

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun Tiaret

Faculté des Sciences et de la Technologie
et Sciences de la Matière



Mémoire

Présenté au Département des Sciences et Technologies
en vue de l'obtention du titre de

Magister

Ecole Doctorale de Génie Electrique
Option: Commande des Réseaux Electriques

Par

BELABBAS BELKACEM

Ingénieur en Electrotechnique de l'Université Ibn Khaldoun Tiaret

Thème

Intégration de l'énergie éolienne dans un réseau électrique local

Soutenu devant le jury composé de :

Président	: M ^r . SMAILI Atallah	M.C.A	Université Ibn Khaldoun -Tiaret
Rapporteur	: M ^r . ALLAOUI Tayeb	M.C.A	Université Ibn Khaldoun -Tiaret
Examineurs	: M ^r . BELFEDAL Cheikh	M.C.A	Université Ibn Khaldoun -Tiaret
Examineurs	: M ^r . BRAHAMI Mostéfa	Professeur	Université Djillali Liabes –Sidi Belabbes
Examineurs	: M ^r . TELMATINE Amer	Professeur	Université Djillali Liabes –Sidi Belabbes

Dédicaces

Livre même écrit d'une seule main n'est jamais le travail d'un seul. En premier lieu, nous remercions ALLAH le tout puissant de nous avoir donné la santé, pour achever ce travail dans les meilleures conditions.

Je dédie ce modeste travail en signe de reconnaissance à tous ceux que j'aime particulièrement :

A mes très Chers Parents (Malika & Mahdi), dont le sacrifice, la tendresse, l'amour, la patience, le soutien, l'aide et les encouragements sont l'essence de ma réussite Sans eux, je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui.

A mes adorables sœurs Wardia et Akila;

Ainsi à mon grand frère Djilali;

A toute ma famille que ça soit mes grands-parents, mes tantes, mes oncles et mes cousines et cousins.

A tous les enseignants et les éducateurs qui ont contribué à ma formation durant tout le parcours de mes études jusqu'à ce jour ;

A tous les étudiants de Post-Graduation du Département de Génie Electrique;

A tous mes amis, en particulier ceux que j'apprécie les plus;

A tous ceux qui m'ont nourri de leur savoir;

A ceux avec qui je partage de bons souvenirs;

A tous ceux qui me sont chers.

Remerciements

Louange à **ALLAH**, nôtre grand seigneur, de nous avoir éclairé le chemin du savoir et de nous avoir donné la bonne volonté et la patience pour l'achèvement de ce travail.

Que le salut d'**ALLAH** soit sur son prophète **MOHAMMED**, nôtre éducateur et guide du bon chemin.

Tout d'abord, je remercie vivement Monsieur **MOUDJAHED Mohamed**, Maître de conférence à l'Université d'Ibn Khaldoun et Directeur de l'école doctorale (ENP) pole de Tiaret, pour son encadrement et ses qualités humaines.

C'est un agréable plaisir pour moi d'exprimer mes remerciements à Monsieur **ALLAOUI Tayeb** Maître de Conférence au département de génie électrique à l'Université Ibn Khaldoun (Tiaret), à qui je présente l'expression de ma profonde gratitude pour tous les conseils et les encouragements qu'il m'a prodigué pendant toute durée de ce travail.

Aux termes de ces années de recherche, nous tenons à remercier très sincèrement les maîtres de conférence et les professeurs:

Monsieur **A. SMAILI**, de l'Université d'Ibn Khaldoun Tiaret, pour nous avoir fait l'honneur d'accepter la présidence du jury de soutenance.

Monsieur **C. BELFEDAL**, de l'Université d'Ibn Khaldoun Tiaret, pour avoir accepté la tâche de rapporteur de ce mémoire et pour le jugement scientifique qu'il a bien voulu y porter.

Monsieur **M. BRAHAMI**, de l'Université Djillali Liabes de Sidi Belabbes, pour avoir accepté de faire le déplacement de loin et se joindre à ses collages afin d'exprimer son point de vue sur le contenu de ce mémoire en tant que rapporteur.

Monsieur **A. TELMATINE**, de l'Université de Djillali Liabes Sidi Belabbes, pour l'intérêt qu'il porte à nos travaux en participant à ce jury en tant que invité d'honneur.

Je tiens tout particulièrement à remercier les enseignants du Département de Génie Electrique pour leurs disponibilités et encouragement, ainsi que tous les enseignants qui ont contribué à ma formation.

Je voudrais remercier tout particulièrement mes parents ainsi que tous les membres de ma famille de leurs soutiens et leurs encouragements tout au long de mon cursus.

Enfin, je remercie toutes celles et tous ceux qui ont, de près ou de loin, contribué à l'élaboration de ce travail.

