt} = a_{31}i_{ds} + a_{34}\Phi_{qs} + V_{ds} \\ \frac{d\Phi_{qs}}{dt} = a_{42}i_{qs} + a_{43}\Phi_{ds} + V_{qs} \\ \frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{3P}{2J} [(\Phi_{ds}i_{qs} - \Phi_{qs}i_{ds})] - \frac{1}{J}C_r - \frac{f_c}{J}\Omega_r \end{cases} \quad (2.30)$$

Les matrices A' et B' sont définie par :

$$A' = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & 0 & 0 & a_{34} \\ 0 & a_{42} & a_{43} & 0 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad B' = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 & b_{13} & 0 \\ 0 & b_{22} & 0 & b_{24} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

Avec :

$\tau_s = \frac{L_s}{R_s}$, $\tau_r = \frac{L_r}{R_r}$ et $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$: représentent respectivement, la constante de temps statorique, la constante de temps rotorique, et le coefficient de dispersion de Blondel

$$a_{11} = a_{22} = -\frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{\tau_s} + \frac{1}{\tau_r} \right) \quad a_{12} = -a_{21} = (\omega_s - \omega_r) \quad a_{13} = a_{24} = \frac{1}{\sigma L_s L_r}$$

$$a_{14} = \omega_r \cdot \frac{1}{L_s \sigma} \quad a_{23} = -\omega_r \cdot \frac{1}{\sigma L_s} \quad a_{31} = a_{42} = -R_s$$

$$a_{34} = -a_{43} = \omega_s \quad b_{11} = b_{22} = \frac{1}{\sigma L_s} \quad b_{13} = b_{24} = \frac{-M}{\sigma L_s L_r}$$

II.2. Modélisation de la turbine

II.2.1. Introduction

La figure suivante montre les trois parties de la turbine à modéliser :

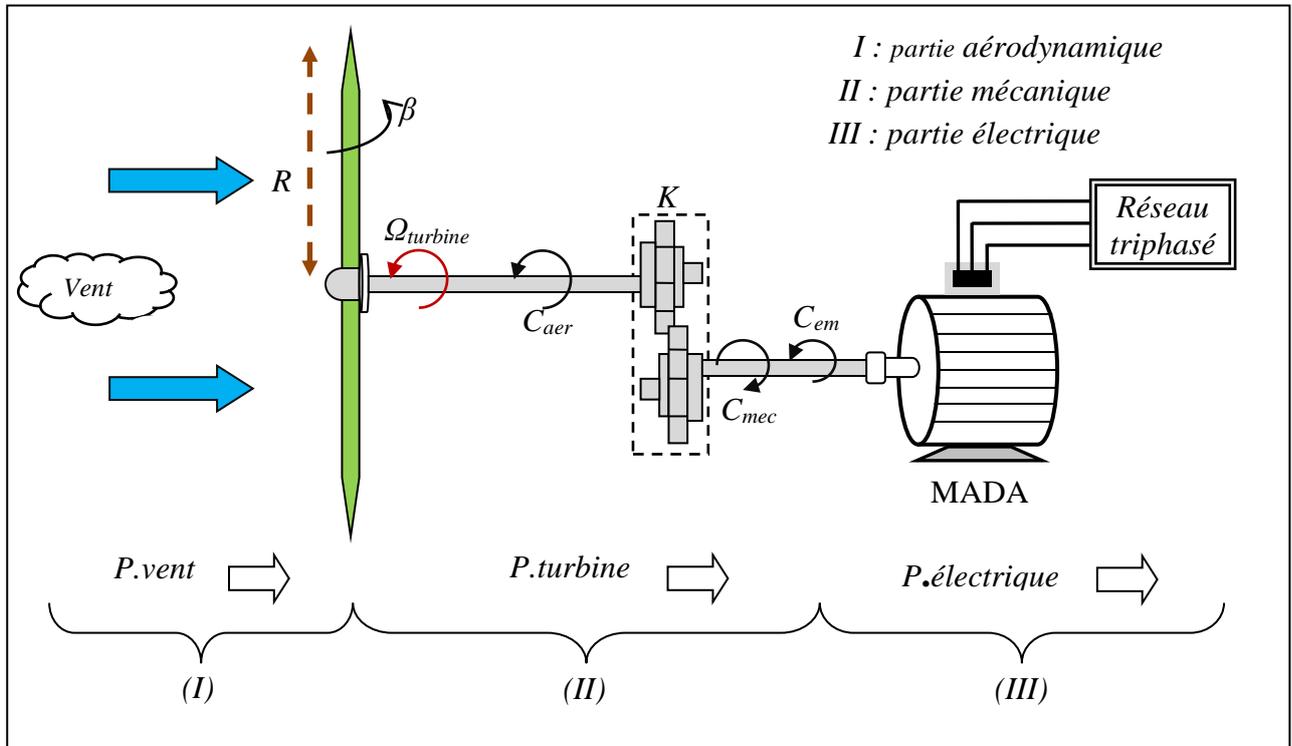


Figure (II.7) : Configuration d'une éolienne [50].

II.2.2. Partie Aérodynamique (le Vent)

Le vent est l'énergie primaire des aérogénérateurs. L'énergie cinétique contenue dans le vent est transformée en partie en énergie mécanique par la turbine, puis en énergie électrique par le générateur. C'est donc une variable importante à modéliser car la précision des simulations dépendra de la qualité de son modèle.

L'un des principes retenus consiste à générer une série temporelle de la vitesse du vent $v_{vent}(t)$ à partir d'un bruit en entrée. Pour ce faire, la vitesse du vent va être décomposée en deux composantes :

- Une composante turbulente du vent $v_T(t)$ est un processus aléatoire stationnaire (ne varie pas avec la vitesse moyenne du vent).

- Une composante lente v_0 ; c'est la moyenne de la vitesse du vent variant régulièrement sur de plus longues périodes dans un site donné.[5][21].

$$v_{vent}(t) = v_0 + v_T(t) \quad (2.32)$$

II.2.3. Partie mécanique

Dans cette partie, il y a la turbine éolienne, le multiplicateur de vitesse et le rotor de la génératrice : la turbine éolienne se compose de 3 pales orientables; le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique qui tourne à sa vitesse nominale.

II.2.3.1. modèle de la turbine

L'équation mathématique suivante représente la relation entre la vitesse du vent et la puissance mécanique extraite. [32][45]

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi R^2 V_{vent}^3 \quad (2.33)$$

Où :

ρ : 1,25 kg/m³ représente la masse volumique de l'air, dans les conditions normales de température et de pression.

V_{vent} : est la vitesse du vent.

L'éolienne ne pouvant récupérer qu'une fraction de la puissance du vent (coefficient de puissance C_p) la puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors [1][2][5] [30][49]

$$P_{turbine} = C_p \cdot P_{vent}$$

$$P_{turbine} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_{vent}^3 \quad (2.34)$$

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine. La figure (II.8) représente la variation de ce coefficient en fonction du rapport de vitesse λ et de l'angle de l'orientation de la pale β . Le rapport de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_{turbine}}{V_{vent}} \quad (2.35)$$

Le couple exercé par le vent sur la turbine (ou couple mécanique à la sortie de la turbine) est défini par :

$$C_{aer} = \frac{P_{turbine}}{\Omega_T} \quad (2.36)$$

Des approximations numériques ont été développées dans la littérature pour calculer le coefficient C_p et différentes expressions ont été proposées. [2],[45],[46],[36]

$$C_p = c_1 \left\{ c_2 \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.0035}{\beta^3 + 1} \right) - c_3 \cdot \beta - c_4 \right\} e^{-c_5 \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.0035}{\beta^3 + 1} \right)} + c_6 \cdot \lambda \quad (2.37)$$

Avec :

$$C1 = 0,5109; \quad C2 = 116; \quad C3 = 0,4; \quad C4 = 5; \quad C5 = 21; \quad C6 = 0,0068$$

β : Angle de calage.

R : Longueur de la pale.

$\Omega_{turbine}$: Vitesse mécanique de la turbine en rad/s.

Les caractéristiques de C_p en fonction de λ pour différentes valeurs de l'angle de calage sont illustrées sur la figure I.21. La valeur maximale de C_p ($C_{pmax} = 0.48$) est atteinte pour $\beta=0$ et $\lambda=8,1$. Cette valeur particulière de λ est définie comme la valeur nominale λ_{nom} [47].

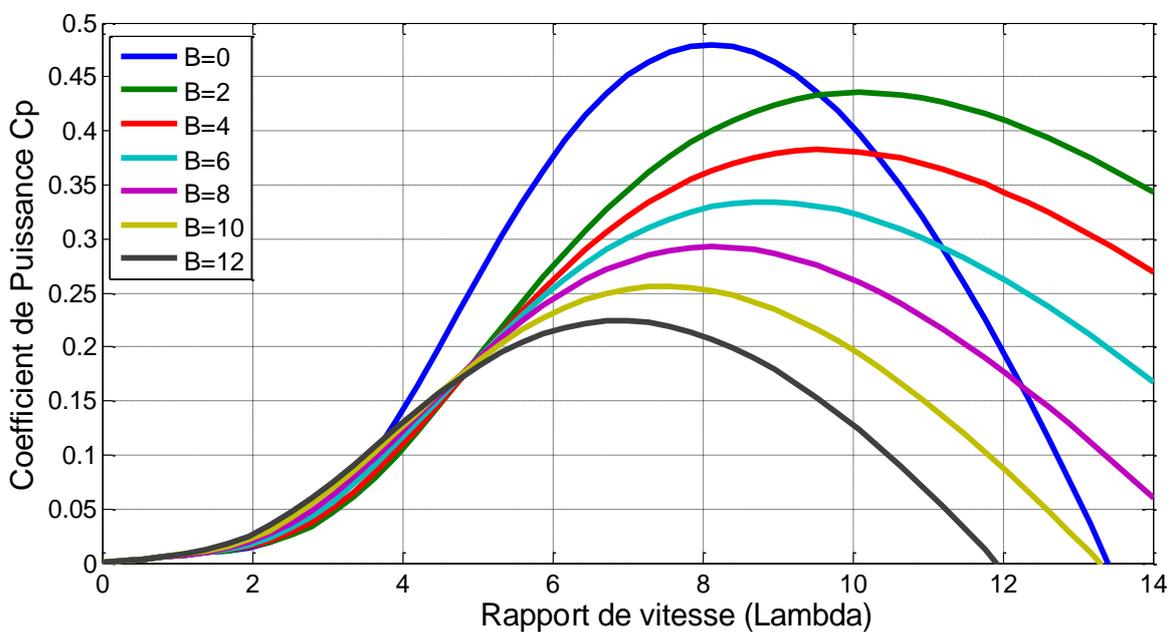


Figure (II.8) : Coefficient de puissance $C_p=f(\lambda)$ [19]

II.2.3.2. modèle du Multiplicateur

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain. L'élasticité et le frottement du multiplicateur sont négligés. Les pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles. Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport de multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur [48] :

$$C_{mec} = \frac{1}{K} C_{aer} \quad (2.38)$$

Où :

K : Rapport de multiplication.

C_{mec} : Couple mécanique adaptant la vitesse de la turbine à celle du générateur ainsi :

$$\Omega_{mec} = K \Omega_t \tag{2.39}$$

Où :

Ω_{mec} : vitesse mécanique du générateur (rad/s).

II.2.3.3. modèle de l'arbre

L'équation différentielle qui caractérise le comportement mécanique de l'ensemble turbine et génératrice est donnée par :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} + C_{em} - f \cdot \Omega_{mec} \tag{2.40}$$

Où :

J : inertie totale des parties tournantes (turbine+génératrice) (Kg.m²).

f : coefficient de frottement visqueux.

C_{mec} : couple mécanique de la génératrice en (N.m).

C_{em} : couple électromagnétique de la génératrice en (N.m).

Le schéma bloc suivant représente le modèle de l'arbre de l'éolienne associé au modèle de la turbine : [1][2][5][30][49]

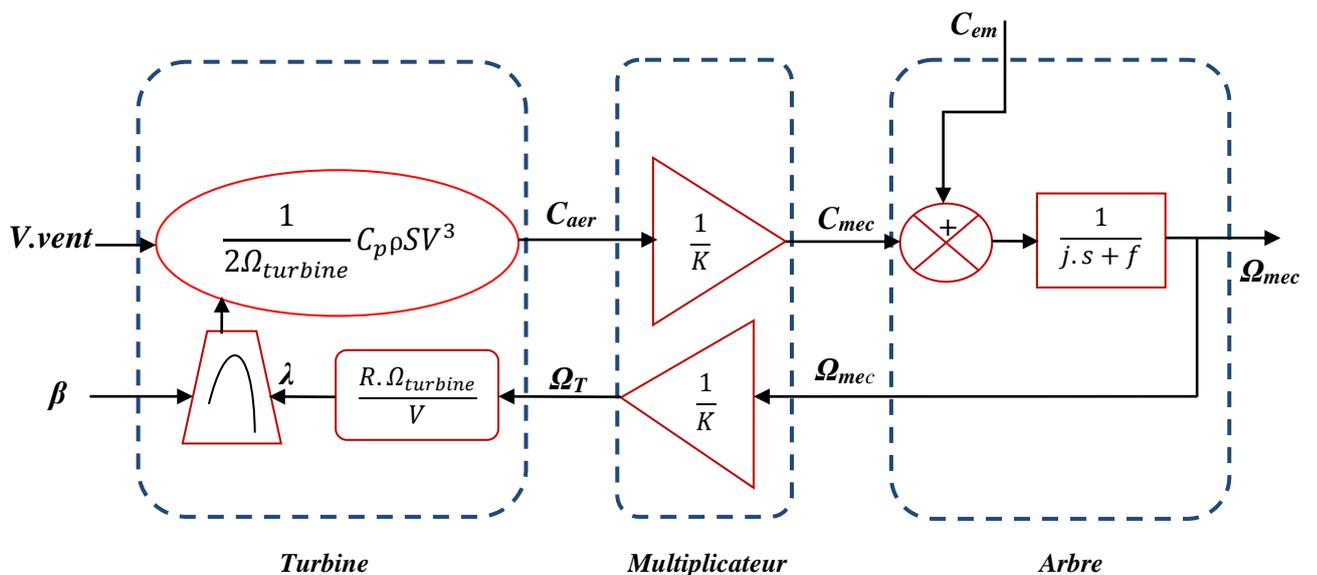


Figure (II.9) : Schéma bloc de la turbine [50]

II.2.4. Synthèse du régulateur P-I pour le contrôle de la vitesse

Puisque nous sommes intéressés à la deuxième zone de fonctionnement de la turbine "MPPT" comme énoncé au chapitre précédent, on va chercher l'extraction de la puissance maximale en temps réel par optimisation de la conversion énergétique. L'angle de calage des pales β étant fixe, on ajuste rotativement le couple électromagnétique de la génératrice afin de régler la vitesse de rotation et de rapprocher la vitesse spécifique de l'éolienne à sa valeur optimale et le coefficient de puissance à sa valeur maximale.

L'asservissement de la vitesse mécanique est réalisé à l'aide d'un correcteur P-I donné en boucle fermée par le schéma bloc ci-après :

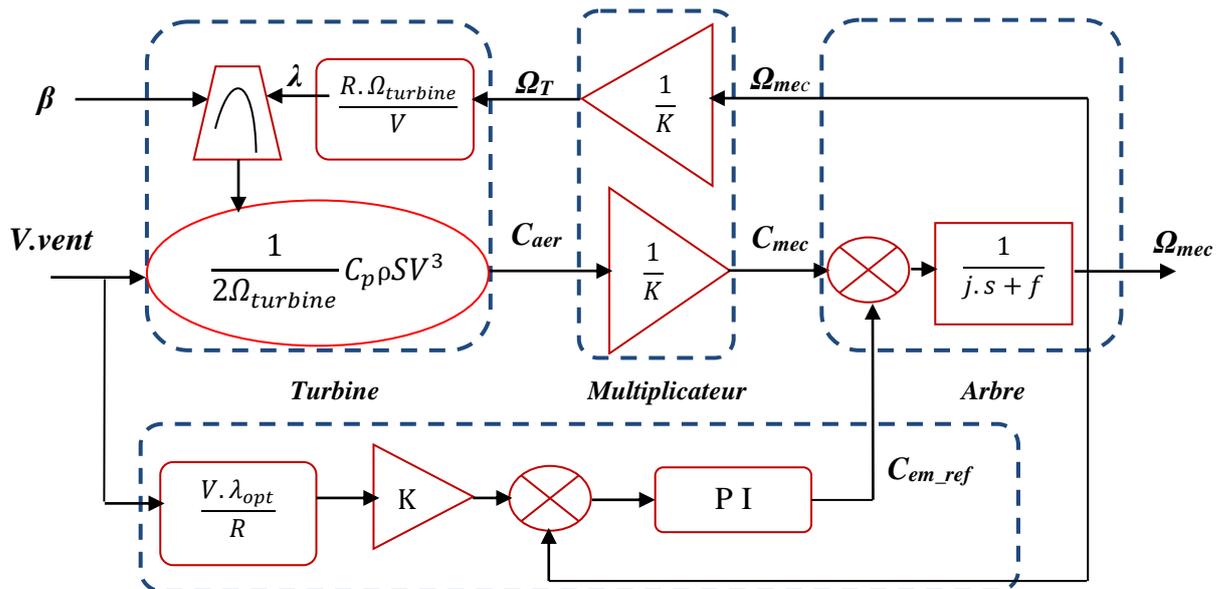


Figure (II.10) : Schéma bloc de turbine avec asservissement de la vitesse mécanique [50]

Le schéma bloc de la régulation de vitesse est donné par la figure ci-après :

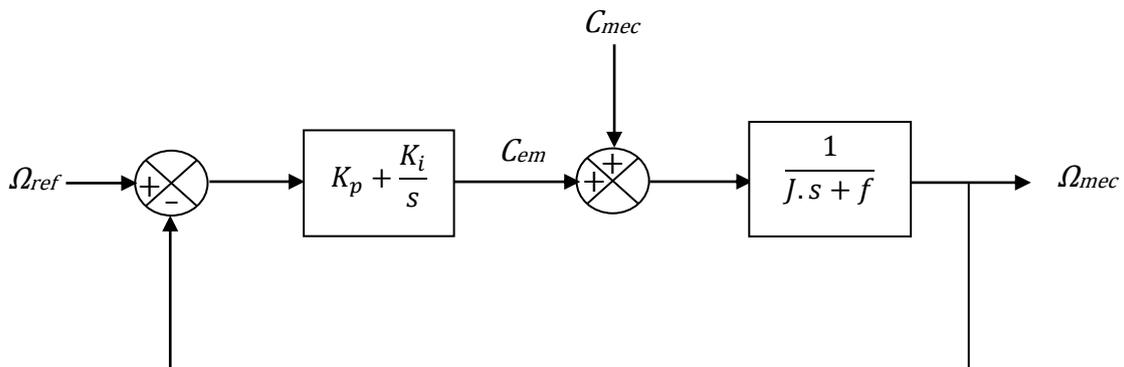


Figure (II.11) : Schéma Bloc du correcteur PI [47] [50]

$$C_{em} = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (2.41)$$

K_p : Gain proportionnel

K_i : Gain intégral.

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par :

$$\Omega_{mec} = \frac{1}{Js+f} (C_{mec} + C_{em}) \quad (2.42)$$

$$\Omega_{mec} = \frac{1}{Js+f} C_{mec} + \frac{1}{Js+f} \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (2.43)$$

$$\Omega_{mec} \left(1 + \frac{K_p + \frac{K_i}{s}}{Js+f} \right) = \frac{K_p + \frac{K_i}{s}}{Js+f} \Omega_{ref} + \frac{1}{Js+f} C_{mec} \quad (2.44)$$

$$\Omega_{mec} \left(\frac{Js+f + K_p + \frac{K_i}{s}}{Js+f} \right) = \frac{K_p + \frac{K_i}{s}}{Js+f} \Omega_{ref} + \frac{1}{Js+f} C_{mec} \quad (2.45)$$

$$\Omega_{mec} = \frac{K_p \cdot s + K_i}{Js^2 + (f + K_p) \cdot s + K_i} \Omega_{ref} + \frac{s}{Js^2 + (f + K_p) \cdot s + K_i} C_{mec} \quad (2.46)$$

$$\Omega_{mec} = F(s) \cdot \Omega_{ref} + G(s) \cdot C_{mec} \quad (2.47)$$

$$F(s) = \frac{K_p \cdot s + K_i}{Js^2 + (f + K_p) \cdot s + K_i} \text{ ou encore } F(s) = \frac{\frac{K_p}{K_i} \cdot s + 1}{\frac{J}{K_i} s^2 + \frac{(f + K_p)}{K_i} \cdot s + 1} \quad (2.48)$$

$$G(s) = \frac{s}{Js^2 + (f + K_p) \cdot s + K_i} \quad (2.49)$$

C_{mec} : Est considéré comme une perturbation qu'on peut négliger, on aura donc :

$$\Omega_{mec} = F(s) \cdot \Omega_{ref} \quad (2.50)$$

Par identification ; la pulsation naturelle et le coefficient d'amortissement sont déterminés par :

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_i}{J}} \quad \text{et} \quad \xi = \frac{f + K_p}{K_i} \cdot \frac{\omega_n}{2} \quad (2.50)$$

Les paramètres du régulateur sont calculés pour un facteur d'amortissement $\xi = 0,7$ et un temps de réponse en boucle fermée $Tr = 0,1s$ [1] [5]

$$\begin{cases} K_i = J \cdot \omega_n^2 \\ K_p = \frac{2 \cdot K_i \cdot \xi}{\omega_n} - f \end{cases} \quad (2.51)$$

II.3. Modélisation de la source d'alimentation

II.3.1. Introduction

Pour entraîner en rotation une machine asynchrone, plusieurs méthodes sont utilisables, du branchement direct sur le réseau, aux variateurs de vitesse en passant par les démarreurs.

Dans ce travail on va étudier l'association d'une machine asynchrone à rotor bobiné doublement alimentée, dont :

Le stator de la génératrice est directement connecté au réseau ;

Le rotor est alimenté par le réseau à tension réduite via un convertisseur statique permettant le redressement et l'ondulation de la tension.

L'alimentation comporte trois parties : [13][17][18][48]

- Un redresseur triphasé double alternance à diodes
- Un filtre passif passe bas (L, C)
- Un onduleur de tension à MLI.

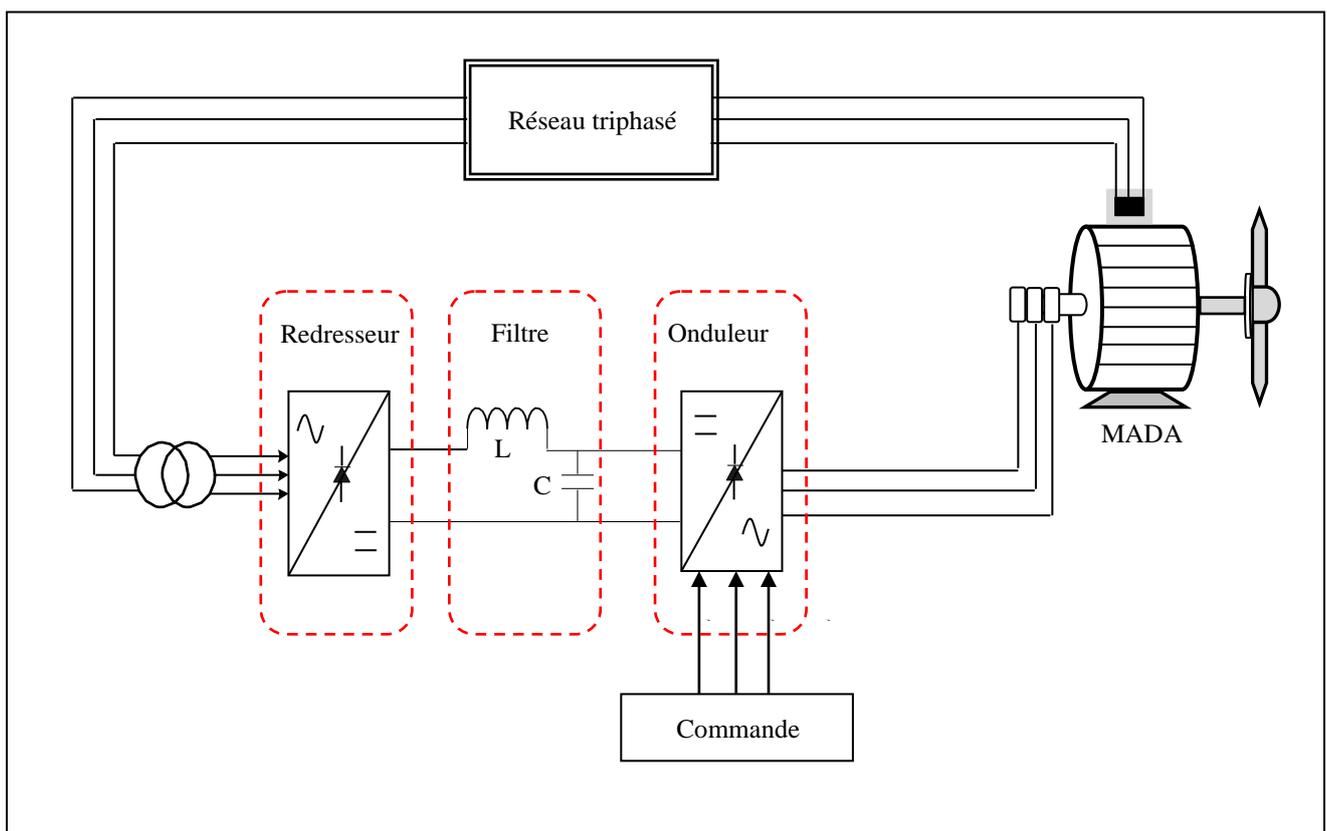


Figure (II.12) : Représentation du système d'alimentation de la MADA [19] [47]

II.3.2. Modélisation du redresseur triphasé à diodes

Les redresseurs sont les convertisseurs de l'électronique de puissance qui assurent la conversion alternative-continu. Alimentés par une source de tension alternative, ils permettent d'alimenter en courant continu le récepteur branché à leur sortie. Nous utilisons le pont triphasé à diodes alimenté par un système de tension sinusoïdales triphasées, représenté sur la figure (II.13) [18][48]

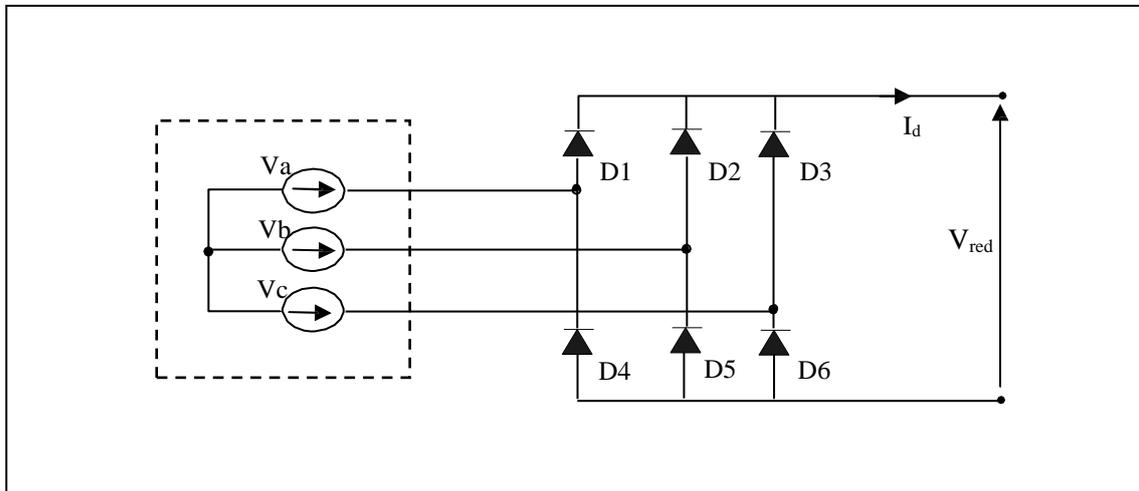


Figure (II.13) : Représentation du redresseur triphasé à diodes. [19][47]

Ce redresseur comporte :

- Trois diodes (D₁, D₂, D₃) à cathode commune assurant l'allée du courant I_d,
- Et
- Trois diodes (D₄, D₅, D₆) à anode commune assurant le retour du courant I_d.

Deux diodes d'un même bras ne peuvent conduire simultanément. Lorsque D₁ conduit, l'une des deux diodes D₅ et D₆ conduit également. Il en vient que D₁ conduit lorsque V_a est supérieur à V_b et V_c, ou encore :

$$V_a = \text{Max}(V_j) ; j = a; b; c \quad (2.52)$$

Le même raisonnement conduit aux conditions suivantes :

- Di conduit si V_i=Max (V_j) ; i=a, b, c et j=1, 3, 5.
- Di' conduit si V_{i'}=Min (V_j) ; i'=a, b, c et j=2, 4, 6.

Si on suppose que le redresseur est alimenté par un réseau triphasé équilibré de tension :

$$\begin{cases} V_a(t) = V_m \sin(2\pi f_t) \\ V_b(t) = V_m \sin(2\pi f_t - 2\pi/3) \\ V_c(t) = V_m \sin(2\pi f_t - 4\pi/3) \end{cases} \quad (2.53)$$

Si on néglige l'effet d'empiètement, la tension de sortie du redresseur sera définie comme suit :

$$V_{red} = \text{Max}(V_j) - \text{Min}(V_j) ; j = a; b; c \quad (2.54)$$

Cette tension est représentée par la figure (II.14) :

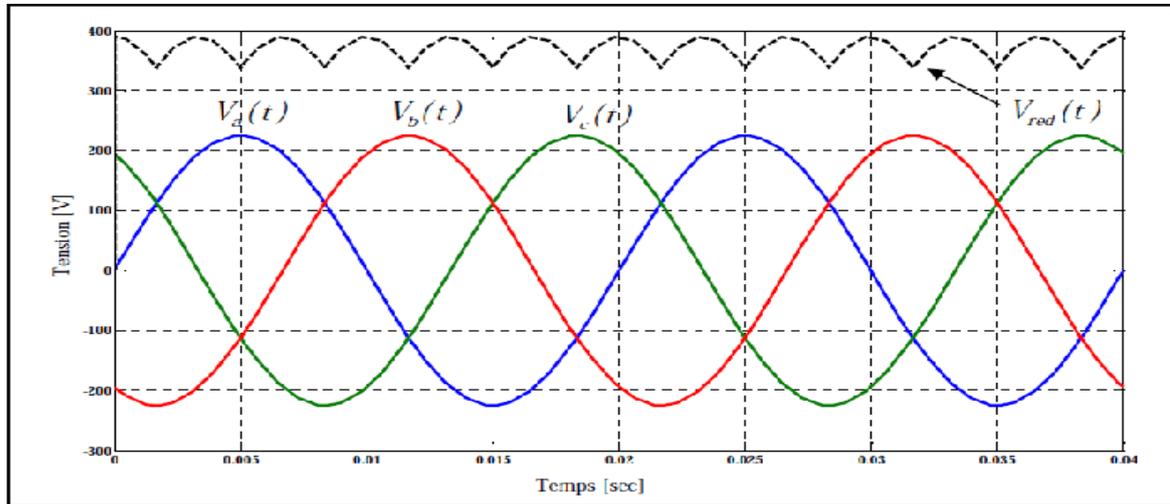


Figure (II.14) : Représentation de la tension de sortie du redresseur [19][47]

II.3.3. Modélisation du filtre

Pour corriger la source de tension continue, on insère à l'entrée de l'onduleur une capacité C , celle-ci absorbe la différence entre le courant unidirectionnel I_d et supprime les brusques variations de V_{DC} lors des commutations ; par contre, pour réduire l'ondulation du courant I et protéger l'onduleur contre la vitesse critique de croissance du courant di/dt , on place en série une inductance de lissage L ; l'ensemble LC constitue un filtre passe bas.

Le schéma représentatif est donné par la figure (II.15) [18] [48]

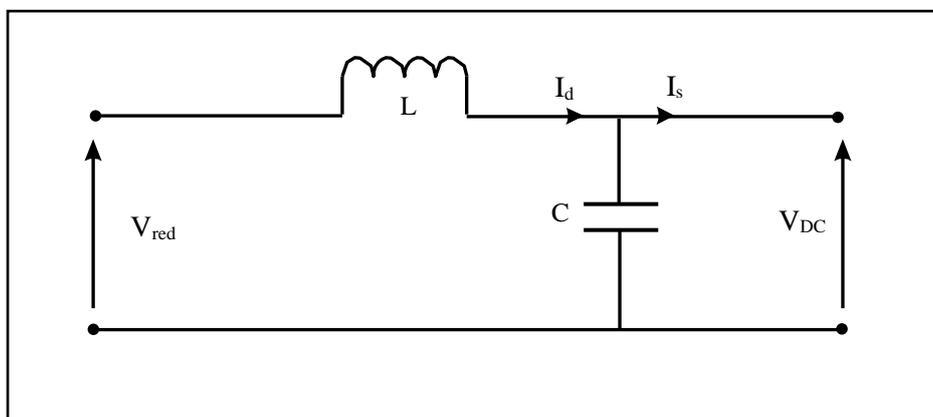


Figure (II.15) : Représentation du filtre passe –bas [19] [47]

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

$$\begin{cases} \frac{dI_d}{dt} = \frac{1}{L} (V_{red} - V_{DC}) \\ \frac{dV_{DC}}{dt} = \frac{1}{C} (I_d - I_S) \\ \omega_c = \frac{1}{\sqrt{L \times C}} \end{cases} \quad (2.55)$$

Où :

V_{red} : est la tension redressée ;

V_{DC} : est la tension filtrée appliquée à l'onduleur

- Le rôle de la capacité C est d'assurer le caractère de la source de tension à l'entrée de l'onduleur, de fournir de l'énergie réactive à la machine, et d'absorber le courant négatif restitué par la charge
- Le rôle de l'inductance L est de lisser le courant I_d à travers la source de tension
- Le filtre est du deuxième ordre dont la fréquence de coupure est $\omega_c = 2\pi f_c$

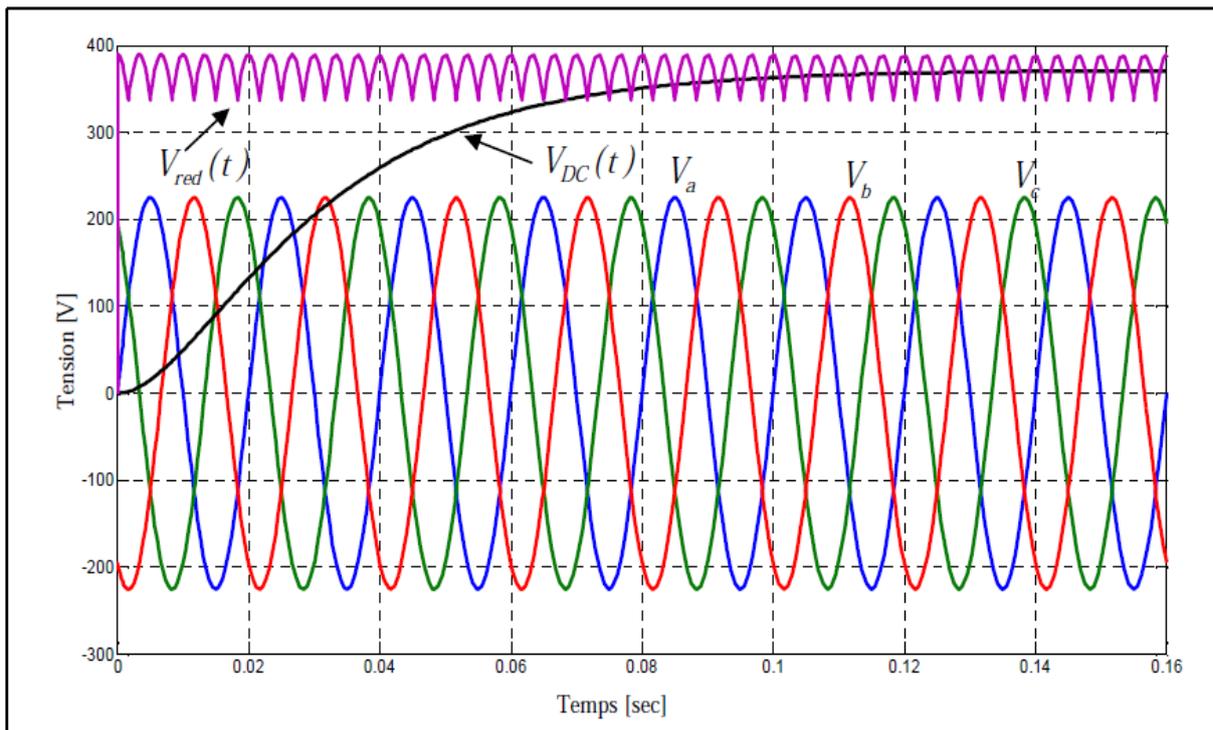


Figure (II.16) : Tension redressée et filtrée à l'entrée de l'onduleur rotatif [19][47]

II.3.4. Association onduleur – MADA

L'onduleur de tension est un convertisseur statique constitué de cellules de commutation généralement à transistor ou thyristor GTO pour les grandes puissances. Il permet d'imposer à la machine des ondes de tensions à amplitudes et fréquences variables à partir d'un réseau 220/380V-50Hz. Après redressement, la tension filtrée V_{DC} est appliquée à l'onduleur.

L'onduleur est l'organe de commande de la MADA et peut être considéré comme un amplificateur de puissance.

Le schéma structurel des onduleurs triphasés à deux niveaux et de ses charges est illustré par la figure (II.17) Chaque IGBT – diode assemblé en parallèle forme un interrupteur bi-commandable (à l'ouverture et à la fermeture) dont l'état apparaît complémentaire à celui qui lui est associé pour former ainsi un bras de commutation par exemple T1–T2 ; T3–T4 ou T5–T6.[18] [48]

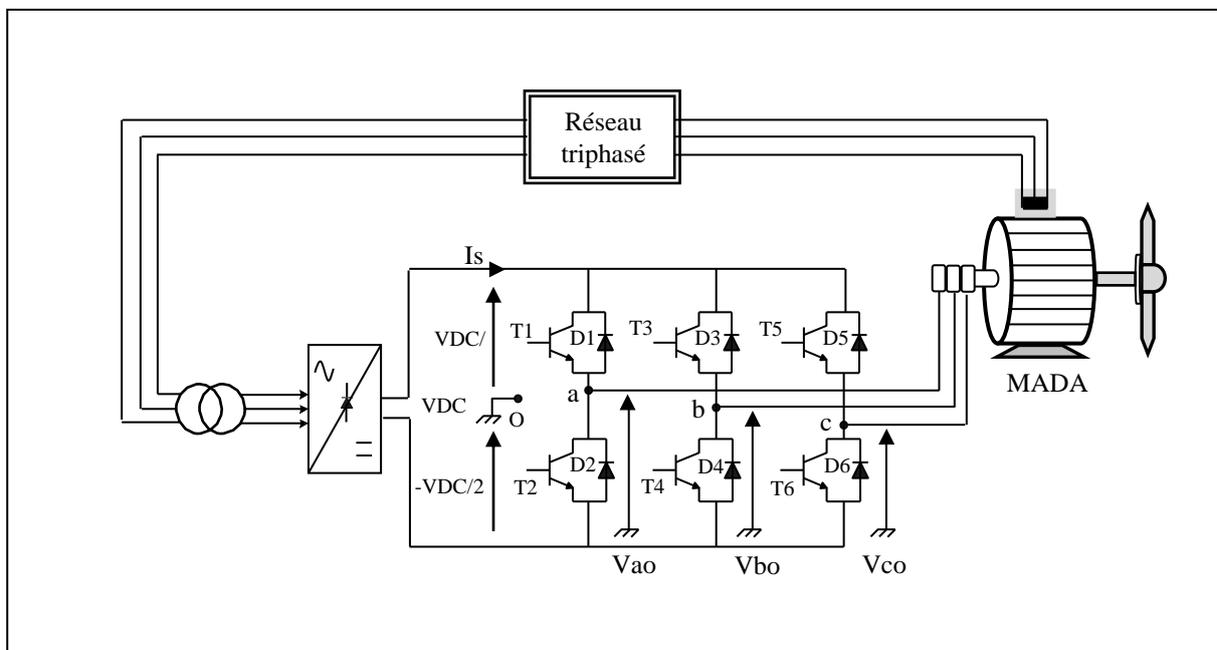


Figure (II.17) : Schéma d'Association onduleur – MADA [19][47]

Les couples d'interrupteurs (T_1 – T_2) , (T_3 – T_4) ou (T_5 – T_6) doivent être commandés de manière complémentaire pour assurer la continuité des courants alternatifs dans la charge d'une part et d'éviter le court-circuit de la source d'autre part.

Les diodes D_i ($i=1, 2, \dots, 6$) sont des diodes à roue libre assurant la protection des IGBTs.

L'état des interrupteurs, supposés parfaits peut être défini par une fonction logique F_i ($i = 1, 2, 3$) appelée fonction de commutation telle que :

$$F_i = \begin{cases} +1 & \text{si l'interrupteur de haut est fermé et celui d'en bas ouvert} \\ 0 & \text{si l'interrupteur de haut est ouvert et celui d'en bas fermé} \end{cases}$$

Dans ce cas de la commande complémentaire, on peut remplacer chaque bras de l'onduleur par un interrupteur à deux positions, comme le montre la figure (II.18). [18] [48]

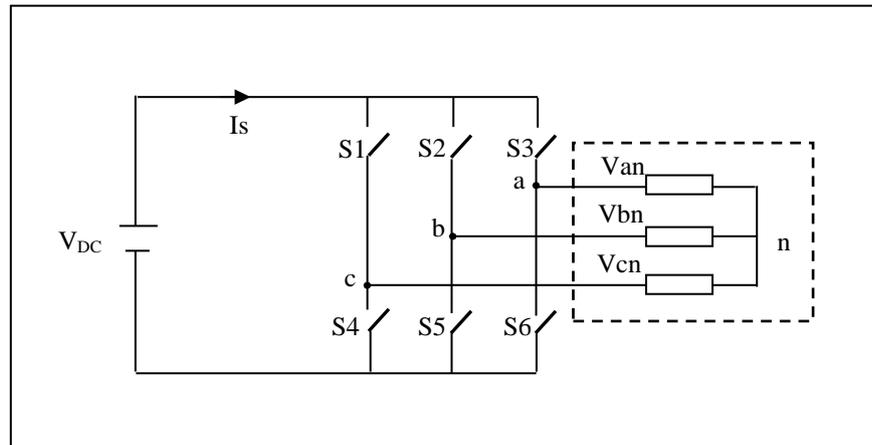


Figure (II.18) : Schéma simplifié d'un onduleur commandé en tension [19][47]

Les tensions des phases a , b , c par rapport au point milieu o de la source sont données par le tableau ci dessous: [50] [51]

Tension de la phase : a	S1	S2
$V_{ao} = +V_{DC}/2$	Fermé	
$V_{ao} = -V_{DC}/2$		Fermé
$V_{ao} = 0$	Ouvert	Ouvert

Tension de la phase : b	S3	S4
$V_{bo} = +V_{DC}/2$	Fermé	
$V_{bo} = -V_{DC}/2$		Fermé
$V_{bo} = 0$	Ouvert	Ouvert

Tension de la phase : c	S5	S6
$V_{co} = +V_{DC}/2$	Fermé	
$V_{co} = -V_{DC}/2$		Fermé
$V_{co} = 0$	Ouvert	Ouvert

On peut déduire les tensions composées en utilisant les tensions de phase précédentes exprimées par rapport au point milieu :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (2.56)$$

Soit n le point neutre du côté de la MADA, alors on peut écrire :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad (2.57)$$

Et comme le système est supposé en équilibre, c'est-à-dire :

$$\begin{cases} i_{an} + i_{bn} + i_{cn} = 0 \\ V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \end{cases} \quad (2.58)$$

Alors :

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (2.59)$$

En remplaçant dans (2.57) on obtient les expressions des tensions simples de la machine :

$$\begin{cases} V_a = V_{an} = V_{ao} - V_{no} = \frac{1}{3}(2V_{ao} - V_{bo} - V_{co}) \\ V_b = V_{bn} = V_{bo} - V_{no} = \frac{1}{3}(2V_{bo} - V_{ao} - V_{co}) \\ V_c = V_{cn} = V_{co} - V_{no} = \frac{1}{3}(2V_{co} - V_{ao} - V_{bo}) \end{cases} \quad (2.60)$$

On peut aussi écrire ces tensions sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix} \quad (2.61)$$

La relation (2.61) peut s'écrire sous la forme suivante :

$$[V_a \ V_b \ V_c]^t = T \cdot [V_{ao} \ V_{bo} \ V_{co}]^t \quad (2.62)$$

Avec $T = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}$ est la matrice de modélisation de l'onduleur

On cherchera donc une expression reliant la tension V_{DC} aux tensions (V_{ab} , V_{bc} , V_{ca}) qui soit une fonction de la position des interrupteurs.

A partir de l'équation (2.56) et (2.57), on peut établir les relations suivantes :

$$V_{ab} = \begin{cases} V_{DC} & \text{si } S_1 = 1 \text{ et } S_3 = 0 \\ -V_{DC} & \text{si } S_1 = 0 \text{ et } S_3 = 1 \\ 0 & \text{si } S_1 = 0 \text{ et } S_3 = 0 \end{cases} \quad S_1 \text{ et } S_2 \text{ représentent la branche N}^\circ 1 \text{ (Fonction } F_1)$$

$$V_{bc} = \begin{cases} V_{DC} & \text{si } S_3 = 1 \text{ et } S_5 = 0 \\ -V_{DC} & \text{si } S_3 = 0 \text{ et } S_5 = 1 \\ 0 & \text{si } S_3 = 0 \text{ et } S_5 = 0 \end{cases} \quad S_3 \text{ et } S_4 \text{ représentent la branche N}^\circ 2 \text{ (Fonction } F_2)$$

$$V_{ca} = \begin{cases} V_{DC} & \text{si } S_5 = 1 \text{ et } S_1 = 0 \\ -V_{DC} & \text{si } S_5 = 0 \text{ et } S_1 = 1 \\ 0 & \text{si } S_5 = 0 \text{ et } S_1 = 0 \end{cases} \quad S_5 \text{ et } S_6 \text{ représentent la branche N}^\circ 3 \text{ (Fonction } F_3)$$

En fonction des signaux de commande F_i , on peut écrire les tensions simples (V_a, V_b, V_c) par :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{DC}}{3} \times \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (2.63)$$

Ainsi huit (08) combinaisons des fonctions logiques de commutations possibles sont données dans le tableau suivant : [50] [51]

Vecteur Commutation	Etat des Interrupteurs			Tensions Simples			Tensions Composées		
	F_1	F_2	F_3	V_{an}	V_{bn}	V_{cn}	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}
Vect_0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Vect_1	0	0	0	$-1/3V_{DC}$	$-1/3V_{DC}$	$2/3V_{DC}$	0	$-V_{DC}$	0
Vect_2	0	1	0	$-1/3V_{DC}$	$2/3V_{DC}$	$1/3V_{DC}$	$-V_{DC}$	0	V_{DC}
Vect_3	0	1	1	$-2/3V_{DC}$	$1/3V_{DC}$	$1/3V_{DC}$	0	$-V_{DC}$	V_{DC}
Vect_4	1	0	0	$2/3V_{DC}$	$-1/3V_{DC}$	$-1/3V_{DC}$	V_{DC}	0	$-V_{DC}$
Vect_5	1	0	1	$1/3V_{DC}$	$-2/3V_{DC}$	$1/3V_{DC}$	V_{DC}	$-V_{DC}$	0
Vect_6	1	1	0	$1/3V_{DC}$	$1/3V_{DC}$	$-2/3V_{DC}$	0	V_{DC}	$-V_{DC}$
Vect_7	1	1	1	0	0	0	0	0	0

II.3.5. Stratégie de commande par MLI triangulo-sinusoïdale:

Elle consiste à convertir une modulante (tension de référence au niveau commande), généralement sinusoïdale, en une tension sous forme de créneaux successifs, générée à la sortie de l'onduleur (niveau puissance). Au niveau électronique, son principe repose sur la comparaison de la modulante avec la porteuse (tension à haute fréquence de commutation). La valeur du rapport de fréquences entre la porteuse triangulaire (ou en dents de scie) et la modulante procède d'un compromis entre une bonne neutralisation des harmoniques et un bon rendement de l'onduleur.

Les techniques de modulation sont nombreuses, les plus utilisées sont: La naturelle, la régulière, l'optimisée (élimination des harmoniques non désirés), la vectorielle et la modulation à bande d'hystérésis.

L'objectif de la MLI, c'est la minimisation ou la réduction des oscillations sur la vitesse, le couple et les courants. Cela permettra de réduire la pollution du réseau électrique en harmonique, avec minimisation des pertes dans le système par conséquent augmenter le rendement

Dans notre travail, parmi les techniques de modulation précitées la technique MLI naturelle sera utilisée en se basant sur la comparaison entre deux signaux voir figure (II.19) :

Le premier c'est le signal de référence V_{ref} qui représente l'image de la sinusoïde qu'on désire à la sortie de l'onduleur, ce signal est modulable en amplitude et en fréquence.

Le second qui est appelé signal de la porteuse V_{pm} qui définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques S_a , S_b et S_c de l'onduleur. C'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence.

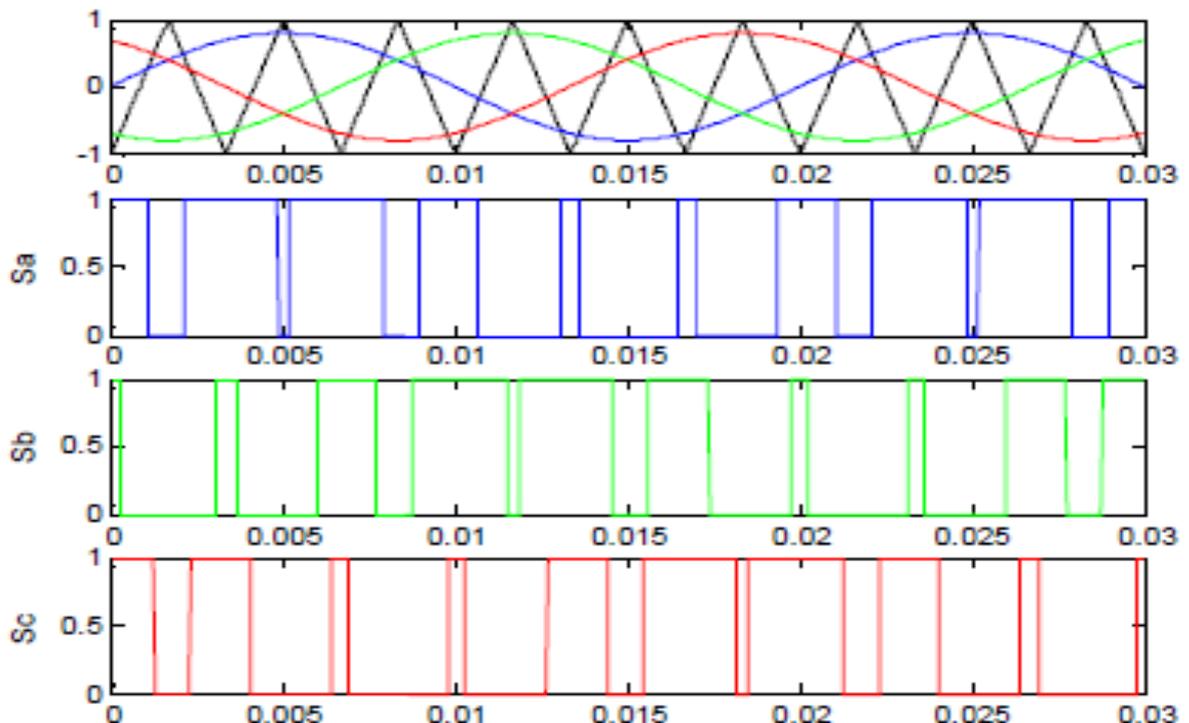


Figure (II.19) : Principe de commande en MLI sinus-triangulaire [19][47]

Les trois signaux de références sont donnés par l'équation suivante :

$$\left\{ V_{ref} = V_{mref} \cdot \sin\left(2\pi f_{ref} \cdot t - 2(c - 1) \frac{\pi}{3}\right), \quad c = 1, 2, 3 \right. \quad (2.64)$$

La commande MLI est caractérisée par les deux paramètres suivants :

- L'indice de modulation $m = f_p/f_{ref}$, c'est le rapport de la fréquence de modulation sur la fréquence de référence.
- Le coefficient de réglage en tension $r = V_{mref}/V_{pm}$ c'est le rapport de l'amplitude de la tension de référence à la valeur crête de l'onde de modulation

f_p : Fréquence de la porteuse ;

f_{ref} : Fréquence de l'onde de référence ;

V_{mref} : Amplitude de tension de l'onde de référence ;

V_{pm} : Amplitude de la porteuse.

Les tensions simples de la sortie onduleurs générées par le système d'équation (2.61), sont données par la figure ci-après :

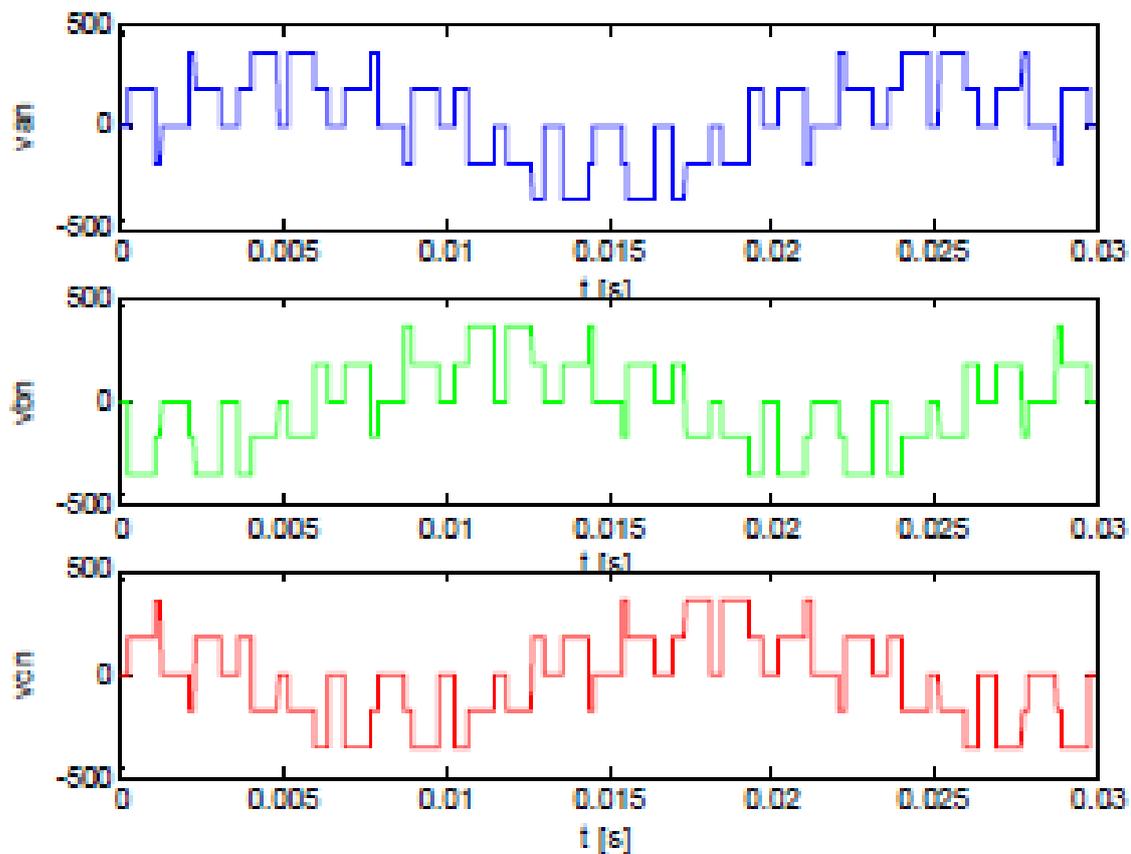


Figure (II.20) : Tensions simples de la sortie onduleur [19][47]

II.4. Simulation du système éolien turbine-MADA

II.4.1. Simulation

Les résultats de la simulation sous MATLAB SIMULINK du modèle la MADA qui est basé sur les équations obtenues avec la transformation de Park (plan (d, q)) liée au champ tournant sont montrés sur les figures ci-dessous. Ces résultats sont obtenus pour le modèle d'une machine asynchrone à double alimentation, de puissance 1,5 kW, alimentée directement par deux sources de tension triphasées parfaites, l'une au niveau du stator avec une fréquence du réseau qui est 50Hz et d'amplitude de $\sqrt{2} \times 220V$, et l'autre au niveau du rotor avec une amplitude de 12V et une fréquence égale à la fréquence rotorique.

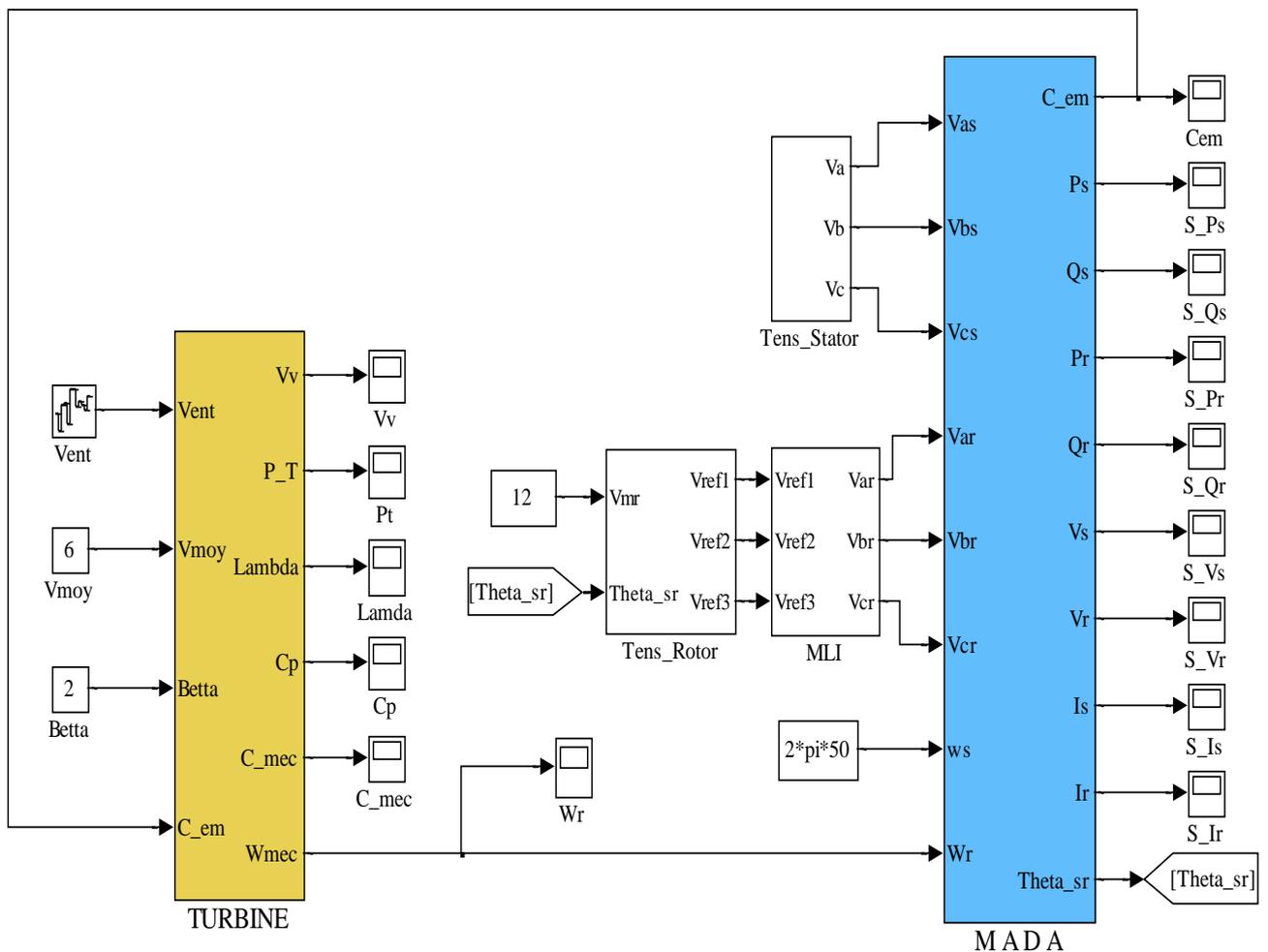
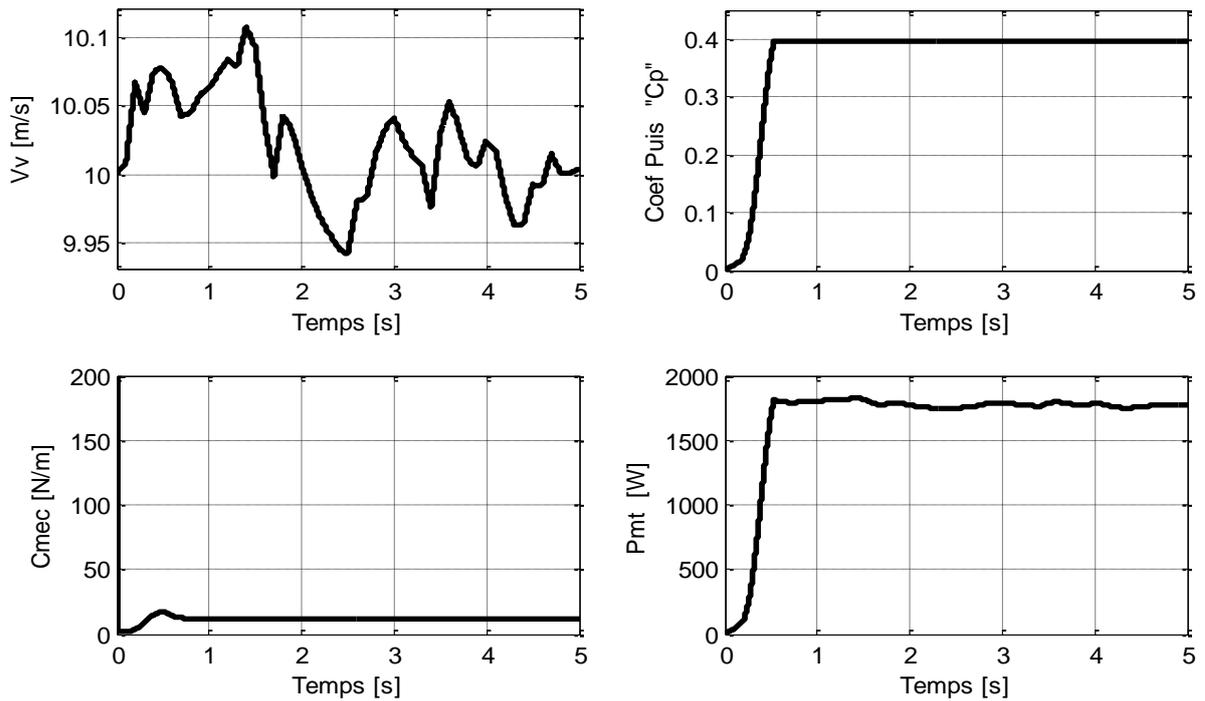


Figure (II.21) : Schéma global du système éolien "Turbine + MADA"

II.4.2. Résultats de simulation



Figure(II.22) : Caractéristique de la turbine

- Allure du vent appliquée et Coefficient de Puissance Cp
- Couple mécanique transmis à l'arbre et Puissance mécanique disponible

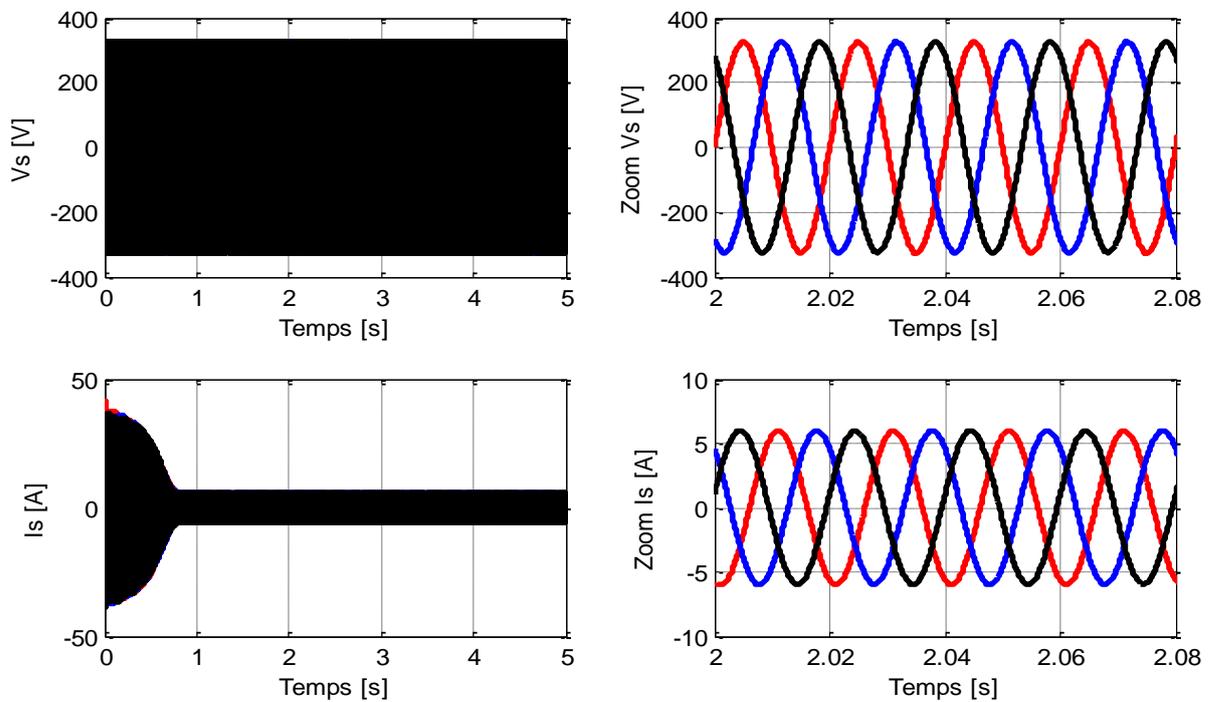


Figure (II.23) : Caractéristique de la MADA

- Courant statorique avec zoom.
- Tension statorique avec zoom.

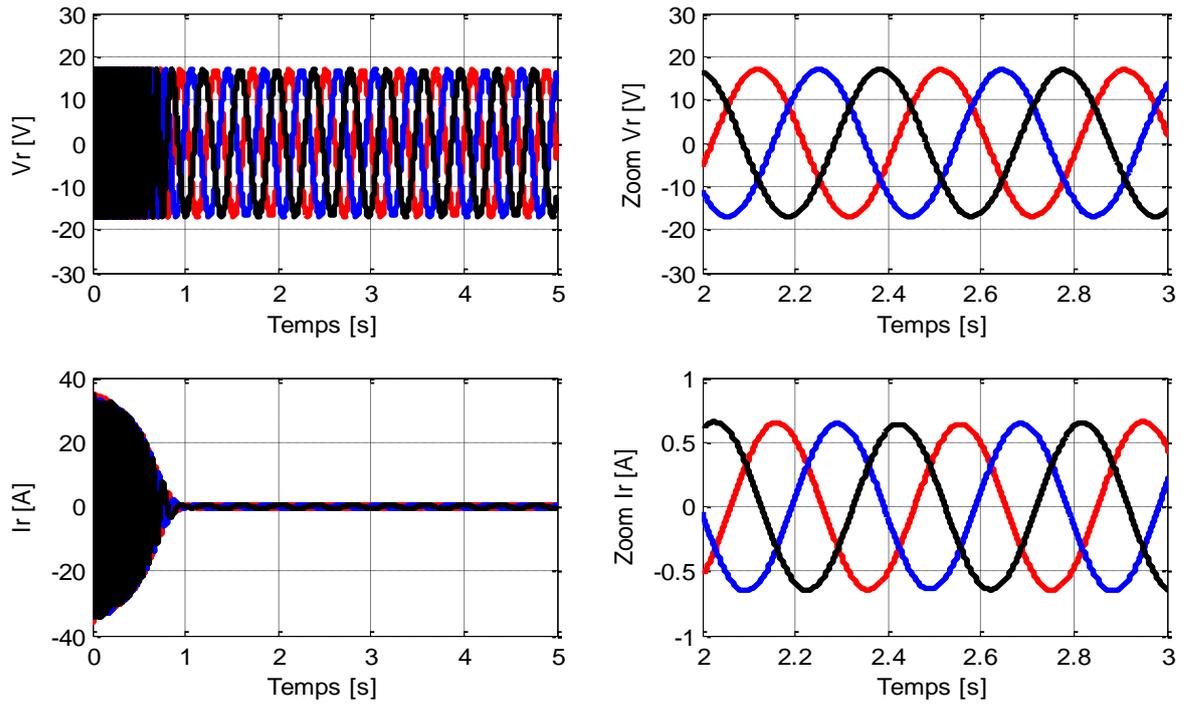


Figure (II.24) : Caractéristique de la MADA

- Courant rotorique avec zoom.
- Tension rotorique avec zoom.

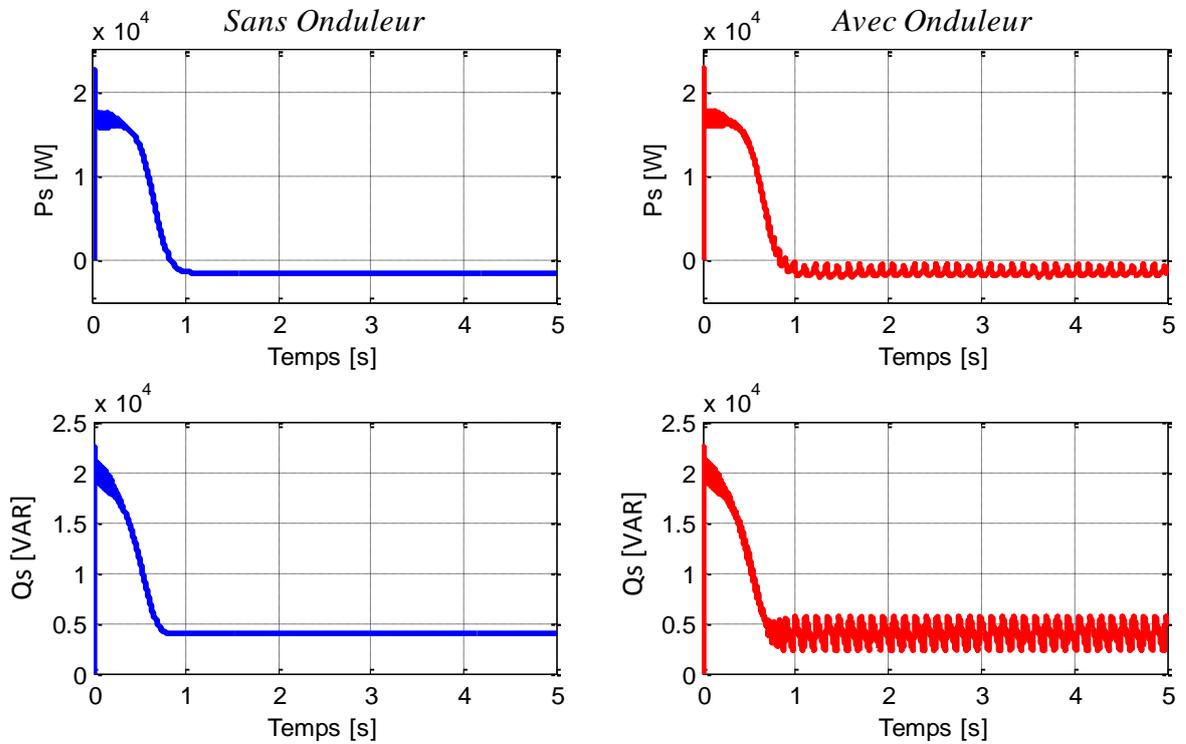


Figure (II.25) : Puissances statoriques Active et Réactive

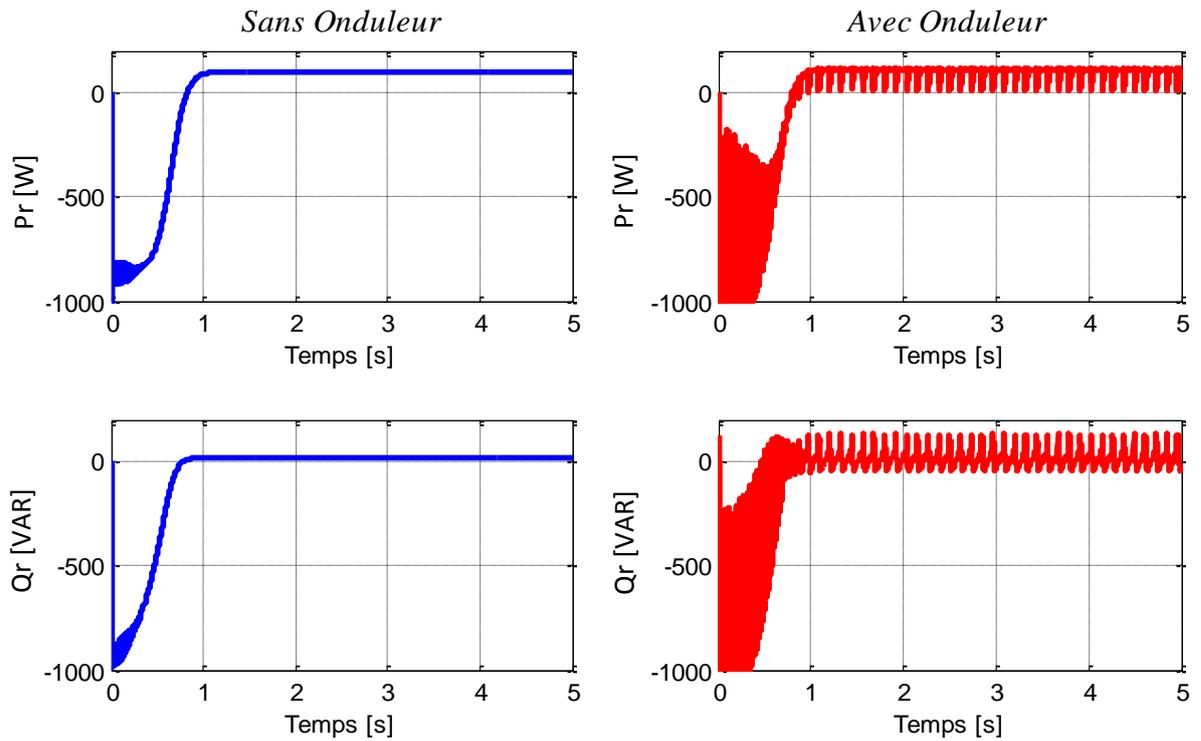


Figure (II.26) : Puissances rotoriques Active et Réactive

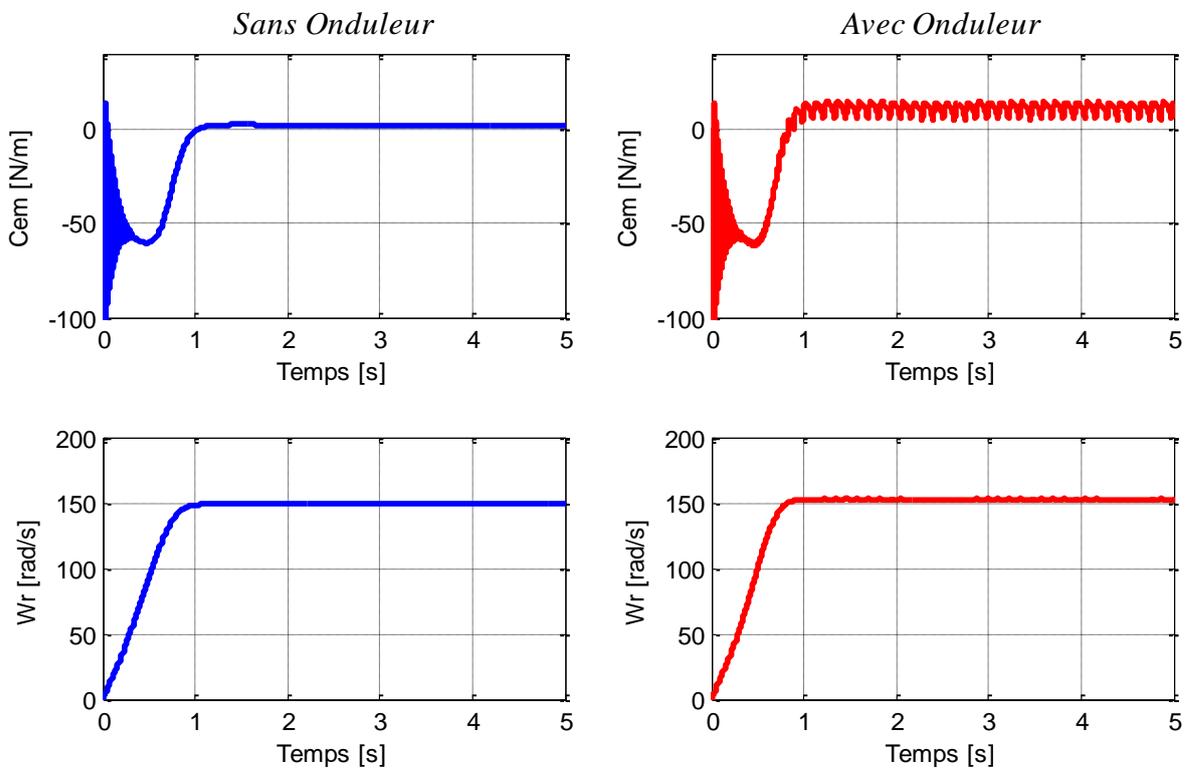


Figure (II.27) : Couple électromagnétique et Vitesse mécanique

Les résultats de simulation montrent bien que la variation de la puissance électrique est adaptée à la variation de la vitesse de la génératrice.

On constate l'importance des courants statoriques et rotoriques pendant le démarrage, après un temps égal à environ 0,05s, ils se stabilisent et prennent leurs formes sinusoïdales habituelles.

II.5. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de présenter la structure d'une machine asynchrone à double alimentation en comparaison avec les machines classiques de type asynchrone à cage où nous avons effectué une présentation de ses différentes configurations.

Afin de mieux comprendre les avantages que peut présenter cette machine par rapport aux structures classiques, nous avons analysé les possibilités qu'elle offrait en fonctionnement générateur. L'analogie de fonctionnement qui peut être faite avec les machines synchrones dans la configuration des flux a conduit à dénommer cette machine : "machine généralisée".

Pour simplifier le modèle de la machine nous avons par la suite, établi le modèle de la machine dans un système d'axe biphasé (d, q) lié au stator à l'aide de la transformation de PARK.

Nous avons analysé les avantages et les inconvénients de l'utilisation des convertisseurs statiques pour l'alimentation de la MADA, deux configurations sont proposées, une où la machine est alimentée par un convertisseur au rotor alors que le stator est lié au réseau (fonctionnement en générateur pour une application du type éolien), c'est cette configuration qui nous intéresse, l'autre où la machine est alimentée par deux convertisseurs, l'un au stator et l'autre au rotor et dédiée à des applications industrielles telles le laminage ou le pompage (fonctionnement moteur).

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

CHAPITRE 3

COMMANDE VECTORIELLE DE LA MADA

III.1.Introduction

Dans une machine à courant continu, la force magnétomotrice de l'induit établit un angle droit avec l'axe des flux inducteur, et ceci quelque soit la vitesse de rotation du moteur. Ainsi le couple est proportionnel au produit du flux inducteur et du courant d'induit.

Dans le cas d'une machine à excitation séparée, si l'on maintient le flux inducteur constant, le couple est directement proportionnel au courant induit. On obtient donc des bonnes performances dynamiques puisque le couple peut être contrôlé aussi rapidement que le courant d'induit peut l'être.

Dans une machine asynchrone par contre, l'angle entre le champ tournant du stator et celui du rotor varie avec la charge, ce qui donne des interactions complexes et des réponses dynamique oscillantes pour obtenir une situation équivalente à celle du moteur à courant continu et afin d'obtenir un contrôle dynamique performant du couple, BLASHKE et HASSE ont proposé une méthode permettant de maîtriser ces difficultés en introduisant des cordonnées de champ, ou le vecteur courant statorique sera décomposé en deux composantes, une qui produit le couple et l'autre le flux, cela pour le cas d'une machine à cage. Pour le cas d'une machine asynchrone à double alimentation et par analogie, c'est le vecteur courant rotorique qui sera décomposé. La dynamique de la MADA sera donc ramenée à celle d'une MCC. Les bases de la nouvelle théorie de commande des machines à courant alternatif sont contenues dans la « commande vectorielle », [52].

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'électricité de l'éolienne, nous allons réaliser un contrôle indépendant des puissances actives et réactives en établissant les équations qui lient les valeurs des tensions rotoriques, générées par un onduleur, aux puissances actives et réactives statoriques ; c'est le principe de la commande vectorielle par orientation du flux [1].

La technique de la commande appliquée à cette machine est réalisée aux moyens des régulateurs PI pour les puissances actives et réactives statoriques permettant ainsi d'obtenir de meilleures performances lors des régimes transitoires.

III.2. Principe de la commande à flux orienté

La commande vectorielle par flux orienté, notée FOC (Field Oriented Control) est une expression qui apparaît de nos jours dans la littérature traitant les techniques de contrôle des moteurs électriques, elle consiste à rendre le comportement du moteur asynchrone identique à celui de la machine à courant continu. Cette méthode se base sur la transformation des variables électriques vers un référentiel qui tourne avec le vecteur du flux rotorique. Par conséquent, les dynamiques du flux rotorique sont linéaires d'où l'utilisation d'un simple PI pour réguler le flux. Quand les dynamiques du flux rotorique ont atteint une consigne constante, la dynamique de la vitesse devient linéaire et peut être régulée par un PI classique, [52] [53] [54]

La commande à flux orienté permet de piloter la machine suivant deux axes : un axe pour le flux et un autre pour le couple. La figure (III.1) illustre l'équivalence entre l'expression du couple que l'on réalise avec la commande découplée classique d'une machines à courant continu et la commande vectorielle d'une MADA.

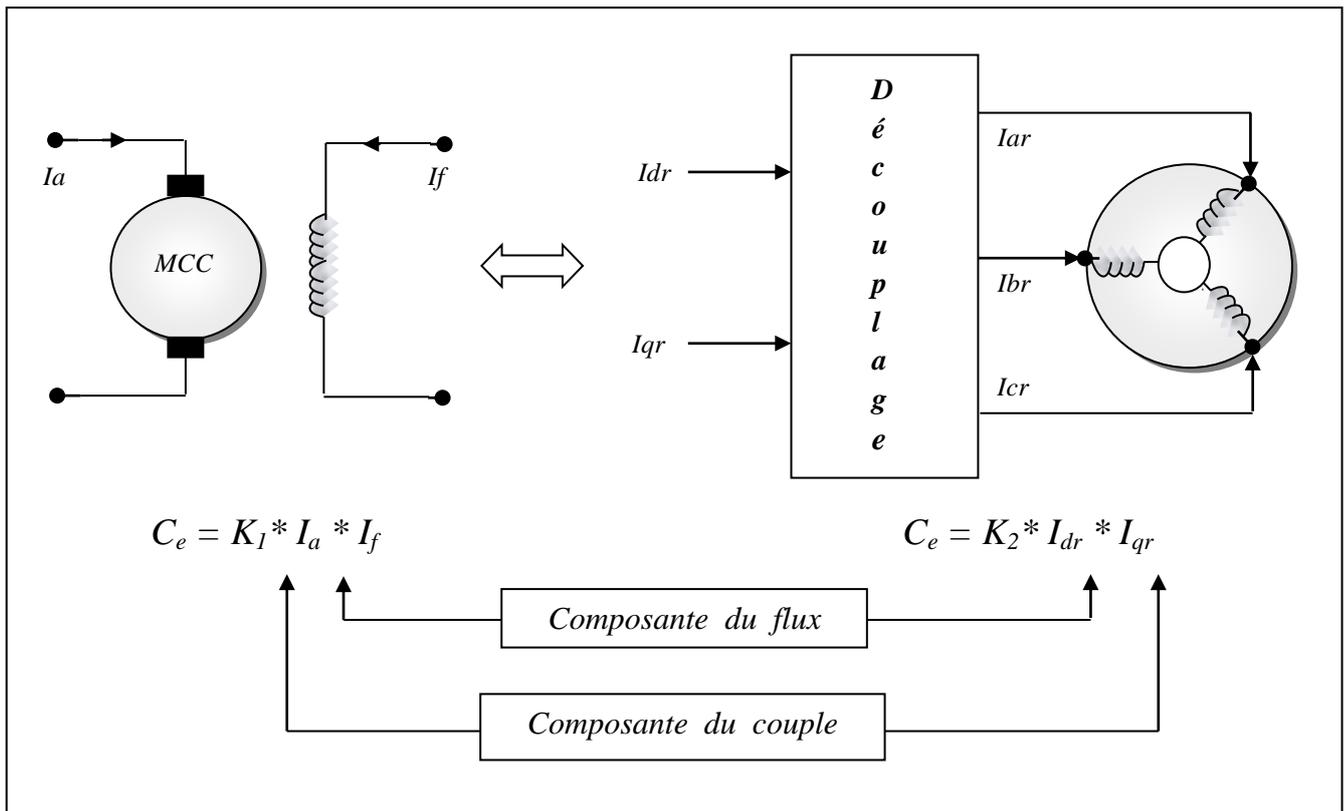


Figure (III.1) : Schéma de principe du découplage de la MADA par analogie à la MCC [6]

De nombreuses variétés ont été présentes dans la littérature, que l'on peut classer :

Suivant la source d'énergie :

- Commande en tension ;
- Commande en courant ;

Suivant l'orientation du repère :

- Le flux rotorique ;
- Le flux statoriques ;
- Le flux d'entrefer ;

Suivant la détermination de la position du flux :

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

L'examen de l'expression du couple de la machine montre qu'elle résulte d'une différence de deux composantes en quadrature du courant statorique et de flux rotorique qui présente un couplage complexe entre les grandeurs de la machine. Le référentiel de travail pour la commande est celui lié au champ tournant afin que l'axe (d) coïncide avec la direction désiré du flux, qui peut être rotorique, statorique, ou d'entrefer. Ainsi il est possible d'orienter les différents flux de la machine [8].

Le flux résultant Φ peut être soit :

Le flux statorique avec les conditions : $\Phi = \Phi_s = \Phi_{ds}$ et $\Phi_{qs} = 0$

Le flux rotorique avec les conditions : $\Phi = \Phi_r = \Phi_{dr}$ et $\Phi_{qr} = 0$

Le flux d'entrefer avec les conditions : $\Phi = \Phi_g = \Phi_{dg}$ et $\Phi_{qg} = 0$

III.3. Stratégie de commande en puissance active et réactive.

Nous avons vu dans les chapitres précédents que l'intérêt de l'utilisation de la MADA, outre la taille du convertisseur, était de pouvoir fonctionner à vitesse variable en suivant la caractéristique de puissance optimale de l'éolienne [5], [47]. Cette caractéristique montre que pour chaque vitesse de vent, il existe une vitesse de rotation optimale (correspondant à la valeur maximale du coefficient de puissance) permettant à l'éolienne d'avoir le meilleur rendement possible. Pour pouvoir tourner à cette vitesse optimale ; à vitesse de vent donnée, la turbine doit avoir un couple mécanique résistant donné, c'est à dire une puissance active débitée par la MADA. C'est en utilisant cette référence de puissance que la machine peut alors être commandée.

III.3.1. Relations entre courants statoriques et courants rotoriques

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

Il s'agit d'obtenir un certain découplage entre le stator et le rotor afin que l'expression du couple soit similaire à celle du couple de la machine à courant continu. Le principe consiste à orienter le flux statorique suivant l'axe d du référentiel tournant figure (III.2).

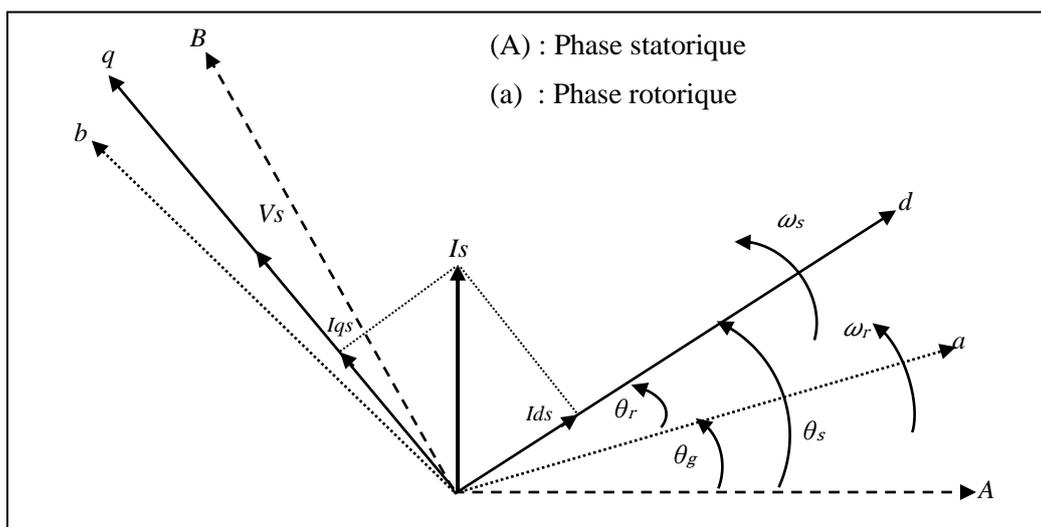


Figure (III.2) : Orientation du flux statorique sur l'axe "d" [6]

Nous utilisons la modélisation diphasée de la machine. On oriente le repère (d,q) afin que l'axe d soit aligné sur le flux statorique Φ_s .

Ainsi :

$$\Phi_{ds} = \Phi_s \text{ et } \Phi_{qs} = 0 \quad (3.1)$$

L'équation du couple électromagnétique (2.22) est donnée par :

$$C_{em} = P \cdot (\Phi_{ds} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds})$$

De :

$$\begin{cases} \Phi_s = \Phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \Phi_{qs} = 0 = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (3.2)$$

On obtient :

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\Phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} \cdot I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (3.3)$$

L'expression du couple devient :

$$C_{em} = P \cdot \frac{M}{L_s} \cdot I_{qr} \cdot \Phi_s \quad (3.4)$$

Ce couple représente une perturbation pour la turbine éolienne et prend une valeur négative

Si l'on suppose le réseau électrique stable, ayant pour tension simple V_s cela conduit à un flux statorique Φ_s constant. Cette considération associée à l'équation (3.3) montre que le couple électromagnétique C_{em} est directement proportionnel au courant rotorique en quadrature i_{qr} [1].

De plus, si l'on néglige la résistance des enroulements statoriques, les équations des tensions statoriques de la machine se réduisent à :

$$\begin{cases} V_{ds} = \frac{d\Phi_s}{dt} \\ V_{qs} = \omega_s \cdot \Phi_s \end{cases} \quad (3.5)$$

Avec l'hypothèse du flux statorique constant, on obtient :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s \end{cases} \quad (3.6)$$

Ainsi, l'expression du flux et du couple deviennent :

$$\begin{cases} \Phi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \\ C_{em} = p \cdot \frac{M}{L_s} \cdot I_{qr} \cdot \frac{V_s}{\omega_s} \end{cases} \quad (3.7)$$

III.3.2. Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques

Dans un repère diphasé quelconque, les puissances active et réactive statoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = (V_{ds} \cdot i_{ds} + V_{qs} \cdot i_{qs}) \\ Q_s = (V_{qs} \cdot i_{ds} - V_{ds} \cdot i_{qs}) \end{cases} \quad (3.8)$$

Ou bien encore, d'après l'équation (3.5) par :

$$\begin{cases} P_s = V_s \cdot i_{qs} \\ Q_s = V_s \cdot i_{ds} \end{cases} \quad (3.9)$$

Pour obtenir l'expression des puissances en fonction des courants rotoriques, on remplace dans l'équation précédente les courants par l'équation (3.6) :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} \cdot i_{qr} \\ Q_s = V_s \cdot \frac{\Phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} \cdot V_s \cdot i_{dr} \end{cases} \quad (3.10)$$

L'expression des puissances peut donc se simplifier de la manière suivante:

$$\begin{cases} P_s = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} \cdot i_{qr} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} - \frac{M}{L_s} \cdot V_s \cdot i_{dr} \end{cases} \quad (3.11)$$

Compte tenu du repère choisi et des approximations faites et si l'on considère l'inductance magnétisante M comme constante, le système obtenu lie de façon proportionnelle la puissance active au courant rotorique d'axe " q " et la puissance réactive au courant rotorique d'axe " d " à la constante $\frac{V_s^2}{L_s \omega_s}$ près imposée par le réseau.

Afin de pouvoir contrôler correctement la machine, il nous faut alors établir la relation entre les courants et les tensions rotoriques qui seront appliqués à la machine. En remplaçant dans l'équation des flux dans le chapitre(II) équation (2.18) par l'expression (3.6) on obtient :

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{dr} + \frac{M V_s}{L_s \omega_s} \\ \Phi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (3.12)$$

En remplaçant l'expression des flux rotoriques de l'équation (3.12) par leurs expressions dans l'équation (2.17) du chapitre (II) on obtient :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{di_{dr}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{di_{qr}}{dt} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{dr} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (3.13)$$

Avec $g = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}$: correspond au glissement de la MADA.

A partir des équations que nous venons de mettre en place, nous pouvons établir les relations entre les tensions appliquées au rotor de la machine et les puissances statoriques que

cela engendre. Il est donc possible maintenant de décrire le schéma bloc de la machine asynchrone à double alimentation qui sera le bloc simplifié à réguler par la suite [1].

En appliquant la transformation de Laplace (opérateur "s") aux deux équations, on obtient :

$$\begin{cases} V_{dr} = \left[R_r + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) s \right] i_{dr} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \\ V_{qr} = \left[R_r + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) s \right] i_{qr} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{dr} + g \frac{MV_s}{L_s} \end{cases} \quad (3.14)$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent, nous pouvons donc écrire [47] :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{dr} + g \frac{MV_s}{L_s} \end{cases} \quad (3.15)$$

V_{dr} et V_{qr} sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus. L'influence des termes de couplage entre les deux axes en $\left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$ est minime. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser.

En revanche le terme $g \frac{MV_s}{L_s}$ représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Son influence n'est pas négligeable car elle entraîne une erreur de traînage. Le contrôle du système devra donc prendre en compte cette erreur [5].

En examinant les équations (3.11) et (3.15), on peut établir le schéma bloc de la figure ci-après qui comporte en entrées les tensions rotoriques et en sorties les puissances actives et réactives statoriques.[1][2][5][24][30].

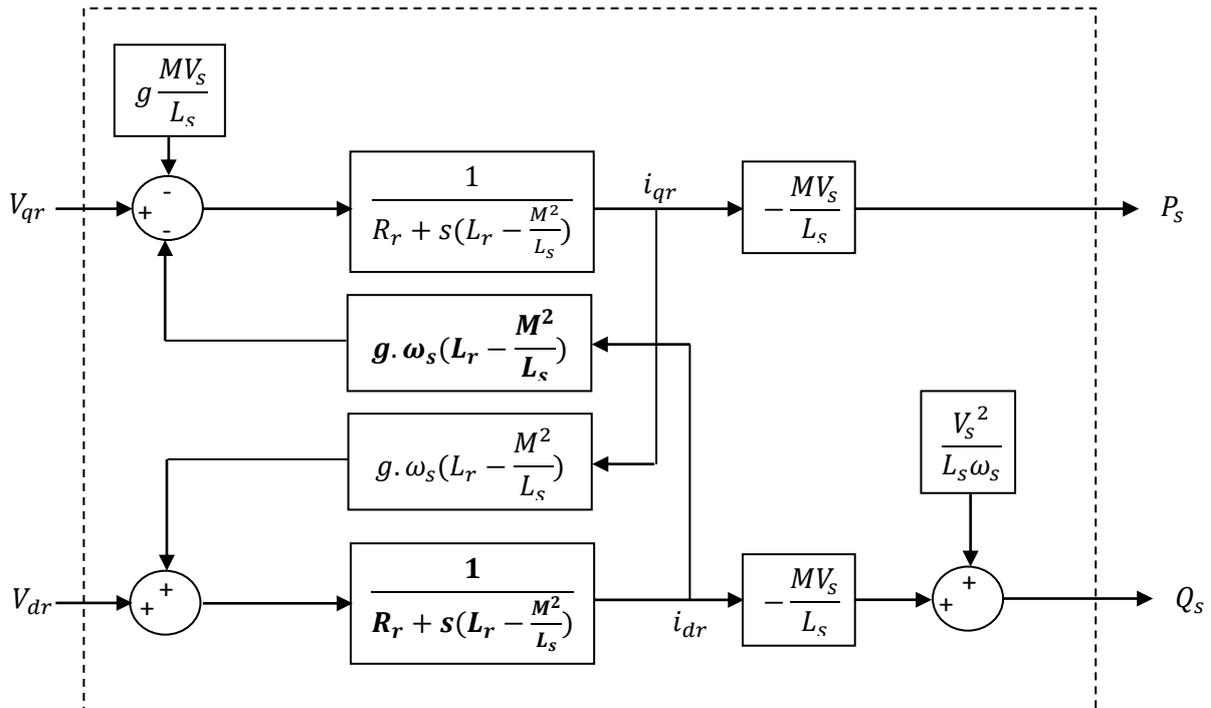


Figure (III.3) : Schéma Bloc du système à réguler [17] [31]

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

Ainsi, il est apparaît deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette machine [1] :

- La première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. Cette méthode sera appelée "*méthode directe*" car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine.
- La deuxième méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques. Cette méthode appelée "*méthode indirecte*" découle directement des équations 3.9 et 3.13.

Ces deux méthodes vont être étudiées et simulées dans la suite de ce chapitre. L'intérêt que présente la méthode directe est que sa mise en œuvre est simple, par contre la méthode indirecte a l'avantage de contrôler les courants rotoriques ce qui permettra de faire une protection de la machine en limitant ces courants ou de rajouter une référence de courant harmonique pour faire fonctionner la MADA en filtre actif, mais elle est complexe à mettre en œuvre.

III.4. Commande directe

III.4.1. Définition générale

Cette méthode de commande a été proposée par *Blaschke* [57]. Dans ce cas, la connaissance du module de flux et de sa phase est requise pour assurer un découplage entre le couple et le flux quelque soit le régime transitoire effectué.

En effet, dans ce cas, le flux est régulé par une contre réaction, donc il doit être mesuré ou estimé à partir des signaux de tensions statoriques et de courants. Afin d'accéder à l'information concernant l'amplitude et la phase du flux, on peut utiliser des capteurs (sondes à effet de Hall, spires de mesure) placés sous les dents du stator (entrefer de la machine).

L'avantage de cette technique est qu'elle dépend moins des variations paramétriques. Cependant, l'inconvénient de cette méthode est que les capteurs sont mécaniquement fragiles et ne peuvent pas travailler dans des conditions sévères telles que les vibrations et les échauffements excessifs. De plus, les signaux captés sont entachés des harmoniques et leur fréquence varie avec la vitesse ce qui nécessite des filtres ajustables automatiquement [52] [53] [54][55] [56].

III.4.2. Commande directe en puissance active et réactive de la MADA en génératrice

Dans cette section, nous présentons la régulation indépendante des puissances actives et réactives de la machine en utilisant les remarques faites au paragraphe précédent. Il a été mis en évidence le lien entre, d'une part la puissance active et la tension V_{qr} et d'autre part la puissance réactive et la tension V_{dr} (Figure III.4).

Considérons le schéma bloc du système à réguler de la figure III.3 afin de déterminer les éléments à mettre en place dans la boucle de régulation.

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

Pour simplifier la commande de la MADA, nous considérons que la tension du réseau est stable, ce qui nous permet d'utiliser une seule boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur indépendant. Toutefois nous allons négliger les termes de couplage entre les deux axes, qui apparaît dans la figure (III.3) à cause du faible glissement, tout en compensant aussi les perturbations ce qui nous donne le schéma simplifié représenté dans la figure (III.4). [5], [47].

La perturbation $-g \frac{MV_s}{L_s}$ sera compensée par $+g \frac{MV_s}{L_s}$, et l'autre perturbation $\frac{V_s^2}{L_s \omega_s}$ par $-\frac{V_s^2}{L_s \omega_s} \frac{MV_s}{L_s R_r + p L_s (L_r - \frac{M^2}{L_s})}$. Après simplification, et en négligeant le terme de couplage $(L_r - \frac{M^2}{L_s})$, on obtient la perturbation $-\frac{V_s^2}{L_s \omega_s} \frac{MV_s}{L_s R_r}$, soit : $-\frac{R_r V_s}{M \omega_s}$.

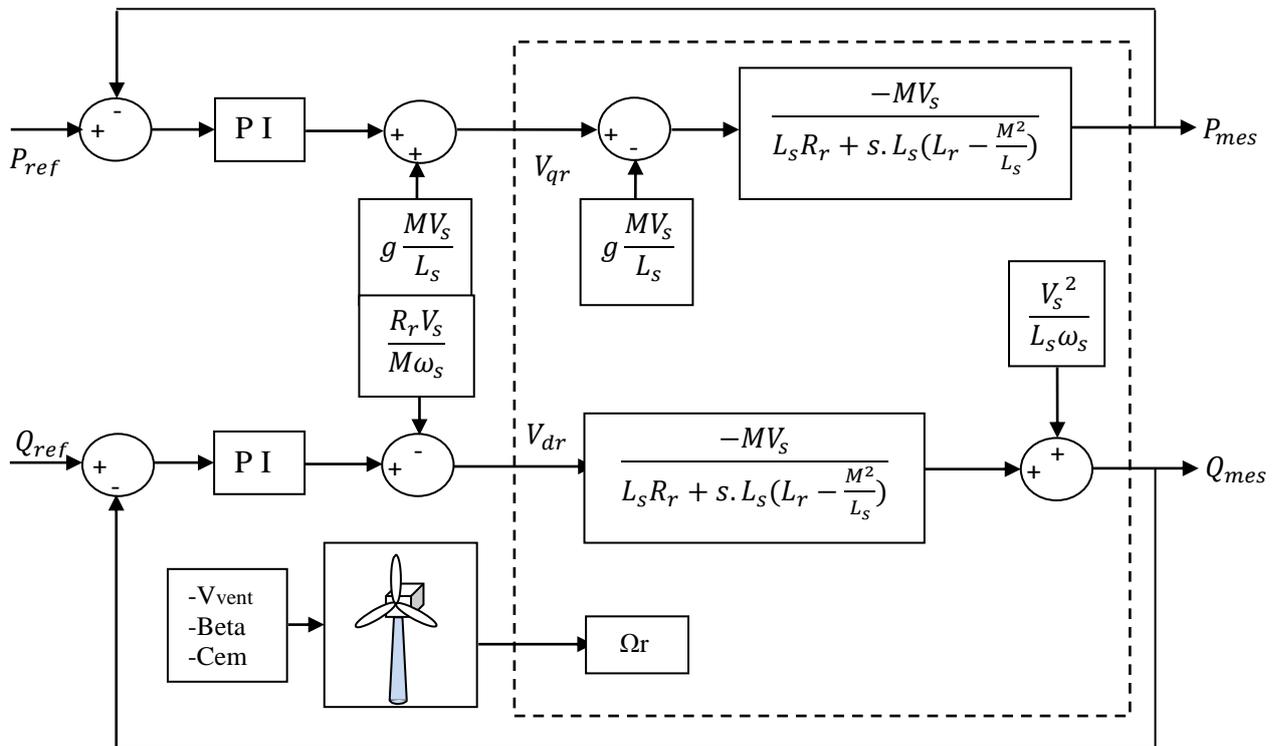


Figure (III.4) : Schéma Bloc de la Commande Vectorielle Directe [17] [31]

III.5. Commande indirecte

III.5.1. Définition générale

Le principe de cette méthode consiste à ne pas mesurer (ou estimer) l'amplitude de flux mais seulement sa position, l'idée est proposée par *Hasse* [57]. Elle consiste à estimer la position du vecteur de flux, et régler son amplitude en boucle ouverte. Les tensions ou les courants assurant l'orientation du flux et le découplage sont évalués à partir d'un modèle de la machine en régime transitoire. Cette méthode a été favorisée par le développement des microprocesseurs, elle est très sensible aux variations paramétriques de la machine. Il est important de souligner que la méthode indirecte est la plus simple à réaliser et la plus utilisée que la méthode directe, mais le choix entre les deux méthodes varie d'une application à l'autre.[52] [53] [54][55] [56]

III.5.2. Commande indirecte en puissance active et réactive de la MADA

En se basant sur les équations régissant le fonctionnement de la machine défini dans la modélisation au paragraphe (III.3.1) ; tout en gardant les mêmes hypothèses.

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

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

$$\begin{cases} V_{dr} = \left[g\omega_s \frac{(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{L_s} \right] \cdot P_s - \left[\frac{R_r + (L_r - \frac{M^2}{L_s})}{\frac{M V_s}{L_s}} \cdot s \right] \cdot Q_s + \left[\frac{R_r V_s}{L_s \omega_s} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{V_s}{M \omega_s} \cdot s \right] \\ V_{qr} = \left[\frac{R_r + (L_r - \frac{M^2}{L_s})}{\frac{M V_s}{L_s}} \cdot s \right] \cdot P_s - \left[g\omega_s \frac{(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{L_s} \right] \cdot Q_s + \left[g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{V_s}{M \omega_s} \right] \end{cases}$$

En gardant les mêmes hypothèses sur la stabilité du réseau, on établit le système de régulation de la figure (III.5) où l'on trouve désormais une boucle de régulation des courants rotoriques dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer à la machine.

Dans le but d'améliorer la commande directe, nous allons introduire une boucle de régulation supplémentaire au niveau des courants afin d'éliminer l'erreur statique tout en préservant la dynamique du système. Nous aboutissons au schéma bloc présenté à la figure (III.6) sur lequel on distingue bien les deux boucles de régulation pour chaque axe, l'une contrôlant le courant et l'autre la puissance. Ce type de régulation donne une dynamique satisfaisante et une erreur statique nulle.

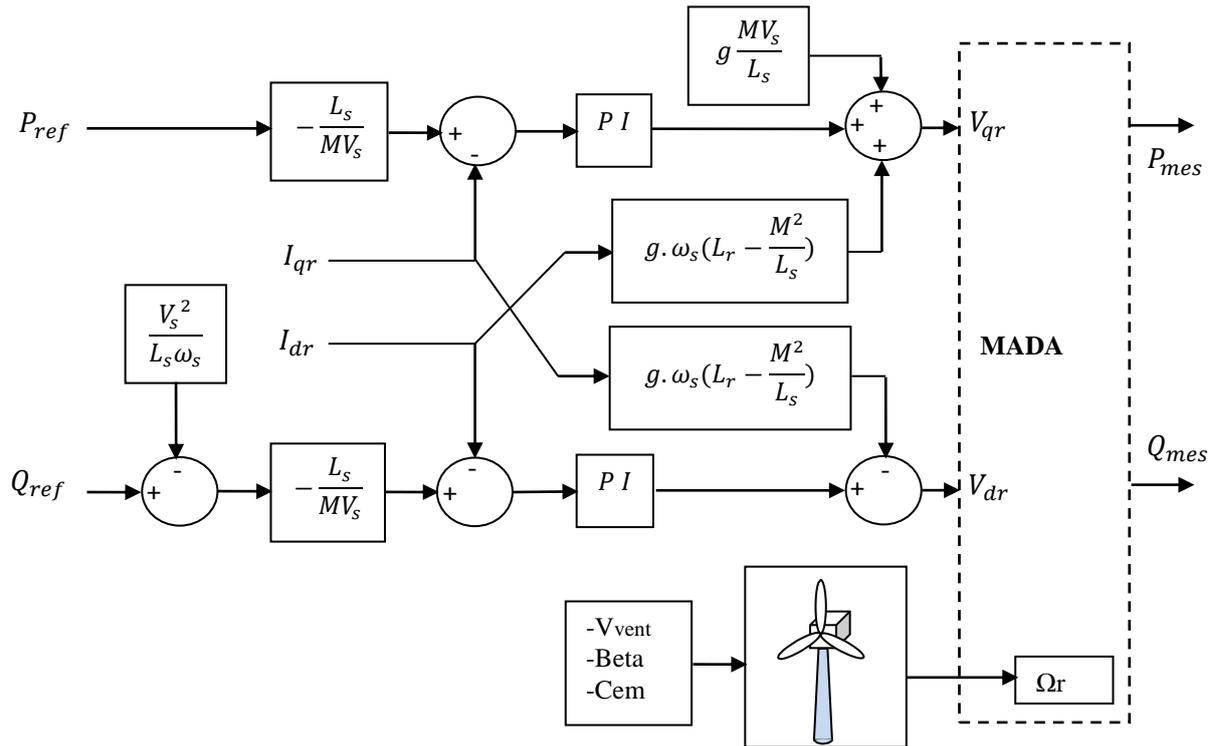


Figure (III.5) : Bloc de Commande Vectorielle Indirecte sans boucle de puissance [17] [31]

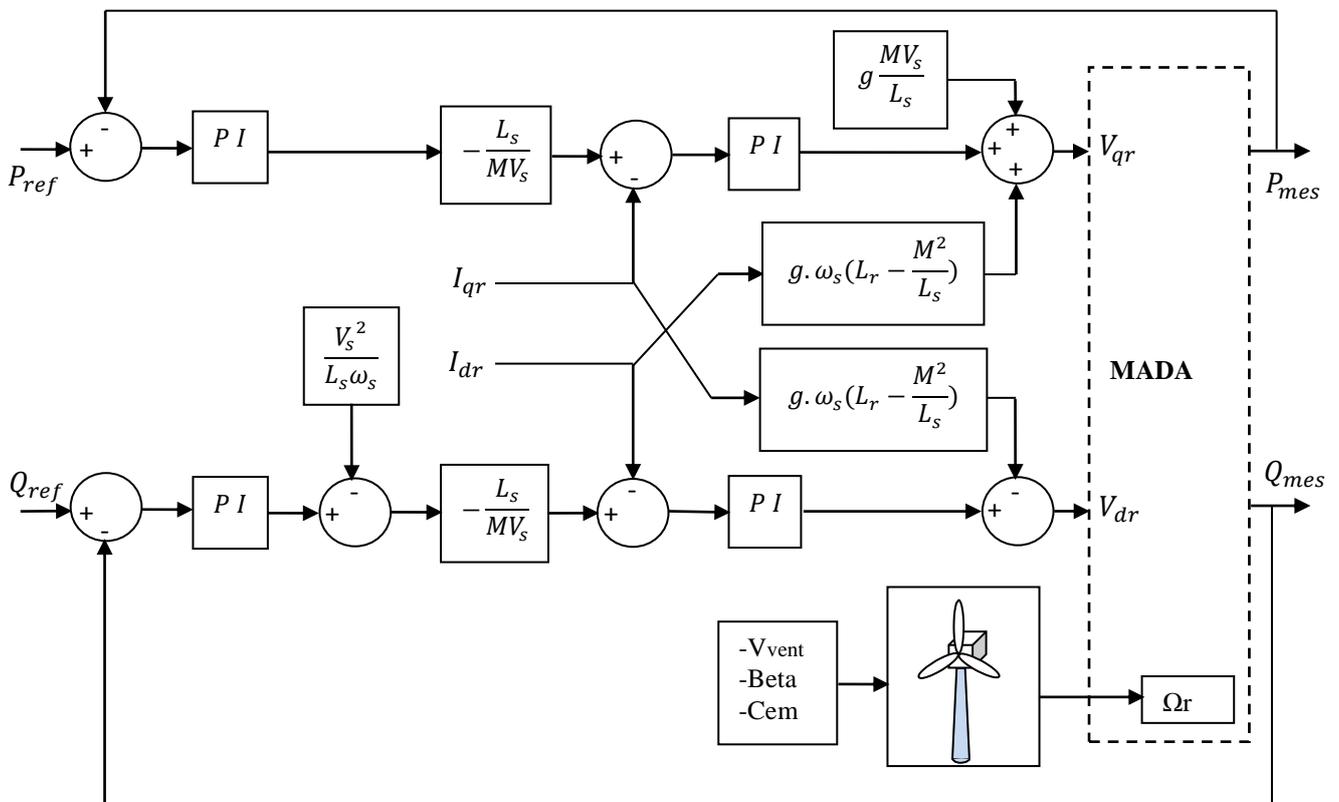


Figure (III.6) : Bloc de la Commande Vectorielle Indirecte avec boucle de puissance [17] [31]

III.6. Etude de la régulation pour la commande

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

Les lois de commande élaborées doivent autoriser cette dynamique sans engendrer des dépassements qui peuvent nuire à la durée de vie de la machine et des convertisseurs [5]. Elles devront également opérer un bon rejet des perturbations qui peuvent être nombreuses sur un tel système étant donné la complexité et le nombre important de capteurs mis en jeu. Enfin, elles devront satisfaire aux exigences de robustesse face aux variations de paramètres qui peuvent intervenir dans les machines électriques notamment à cause des variations de température. Le dispositif de mesure de puissance de référence est constitué d'un transformateur de Park (V,I) et d'un bloc de mesure de puissance (Ps,Qs).

III.6.1. Synthèse du régulateur Proportionnel-Intégral (PI)

La mise en équation de la MADA nécessaire à la commande en puissances active et réactive a été mise en œuvre dans les paragraphes précédents. Nous allons maintenant procéder à la synthèse des régulateurs nécessaires à la réalisation de cette commande.

La synthèse d'un régulateur Proportionnel – Intégral est réalisée. Ce type de régulateur reste le plus communément utilisé pour la commande de la MADA en génératrice, ainsi que dans de nombreux systèmes de régulation industriels.

Pour rendre possible, dans notre cas, la synthèse d'un régulateur PI classique, nous allons faire un certain nombre d'hypothèses dans le but de linéariser et de simplifier le modèle de la machine, avec une fonction de transfert du premier ordre sur les grandeurs d'entrée de chaque axe représentant l'onduleur de tension.

En effet, si la fonction de transfert entre puissances actives et réactives et courants rotoriques est simplifiée en raison de l'approximation faite sur la résistance statorique, celle entre tensions rotoriques et courants rotoriques ne l'est pas. La commande sera alors d'autant plus efficace si le calcul des régulateurs est basé sur cette même fonction de transfert.

Notons que d'autres configurations (notamment sans réduction de l'ordre du système ou en considérant une linéarisation autour d'un point de fonctionnement) ont été testées en simulation mais les performances obtenues ne sont pas meilleures qu'avec le modèle simplifié [16]

III.6.2. Calcul des régulateurs

Le régulateur proportionnel intégral (PI) ; utilisé pour commander la MADA en génératrice (commande directe et indirecte) ; est simple et rapide à mettre en œuvre tout en offrant des performances acceptables. C'est pour cela qu'il a retenu notre attention pour une étude globale du système de génération éolien. La figure (III.7) montre une partie de notre système bouclé et corrigé par un régulateur « **PI** » dont la fonction de transfert est de la forme $K_p + \frac{K_i}{s}$ correspondant aux régulateurs utilisés dans notre étude

La fonction de transfert pour la régulation et le contrôle des puissances (P_s et Q_s) est donnée par le schéma de la figure ci-après :

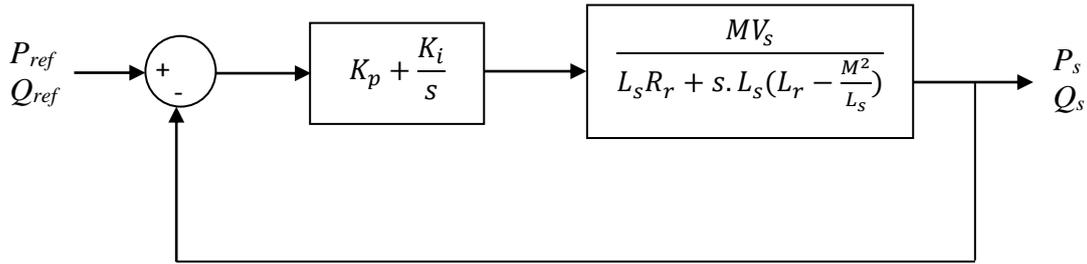


Figure (III.7) : Contrôle des puissances d'un système régulé par un PI [6][31]

En boucle ouverte, la FT_{BO} s'écrit de manière suivante :

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

Ou sous une autre forme :

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

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

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

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

$$FT_{BO} = \frac{K_p \frac{MV_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{s}$$

La fonction de transfert en boucle fermée FT_{BF} s'exprime alors par :

$$FT_{BF} = \frac{FT_{BO}}{1 + FT_{BO}} = \frac{1}{1 + \tau_r \cdot s}$$

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

Le terme τ_r désigne ici le temps de réponse du système. Nous choisissons de fixer celui-ci à 10 ms, ce qui représente une valeur suffisamment rapide pour l'application de production d'énergie. Une valeur inférieure est susceptible d'engendrer des régimes transitoires avec des dépassements importants et ne présente pas d'intérêt particulier pour notre application. Les termes K_p et K_i sont alors exprimés en fonction de ce temps de réponse et des paramètres de la machine [6][31] :

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

$$\begin{cases} K_p = \frac{1}{\tau_r} \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{MV_s} \\ K_i = \frac{1}{\tau_r} \frac{L_s R_r}{MV_s} \end{cases}$$

Notons que la méthode de la compensation des pôles n'est bien entendu pas la seule alternative de calcul pour la synthèse d'un régulateur PI. Toutefois, elle présente l'avantage d'être rapide à mettre en œuvre sur une fonction de transfert du premier ordre et elle s'avère suffisante dans notre cas pour comparer le PI avec un régulateur neuronale étudié dans le suivant chapitre.

De la même manière, Les termes K_p et K_i pour la régulation et le contrôle des courants rotorique (i_{dr} , i_{qr}) sont calculés à partir de la fonction de transfert du schéma de la figure ci-après:

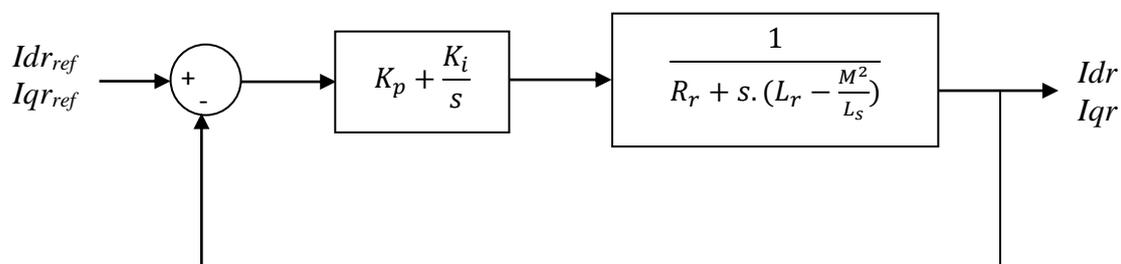


Figure (III.8) : Contrôle des courants d'un système régulé par un PI [6][31]

En boucle ouverte, la FT_{BO} s'écrit de la manière suivante :

$$FT_{BO} = \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right) \cdot \frac{1}{R_r + s \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)}$$

Ou sous une autre forme :

$$FT_{BO} = \frac{s + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{s}{K_p}} \cdot \frac{\frac{1}{\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)}}{s + \frac{R_r}{\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)}}$$

Par élimination du zéro présent dans le numérateur de la fonction de transfert, on a :

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

Après la compensation on a :

$$FT_{BO} = K_p \frac{1}{s \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)}$$

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

$$FT_{BF} = \frac{FT_{BO}}{1 + FT_{BO}} = \frac{1}{1 + \tau_r \cdot s}$$

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

On en déduit :

$$\begin{cases} K_p = \frac{1}{\tau_r} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \\ K_i = \frac{R_r}{\tau_r} \end{cases}$$

$$\begin{cases} K_p = 0,03 \\ K_i = 0,18 \end{cases}$$

III.7. Simulation

III.7.1. Suivi de consignes

Durant toute la période de simulation de la commande vectorielle directe et indirecte, la MADA est entraînée par une turbine éolienne étudiée au chapitre précédent.

Les résultats sont obtenus pour les conditions d'essais suivantes :

Pour la puissance active de référence, à :

- $t=1$ s : P_{sref} passe de -600 W à -1000 W
- $t=2$ s : P_{sref} passe de -1000 W à -400 W
- $t=3$ s : P_{sref} passe de -400 W à -800 W

Pour la puissance réactive de référence, à :

- $t=1,2$ s : Q_{sref} passe de -2500 VAR à -1500 VAR
- $t=2,2$ s : Q_{sref} passe de -1500 VAR à -2500 VAR
- $t=3,2$ s : Q_{sref} passe de -2500 VAR à -1000 VAR

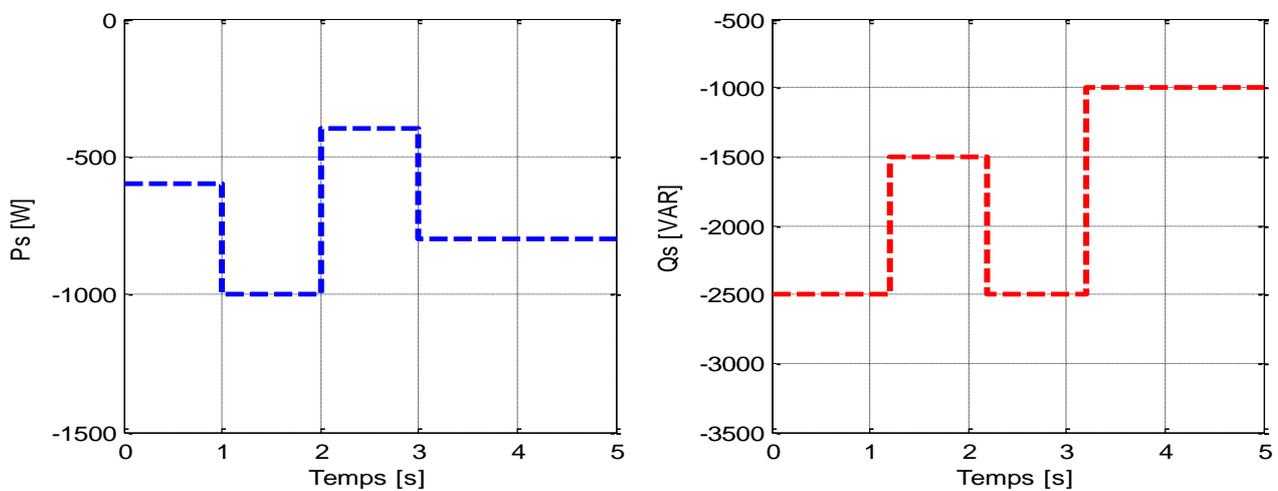


Figure (III.9) : P_s et Q_s de référence

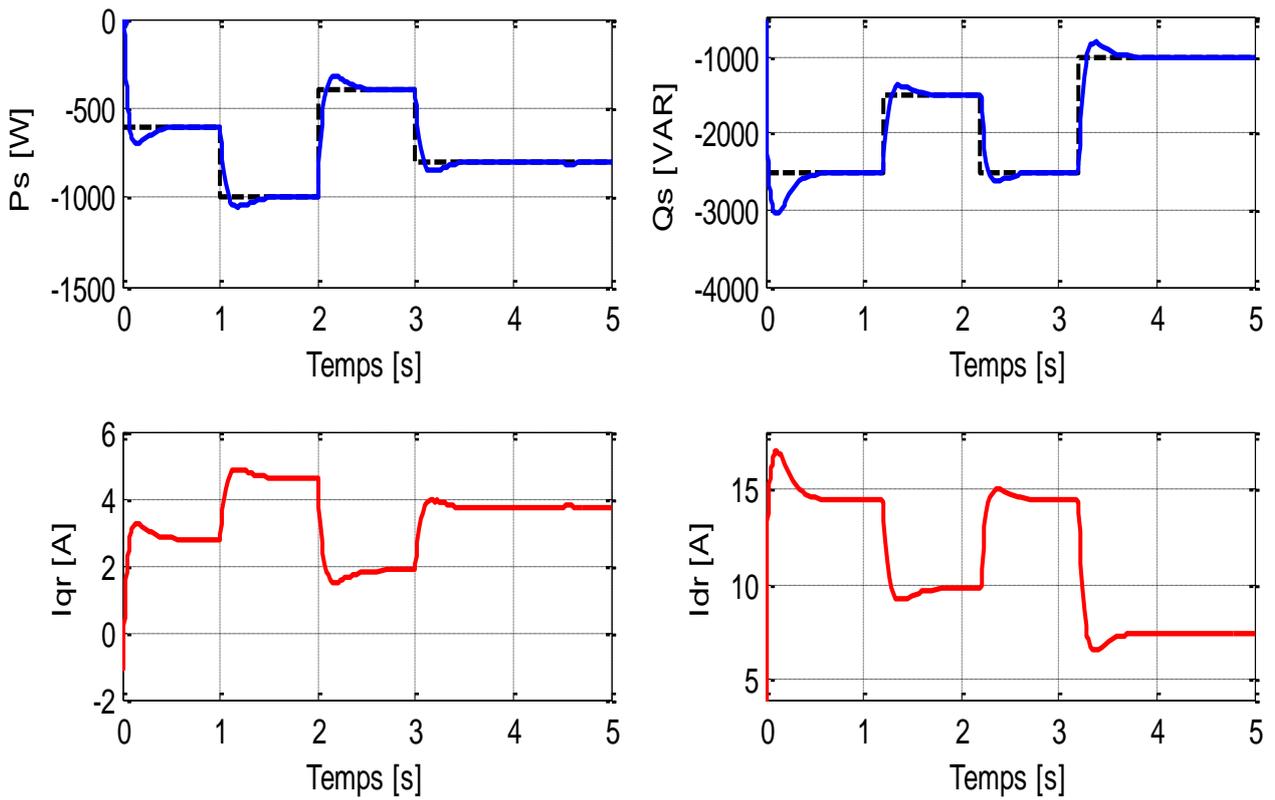


Figure (III.10) : Couplage Puissance rotorique au Courant rotorique (Commande Directe)

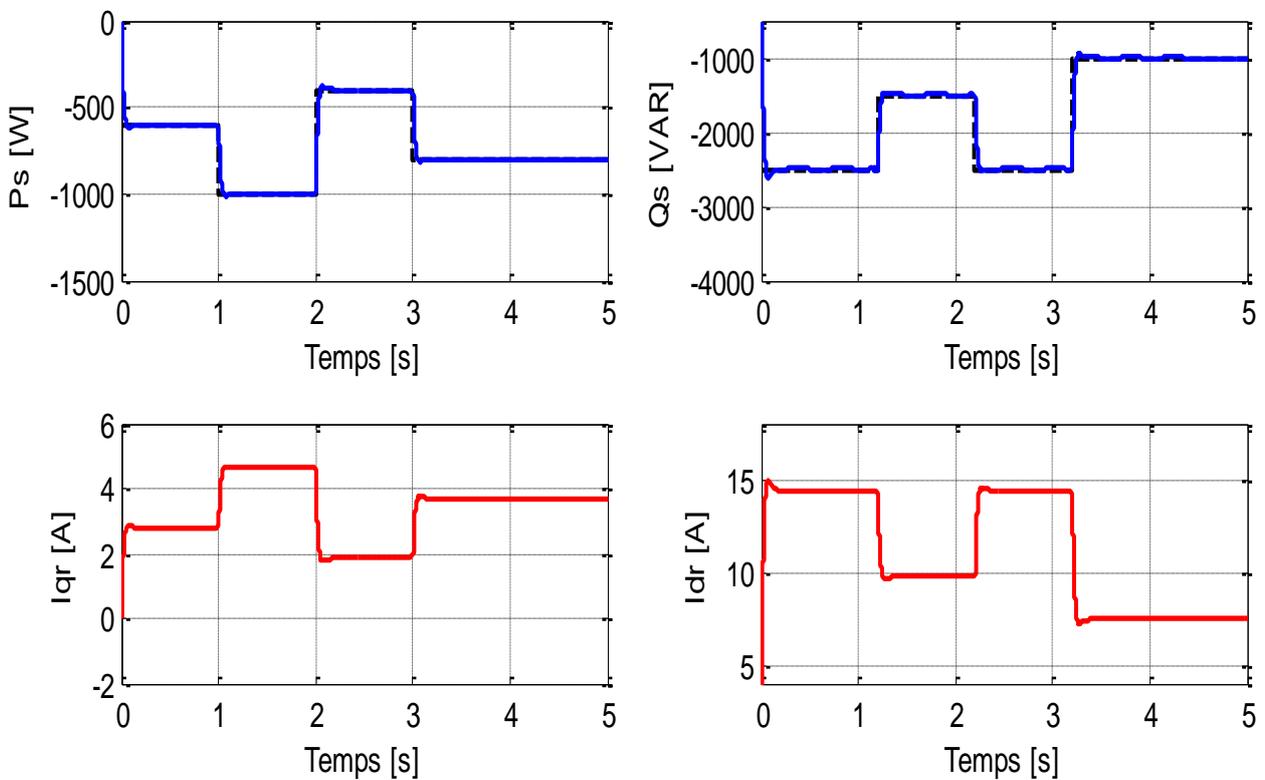


Figure (III.11) : Couplage Puissance rotorique au Courant rotorique (Commande Indirecte)

Résultats et interprétations

A travers les résultats obtenus figure (III.10) et figure (III.11), on remarque que :

Les puissances actives et réactives suivent parfaitement leurs consignes de références.

L'effet de couplage entre les deux axes de commandes d et q est nettement observé pour la commande directe et peu perceptible dans la commande Indirecte car un échelon de puissance imposé à l'une des deux puissances active ou réactive induit de faibles oscillation sur l'autre puissance et vis versa.

Le découplage de la machine est réalisé avec succès : la puissance statorique active P_s dépend de la composante en quadrature du courant rotorique I_{qr} , la puissance statorique réactive Q_s dépend de la composante directe du courant rotorique I_{dr}

La commande directe présente un régime transitoire avec un temps de réponse de 0.077s et un dépassement de 16%.

La commande indirecte offre une dynamique qui réagit rapidement 0.056s du fait qu'elle inclut une boucle de régulation supplémentaire pour le contrôle des courants rotorique dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer à la machine mais avec un dépassement de 22%.

Aucune erreur statique n'est apparue pour les deux commandes (directe et indirecte).

III.7.2. Performances

Cet essai nous permet de vérifier dans quelles mesures les puissances active et réactive suivent leurs consignes lorsque la vitesse de rotation de la machine varie brusquement à l'instant $t = 4,5s$ et passe de 1480 tr/min à 1600 tr/min.

- Echelon de puissance active avec zoom $P_{sref} = -800$ W
- Echelon de puissance réactive avec zoom $Q_{sref} = -1000$ KVAR

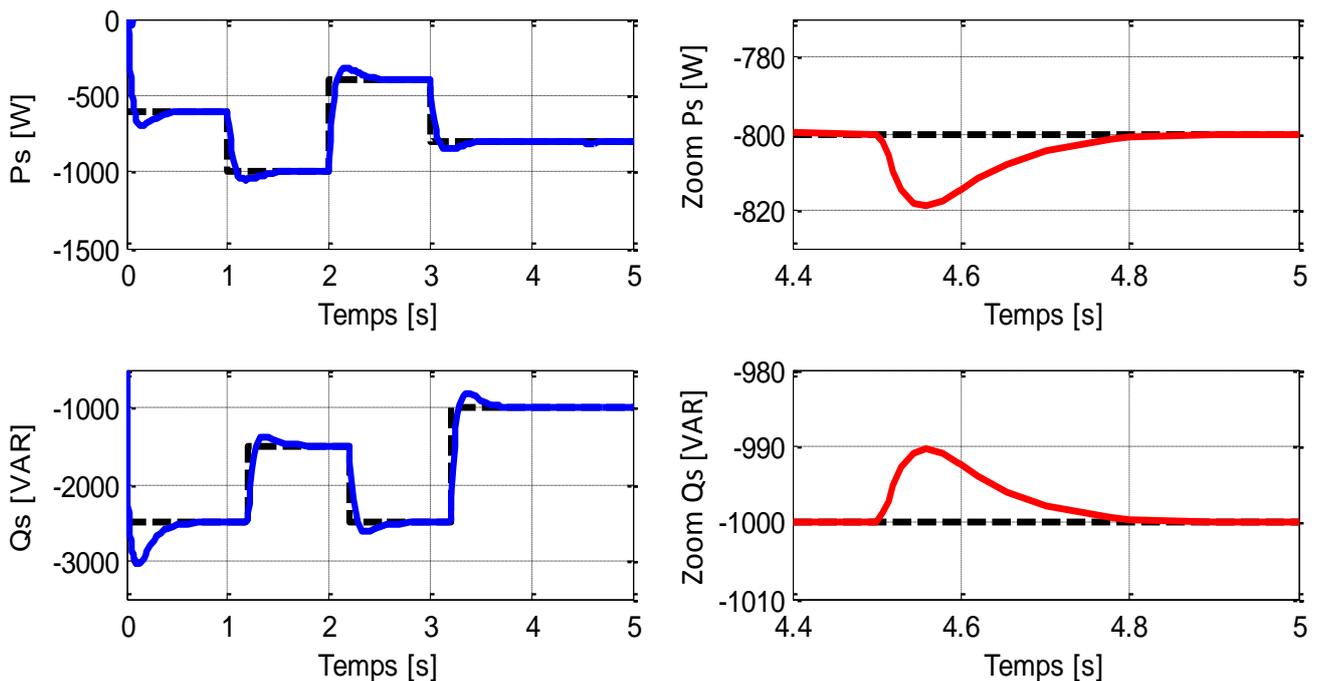


Figure (III.12) : Rejet de perturbations (Commande Directe)

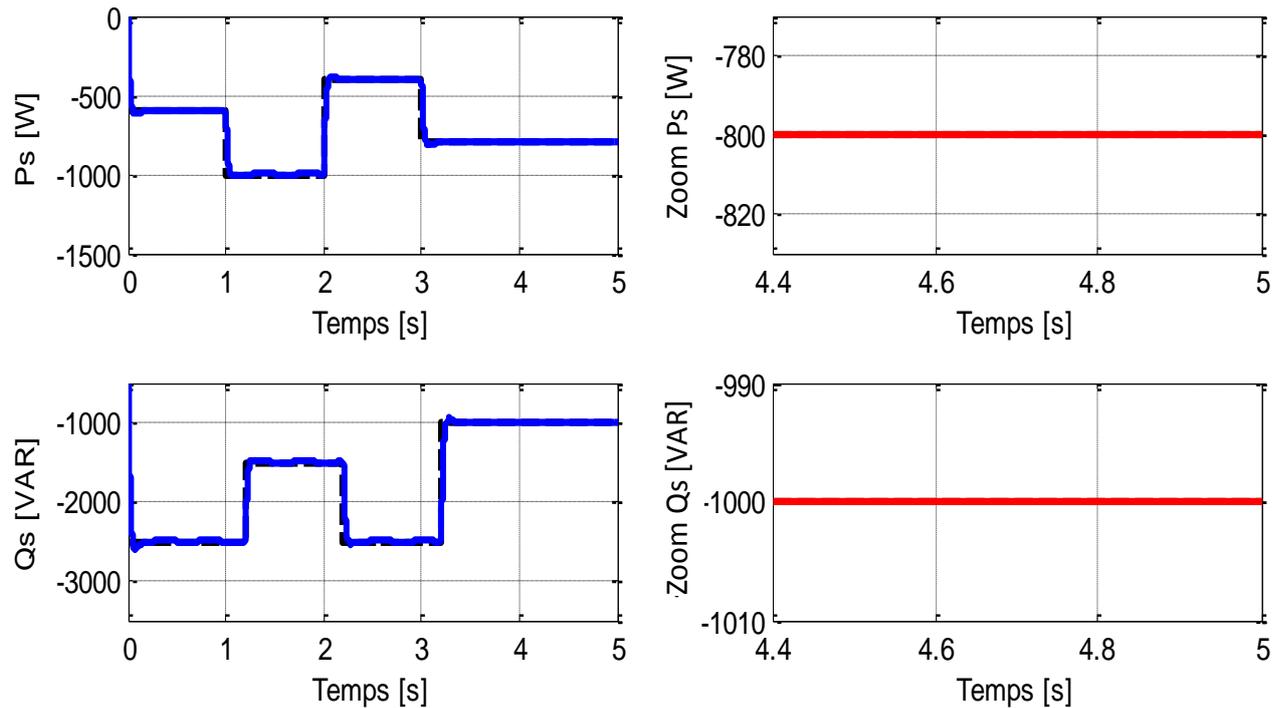


Figure (III.13) : Rejet de perturbations (Commande Indirecte)

Résultats et interprétations

Nous constatons un bon rejet des perturbations, figure (III.12) et figure (III.13) où les puissances actives et réactives suivent leurs consignes pour la commande directe et à un degré moindre (négligeable) presque sans effet pour la commande indirecte.

III.7.3. Robustesse

Cet essai consiste à faire varier les paramètres du modèle de la machine. En effet, le calcul des régulateurs est basé sur des fonctions de transfert dont les paramètres sont supposé fixes, mais dans un système réel les paramètres de la machine sont soumis à des variations entraînées par différents phénomènes physiques (Saturation des inductances et échauffement des résistances) et de voir si la régulation reste dans les limites souhaitées.

Essai 1: La résistance rotorique augmente de 20%.

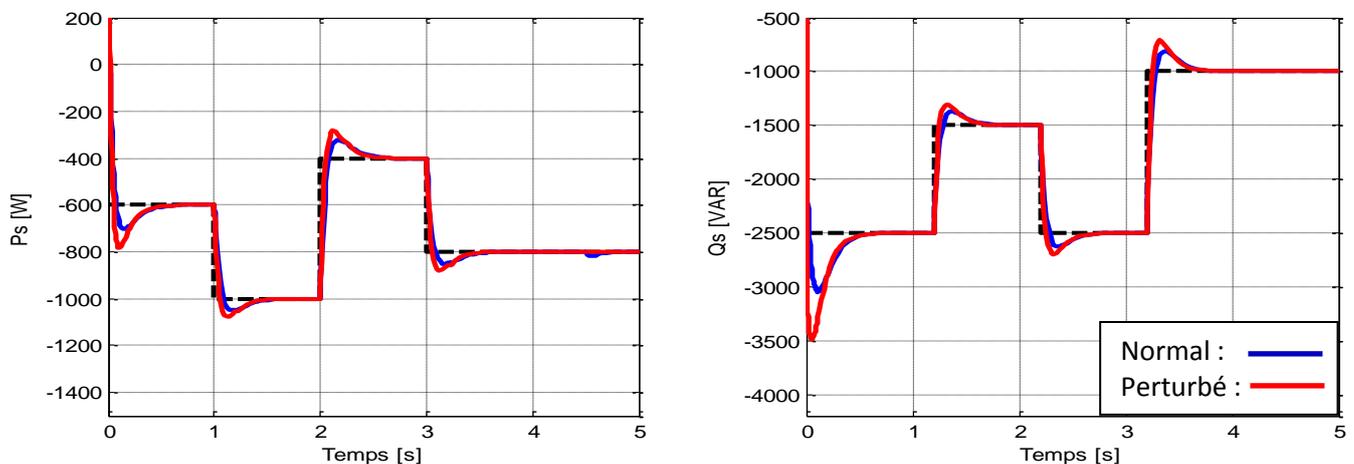


Figure (III.14) : Variation de R_r (+20%)

Essai 2 : L'Inductance statorique diminue de 10%.

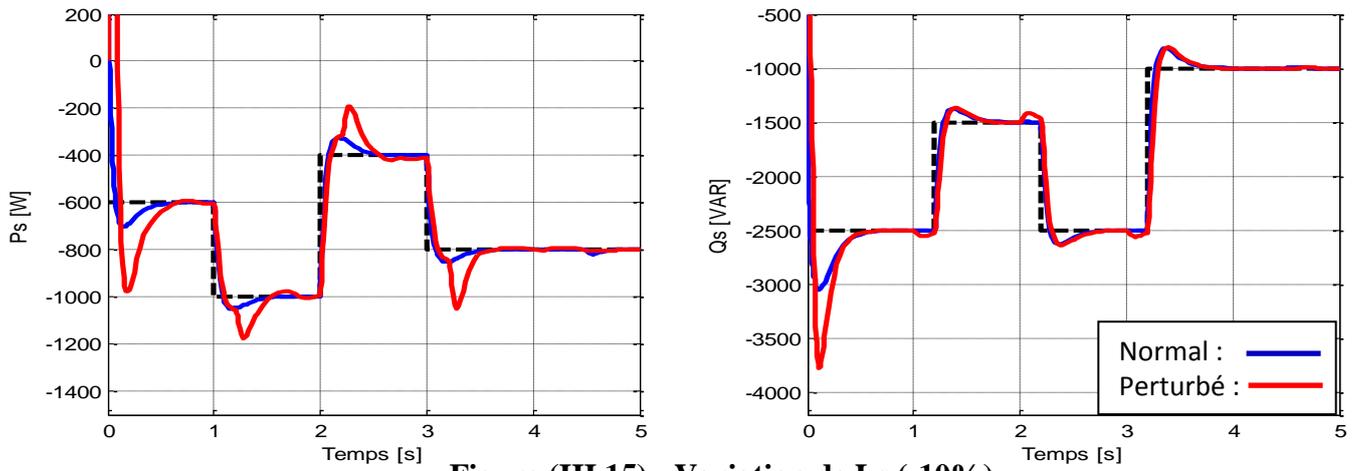


Figure (III.15) : Variation de L_s (-10%)

Essai 3 : L'Inductance rotorique diminue de 10%.

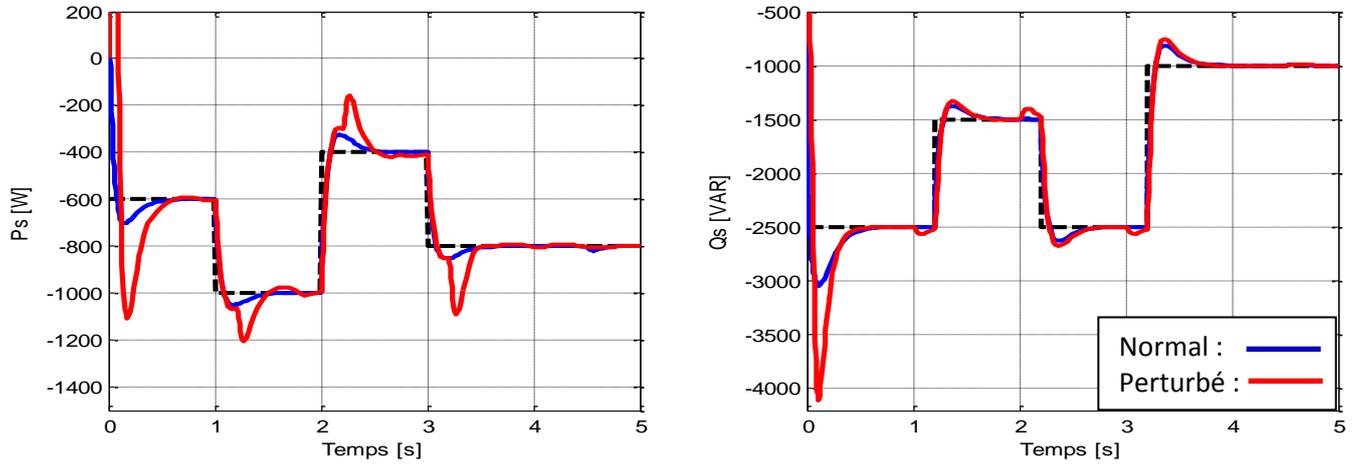


Figure (III.16) : Variation de L_r (-10%)

Essai 4 : L'Inductance mutuelle augmente de 20%.

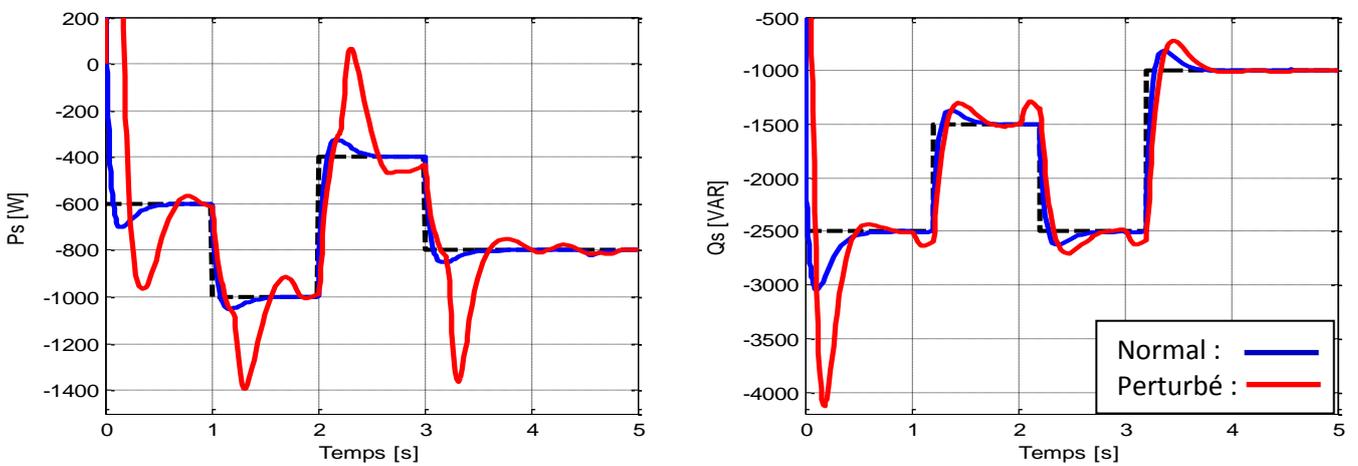


Figure (III.17) : Variation de M (+20%)

Résultats et interprétations

Pour une variation de la résistance rotorique de +20% qui correspond au cas d'échauffement du bobinage rotorique figure (III.17), les puissances active et réactive viennent suivre leurs consignes correctement avec un léger dépassement mais sans aucune influence sur le fonctionnement de la MADA.

Le régulateur PI perd sa robustesse particulièrement face aux variations des inductances car le calcul des gains K_p et K_i du régulateur repose essentiellement sur les paramètres de la machine.

Si plusieurs paramètres varient en même temps dans de grandes proportions, il est sûr que les régulateurs n'arriveront plus à faire fonctionner le système convenablement ce qui dénote la limite de robustesse de ces régulateurs classique (PI).

III.8. Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, on a présenté la commande vectorielle de la machine asynchrone double alimentée pilotée par le rotor.

A travers les résultats obtenus, on a constaté qu'effectivement la technique d'orientation du flux statorique permet le découplage du flux et des puissances de sorte que la composante directe du courant rotorique I_{dr} contrôle la puissance réactive, et la composante en quadrature contrôle la puissance active

D'après ces simulations, on peut remarquer la robustesse de cette commande qui a convenablement assuré la MPPT pour l'échange de puissances actives et réactives entre la MADA et le réseau par la régulation avec le correcteur PI classique pour la commande indirect et à un degré moindre pour la commande directe.

il a été réalisé aussi dans ce chapitre une boucle d'asservissement au niveau du système éolien qui montre clairement son efficacité acceptable de la régulation choisie qui fait ramener le système à son point optimal après une variation brutale de la vitesse du vent avec un bon suivi des puissances actives et réactives avec leurs références.

Dans le but d'augmenter ce degré d'efficacité et d'améliorer les performances de notre système à cause des dépassements obtenus bien que c'est acceptable, il faut réfléchir à d'autres algorithmes de commande plus avancés telle que la commande par mode de glissement SMC et par mode flou FLC seront étudiés dans les chapitres suivants.

CHAPITRE 4

COMMANDE PAR MODE GLISSANT DE LA MADA

IV.1. Introduction

Dans le domaine de la commande de la machine électrique les travaux de recherche s'orientent de plus en plus vers l'application des techniques des commandes modernes, ces techniques évoluent d'une façon vertigineuse avec l'évolution des calculateurs numériques et de l'électronique de puissance ceci permet d'aboutir à des processus industriels de haute performance.

Chaque technique étant le meilleur pour une classe particulière de la commande pour une application donnée, dépendant de la forme des équations d'états des systèmes et.

Le mode de glissement est un mode de fonctionnement particulier du système à structure variable. La théorie de ses systèmes a été développée en union soviétique, tout d'abord par le professeur Emel'yanov, puis par d'autres collaborateurs comme Utkin [60][61], à partir des études du mathématicien Filippov sur les équations différentielles à second membre discontinu.

Selon le but envisagé, la technique par mode de glissement est considérée comme une des approches les plus simples pour la commande des systèmes non linéaires et les systèmes ayant un modèle imprécis [17], cela est dû à sa simplicité de mise en œuvre et à sa robustesse par rapport aux incertitudes du système et des perturbations externes entachant le processus. Elle consiste à définir une surface dite de glissement, la poursuite de la trajectoire désirée se fait en deux phases :

- l'approche jusqu'à l'arrivée à la surface
- le maintien et le glissement le long de cette surface [17]

IV.2. Théorie de la commande par mode de glissement

Un système à structure variable (Variable Structure System) est un système dont la structure change pendant le fonctionnement. Il est caractérisé par un choix d'une fonction et d'une logique de commutation. Ce choix permet de commuter à tout instant entre chaque structure, afin de combiner les propriétés utiles de chacune de ces structures [60][61].

Dans les systèmes à structure variable avec mode de glissement, la trajectoire d'état est amenée vers une surface (hyperplan). Puis à l'aide de la loi de commutation, elle est obligée de rester au voisinage de cette surface. Cette dernière est dite surface de glissement et le mouvement le long de laquelle se produit, est dit mouvement de glissement. La trajectoire dans le plan de phase (exemple d'un système d'ordre deux) est constituée de trois parties distinctes figure (IV.1).

- Le Mode de Convergence MC (*Reaching Mode, RM*) : durant lequel la variable à régler se déplace à partir de n'importe quel point initial dans le plan de phase et tend vers la surface de commutation $S(x, y) = 0$. Ce mode est caractérisé par la loi de commande et le critère de convergence.
- Le Mode de Glissement MG (*Sliding Mode, SM*) : durant lequel la variable d'état atteint la surface de glissement et tend vers l'origine du plan de phase. La dynamique dans ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement $S(x, y)$.
- Le Mode du Régime Permanent MRP (*Steady-State SS*) : Il est ajouté pour l'étude de la réponse du système autour de son point d'équilibre (origine du plan de phase). Il est caractérisé par la qualité et les performances de la commande [17].

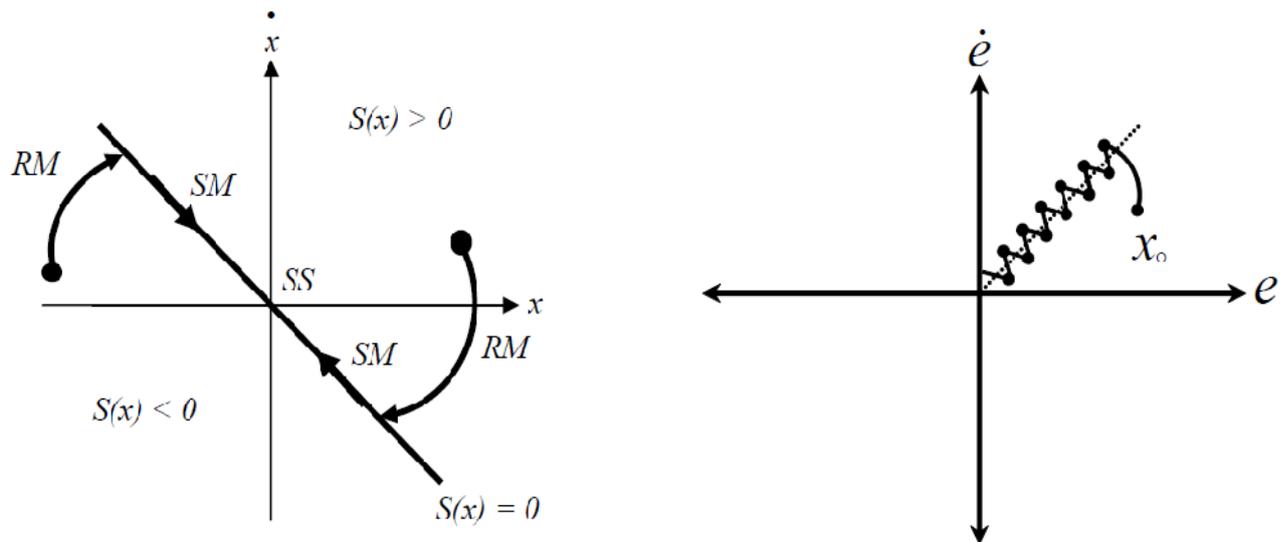


Figure (IV.1) : Trajectoire d'un système de deuxième ordre à VSC [28].

IV.3. Généralités sur la théorie du contrôle par mode glissant

Dans les systèmes à structure variable utilisant la commande par mode glissant, on peut trouver trois configurations de base pour la synthèse des différentes commandes. La première correspond à la structure la plus simple ou la commutation a lieu au niveau de l'organe de commande lui-même. On l'appellera, structure par commutation au niveau de l'organe de commande. La deuxième structure fait intervenir la commutation au niveau d'une contre réaction d'état.

En fin, la dernière structure est une structure par commutation au niveau de l'organe de commande avec ajout de la « commande équivalente ». Cette dernière structure est retenue pour la suite de notre étude.

IV.3.1. Structure par commutation au niveau de l'organe de commande

Cette structure de commande figure (IV.2).est la plus classique et la plus usitée. Elle correspond au fonctionnement tout ou rien des interrupteurs de puissance associés dans une grande majorité d'application aux variateurs de vitesse. [17].

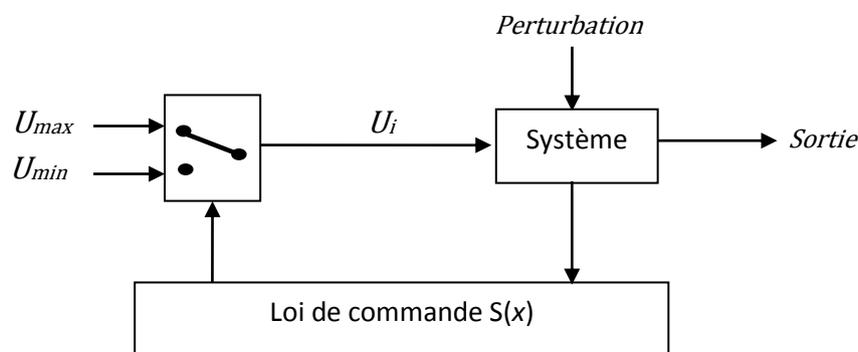


Figure (IV.2) : Structure de régulation par commutation au niveau de l'organe de commande [17].

IV.3.2. Structure par commutation au niveau d'une contre réaction d'état :

Nous pourrions consulter le schéma d'une telle structure sur la figure (IV.3).

C'est la structure la moins exigeante au niveau de la sollicitation de la commande. Elle a été mise en œuvre dans la commande de moteurs à courant continu et à aimant permanents, ainsi que dans la commande de machines à induction. Elle s'appuie sur la commande par contre réaction d'état classique ou le réglage de la dynamique du système est réalisée par les gains de réglage. La non linéarité provient de la commutation entre les gains donc on crée une commutation au niveau de la dynamique du système.

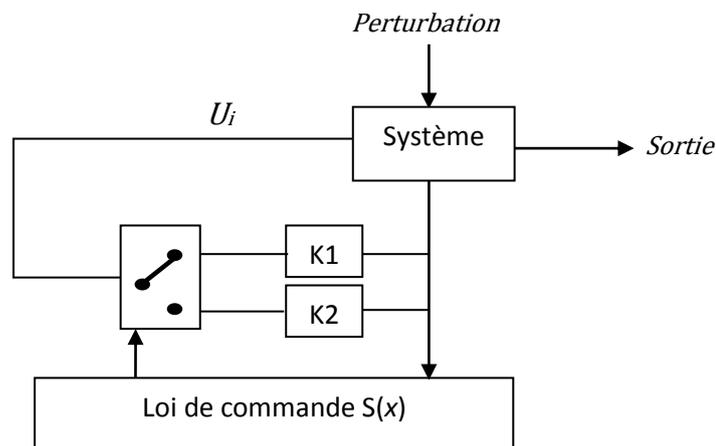


Figure (IV.3) : Structure de régulation par commutation au niveau de la contre réaction d'état [17].

IV.3.3. Structure par commutation au niveau de l'organe de commande, avec ajout de la commande équivalente :

Une telle structure dont le principe est montré sur la figure (IV.4), présente un réel avantage. Elle permet de pré-positionner l'état futur du système grâce à la commande équivalente qui n'est rien d'autre que la valeur désirée du système en régime permanent. L'organe de commande est beaucoup moins sollicité, mais on est plus dépendant des variations paramétriques du fait de l'expression de cette commande équivalente.

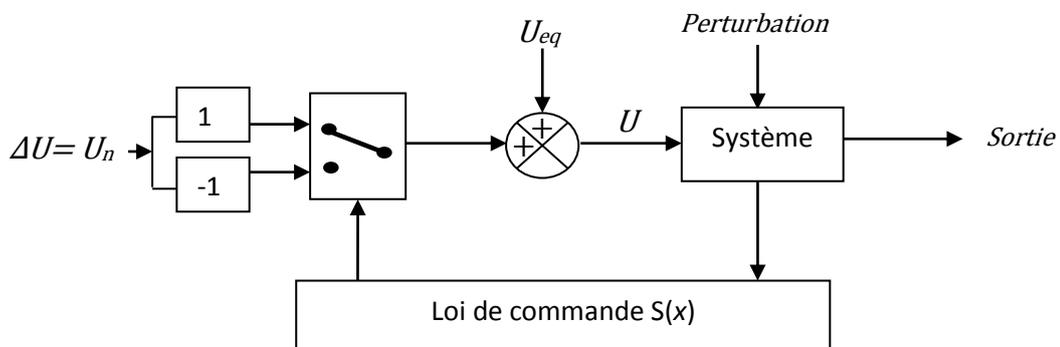


Figure (IV.4) : Structure de régulation par ajout de la commande équivalente [17].

IV.4. Conception de la commande par mode de glissement

Les avantages de la commande par mode de glissement sont importants et multiples, comme la haute précision, la bonne stabilité, la simplicité, l'invariance et la robustesse. Ceci lui permet d'être particulièrement adaptée pour les systèmes ayant un modèle imprécis. Souvent, il est préférable de spécifier la dynamique du système durant le mode de convergence. Dans ce cas, la structure d'un contrôleur comporte deux parties. Une première continue représentant la dynamique du système durant le mode de glissement et une autre discontinue représentant la dynamique du système durant le mode de convergence. Cette deuxième est importante dans la commande non linéaire, car elle a pour rôle d'éliminer les effets d'imprécision et de perturbation sur le modèle [61].

La conception de cette commande peut être divisée en trois étapes principales très dépendantes, ces étapes concernent :

- Choix de la surface
- Etablissement des conditions d'existence de convergence
- Détermination de la loi de commande

IV.4.1. Choix de la surface de glissement

Le choix de la surface de glissement concerne le nombre et la forme nécessaires. Ces deux facteurs sont en fonction de l'application et de l'objectif visé.

Pour un système défini par l'équation :

$$\dot{x} = A(x; t) + B(x; t).u(t) \quad (4.1)$$

où :

$x \in R^n$ est le vecteur d'état du système,

$u \in R^m$ est le vecteur de commande,

$A(x; t)$ et $B(x; t)$ sont deux fonctions non linéaires continues et incertaines supposées bornées.

La surface de glissement est une fonction scalaire tel que l'erreur sur la variable à régler glisse sur cette surface et tend vers l'origine du plan de phase. Ainsi, la surface représente le comportement dynamique désiré. Nous trouvons dans la littérature de différentes formes de la surface, dont chacune donne de meilleures performances pour certaines utilisations. Dans ce travail, nous nous intéressons à une surface de forme non linéaire.

La forme non linéaire est en fonction de l'erreur sur la variable à régler x . Elle est donnée par [60]:

$$S(x) = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \lambda_x \right)^{n-1} . e(x) \quad (4.2)$$

Avec :

$e(x)$ est l'erreur entre la variable à réguler et sa référence : $e(x) = x^* - x$

λ_x : est une constante strictement positive, représentant la pente de la surface de glissement.

n : est un degré relatif du système qui représente le nombre de fois qu'il faut dériver la surface pour faire apparaître la commande

L'objectif de la commande est de garder la surface $S(x)=0$. Cette dernière est une équation différentielle linéaire dont l'unique solution est $e(x)=0$, pour un choix convenable du paramètre λ_x . Ceci revient à un problème de poursuite de trajectoire, ce qui est équivalent à une linéarisation exacte de l'écart, tout en respectant la condition de convergence.

IV.4.2. Conditions de convergence et d'existence

Les conditions d'existence et de convergence sont les critères qui permettent à la dynamique du système de converger vers la surface de glissement et d'y rester indépendamment à la perturbation. Deux considérations seront à envisager et qui correspondent au mode de convergence de l'état du système :

1^{ère} considérations : Condition proposée par Emilyanov et Utkin il s'agit de donner, à la surface une dynamique convergente vers zéro. Elle est formulée par :

$$\dot{S}(x) > 0; \text{ lorsque } S(x) < 0$$

$$\dot{S}(x) < 0; \text{ lorsque } S(x) > 0$$

Autrement dit, nous avons :

$$\dot{S}(x).S(x) < 0 \tag{4.3}$$

2^{ème} considérations : Condition de Lyapunov qui définit une fonction scalaire positive $V(x) > 0$ pour les variables d'état du système. La loi de commande doit faire décroître cette fonction $\dot{V}(x) < 0$. L'idée est de choisir une fonction scalaire $S(x)$ pour garantir l'attraction de la variable à contrôler vers sa valeur de référence.[62]

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x) \tag{4.4}$$

Pour que $V(x)$ de l'équation 4.4, soit décroissante, il faut que sa dérivée soit alors négative :

$$\dot{V}(x) = S(x) \times \dot{S}(x) < 0 \tag{4.5}$$

Tant que (4.5) est vérifiée, la dynamique du système sur $S(x)$, ainsi que sa stabilité sont indépendantes du système représenté par l'équation (4.1), elles dépendent uniquement des paramètres de la surface choisie.

Lorsque la trajectoire de phase reste sur la surface $S(x)$, le système est dit en mode de glissement et cela jusqu'à ce qu'il arrive à un état d'équilibre (régime permanent).

Cette inégalité fondamentale, permet de déterminer les paramètres de réglage [17].

IV.5. Calcul de la commande

Lorsque le régime glissant est atteint, la dynamique est indépendante de la loi de commande qui n'a pour but que de maintenir les conditions de glissement (l'attractivité de la surface). C'est pourquoi la surface a pu être déterminée indépendamment de la commande, sur la base du système et des performances désirées (la réciproque n'est pas vraie, et la commande va dépendre de la surface de glissement) [60][61]. Il reste à déterminer la commande nécessaire pour attirer la trajectoire d'état vers la surface et ensuite vers son point d'équilibre en maintenant la condition d'existence du mode de glissement.

L'obtention d'un régime de glissement suppose une commande discontinue. La surface de glissement devrait être attractive des deux côtés. De ce fait, si cette constante discontinue est indispensable, elle n'empêche nullement qu'une partie continue lui soit ajoutée. La partie continue peut en effet amener à réduire autant qu'on veut l'amplitude de la partie discontinue.

En présence d'une perturbation, la partie discontinue a essentiellement pour but de vérifier les conditions d'attractivité [61]. Dans ce cas, la structure d'un contrôleur par mode de glissement se compose de deux parties :

- une concernant la linéarisation exacte U_{eq}
- et l'autre stabilisante U_n .

$$U = U_{eq} + U_n \quad (4.6)$$

La commande équivalente U_{eq} qui est proposée par Filipov, sert à maintenir l'état sur la surface de glissement $S(x) = 0$. La commande équivalente est déduite, connaissant que la dérivée de la surface est nulle $\dot{S}(x) = 0$. Elle peut être interprétée comme étant un retour d'état particulier jouant le rôle du signal de commande appliqué sur le système à commander [41]. Elle peut être interprétée autrement comme une valeur moyenne que prend la commande lors de la commutation rapide entre les valeurs U_{min} et U_{max}

La commande discrète U_n est déterminée pour vérifier la condition de convergence en dépit de l'imprécision sur les paramètres et le modèle.

La dérivée de la surface est :

$$\dot{S}(x, t) = \frac{dS}{dt} = \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial t} \quad (4.7)$$

Par substitution, nous trouvons l'expression suivante :

$$\dot{S}(x, t) = \frac{\partial S}{\partial x} [A(x, t) + B(x, t)U_{eq}] + \frac{\partial S}{\partial x} B(x, t) \cdot U_n \quad (4.8)$$

Durant le mode de glissement et le régime permanent, la surface est nulle, par conséquent sa dérivée et la partie discontinue sont aussi nulles.

$$\begin{cases} U_n = 0 \\ \dot{S}(x, t) = 0 \end{cases} \quad (4.9)$$

D'où, nous déduisons l'expression de la commande équivalente

$$U_{eq} = - \left(\frac{\partial S}{\partial x} B(x, t) \right)^{-1} \cdot \frac{\partial S}{\partial x} A(x, t) \quad (4.10)$$

Afin que la commande équivalente existe, la surface doit remplir la condition suivante :

$$\frac{\partial S}{\partial x} B(x, t) \neq 0 \quad (4.11)$$

Durant le mode de convergence, en remplaçant la commande équivalente par son expression, nous trouvons la nouvelle expression de $\dot{S}(x, t)$.

$$\dot{S}(x, t) = \frac{\partial S}{\partial x} B(x, t) \cdot U_n \quad (4.12)$$

La condition d'attractivité 4.5 devient :

$$S(x, t) \cdot \dot{S}(x, t) < 0 \quad \text{c'est à dire : } S(x, t) \cdot \frac{\partial S}{\partial x} B(x, t) U_n < 0 \quad (4.13)$$

Afin de satisfaire cette condition, $S(x, t) \cdot \frac{\partial S}{\partial x} B(x, t)$ doit avoir un signe opposé à celui de U_n .

a : fonction "sgn"

La commande U_n , est donnée par la forme de base qui est celle d'un relais représenté par la fonction "sgn" figure (IV.5)

$$U_n = K \cdot \text{sgn}(S(x)); \text{ avec } K > 0 \quad (4.14)$$

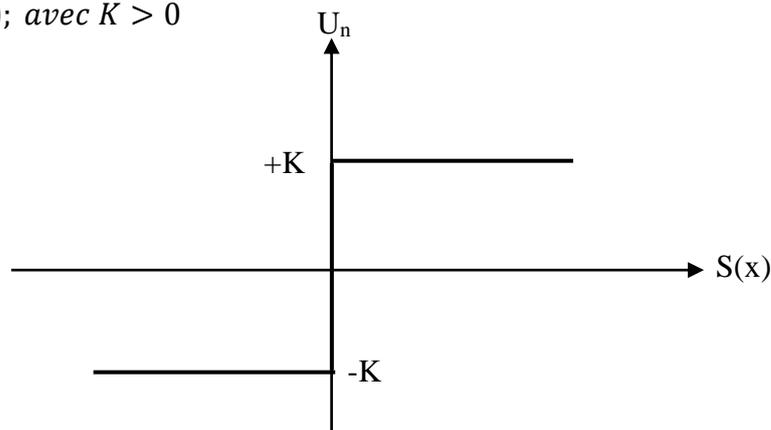


Figure (IV.5) : Représentation Fonction « sign » de U_n [13].

L'utilisation de la fonction sgn signifie que la commande U_n commute entre deux valeurs $\pm K$ avec une fréquence théoriquement infinie et se manifeste par des oscillations autour de la surface de glissement S , ces derniers auront une amplitude d'autant plus grande et une fréquence d'autant plus basse que les imperfections sont importantes [13]. Une fréquence d'oscillation infinie suppose des éléments idéaux de commutation (relais sans seuil, ni hystérésis, ni retard de commutation), ce qui n'est pas le cas en pratique ; ce phénomène est appelé phénomène de broutement (*chattering* en anglais). Pour remédier à ce problème qui peut aller jusqu'à détruire les équipements des systèmes, la fonction discontinue "sgn", est remplacée par des fonctions continues, en créant une bande autour de la surface de glissement S .

b : fonction "sat"

D'autres méthodes sont proposées pour limiter ce phénomène de broutement dans la régulation par mode glissant : c'est la commande douce à un seul seuil figure (IV.6), dite aussi fonction saturation "sat" donnée par l'équation (4.15) :

$$U_n = K \cdot \text{sat}(S(x)) \quad (4.15)$$

$$\text{sat}(S(x)) = \begin{cases} \frac{1}{\varepsilon} S(x) & \text{si } |S(x)| \leq \varepsilon \\ \text{sgn}(S(x)) & \text{si } |S(x)| > \varepsilon \end{cases} \quad (4.16)$$

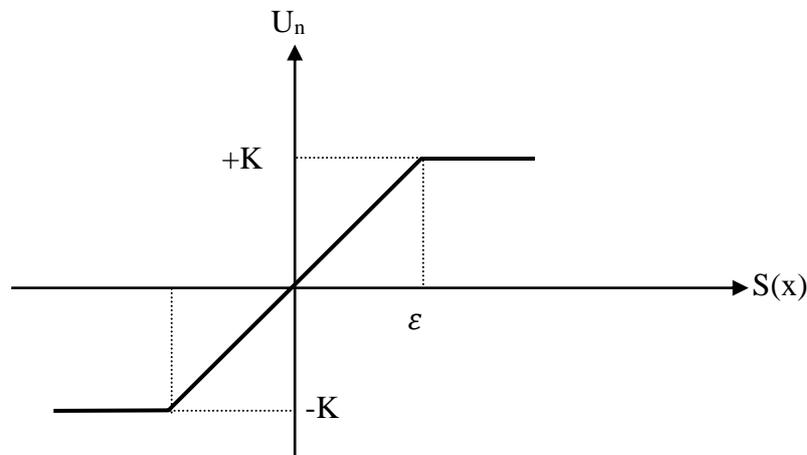


Figure (IV.6) : Représentation de la commande douce Fonction "sat". [28]

c : fonction "smooth"

Un autre type d'adoucissement de la fonction "sgn" connu sous le nom de "smooth", voir figure (IV.7) est défini par la commande [13] :

$$U_n = K \cdot \text{smooth}(S(x)) \quad (4.17)$$

$$\text{smooth}(S(x)) = \begin{cases} 2 \cdot \frac{S(x)}{\varepsilon + S(x)} & \text{si } |S(x)| \leq \varepsilon \\ \text{sgn}(S(x)) & \text{si } |S(x)| > \varepsilon \end{cases} \quad (4.18)$$

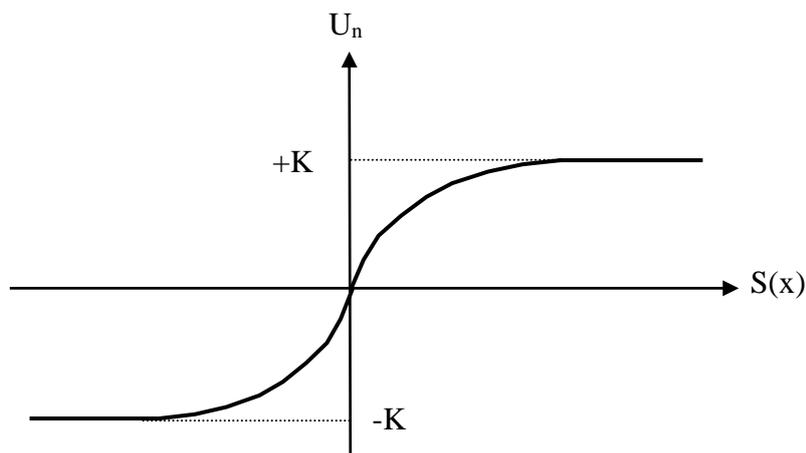


Figure (IV.7) : Représentation de la commande douce ; fonction "Smooth" [28]

Pour illustrer les performances de commande du RMG (Régulateur par Mode Glissant) appliqué à la MADA, et pour simplifier l'expression de la commande équivalente et faciliter la tâche de la conception pratique, on propose une action de commande équivalente basée sur une loi de commande Proportionnelle – Intégrateur. L'avantage de cette approche est la flexibilité d'utilisation des modèles non linéaires des systèmes physiques dans la simulation.

Donc la loi de commande par mode de glissement prend la forme suivante [62] :

$$U = U_n + [- (K_1 \int e. dt) - (K_2. e)] = U_n + U_{eq} \tag{4.19}$$

Où :

$$K_1 = \begin{cases} K_{1a} & \text{si } S < -\varepsilon \\ K_{1b} & \text{si } -\varepsilon \leq S \leq \varepsilon \\ K_{1c} & \text{si } S > \varepsilon \end{cases} \tag{4.20}$$

$$K_2 = \begin{cases} K_{2a} & \text{si } e.S < -\varepsilon \\ K_{2b} & \text{si } -\varepsilon \leq e.S \leq \varepsilon \\ K_{2c} & \text{si } e.S > \varepsilon \end{cases} \tag{4.21}$$

Quand les états font partie de la région de glissement, la commande équivalente U_{eq} n'est qu'un PI conventionnel défini par :

$$U_{eq} = - (K_{1b} \int e. dt) - (K_{2b}. e) \tag{4.22}$$

IV.6. Commande de la MADA par mode glissant

En suivant la démarche de la théorie de commande par mode glissant citée plus haut, et en prenant $n=1$ dans (4.2), le contrôle indépendant des puissances active et réactive de la MADA est donné par l'expression de la surface de contrôle $S(P)$ et $Q(P)$ comme suit [31] :

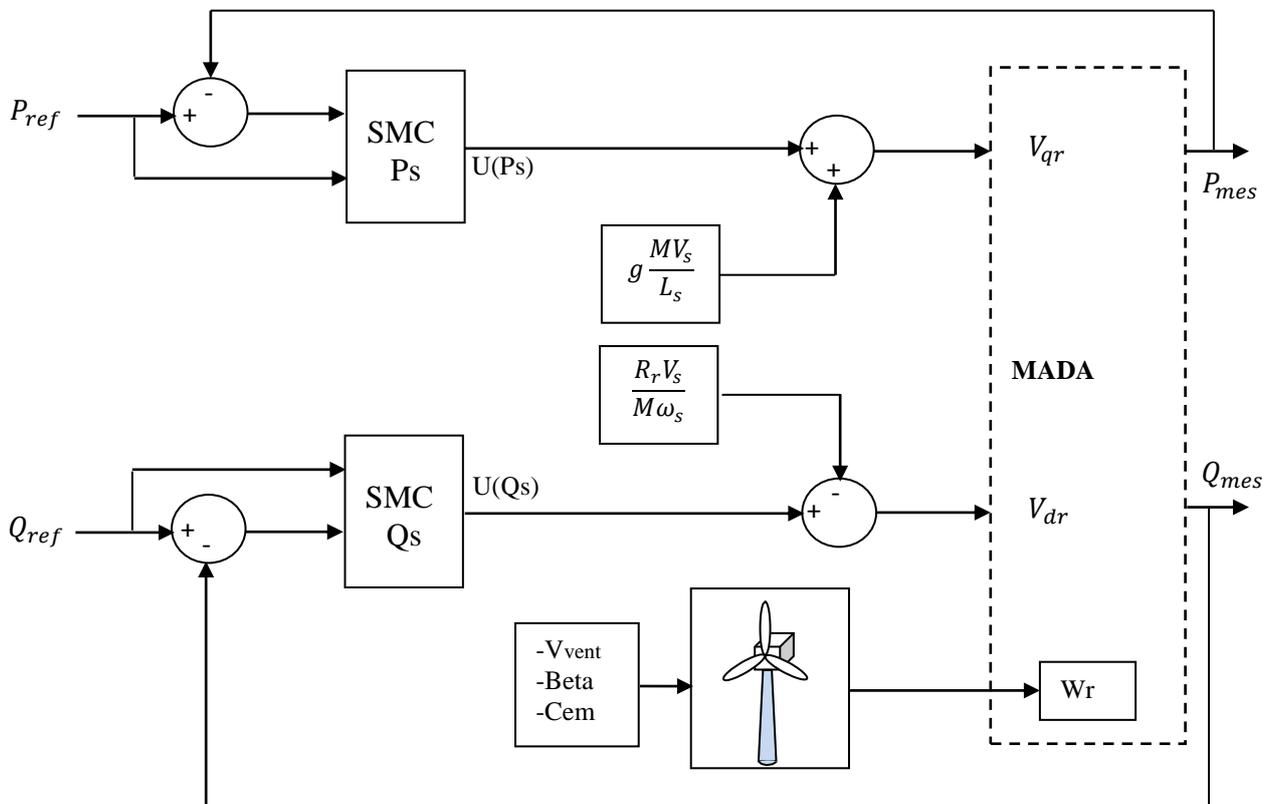


Figure (IV.8) : Schéma bloc de la Commande de la MADA avec régulation SMC [17] [31]

IV.6.1. Contrôle de la puissance active

$$S(P) = (P_{ref} - P_s) \quad (4.23)$$

La dérivée de la surface est :

$$\dot{S}(P) = (\dot{P}_{ref} - \dot{P}_s) \quad (4.24)$$

On remplace l'expression de la puissance (équation 3.11)

$$\dot{S}(P) = \left(\dot{P}_{ref} + V_s \cdot \frac{M}{L_s} \cdot \dot{I}_{qr} \right) \quad (4.25)$$

On tire l'expression du courant \dot{I}_{qr} de l'équation de la tension V_{qr} (équation 3.13)

$$\dot{S}(P) = \left(\dot{P}_{ref} + V_s \frac{M}{L_s \times L_r \times \sigma} (V_{qr} - R_r I_{qr}) \right) \quad (4.26)$$

En remplaçant l'expression de V_{qr} par $V_{qr}^{eq} + V_{qr}^n$; la commande apparaît clairement dans l'équation suivante :

$$\dot{S}(P) = \left(\dot{P}_{ref} + V_s \frac{M}{L_s \times L_r \times \sigma} ((V_{qr}^{eq} + V_{qr}^n) - R_r \cdot I_{qr}) \right) \quad (4.27)$$

Durant le mode de glissement et en régime permanent, on a :

$$S(P) = 0; \text{ donc } \dot{S}(P) = 0 \text{ et } V_{qr}^n = 0 \quad (4.28)$$

On tire de l'équation précédente la grandeur de commande équivalente V_{qr}^{eq} qui s'écrit :

$$V_{qr}^{eq} = \left(-\dot{P}_{ref} \frac{\sigma \times L_s \times L_r}{V_s \times M} + R_r \cdot I_{qr} \right) \quad (4.29)$$

Durant le mode de convergence, pour que la condition $S(P) \times \dot{S}(P) \leq 0$ soit vérifiée, on pose:

$$\dot{S}(P) = \left(-V_s \frac{M}{L_s \times L_r \times \sigma} V_{qr}^n \right) \quad (4.30)$$

Par conséquent, le terme de commutation est donné par la relation :

$$V_{qr}^n = KV_{qr} \text{sign}(S(P)) \quad (4.31)$$

Pour vérifier la condition de stabilité du système, le paramètre KV_{qr} doit être positif Afin d'atténuer tout dépassement possible de la tension de référence V_{qr} , Il est souvent utile de rajouter un limiteur de tension qui s'exprime par :

$$V_{qr}^{lim} = V_{qr}^{max} \times \text{sat}(P) \quad (4.32)$$

IV.6.2. Contrôle de la puissance réactive

$$S(Q) = (Q_{ref} - Q_s) \quad (4.33)$$

La dérivée de la surface est :

$$\dot{S}(Q) = (\dot{Q}_{ref} - \dot{Q}_s) \quad (4.33)$$

On remplace l'expression de la puissance (équation 3.11) :

$$\dot{S}(Q) = \left(\dot{Q}_{ref} - (-V_s \times \frac{M}{L_s} \times \dot{I}_{dr}) \right) \quad (4.34)$$

On tire l'expression du courant \dot{I}_{dr} de l'équation de la tension V_{dr} (équation 3.13)

$$\dot{S}(Q) = \left(\dot{Q}_{ref} + V_s \frac{M}{L_s \times L_r \times \sigma} (V_{dr} - R_r \times I_{dr}) \right) \quad (4.35)$$

En remplaçant l'expression de V_{dr} par $V_{dr}^{eq} + V_{dr}^n$ la commande apparaît clairement dans l'équation suivante :

$$\dot{S}(Q) = \left(\dot{Q}_{ref} + V_s \frac{M}{L_s \times L_r \times \sigma} ((V_{dr}^{eq} + V_{dr}^n) - R_r \times I_{dr}) \right) \quad (4.36)$$

Durant le mode de glissement et en régime permanent, on a :

$$S(Q) = 0 ; \text{ donc } \dot{S}(Q) = 0 \text{ et } V_{dr}^n = 0 \quad (4.37)$$

On tire de l'équation précédente la grandeur de commande équivalente V_{dr}^{eq} qui s'écrit :

$$V_{dr}^{eq} = \left(-\dot{Q}_{ref} \frac{\sigma \times L_s \times L_r}{V_s \times M} + R_r \times I_{dr} \right) \quad (4.38)$$

Durant le mode de convergence, pour que la condition $S(Q) \times \dot{S}(Q) \leq 0$ soit vérifiée, on pose:

$$\dot{S}(Q) = \left(-V_s \frac{M}{L_s \times L_r \times \sigma} V_{dr}^n \right) \quad (4.39)$$

Par conséquent, le terme de commutation est donné par :

$$V_{dr}^n = KV_{dr} \text{sign}(S(Q)) \quad (4.40)$$

Pour vérifier la condition de stabilité du système, le paramètre KV_{dr} doit être positif Afin d'atténuer tout dépassement possible de la tension de référence V_{qr} , Il est souvent utile de rajouter un limiteur de tension qui s'exprime par :

$$V_{dr}^{lim} = V_{dr}^{max} \times \text{sat}(Q) \quad (4.41)$$

IV.7. Simulation

Afin de montrer les performances du régulateur SMC, nous présentons les résultats de simulation obtenus avec ce régulateur pour le contrôle in dépendant de la puissance active et la puissance réactive de la machine asynchrone à double alimentation (MADA). Les résultats ainsi obtenus seront comparés à ceux trouvés par les régulateurs PI de la commande vectorielle. La figure (IV.9) montre le schéma bloqe de simulation

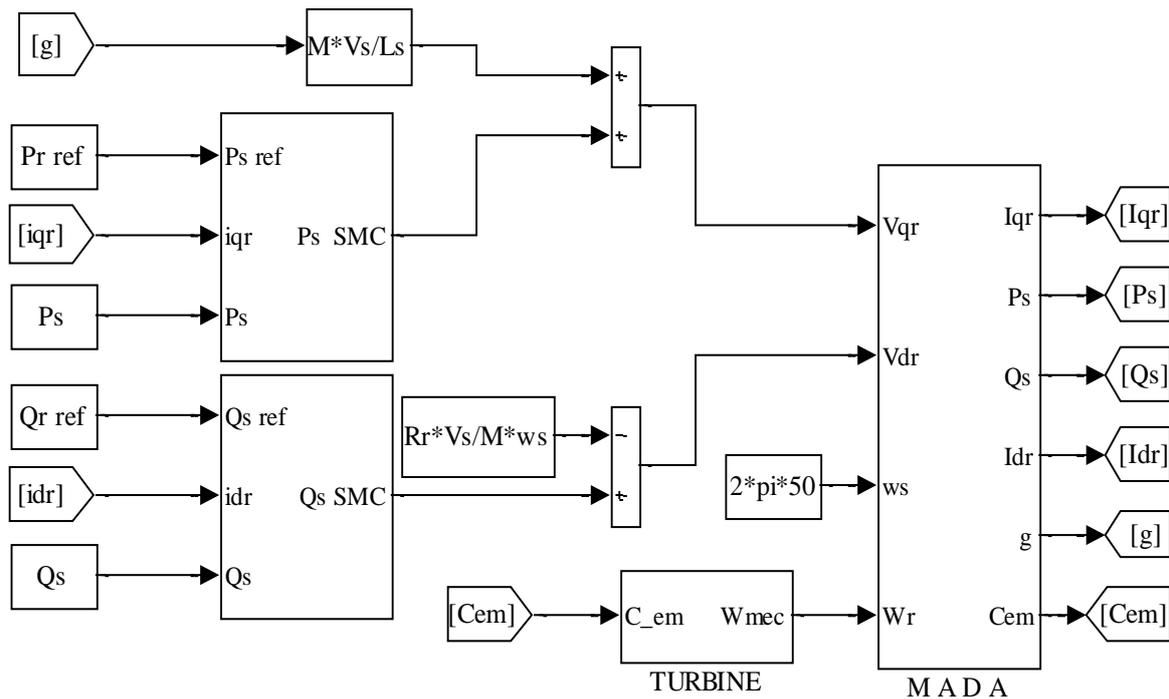


Figure (IV.9) : Schéma bloc de simulation de commande de la MADA par un régulateur SMC

IV.7.1 Suivi de consignes :

Les échelons de puissance appliqués se présentent comme suit :

Pour la puissance active de référence, à :

- $t=1$ s : P_{sref} passe de -600 W à -1000 W
- $t=2$ s : P_{sref} passe de -1000 W à -400 W
- $t=3$ s : P_{sref} passe de -400 W à -800 W

Pour la puissance réactive de référence, à :

- $t=1,2$ s : Q_{sref} passe de -2500 VAR à -1500 VAR
- $t=2,3$ s : Q_{sref} passe de -1500 VAR à -2500 VAR
- $t=3,2$ s : Q_{sref} passe de -2500 VAR à -1000 VAR

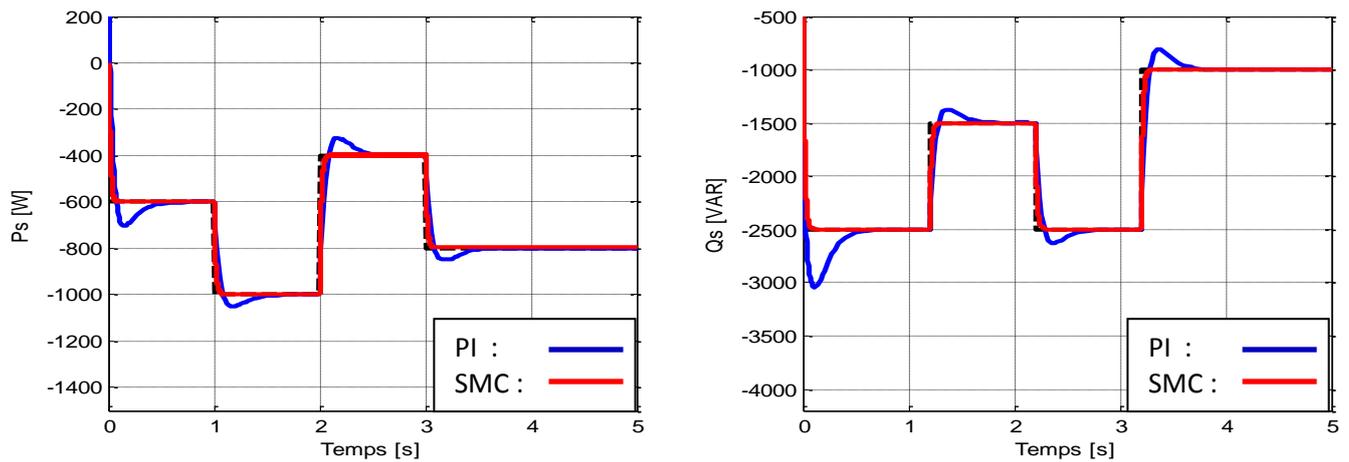


Figure (IV.10) : Suivi de consigne Ps et Qs

Résultats et interprétations

A travers les résultats obtenus (Figure IV.10), on remarque que les puissances actives et réactives suivent parfaitement leurs consignes de références.

Par rapport à la commande classique (régulateur PI) qui présente un régime transitoire avec un temps de réponse de 0.077s et un dépassement de 16% (Chapitre 3), la commande par mode de glissement SMC offre une dynamique qui réagit rapidement pour un temps de réponse de 0.044s et sans dépassement, soit alors une amélioration de 43%.

Nous remarquons l'apparition d'une erreur statique dans le suivi de consignes de l'ordre de 2w et 2.5VAR respectivement pour la puissance active et réactive due au phénomène de chattering.

IV.7.2. Performances

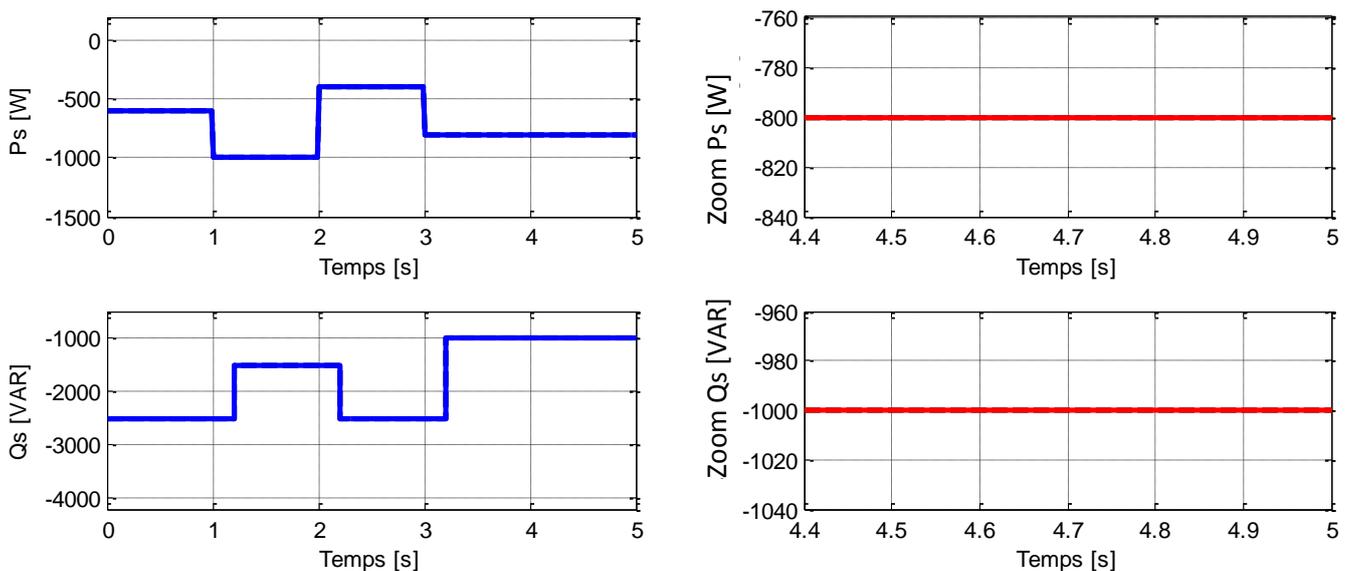


Figure (IV.11) : Rejet de perturbations

Résultats et interprétations

Nous constatons pour les deux cas de figure, la puissance active et réactive ne sont pas affectées face à la perturbation ressentit à l'instant 4.5s, soit donc une meilleure performance par rapport à la commande directe.

IV.7.3. Robustesse

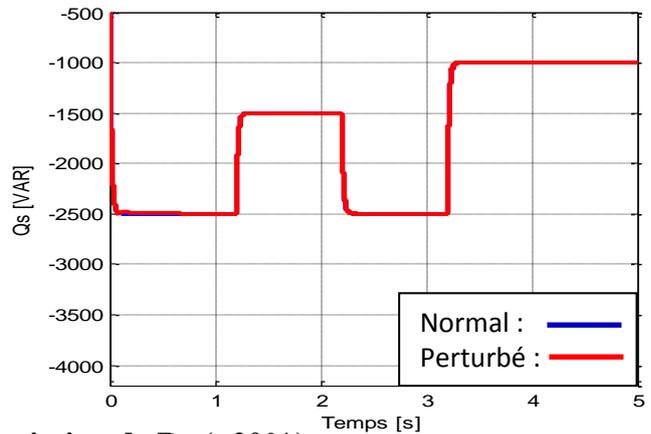
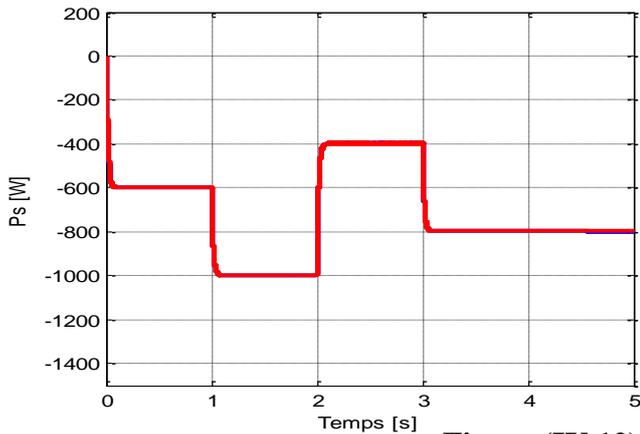


Figure (IV.12) : Variation de Rr (+20%)

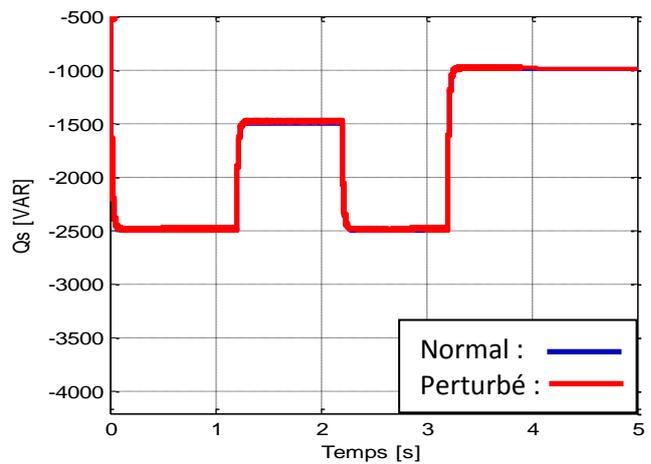
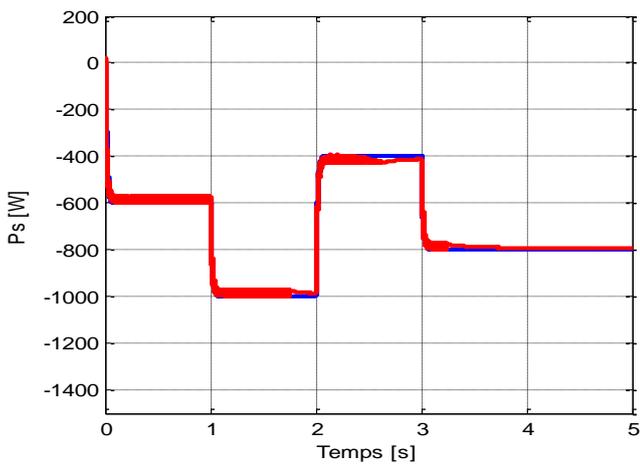


Figure (IV.13) : Variation de Ls (-10%)

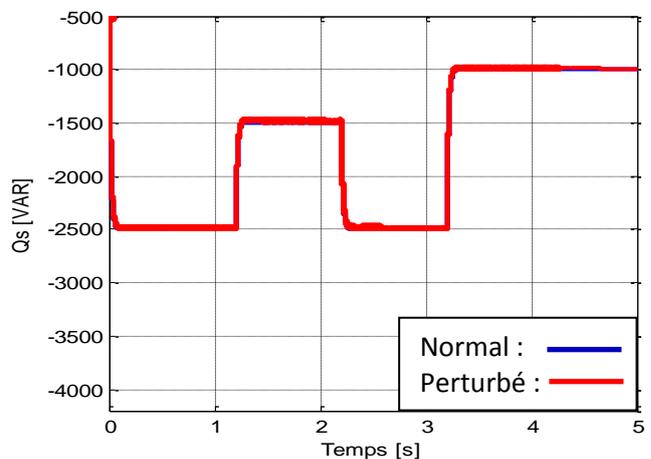
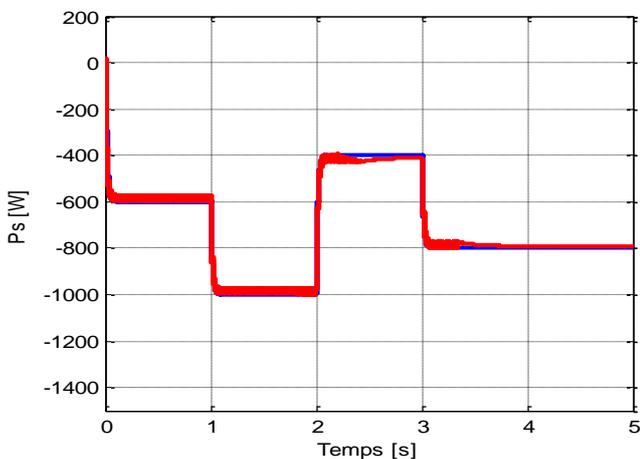


Figure (IV.14) : Variation de Lr (-10%)

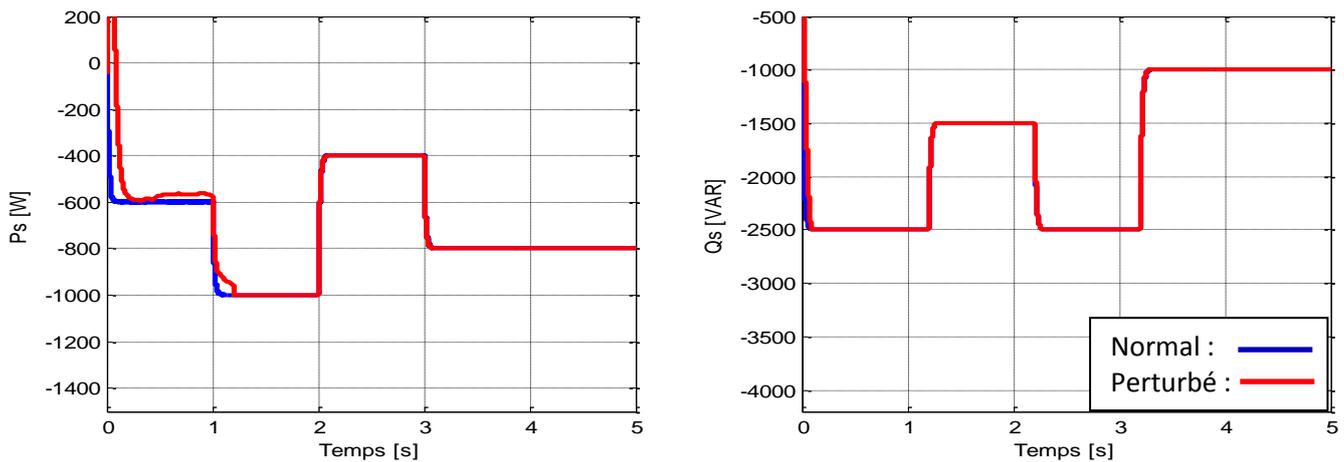


Figure (IV.15) : Variation de M (+20%)

Résultats et interprétations

La commande mode glissant offre aussi une robustesse très élevée par rapport à la commande directe,

- La variation de la résistance rotorique jusqu'à une valeur de 50% est sans effet observée et n'influe pas sur la poursuite de consignes des puissances actives et réactives.
- Les variations des inductances statoriques, rotoriques et mutuelles quant à elles sont sans effet jusqu'à une limite de 40% où on observe une divergence de la puissance réactive uniquement au-delà de cette valeur.

IV.8 Conclusion

Dans ce chapitre, il a été présenté la commande par mode de glissement de la machine asynchrone double alimentée pilotée par le rotor permettant un contrôle indépendant des puissances actives et réactives.

Les résultats obtenus ont permis de juger les qualités de la commande à base des régulateurs SMC, qui offrent de bonnes performances même en cas de variations de consignes. La poursuite en puissance est sans dépassement. Le découplage, la stabilité et la convergence vers l'équilibre sont assurés. De plus, ce réglage présente un algorithme de commande robuste très simple et qui a l'avantage d'être facilement implanté.

D'après ces simulations, on peut remarquer la robustesse de cette commande qui a convenablement assuré la MPPT pour l'échange de puissances actives et réactives entre la MADA et le réseau par la régulation avec le correcteur PI classique pour la commande indirect et à un degré moindre pour la commande directe.

il a été réalisé aussi dans ce chapitre une boucle d'asservissement au niveau du système éolien qui montre clairement son efficacité acceptable de la régulation choisie qui fait ramener le système à son point optimal après une variation brutale de la vitesse du vent avec un bon suivi des puissances actives et réactives avec leurs références.

Dans le but d'augmenter ce degré d'efficacité et d'améliorer les performances de notre système à cause du phénomène de chattering observé, nous ferons au chapitre suivant une simulation avec un régulateur par logique floue et on compare les résultats obtenus.

CHAPITRE 5

COMMANDE PAR MODE FLOU DE LA MADA

V.1. Introduction

En 1965 le professeur L.A. Zadeh a posé les lois théoriques de la logique floue, en 1973 il a proposé d'appliquer les principes de la logique floue dans la résolution des problèmes de réglage, par la suite et en 1974 E.H Mamdani a construit un premier contrôleur flou pour la commande d'une turbine à vapeur. En 1980 Sugeno a appliqué le réglage par logique floue à un four à ciment. Après ces travaux la commande floue a connu un grand essor essentiellement au Japon. La logique floue est basée sur un raisonnement humain, réaliste. Avec toutes les imprécisions et incertitudes qu'elle manipule, elle s'adapte très bien à la régulation des processus aussi bien linéaires que non linéaires. La régulation floue est simple à mettre au point et permet de prendre en charge des systèmes complexes mais exige une connaissance du dispositif. Dans ce qui suit nous présenterons les notions de bases de la logique floue et la méthode manuelle de la conception d'un contrôleur flou (FLC), par la suite nous appliquons ce type de contrôle dans la commande **en puissance active et réactive de la MADA**. [3]

Le réglage par la logique floue avec sa structure non linéaire a présenté des bonnes performances et robustesses dans le contrôle de la MADA, mais dans les contrôleurs flous conventionnels, cette non linéarité est incorporée par un nombre limité des règles (Si-Alors) générés par l'expertise de l'homme, qui ne peut pas être toujours suffisant pour produire un signal de commande nécessaire. Par conséquent, les contrôleurs possédant des facteurs d'échelle fixes, fonctions d'appartenance simples et un nombre limité des règles, ne peuvent pas pour atteindre les performances désirées. Afin d'améliorer l'adaptabilité et la robustesse du réglage vis-à-vis des conditions de fonctionnement, des variations de perturbations et des paramètres, il est judicieux d'adapter les facteurs d'échelles de l'entrée et de la sortie.

Dans ce travail nous proposons une approche d'adaptation des facteurs d'échelle du contrôleur FLC afin d'améliorer davantage ses performances.

Dans une situation pratique, certaines caractéristiques physiques de la MADA peuvent varier au cours du fonctionnement ce qui amène des variations paramétriques sur le modèle du système. En outre, pour la plupart des systèmes, le modèle mathématique n'est pas connu exactement à cause de la non linéarité du processus réel. La procédure habituelle est de concevoir le contrôleur en se basant sur un modèle simplifié et avec des paramètres physiques nominaux. Cette simplification entraîne aussi des incertitudes supplémentaires sur les paramètres du modèle et le contrôleur PI classique ne permet plus d'avoir les qualités de réglage exigées. Le problème peut être résolu par un contrôle adaptatif par lequel le contrôleur est forcé à s'adapter à des conditions de fonctionnement très variées; en exploitant les informations fournies par le système en temps réel. Dans cette voie nous allons procéder à une technique d'hybridation entre le réglage PI et la logique floue, en effet les paramètres du contrôleur PI seront adaptés par une inférence floue, comme il sera détaillé ultérieurement. Nous obtiendrons un contrôleur appelé PI adaptatif flou (PI-FLC).

V.2. Principe généraux de la logique flou 'FLC' :

La logique floue est une technique de traitement des incertitudes et a pour objet : la représentation des connaissances imprécises, elle est basée sur des termes linguistiques courants comme petit, grand, moyen...etc. Elle autorise des valeurs intermédiaires entre le vrai et le faux et admet même des chevauchements entre eux [17][3]. Nous donnons ci-dessous quelques définitions sur la logique floue.

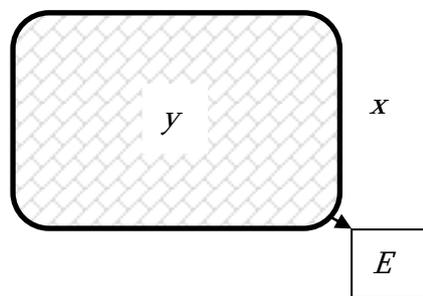
V.2.1. Ensemble flou

Dans un ensemble de référence E , un sous ensemble flou de ce référentiel E est caractérisé par une fonction d'appartenance μ de E dans l'intervalle des nombres réels $[0 \ 1]$ qui indique avec quel degré un élément appartient à cette classe.

L'univers de discours est l'ensemble des valeurs réelles que peut prendre la variable floue x . En général, le domaine de définition de $\mu_E(x)$ peut être réduit à un sous-ensemble de l'univers de discours. On peut ainsi avoir plusieurs fonctions d'appartenance, chacune caractérisant un sous-ensemble flou. C'est par l'association de tous les sous-ensembles flous de l'univers de discours que l'on obtient l'ensemble flou de la variable floue x . Par abus de langage, les sous-ensembles flous sont fort souvent confondus avec l'ensemble flou [17].

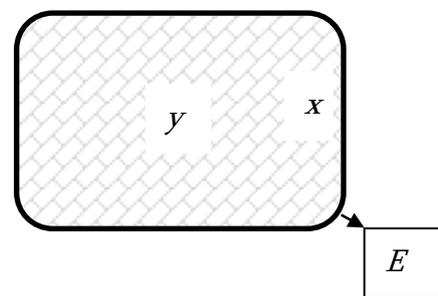
Un sous ensemble flou est caractérisé par un noyau, un support et une hauteur [3]

Ensemble Classique Booléen



y : appartient à E
 x : n'appartient pas à E

Ensemble Flou



y : appartient totalement à E
 x : appartient partiellement à E

Figure (V.1) : Comparaison d'un ensemble classique et d'un ensemble flou [3]

V.2.2. Noyau

C'est l'ensemble des éléments qui sont vraiment dans A : $Noy(E) = \{x / \mu_E(x) = 1\}$

V.2.3. Support

C'est l'ensemble des éléments qui sont dans E à des degrés divers.

V.2.4. Hauteur

C'est la borne supérieure de la fonction d'appartenance : $h_t(E) = Sup_{(x \in E)} \mu_E(x)$

V.2.5. Ensemble normalisé

Un ensemble est dit normalisé s'il est de hauteur 1.

Exemple : Dans la figure (V.2) nous indiquons un exemple de sous ensemble normalisé ainsi que son noyau, son support et sa hauteur.

- Support = ad
- Noyau = bc
- Hauteur = 1

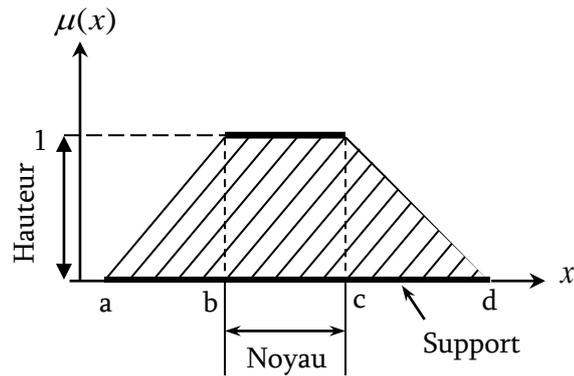


Figure (V.2) : Format d'un ensemble flou normalisé [3]

V.2.6. Opérations

Les opérations possibles sur les ensembles flous sont des opérations de base existant déjà en logique booléenne

Dans la théorie des ensembles classiques on définit les relations intersection ET, la union OU et la complémentation NON. Ces opérateurs existent également en logique floue, mais sont adaptés aux spécificités de cette logique pour traiter les ensembles flous en respectant un certain nombre de propriétés.

Soient E et F un couple d'univers de discours, une relation floue R entre E et F est définie par :

$$R : \begin{cases} E \times F \rightarrow [0, 1] \\ (x, y) \rightarrow \mu_R(x, y) \end{cases} \quad (V.1)$$

V.2.6.1.L'intersection

L'intersection de deux ensembles flous est le plus grand ensemble flou contenu dans E et dans F :

$$\mu_{E \cap F}(x, y) = \mu(x, y) = \min(\mu_E, \mu_F)$$

Ou encore

$$\mu_{E \cap F}(x, y) = \mu(x, y) = \mu_E(x) \cdot \mu_F(y)$$

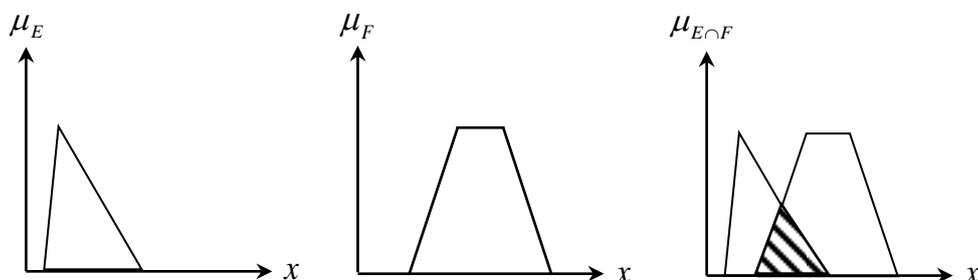


Figure (V.3) : Intersection de deux sous ensemble flous [3]

V.2.6.2.L'union

Une union de deux ensembles flous E et F est le plus petit ensemble flou contenant E et F :

$$\mu_{E \cup F}(x, y) = \mu(x, y) = \max(\mu_E, \mu_F)$$

Ou encore

$$\mu_{E \cup F}(x, y) = \mu(x, y) = \mu_E(x) + \mu_F(y)$$

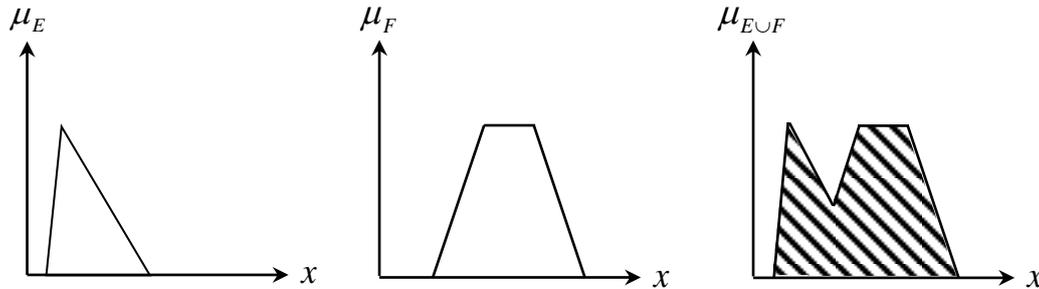


Figure (V.4) : Union de deux sous ensemble flous [3]

V.2.6.3.La complémentation

Le complémentaire d'un sous ensemble flou E dans un ensemble de référence A est défini par la relation : $\mu_{\bar{E}} = 1 - \mu_E$

V.2.6.4. Formes de fonctions d'appartenances

On utilise en général des fonctions d'appartenance de forme triangulaire, trapézoïdale et/ou gaussienne bien qu'il en existe d'autres. Quel que soit la forme choisie, il faut prendre certaines précautions dans la construction et la disposition des fonctions d'appartenance

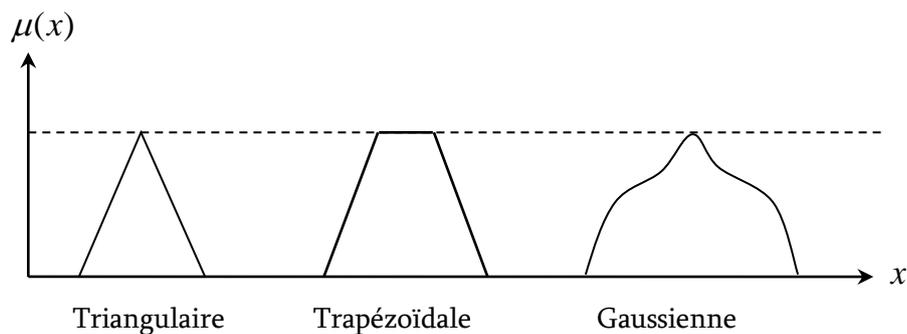


Figure (V.5) : Union et intersection de deux sous ensemble flous [3]

- Pour la variable linguistique « environ zéro » On veillera à éviter un plat au sommet (entraînant d'une indétermination du réglage).
- On évite les recouvrements trop importants ou trop faibles de deux fonctions d'appartenance contiguës.
- On préfère les triangles et les trapèzes pour définir les fonctions d'appartenances pour gagner de l'espace mémoire et minimiser le temps de calculs.

V.2.7. Illustration

Afin de mieux saisir la différence qui existe entre les deux logiques et de mettre en évidence le principe fondamental de la logique floue, nous présentons ci après un exemple pour mieux illustrer la philosophie des choses.

On se propose de classifier des puissances actives d'une éolienne en fonction de leurs valeurs en définissant trois catégories voir figure (V.6) :

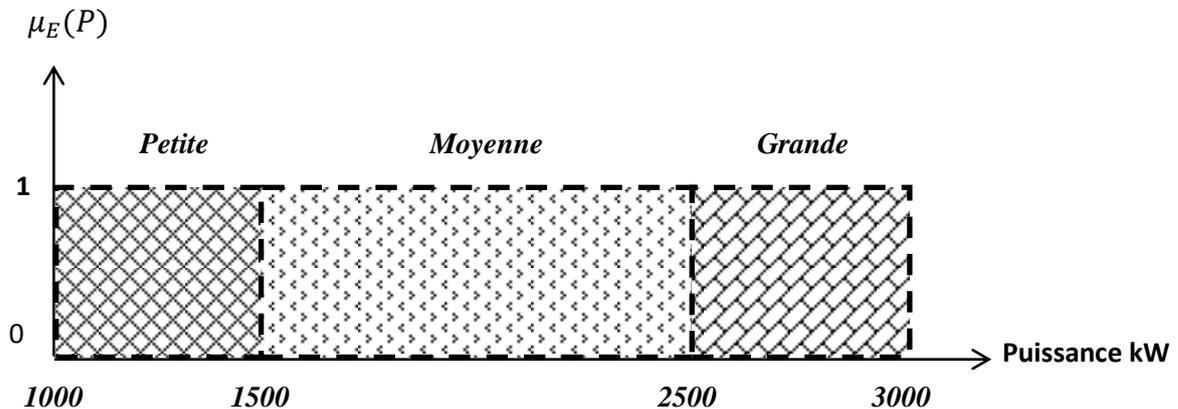


Figure (V.6) : Représentation des variables binaires [3]

On constate que cette façon utilisée pour séparer les intervalles des puissances est très éloignée de ce que fait l'être humain lorsqu'il analyse ce genre de situation. En effet, l'homme ne fait pas une distinction franche entre "petite" et "moyenne" par exemple. Il utilise des expressions telles que "plutôt petite" pour une puissance légèrement inférieure à 1500 kW, et "plutôt moyenne" pour une vitesse juste supérieure à cette valeur.

Donc la logique classique présente bien l'avantage de la simplicité, mais elle est relativement éloignée de la logique utilisée par l'être humain.

Représentons le même problème à l'aide de la logique floue. Les variables ne sont plus de nature binaire mais peuvent prendre une infinité de valeurs possibles entre (0) et (1). La figure (V.7) représente la classification considérée selon le principe de la logique floue.

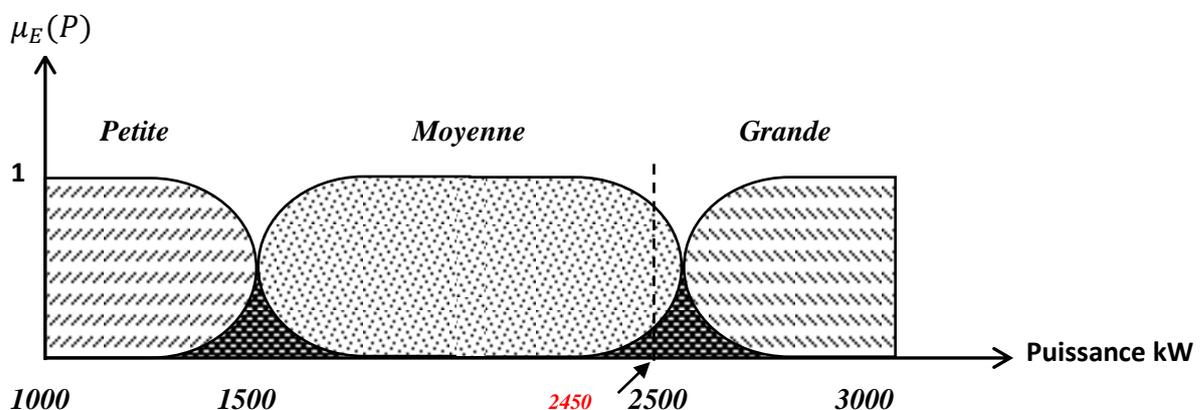


Figure (V.7) : Représentation des variables floues [3]

Ce type de figure est appelé fonction d'appartenance, elle montre que les limites entre les trois catégories ne varient pas brusquement, mais illustre la gradualité introduite par la logique floue. Par exemple une puissance de 2450 kW appartient à l'ensemble "grande" avec un degré de 0,3 et à l'ensemble "moyenne" avec un degré de 0,7.

La fonction d'appartenance est désignée par $\mu_E(P)$. L'argument P se rapporte à la variable linguistique, tandis que l'indice E indique l'ensemble concerné.

On peut résumer la terminologie utilisée par l'illustration suivante [17] :

Variable linguistique	Puissance en kW
Terme linguistique (valeur de la variable linguistique)	"petite" , "moyenne" , "grande"
Ensemble flou (classe d'appartenance)	"petite" , "moyenne" , "grande"
Plage des valeurs de la variable linguistique	(1000, 1500, 2500, 3000)
Fonction d'appartenance	$\mu_E(x) = a$ avec $0 \leq a \leq 1$
Degré d'appartenance	a

Tableau (V.1) : Terminologie de la logique floue

- Une puissance " P " n'est vraiment petite qu'au dessous de 1500 kW, elle n'est qu'à moitié petite à 1750 kW et elle n'est plus du tout petite à 2000 kW ;
- Une puissance " P " n'est vraiment grande qu'au dessus de 2500 kW, elle n'est qu'à moitié grande à 2250 kW et elle n'est plus du tout grande à 3000 kW ;
- Une puissance " P " est tout à fait moyenne à 2000 kW, en dessous de 1500 kW elle n'est pas assez grande pour être moyenne et au-delà de 2500 kW elle ne l'est plus.

Ceci peut être traduit par les trois fonctions d'appartenance de la variable linguistique présentées dans la figure (V.8).

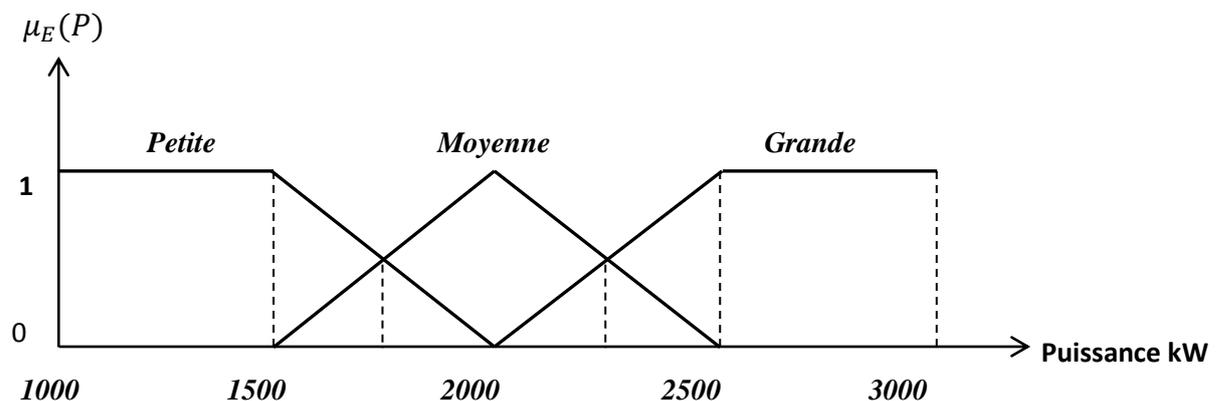


Figure (V.8) : Fonctions d'appartenance avec trois sous-ensembles flous [3]

Afin d'obtenir une subdivision plus fine, nous pouvons définir plus de trois sous-ensembles flous comme l'indique la figure (V.9) qui montre un exemple d'une fonction d'appartenance à cinq sous-ensembles flous. Le choix du nombre des sous-ensembles flous, de la forme des fonctions d'appartenance, du recouvrement de ces fonctions et de leur répartition sur l'univers de discours n'est jamais évident. Il y a pourtant des facteurs qui sont plus importants que d'autres [41].

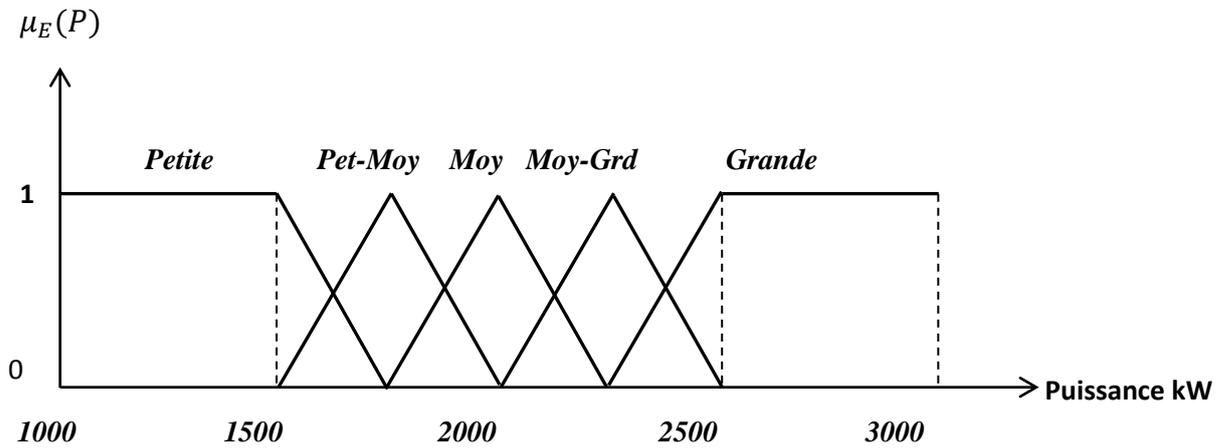


Figure (V.9) : Fonctions d'appartenance avec cinq sous ensembles flous [3]

V.3. Structure générale d'un contrôleur flou

L'avantage de la commande floue par comparaison avec les commandes classiques est qu'elle ne nécessite pas la connaissance des modèles mathématiques du système. Par contre elle a besoin d'un ensemble de règles basées essentiellement sur la connaissance d'un opérateur qualifié manipulant le système [3]

La conception du contrôleur flou (FLC) passe par quatre principales parties distinctes, comme le montre la figure (V.10).

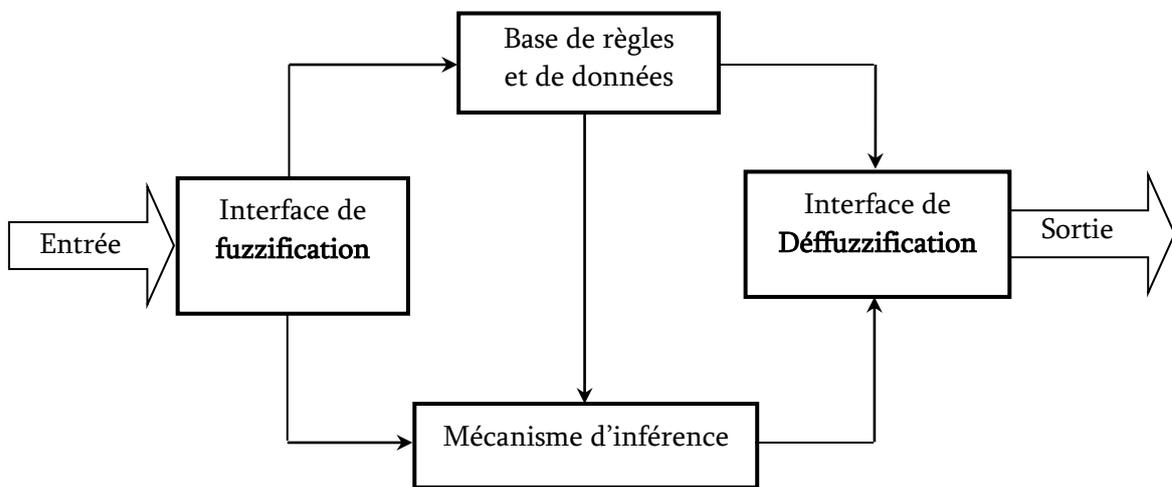


Figure (V10) : Structure d'un système de contrôle flou [3]

V.3.1. Interface de fuzzification

Dans le domaine du contrôle, les données observées sont des grandeurs physiques générées par des capteurs. Il est nécessaire de convertir ces grandeurs réelles déterministes en des variables floues. Pour cela, on fait appel à une opération dite "fuzzification", qui permet de fournir les degrés d'appartenance de la variable floue à ses sous ensembles flous en fonction de la valeur réelle de la variable d'entrée.

Chaque grandeur physique "y" utilisée doit être normalisée dans l'intervalle [-1 ,1] en la divisant par : $max(y_{max} - y_{min})$

En résumé, la fuzzification permet le passage du domaine analogique (grandeurs physiques) au domaine symbolique (variables floues).

V.3.2. Base de règles

Le système de contrôle flou comprend un nombre de règles d'inférence reliant les variables floues d'entrée d'un système aux variables floues de sortie de ce système. Ces règles se présentent sous la forme usuelle suivante :

Si condition 1 **Et/Ou** condition 2 (**Et/Ou**), etc ... **Alors** action sur les sorties.

L'établissement de ces règles est généralement basé sur la connaissance du problème et sur l'expérience de l'opérateur qui peut fixer le nombre de sous-ensembles, leurs fonctions d'appartenance ainsi que les variables linguistiques. Ils existent plusieurs présentations de la base de règles telles que la description linguistique, symbolique ou par une matrice d'inférence. [3]

En résumé, la base de règle est constituée d'une base de données qui contient les définitions des sous-ensembles flous, leurs fonctions d'appartenance et leurs univers de discours pour chacune des variables intervenant dans le régulateur.

L'extraction de ces règles peut être effectuée en utilisant la réponse indicielle d'un système du deuxième ordre en analysant son comportement dynamique et en suite de formuler les règles afin que la réponse coïncide avec la référence (figure xxx).

Dans cette courbe on peut distinguer quatre régions : la montée, le dépassement, l'amortissement et la région de régime permanent.

Si par exemple, pour un système représenté par $e_p = (P_{ref} - P_s)$ et sa variation $\Delta e_p = \Delta(P_{ref} - P_s)$, on peut constater que l'erreur e_p et sa variation Δe_p sont les grandeurs les plus significatives pour analyser le comportement du système.

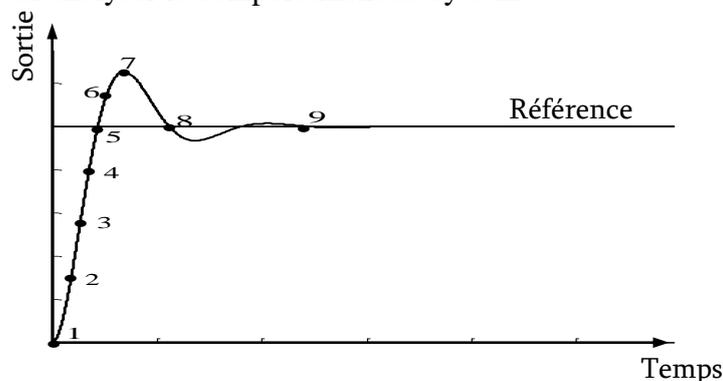


Figure (V.11) : Etude du comportement du système [3]

Si $e = GP$ et $\Delta e = Z$ alors $\Delta u = GP$ (point de départ, la commande est importante)

Si $e = GP$ et $\Delta e = PN$ alors $\Delta u = MP$ (augmentation de la commande pour gagner l'équilibre)

Si $e = MP$ et $\Delta e = PN$ alors $\Delta u = PP$ (faible augmentation de commande pour n'avoir pas de dépassement)

Si $e = PP$ et $\Delta e = PN$ alors $\Delta u = Z$ (convergence vers l'équilibre correct)

Si $e = Z$ et $\Delta e = PN$ alors $\Delta u = PN$ (freinage du processus)

Si $e = PN$ et $\Delta e = PN$ alors $\Delta u = MN$ (freinage et inversion de la variation de commande)

Si $e = MN$ et $\Delta e = Z$ alors $\Delta u = MN$ (rappel du processus vers l'équilibre correct)

Si $e = PN$ et $\Delta e = PP$ alors $\Delta u = Z$ (convergence vers l'équilibre correcte)

Si $e = Z$ et $\Delta e = Z$ alors $\Delta u = Z$ (équilibre)

V.3.3. Mécanisme d'inférence

Dans cette étape, il s'agit de déterminer comment le système interprète les variables linguistiques floues. Les variables linguistiques (entrées et sorties) sont liées par les règles d'inférence. Les variables sont liées par l'opérateur "ET", tandis que les variables de sortie des différentes règles sont liées par l'opérateur "OU" et l'ensemble des règles sont liées par les connecteurs tels que "ET" et "Alors". La conséquence d'une règle floue est inférée par l'emploi de règle de composition, en utilisant les fonctions d'implications floues et les connecteurs "ET" et "Alors".

Les méthodes d'inférences se différencient selon la combinaison et l'utilisation des opérateurs (ET et OU) dans les règles d'inférence. Parmi ces méthodes on trouve [3] :

- Méthode d'inférence MAX-MIN
- Méthode d'inférence MAX-PROD
- Méthode d'inférence SOMME-PROD

V.3.3.1. Méthode d'inférence MAX-MIN

Cette méthode dite aussi implication de Mamdani, est représentée comme suit :

- l'opérateur "ET" par la fonction "Min",
- l'opérateur "OU" par la fonction "Min",
- la conclusion "ALORS" par la fonction "Max".

La représentation graphique de cette méthode d'inférence est illustrée par la figure (V.12).

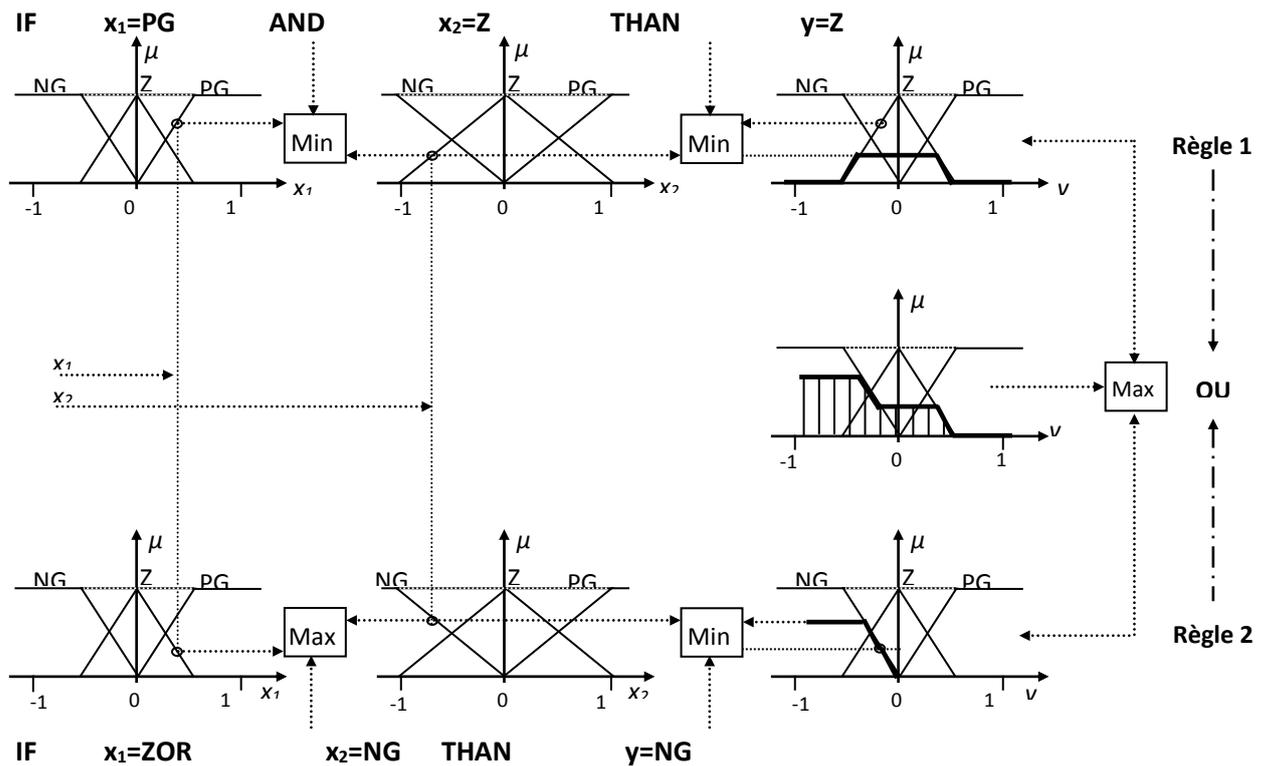


Figure (V.12) : Méthode d'inférence Max-Min [3].

V.3.3.2. Méthode d'inférence Max-Produit

Cette méthode présente l'opérateur "ET" par la fonction "Min", l'opérateur "OU" par la fonction "Max" et la conclusion "Alors" par la fonction "Prod", d'où la représentation graphique de cette méthode est schématisée par la figure (V.13).

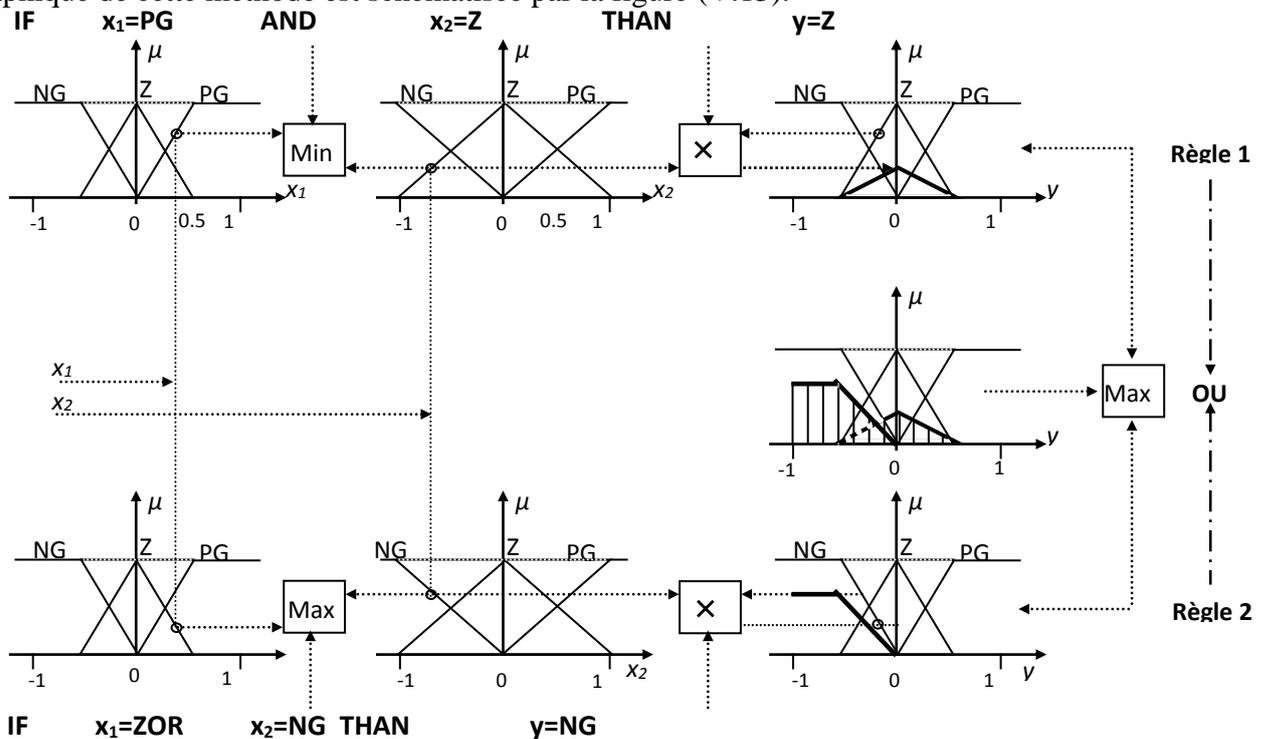


Figure (V.13) : Méthode d'inférence Max-Prod [3]

V.3.3.3.Méthode d'inférence Somme-Produit

Dans cette méthode, l'opérateur "ET" est représenté par la fonction "Prod", l'opérateur "OU" est représenté par la fonction "Somme" et la conclusion "Alors" est représentée par la fonction "Prod", sa représentation graphique est illustrée par la figure (V.14).

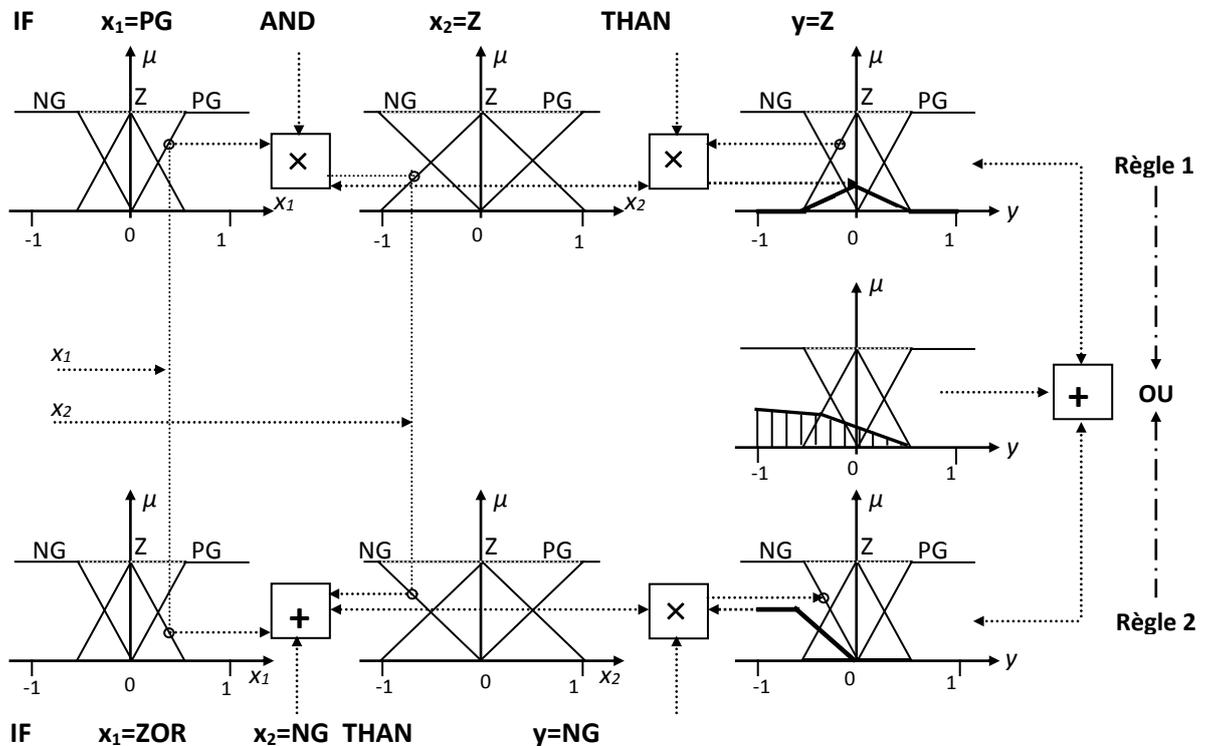


Figure (V.14) : Méthode d'inférence floue Somme-Prod. [3]

Néanmoins, la méthode Max-Min est de loin la plus utilisée à cause de sa simplicité

V.3.4. Interface de déffuzzification

Les méthodes d'inférence génèrent une fonction d'appartenance, il faut transformer cette grandeur floue en grandeur physique réelle. L'opération de déffuzzification permet de calculer à partir des degrés d'appartenance à tous les sous-ensembles flous de la variable de sortie, la valeur de sortie à appliquer au système.

La déffuzzification consiste à déduire une valeur numérique précise de la sortie du régulateur (x_r) à partir de la conclusion résultante floue ($\mu_{RES}(x_r)$) issue de l'opération d'inférence. Les méthodes couramment utilisées sont :

- La méthode de centre de gravité ;
- La méthode du maximum ;
- La méthode des surfaces ;
- La méthode des hauteurs.

On présente dans ce qui suit l'une des méthodes les plus utilisées, qui est la méthode du centre de gravité. Cette méthode donne généralement de meilleurs résultats malgré l'exigence d'une grande puissance de calcul. Elle consiste à prendre comme décision à la sortie l'abscisse x_{Gr} du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante $\mu_{RES}(x_r)$. Cette abscisse est déterminée par la relation suivante [45].

$$x_{Gr} = \frac{\int_{-1}^1 x_r \mu_{RES}(x_r) dx_r}{\int_{-1}^1 \mu_{RES}(x_r) dx_r} \quad (V.2)$$

En résumé, La défuzzification réalise la fonction inverse de la fuzzification. Elle définit le passage du domaine symbolique au domaine numérique.

V.4. Structures de base d'un contrôleur flou

Dans la commande floue plusieurs approches peuvent être utilisées, ces approches se distinguent selon les entrées et la sortie du contrôleur.

V.4.1. Contrôleur flou-PI

La figure (V.15) représente un contrôleur flou de type PI (FLC-PI). Dans ce cas la sortie du contrôleur flou est considérée comme un incrément de commande.

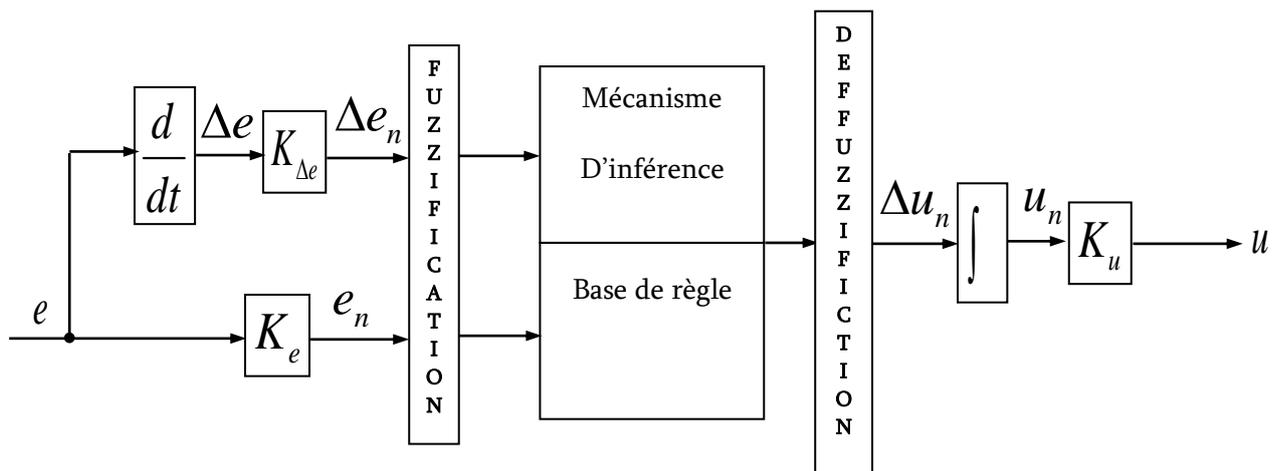


Figure (V.15) : Schéma de principe d'un contrôleur flou type PI [3]

V.4.2. Contrôleur flou-PD

Dans la figure (V.16), Plutôt la sortie du contrôleur est directement appliquée au processus, le contrôleur est appelé : contrôleur flou de type PD (FLC-PD).

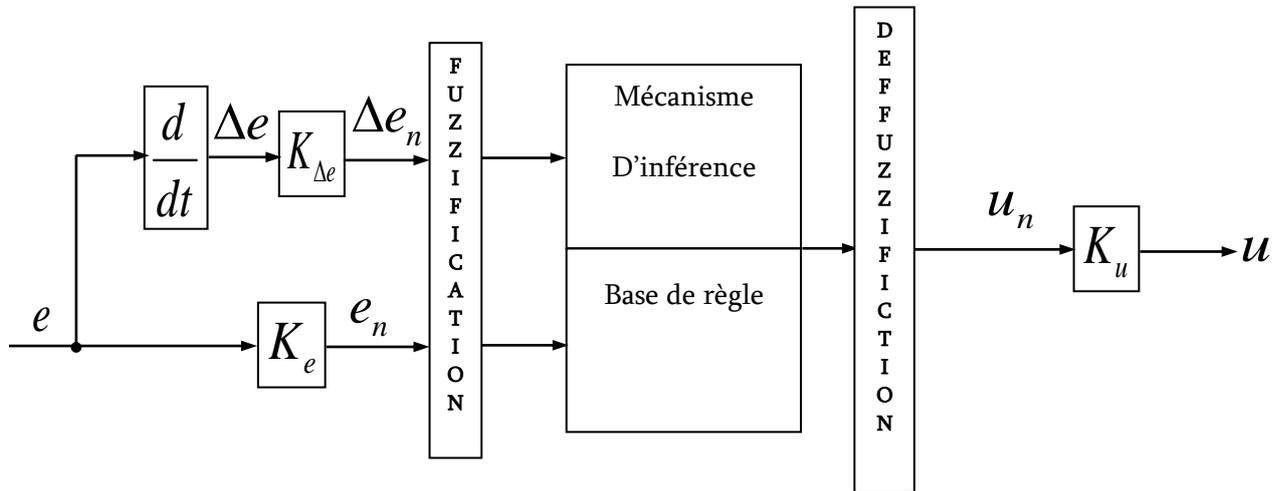


Figure (V.16) : Schéma de principe d'un contrôleur flou type PD. [3]

V.4.3. Contrôleur flou-PID

Le contrôleur flou de type PID peut être obtenu en combinant les deux contrôleurs flous de type PI et PD comme il est indiqué dans la figure (V.17)

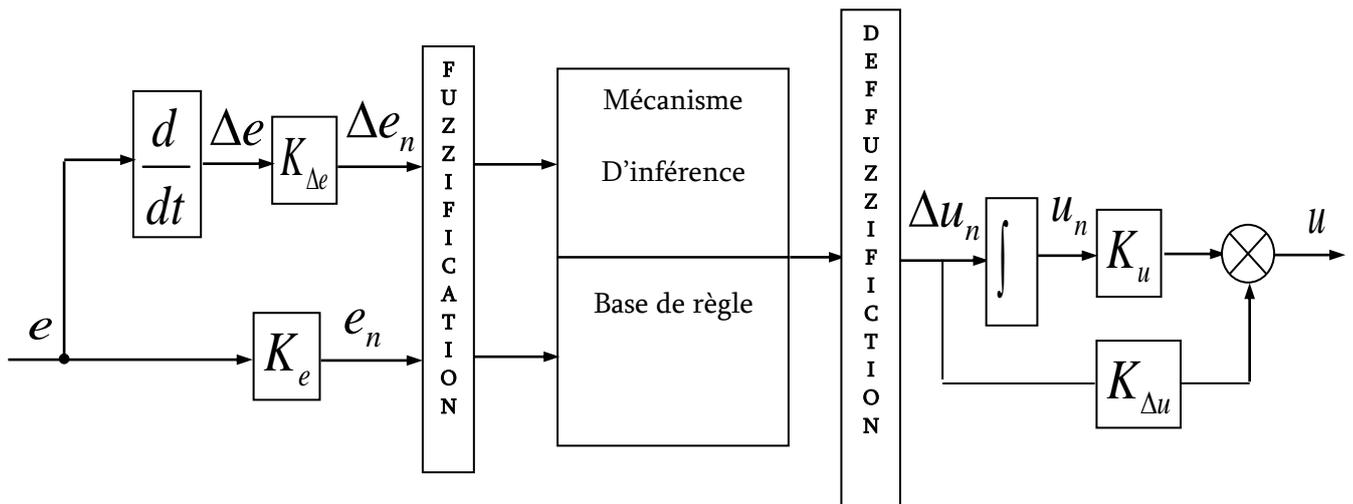


Figure (V.17) : Schéma de principe d'un contrôleur flou type PID. [3]

Les gains K_e et $K_{\Delta e}$ sont nommés facteurs d'échelle, ils servent à transformer les valeurs physiques des entrées dans un domaine normalisé $[-1 \ 1]$. De plus, la dénormalisation change la valeur normalisée du signal de commande à son domaine physique respecté à l'aide des deux facteurs d'échelle K_u et $K_{\Delta u}$. Par conséquent, les entrées du contrôleur flou e_n et Δe_n sont normalisées par l'utilisation des expressions suivantes :

$$\begin{cases} e_n = K_e \cdot e \\ \Delta e_n = K_{\Delta e} \cdot \Delta e \end{cases} \quad (\text{V.3})$$

De la même façon, la sortie u_n du contrôleur est dénormalisée à u en utilisant la relation suivante :

$$u = K_u \cdot u_n + K_{\Delta u} \cdot \Delta u_n \quad (\text{V.4})$$

V.5. Commande de la MADA par la Logique flou 'FLC' :

En se basant sur l'étude de la commande par logique floue décrite précédemment, on va procéder à son application à notre génératrice asynchrone à double alimentation pour le contrôle indépendant des puissances actives et réactives. Nous allons donc garder la commande vectorielle de la MADA en remplaçant les régulateurs Proportionnel-Intégral (PI) par des régulateurs flou PI plus robustes où on aura un régulateur sur chacune des boucles, celle de la puissance active et celle de la puissance réactive

V.5.1. Configuration de la boucle de puissance

Les deux grandeurs les plus significatives pour analyser le comportement du système à savoir l'erreur e_p et sa variation Δe_p sont choisis comme deux entrées du FLC. La sortie est l'incrément de signal de commande à appliquer au système à commander Δu .

V.5.1.1. Choix des variables

Les entrées du FLC se calculent à l'instant k de manière suivante [17]:

$$\begin{cases} e_p(k) = P_{ref}(k) - P_s(k) \\ \Delta e_p(k) = e_p(k) - e_p(k-1) \end{cases} \quad (\text{V.5})$$

Le signal de commande (sortie) Iqr_{ref} s'obtient après l'intégration de la sortie du FLC.

$$Iqr_{ref}(k) = Iqr_{ref}(k-1) + \Delta Iqr_{ref}(k) \quad (\text{V.6})$$

Le même raisonnement et la même procédure s'applique à la boucle de puissance réactive où le signal de commande est le courant rotorique direct Idr_{ref}

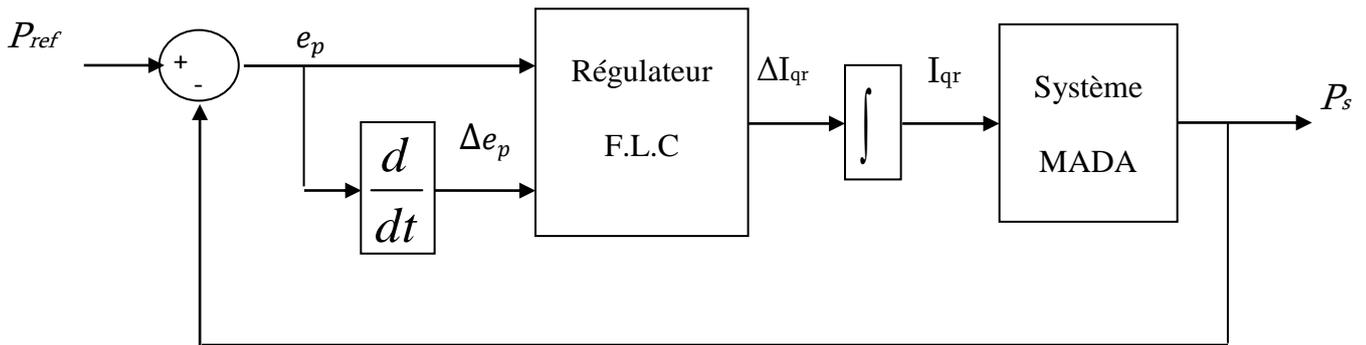


Figure (V.18) : Schéma bloc de la commande de la MADA [17] [31]

V.5.1.2. Choix de l'univers de discours :

Pour avoir une flexibilité dans l'implémentation du régulateur, on doit limiter les univers de discours d'entrée et de sortie à un intervalle déterminé par la normalisation des entrées et de la sortie, c'est-à-dire $[-1,1]$. Il faut donc avoir des gains d'adaptation pour avoir la dynamique voulue, mais il n'y a pas de technique systématique pour la détermination de ces gains, donc on procède par tâtonnements.

V.5.1.3. Choix des fonctions d'appartenance

Les fonctions d'appartenance choisies ont la forme trapézoïdale aux extrémités et triangulaire dans l'univers de discours figure (V.19)

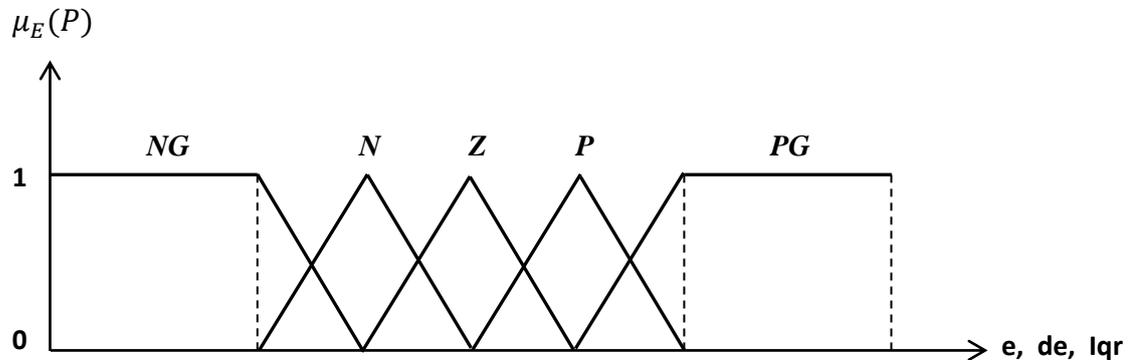


Figure (V.19) : Fonctions d'appartenance avec cinq sous ensembles flous [3]

V.5.1.4. Choix de la méthode d'inférences

Nous avons choisi la méthode d'inférence floue (max-min) donnée par la figure (V.12).

V.5.1.5. Choix de la méthode de déffuzzification

Nous avons considéré, dans notre travail, la méthode du centre de gravité pour la déffuzzification.

Pour les fonctions d'appartenance, elles sont définies par dans le tableau (V.2) par :

- Négatif grand noté NG ;
- Négatif petit noté NP ;
- Environ de zéro noté EZ ;
- Positif petit noté PP ;
- Positif grand noté PG ;

ΔI_{qr}		Δe_p				
		GN	N	Z	P	GP
e_p	GN	GN	GN	N	N	Z
	N	GN	N	N	Z	P
	Z	N	N	Z	P	P
	P	N	Z	P	P	GP
	GP	Z	P	P	GP	GP

Tableau (V.2) : Matrice d'inférence à cinq fonctions d'appartenance [3]

V.6 Résultats de simulation

Afin de montrer les performances du régulateur FLC, nous présentons les résultats de simulation obtenus avec ce régulateur pour le contrôle indépendant de la puissance active et la puissance réactive de la machine asynchrone à double alimentation MADA comme le montre le schéma bloc de simulation donné par la figure (V.20). Les résultats ainsi obtenus seront comparés à ceux trouvés par les régulateurs PI de la commande vectorielle.

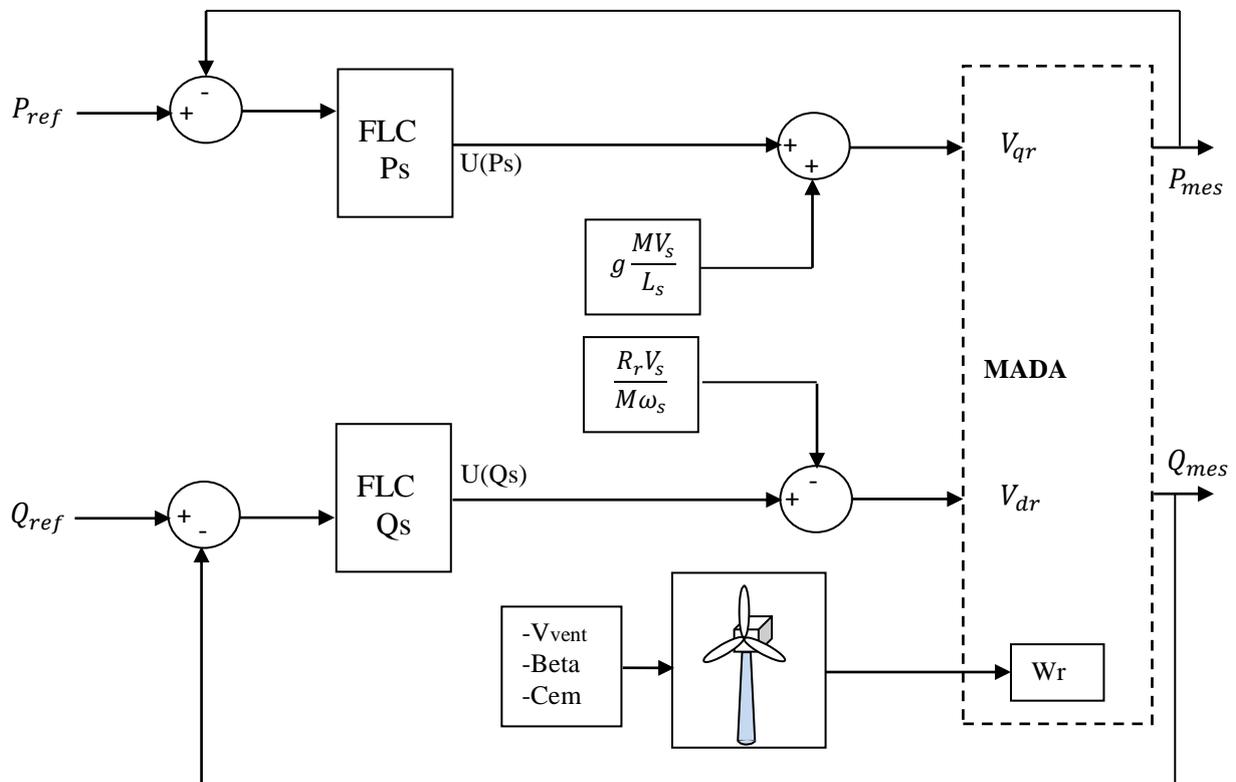


Figure (V.20) : Schéma bloc de la Commande de la MADA avec régulation FLC

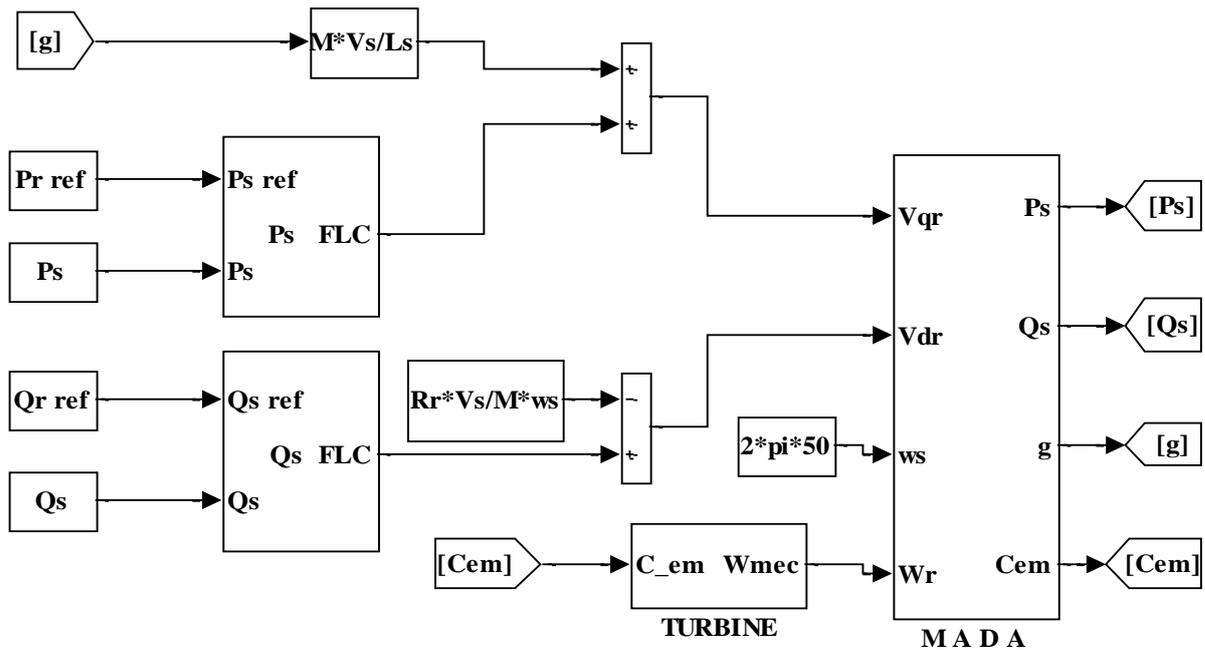


Figure (V.21) : Schéma bloc de simulation de commande de la MADA par un régulateur FLC

V.6.1 Suivi de consignes :

Les échelons de puissances appliqués se présentent comme suit :

Pour la puissance active de référence, à :

- $t=1$ s : P_{sref} passe de -600 W à -1000 W
- $t=2$ s : P_{sref} passe de -1000 W à -400 W
- $t=3$ s : P_{sref} passe de -400 W à -800 W

Pour la puissance réactive de référence, à :

- $t=1,2$ s : Q_{sref} passe de -2500 VAR à -1500 VAR
- $t=2,3$ s : Q_{sref} passe de -1500 VAR à -2500 VAR
- $t=3,2$ s : Q_{sref} passe de -2500 VAR à -1000 VAR

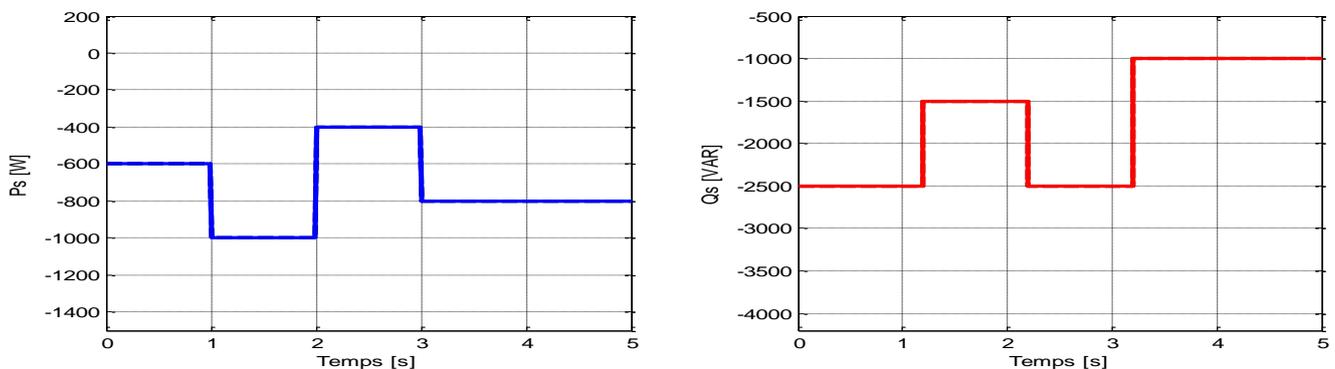


Figure (V.22) : Suivi de consigne P_s et Q_s

Résultats et interprétations

A travers les résultats obtenus Figures (V.21), on remarque que les puissances actives et réactives suivent parfaitement leurs consignes de références.

V.6.2. Performances

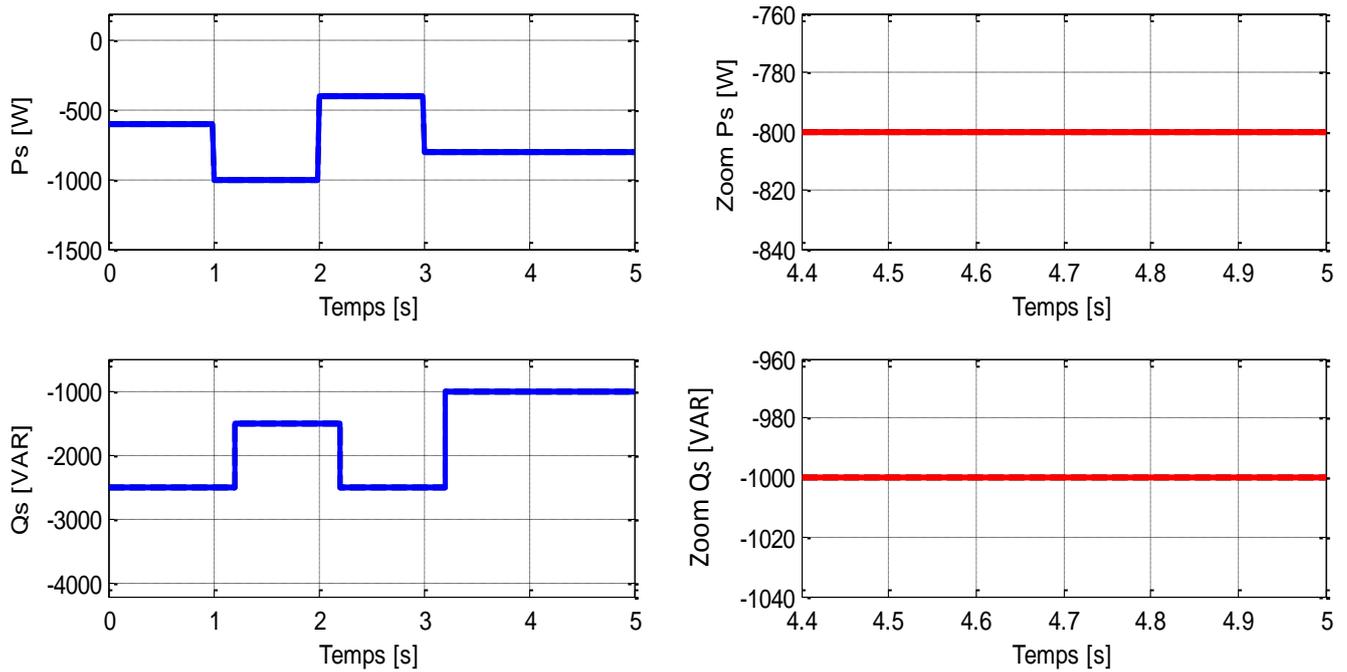


Figure (V.23) : Rejet de perturbations

Résultats et interprétations

Nous constatons pour les deux cas de figure, la puissance active et réactive ne sont pas affectées face à la perturbation ressentit à l'instant 4.5s.

V.6.3. Robustesse

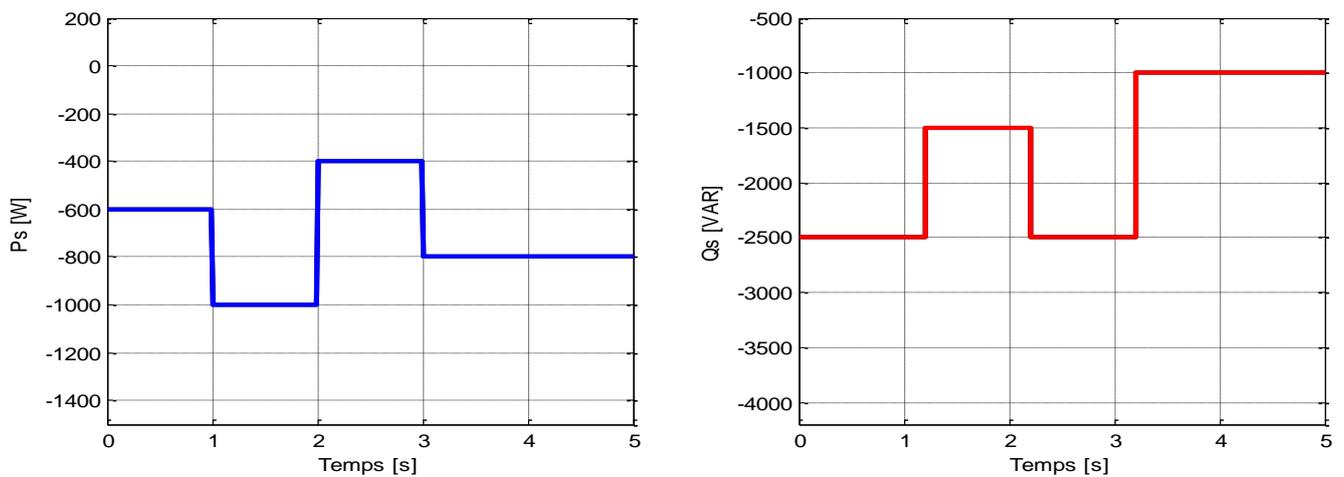
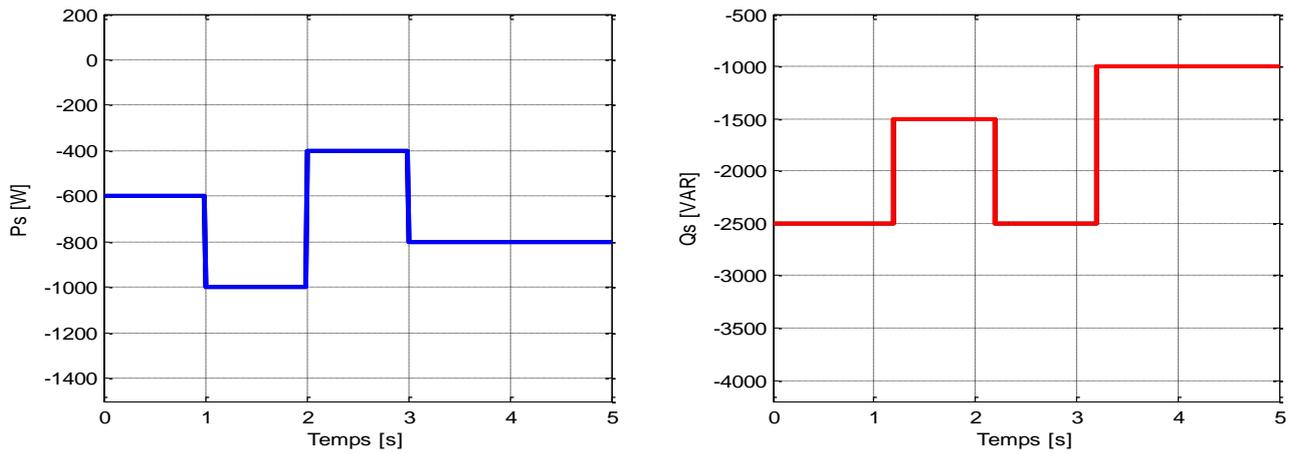
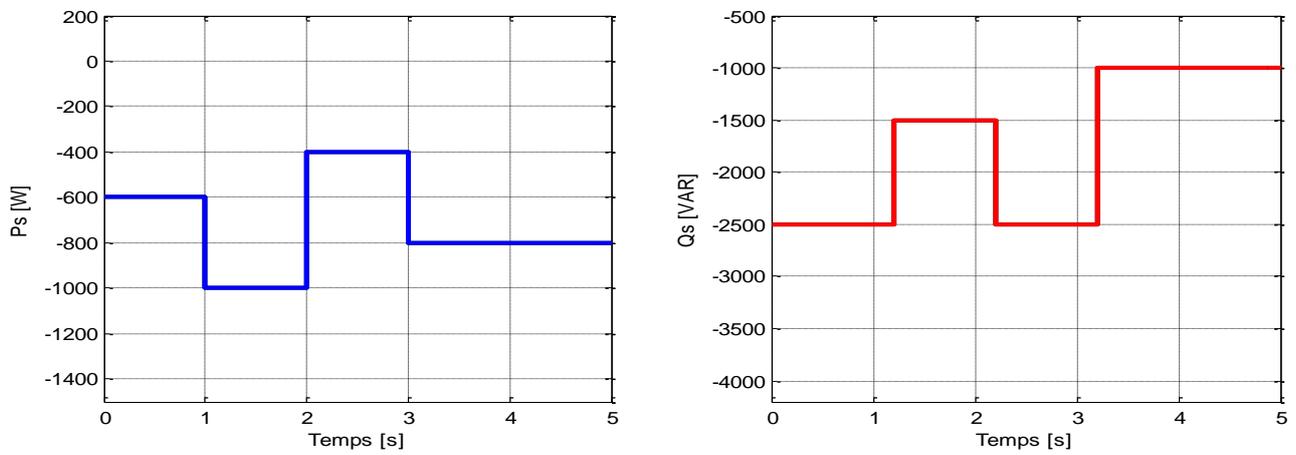
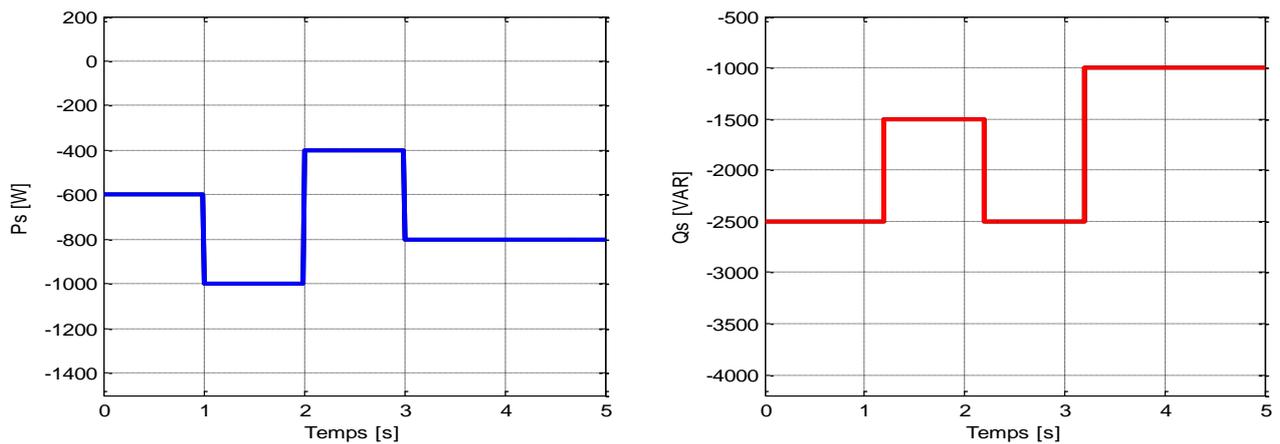


Figure (V.24) : Variation de R_r (+20%)

Figure (V.25) : Variation Variation de L_s (-10%)Figure (V.26) : Variation Variation de L_r (-10%)Figure (V.27) : Variation de M (+20%)

Résultats et interprétations

La commande par logique floue offre aussi une robustesse très élevée

V.7 Comparaison des trois commandes :

V.7.1. Suivi de consignes :

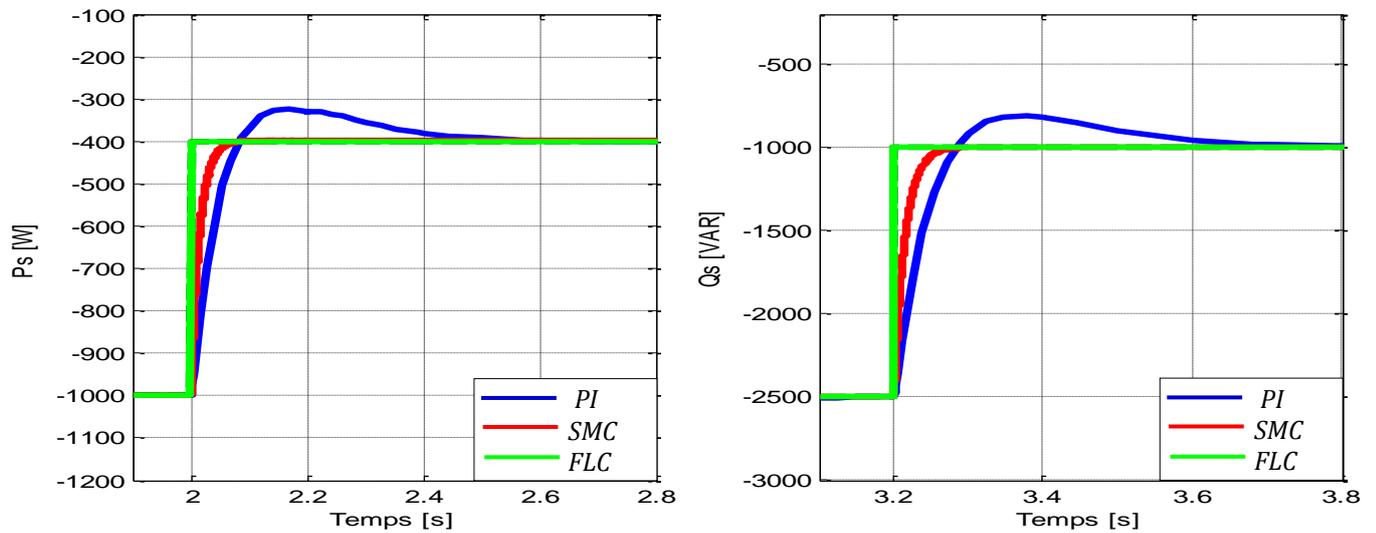


Figure (V.28) : Suivi de consigne P_s et Q_s

A travers les résultats obtenus, on remarque que les puissances actives et réactives suivent parfaitement leurs consignes de références.

Par rapport à la commande directe qui présente un régime transitoire médiocre en termes de temps de réponse et dépassement, la commande par logique flou offre une meilleure dynamique qui se coïncide presque à celle de la commande par mode glissant avec une amélioration dans le temps de réponse du système presque nul. Le couplage entre les deux puissances pratiquement n'existe pas.

V.7.2. Performances :

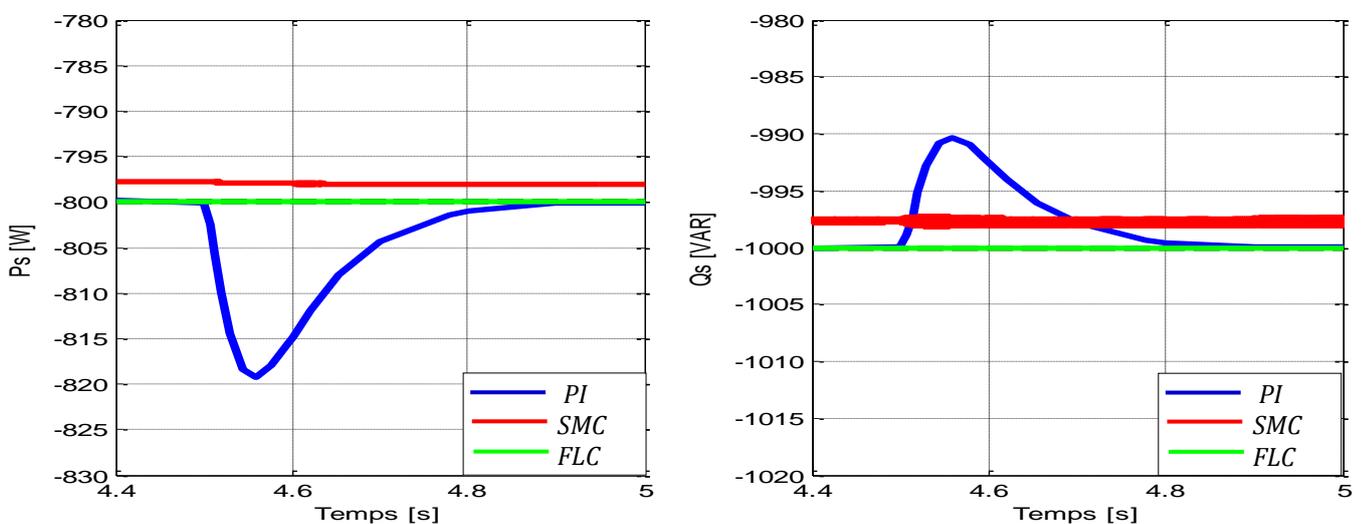


Figure (V.29) : Rejet de perturbations

Nous constatons pour les deux cas de figure, la puissance active et réactive ne sont pas affectées face à la perturbation ressentit à l'instant 4.5s, soit donc une meilleure performance par rapport à la commande directe et presque la même pour le mode glissant

V.7.3. Robustesse :

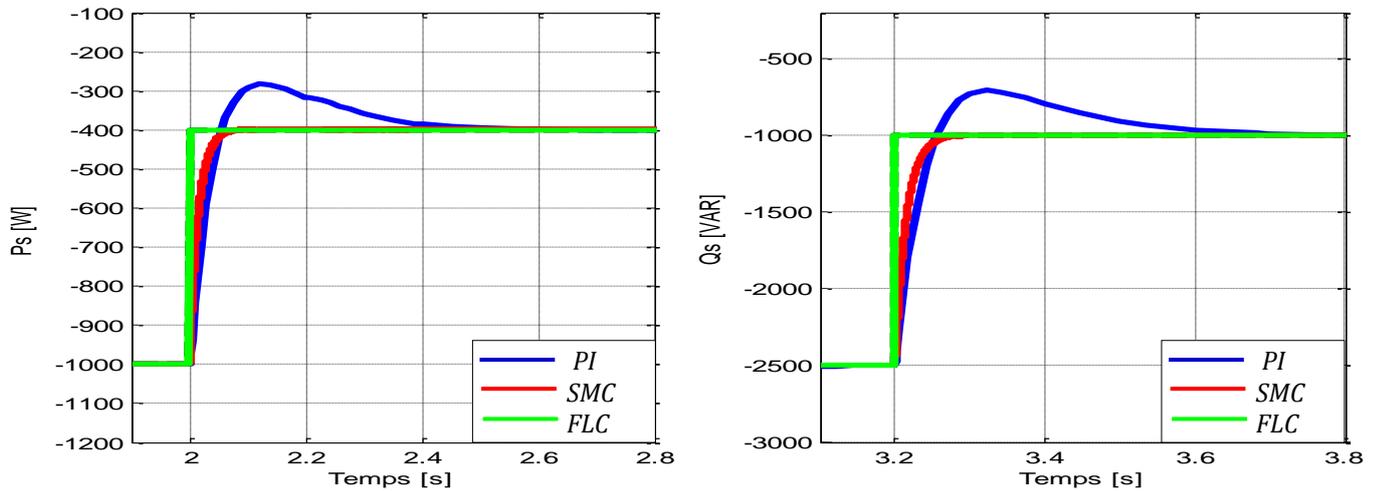


Figure (V.30) : Variation de Rr (+20%)

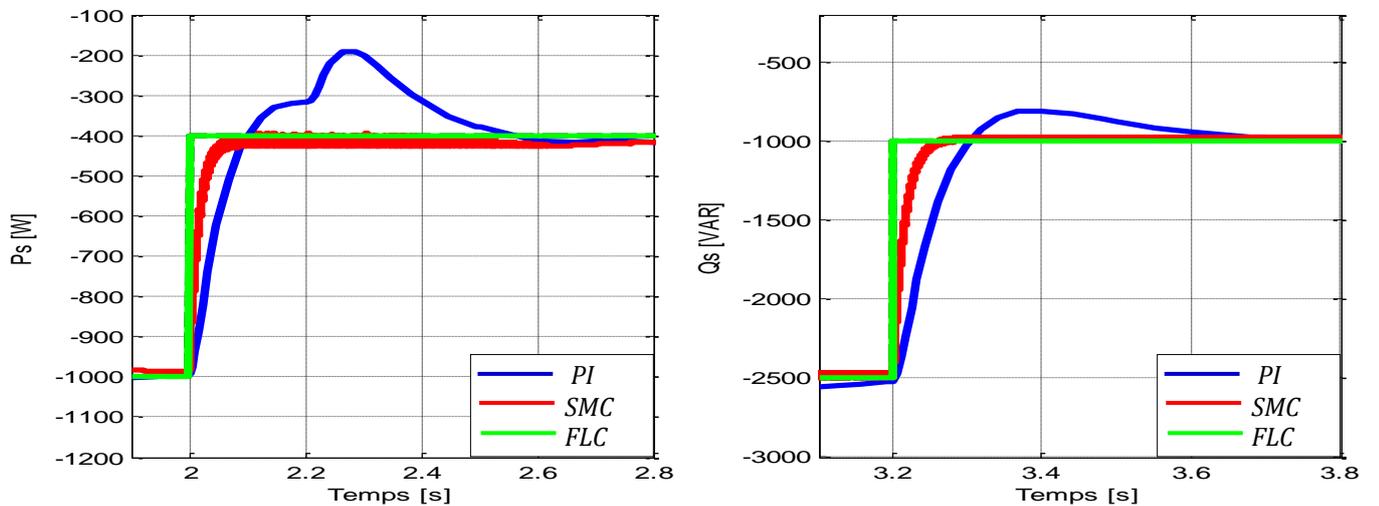


Figure (V.31) : Variation de Ls (-10%)

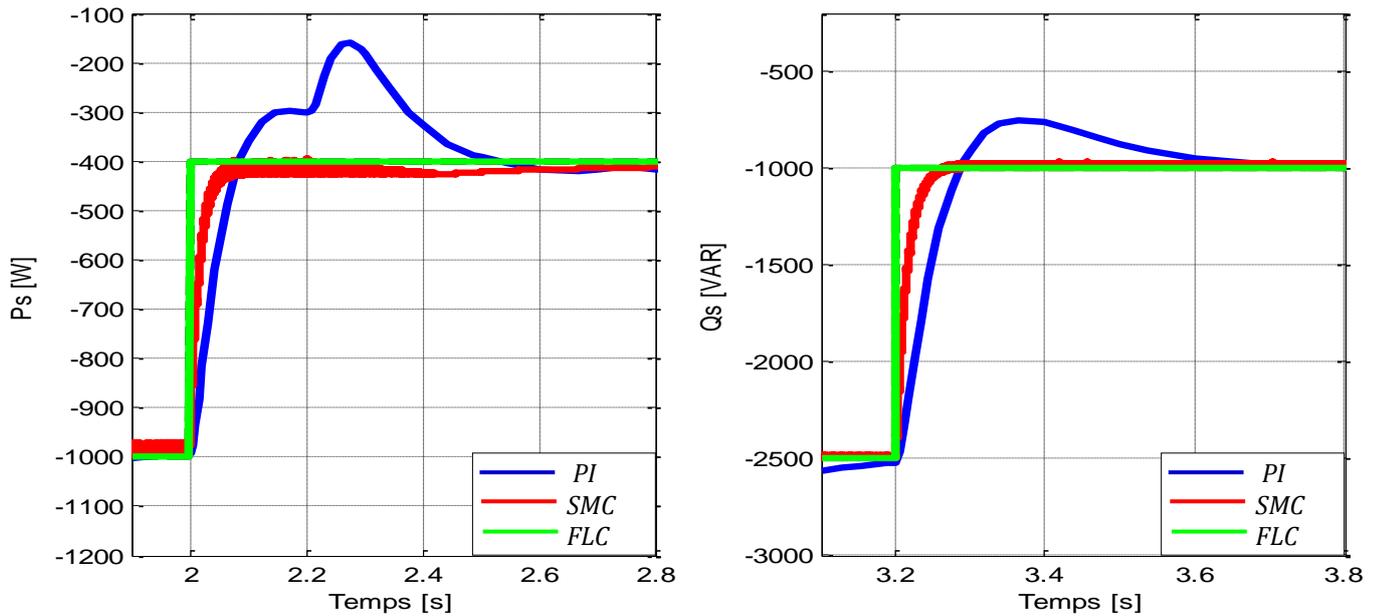


Figure (V.32) : Variation de L_r (-10%)

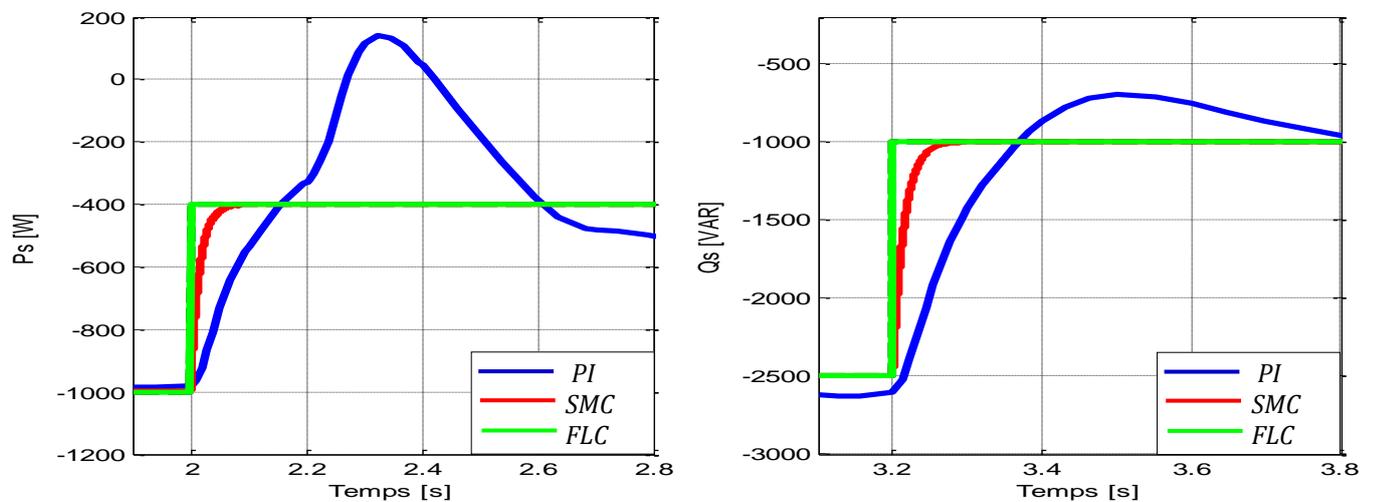


Figure (V.33) : Variation de M (+20%)

La commande par logique floue offre une performance très élevée par rapport aux deux autres commandes,

- La variation de la résistance rotorique jusqu'à une valeur de 50% est sans effet observée et n'influe pas sur la poursuite de consignes des puissances actives et réactives.
- Les variations des inductances statoriques, rotoriques et mutuelles quant à elles sont sans effet jusqu'à une limite de 40% où on observe une divergence dans la poursuite des puissances surtout pour la puissance réactive.

V.7.4. Tableau comparatif des trois commandes

Paramètres	Puissance Active			Puissance Réactive		
	PI	SMC	FLC	PI	SMC	FLC
Temps réponse (s)	0,077	0,044	0,001	0,056	0,044	0,001
Dépassement (%)	16	0	0	22	0	0
Erreur statique (%)	0	0,25	0	0	0,25	0
Suivi de consigne	Moyen	Bon	Excellent	Moyen	Bon	Excellent
Performance	Moyen	Bon	Excellent	Moyen	Bon	Excellent
Robustesse	Mauvais	Bon	Excellent	Mauvais	Bon	Excellent
Autres	-	Chattering	-	-	Chattering	-

Tableau (V.3) : Comparaison des trois commandes

V.8 Conclusion

Dans ce chapitre, il a été présenté la commande par mode flou de la machine asynchrone double alimentée pilotée par le rotor permettant un contrôle indépendant des puissances actives et réactives.

Les résultats obtenus ont permis de juger les qualités de la commande à base du régulateur flou qui offre de bonnes performances même en cas de variations de consignes.

En effet la différence entre les trois régulateurs est peu significative en ce qui concerne le suivi de consigne, Mais en termes de rapidité et robustesse on a vu la supériorité du régulateur flou avec ses résultats qui sont plus performants et très concluants par rapport à celui du régulateur SMC et PI classique. De plus du découplage, la stabilité et la convergence vers l'équilibre qui sont assurés, ce réglage présente un algorithme de commande robuste très simple et qui a l'avantage d'être facilement implanté.

La comparaison est nettement remarquable entre les trois commandes par ordre de mérite dans l'amélioration des résultats : 1-FLC, 2-SMC et 3-PI.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale et perspective :

Le travail effectué dans ce mémoire a pour objectif la modélisation des différents composants de la production de l'énergie éolienne et l'étude des différents systèmes de contrôle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA). Un rappel a été donné sur les concepts fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique de la machine asynchrone double alimentée ainsi que son état de l'art.

A cause du fort couplage observé entre la puissance active et la puissance réactive, il a été développé la commande vectorielle qui permet de découpler le modèle de la MADA afin de contrôler l'échange des puissances active et réactive entre la machine et le réseau. Deux méthodes sont envisagées: la commande directe et la commande indirecte. Cette dernière a été retenue pour son contrôle des courants rotoriques et sa bonne robustesse due aux deux boucles de régulation en courant et en puissance. Nous avons effectué une synthèse du régulateur PI et comparé ses performances en suivi de consigne, face aux variations des paramètres de la machine

Ensuite, nous avons introduit une méthode basée sur les systèmes à structure variable. Les conséquences de l'essor des technologies en matière de composants et de développement des calculateurs, ont rendu les commandes à structure variable VSC par mode glissant très sollicitées dans le domaine de la commande des machines électriques. Cependant, cette technique de commande présente l'inconvénient des oscillations aux hautes fréquences dues à la commande discontinue u , de base (fonction « sign »). Pour palier à ce problème, diverses formes de la commande discontinue sont proposées notamment la commande adoucie (fonction « sat »).

Après une étude théorique étendue, l'application de notre commande pour le transfert de puissances a confirmé par simulation les performances souhaitées, mises en évidence par un bon suivi aux changements de consigne.

Par rapport aux variations paramétriques de la machine, la logique floue a été utilisée dans la régulation au sein même de la commande vectorielle. Ce qui est intéressant, c'est la manière dont s'opèrent la conception, la mise au point et le réglage du régulateur flou, tout en obtenant satisfactions des résultats obtenus.

Nous avons donc abordé un sujet qui est en plein développement, la commande de la MADA pour la production éolienne qui est d'actualité et déjà utilisée dans les grandes éoliennes commercialisées. Cette thématique est nouvelle dans notre laboratoire CAOSE dont nous avons pu aboutir à une modélisation de l'ensemble de notre système avec des résultats concluants pouvant être utilisés pour poursuivre les essais et envisager d'autres fonctionnements et comparer avec d'autres types de génératrices.

Nous espérons aussi pouvoir vérifier ces résultats par la réalisation d'un banc d'essais afin de valider les simulations théoriques et permettre la mise en fonctionnement réel d'une petite éolienne débitant sur un réseau alternatif et d'effectuer de plus amples tests en temps réel.

Caractéristique de la machine :

Puissance nominale	P_n	1,5 kW
Tension nominale	V_n	220 V
Vitesse nominale	Ω_n	1428 tr/min
Fréquence nominale	f	50 Hz
Résistance statorique	R_s	4,85 Ω
Résistance rotorique	R_r	3,805 Ω
Inductance cyclique statorique	L_s	0,274 H
Inductance cyclique rotorique	L_r	0,274 H
Inductance mutuelle	M	0,258 H
Nombre de paires de pôles	P	2
Moment d'inertie	J	0,031 kg/m ²
Coefficient de frottement	f_c	0,008 N.m.sec/rad
Rayon de éolienne	R	1,5 m
Gain de multiplicateur	G	20

Références

- [1] **Armond. BOYETTE** «*Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne*», Thèse de Doctorat en génie électrique, Université Henri Poincaré, Nancy I, 2006.
- [2] **Salama et AIMANI** «*Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension*»; Thèse de Doctorat en génie électrique, Université des sciences et technologies de Lille 1, (USTL), France.
- [3] **HAZZAB** «*Commande des systèmes par logique floue, réseaux neurones et algorithmes génétiques*» Thèse de Magistère de l'université d'Oran USTO, 2006.
- [4] **J. MARTIN, P. LECONTE, M. RAPIN, E. SZECHENYI** «*Énergies éoliennes* » ; Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie Énergétique pp. B 8 585 1- B 8 585 21
- [5] **Frédéric 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 de Doctorat en génie électrique, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, 2003.
- [6] **Youcef DJERIRI**, « *Commande vectorielle d'une MADA intégrée à un système éolien* », Thèse de Magister Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes, Algérie, 2008
- [7] **World Wind Energy Association**, « *World Wind Energy Report 2008* », 8th World Wind Energy Conference & Exhibition Wind Power For Islands – Offshore and Onshore, South Korea, 23-25 June 2009.
- [8] **Laid KHETTACHE** «*Étude et Commande d'un Système Éolien à Base d'une Machine Électrique Double Alimentée*»; Thèse de Magistère en électrotechnique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université de Batna, Algérie, 2007.
- [9] **N. K. MERZOUK, M. MERZOUK, B. BENYOUCEF** «*Perspectives du pompage éolien dans le sud Algérien* » ; Projet National de Recherche, domicilié au Centre de Développement des Énergies Renouvelables, Laboratoire En.R, Alger, Algérie, 2007.
- [10] **T. ACKERMAN, L. S'OLDER**, «*An overview of Wind Energy-status 2002*», Renewable and sustainable Energy reviews, 2002, Vol. 6, pp. 67 - 128.
- [11] **G. CUNTY**, «*Eoliennes et aérogénérateurs, guide de l'énergie éolienne* », Edisud, Aix-en-Provence, 2001, ISBN 2-7449-0233-0.
- [12] **N.Kasbadji MERZOUK**, «*Evaluation du gisement Energétique Eolien Contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie*», Thèse Doctorat de l'université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen, Algérie,
- [13] **I. MANSOURI**, «*modélisation des différents Composants de la production décentralisée de l'énergie éolienne*» Mémoire de Magister, Université de Bechar, Algérie 2011
- [14] **Meny IVAN**, «*Modélisation et réalisation d'une chaîne de conversion éolienne petite puissance*» laboratoire d'électronique de Montpellier (LEM), 2004.
- [15] **Adrian CONSTANTIN**, «*Advanced Modeling and Control of Wind Power Systems*», Thèse de master, Institute of Energy Technology, Aalborg University, Denmark, 2009.

-
- [16] **M.Machmoum, F.Poitieres, C.Darengosse and A.Queric**, «*Dynamic Performances of a doubly –Fed Induction Machine for a variable-Speed Wind Energy Generation*», IEEE Trans.Energy onversion, 2003, pp.2431-2436.
- [17] **M. KENDZI**, *Commande des génératrices asynchrone utilisées dans les systèmes éoliens* Mémoire de Magister, Université de Bechar, Algérie 2012
- [18] **Youcef EL BIYA** «*Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté* » Thèse de Magister Université de Batna, Algérie, 2009
- [19] **Belkacem TOUAL** «*Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable* » université de Battna, Algérie, 2010
- [20] **N. MOHAN & T. UNDELAND & W. P. ROBBINS** «*Power Electronics, Converters, Applications and design*»; Publications John Wiley & Sons, ISBN 0-471-58408-8.
- [21] **Adam MIRECKI**, «*Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance*», Thèse doctorale, préparée au Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique Industrielle de l'ENSEEIH. Unité Mixte de Recherche CNRS N° 5828, 2005.
- [22] **C.BENOUDJIT** «*Etude pour la conception d'un banc d'essais pour Energie éolienne*», Thèse de Magistère de l'université de Batna, Algérie, 2004
- [23] **Youcef HOCINI** «*Commande d'une génératrice asynchrone pour Energie éolienne*», Thèse de Magistère de l'université d'Oran USTO, 2013
- [24] **Saci TARAFT** «*Etude du stockage inertiel d'énergie dans une chaîne de conversion éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation* » Thèse de Magister, Université A/MIRA de Bejaïa, Algérie, 2008.
- [25] **P. BERLU**, «*Calcul des Efforts Subis par les Eoliennes de Moyenne et Forte Puissance* », Thèse de Doctorat, Université des sciences et Technologies de Lille I, 1999.
- [26] **A.H. AL-BAHRANI**, «*Analysis of Self-excited induction generators under unbalanced conditions*», Electric Machines and power systems, 24, 1996, pp.117-129
- [27] **Désiré Le GOURIERE**, «*Energie éolienne, Théorie, Conception et calcul pratique des installations* », Edition Eyrolles, 1982
- [28] **Ludovic LECLERCQ** «*Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes* », Thèse de Doctorat de l'Université des sciences et technologies de Lille 1, 2004
- [29] **Milutin G. Jovanovid and Robert E. Betz** «*Slip power recovery systems based on brushless doubly fed reluctance machines*» University of Northumbria at Newcastle, School of Engineering Ellison Building, Newcastle, Australia
- [30] **Kaci GHEDAMSI**, «*Contribution à la modélisation et la commande d'un convertisseur direct de fréquence Application à la conduite de la machine asynchrone*», Ecole Nationale Polytechnique Laboratoire de Commande des Processus, 2008.
- [31] **Mohamed Adjoudj** «*Commande d'une machine asynchrone à double alimentation*», Thèse de Doctorat de l'Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbas, 2009
- [32] **Stephan MEIER**, «*System Aspects and Modulation strategies Of an VDC-Based converter System For Wind Farms*» Institut royal de technologies, école du genie électrique, Stockholm 2009.
-

-
- [33] H.S.vicators , J.A Tegopoulos , Fellon «*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.
- [34] K. FERKOUS «*Etude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne* » Thèse de Magister université de Constantine, Algérie, 2009
- [35] Krishna Vasudevan and P.Sasidhara Rao «*A Modular Approach to the Simulation of Doubly-fed Induction Machine Systems*» Department of Electrical Engineering Indian Institute of Technology Mdras 600036, INDIA
- [36] N. Mekkaoui, «*Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée* », Thèse de Magister, Université de Batna, Algérie, 2004
- [37] A. LAMA «*Commande par backstepping de la Machine à Induction Double Etoile*», Thèse de Magister, Université de Bechar, Algérie, 2009
- [38] J. Camille de Barros, «*Application de la Logique Floue à la Commande Optimale du Moteur Asynchrone* », Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université de Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille, Aix-Marseille III, France, 2003.
- [39] R. Abdessemed, M. Kadjouj ; «*Modélisation des Machines Electriques* », Presses de l'Université de Batna, Algérie, 1997
- [40] R. Hubert, «*La Machine à Induction : Commande et Défaillance* », Habilitation à Diriger des Recherches en Génie Electrique, Université Henri Poincaré, Nancy 1, France, 2000.
- [41] K. Kouzi, «*Commande Vectorielle d'un Moteur à Induction sans Capteur de Vitesse par un Réglage PI-Flou à Gains-Flous Adaptés Associé à un Observateur d'Etat par Mode de Glissement* », Thèse de Magister, Université de Batna, Algérie, 2002.
- [42] B. Mokhtari, «*Implantation de la DTFC par des Techniques de l'Intelligences Artificielles Neuronale et Floue : Application à la Machine Asynchrone Alimentée par des Onduleurs de Tension à Deux et à Trois Niveaux*», Thèse de Magister, Université de Batna, Algérie, 2004.
- [43] H. Tamrabet, «*Robustesse d'un Contrôle Vectoriel de Structure Minimale d'une Machine Asynchrone* », Thèse de Magister, Université de Batna, Algérie, 2006.
- [44] V. Rogez, «*Modélisation Simplifiée de Sources de Production Décentralisée pour des Etudes de Dynamique de Réseaux. Application à l'Intégration d'une Production Eolienne dans un Réseau de Distribution Insulaire* », Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université d'Artois, Lille, France, 2004.
- [45] Nesmat ABU-TABAK «*Stabilité dynamique des systèmes électriques multimachines : modélisation, commande, observation et simulation*» Thèse de Doctorat de l'école centrale de LYON 19 Novembre 2008.
- [46] Sanae Rechka, Gilles Roy, Sébastien Dennetiere et Jean Mahseredjian «*modélisation de systèmes électromécaniques multi-masses à base de machines asynchrones, à l'aide des outils Matlab et EMTP, avec application aux éoliennes*» Département de Génie Électrique, Section Énergie électrique École Polytechnique de Montréal EPM-RT-2004.
- [47] A. M. SIDDO & I. S. NOUHOU «*Étude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne*»; Projet de fin étude d'ingénieur en électrotechnique, École Nationale Polytechnique, El-Harrach, Algérie, 2007.
-

-
- [48] L. BENALIA «*Commande en Tension des Moteurs à Induction Double Alimenté*», Thèse de Doctorat Université de Batna, Algérie, 2010.
- [49] Farid MERRAHI, «*Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne)*». Thèse de Magister Ecole Nationale polytechnique, Algérie, 2007
- [50] Ghania AGGOUN «*Etude qualitative de l'association convertisseur machine pour l'entraînement électrique d'un système de génération éolienne*» Thèse de Magister Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Algérie, 2007.
- [51] Henia SAIGH «*Evaluation de la puissance d'une installation éolienne*» Thèse de Magister Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Algérie, 2012.
- [52] Farid. BOUMARAF «*Commande Intelligente D'une Association Convertisseur statique Machine Asynchrone à Double Alimentation*», Thèse de magister, Université de Batna, Algérie 2009.
- [53] Minh TA-CAO, Hoang LE-HUY «*Rotor Resistance Estimation Using Fuzzy Logic for High Performance Induction Motor Drives*», IEEE, Proceedings of the 24th Ann. Conf. of IES. Vol. 1, pp.303 – 308, Aug/Sep 1998.
- [54] David AGUGLIA, «*Identification des Paramètres du Moteur à Induction Triphasé en vue de sa Commande vectorielle*», Mémoire Maître ès science de l'Université de LAVAL Québec, Canada 2004.
- [55] A. L. NEMMOUR, «*Contribution à la Commande Vectorielle de la Machine Asynchrone Double Alimentation*» ; Mémoire de Magister en électrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2002.
- [56] G. GRELLET & G. CLERC «*Actionneurs Électriques: Principes, Modèles, Commande*» ; Deuxième tirage, Éditions Eyrolles, Paris, France, 1997.
- [57] C. CARLOS DE WIT, «*Modélisation Contrôle Vectoriel et DTC* », Edition Hermes Sciences Europe, 2000.
- [58] P.W. CARLIN, A.S. LAXSON, E.B. MULJADI «*The History and State of Art of Variable-Speed Wind Turbine Technology*»; NREL/TP-500-28607, February 2001.
- [59] H. DRAOU, «*Cartes Saisonnières du Vent en Algérie*». Journée d'études : Météorologie et Climatologie entre sciences et prise de décision, ONM/Alger, Algérie, 2001
- [60] KARBOUA, «*Commande et observateurs par mode de glissement : Application à une Machine Asynchrone Alimentée en Tension*», Mémoire de Magister, ENP Alger, 1999.
- [61] GOURI Rabah «*Commande par mode flou glissant et par backstepping de la machine synchrone*» Mémoire de Magister, Université de Bechar, Algerie 2004
- [62] C.E.EG «*Compagnie Engeenering Electricité et Gaz*» Filiale de Sonelgaz.
- [63] <http://www.energies-renouvelables.org>
- [64] <http://www.windpower.org/fr/core.htm>
- [65] <http://www.windturbinesnow.com>
- [66] <http://membres.lycos.fr/tipemaster/TIPE/Eole/Eole.html>
-

كلمات مفتاحية:

- النمذجة، طاقة الرياح، الماكنة اللامتزامنة مضاعفة التغذية، التحكم الشعاعي، الانزلاق، المنطق الغامض.

ملخص:

تتعرض الأطروحة المقدمة لدراسة واستعمال المولد اللامتزامن مضاعف التغذية في انتاج الطاقة الكهربائية بواسطة طاقة الرياح التي أصبحت تمثل البديل المحتمل لأنواع أخرى من الطاقات الملوثة، لهذا اعتمدنا على نموذج لتوربينات الرياح لتشغيل الماكنة اللامتزامنة مضاعفة التغذية.

تتمثل دراسة الماكنة اللامتزامنة مضاعفة التغذية في جزئين أساسيين :

في الجزء الأول تم عرض الحالة الفنية لمجموعة الماكنة مع المحول و تطبيقاتها في طاقة الرياح، في الجزء الثاني تم التطرق من ناحية، لاستراتيجية التحكم الخطي (التحكم الشعاعي) لتسليط الضوء على الفصل بين الاستطاعات الفعلية و الارتكاسية (الردية) المتعلقة بالمركبات العمودية و المباشرة على التوالي لتيارات دوار الماكنة ، و من ناحية أخرى لاستراتيجية التحكم الغير خطي (التحكم بالنمط الانزلاقي و المنطق الغامض) واللذان يحسنان أداء و متانة النظام مقابل تغيير عوامل الماكنة.

Mots clés

Modélisation, énergie éolienne, machine asynchrone à double alimentation, commande vectorielle mode glissant, logique floue.

Résumé

Ce travail présente l'étude et l'utilisation de la génératrice asynchrone à double alimentation dans la production de l'énergie électrique à base de l'énergie éolienne qui représente une alternative potentielle à substituer à d'autres énergies plus polluantes, pour cela, nous avons défini un modèle de la turbine éolienne pour l'entraînement de la machine asynchrone double alimentée. L'étude de la MADA s'articule sur deux parties :

Dans la première partie il a été présenté un état de l'art de l'ensemble machine - convertisseur utilisé dans l'énergie éolienne.

Dans la deuxième partie il a été traité d'une part la stratégie de contrôle linéaire (contrôle vectoriel) pour la mise en évidence du découplage réalisé avec succès entre les puissances actives et réactives dépendant respectivement des composantes en quadrature et directe des courants rotoriques, et d'autre part, celles non-linéaires (contrôle par mode glissant et logique flou) qui viennent augmenter les performances et robustesses du système en termes de suivi de consigne vis-à-vis des variations des paramètres de la MADA.

Key words

Modeling, wind power, doubly fed induction machine, vector control, sliding mode, fuzzy logic.

Abstract

This work presents the study and the use of the doubly-fed induction generator in the production of electrical energy from wind power, which represents a potential alternative to replace other more polluting energy sources, for this, we defined a model of the wind turbine to drive the doubly fed induction machine. The study of DFIM is articulated on two parts:

In the first part, it was presented a state of the art of all machines - inverter used in wind energy.

In the second part, it was treated on the one hand, the linear control strategy (vector control) to highlight the decoupling between active and reactive power dependent on the quadrature and direct components rotor currents respectively, and on the other hand, the nonlinear control strategy (slides mode control and fuzzy logic control) which augments the performance and robustness of the system in terms of monitoring instructions towards parameters variations of the machine.