TABLES DES MATIERES

TABLES DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre I: État de l'art	
I.1 Énergies renouvelables	3
I.2 État de l'art, principes et éléments constitutifs de l'éolien.....	5
I.2.1 Historique de l'éolien	5
I.2.2 Situation actuelle de l'énergie éolienne dans le monde	6
I.2.3 Situation actuelle de l'énergie éolienne dans l'Algérie	8
I.2.4 D'où vient le vent ?	11
I.2.5 Principe de fonctionnement d'une éolienne	11
I.2.6 Avantages et désavantages de l'énergie éolienne	12
I.2.6.1 Avantages de l'énergie éolienne	12
I.2.6.2 Désavantages de l'énergie éolienne	13
I.2.7 Les différents types des turbines éoliennes	13
I.2.7.1 Les raisons pour choisir une grande éolienne	14
I.2.7.2 Les raisons pour choisir une éolienne plus petite.....	14
I.2.8 Les éoliennes à axe vertical.....	15
I.2.8.1 Avantages des éoliennes à axe vertical	15
I.2.8.2 Inconvénient des éoliennes à axe vertical	15
I.2.8.3 Rotor de Savonius	15
I.2.8.4 Rotor de Darrieus	16
I.2.9 Les éoliennes à axe horizontal.....	16
I.2.9.1 Avantages des éoliennes à axe horizontal	17
I.2.9.2 Inconvénient des éoliennes à axe horizontal	17
I.2.9.3 Eoliennes lentes	17
I.2.9.4 Eoliennes rapides.....	18
I.2.10 Principales composantes des éoliennes à axe horizontal.....	18
I.3 Les éoliennes connectées au réseau.....	21
I.3.1 Les éoliennes à vitesse fixe	21
I.3.2 Avantages du fonctionnement à vitesse fixe	22
I.3.3 Inconvénients du fonctionnement à vitesse fixe.....	22
I.4 Les éoliennes à vitesse variable.....	22
I.5 Intérêt de la vitesse variable	23
I.6 Conclusion	24

Chapitre II: Turbine éolienne

II.1. INTRODUCTION	25
II.2 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique	25
II.3 Stratégies de fonctionnement d'une éolienne	28
II.3.1 Bilan des forces sur une pale.....	28
II.3.2 Les différentes zones de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable	29
II.3.3 Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne.....	30
II.3.3.1 Système à décrochage aérodynamique « Stall ».....	30
II.3.3.2 Système à pas variable ou à calage variable ou système « pitch »	31
II.4 Modélisation de la turbine éolienne à vitesse variable	32
II.4.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine	32
II.4.2 Modélisation de la turbine.....	34
II.4.2.1 Production d'énergie mécanique.....	34
II.4.2.2 Le coefficient de puissance	35
II.4.2.3 Modèle du multiplicateur	37
II.4.2.4 Equation dynamique de l'arbre	37
II.4.2.5 Graphe informationnel causal du modèle de la turbine (GIC).....	38
II.5 Technique d'extraction du maximum de puissance	39
II.5.1 Bilan de puissance.....	39
II.5.2 Maximisation de la puissance extraite	40
II.5.3 Conception du correcteur de vitesse	41
II.6 Résultats de simulation	42
II.7 Conclusion	45

Chapitre III: Modélisation et la commande du MADA

III.1. INTRODUCTION	46
III.2. Description et modes de fonctionnement de la MADA.....	47
III.2.1. Description de la MADA.....	47
III.2.2 Principe de fonctionnement	48
III.2.3. Mode de fonctionnement de la MADA	49
III.2.3.1. Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.....	50
III.2.3.2 Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.....	50
III.2.3.3 Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone	51
III.2.3.4 Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone	51
III.3 Domaine d'applications de la MADA	52
III.4 Avantages et inconvénients de la MADA	53

III.4.1 Avantages de la MADA.....	53
III.4.2 Inconvénients de la MADA	53
III.5 Différentes topologies de la MADA.....	54
III.5.1 Structure à énergie rotorique dissipée.....	54
III.5.2 Structure de Kramer.....	55
III.5.3 Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.....	56
III.5.4 Structure de Scherbius avec convertisseur MLI	57
III.6 Choix de la meilleure structure.....	58
III.7 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation MADA.....	58
III.7.1 Hypothèses simplificatrices	59
III.7.2 Equation électrique et magnétique.....	60
III.7.2.1 Equation électrique	60
III.7.2.2 Equation magnétique	61
III.7.3 Application de la transformation de Park	62
III.7.4 Modélisation de la machine asynchrone dans le repère de Park.....	63
III.7.4.1 Equation électrique :	63
III.7.4.2 Equation magnétique :	64
III.7.5 Choix du référentiel	65
III.7.5.1 Référentiel lié au stator	65
III.7.5.2 Référentiel lié au rotor	66
III.7.5.3 Référentiel lié au champ tournant.....	66
III.7.6 Equation des puissances et du couple.....	66
III.7.7 Equation mécanique.....	67
III.7.8 Mise sous forme d'équation d'état	68
III.7.9 Simulation et interprétation des résultats.....	68
III.8 Commande vectorielle.....	71
III.8.1 Description de la commande	71
III.8.2 Principe de la commande vectorielle.....	72
III.8.3 Variantes de la commande vectorielle.....	74
III.8.4 Procédé d'orientation du flux	74
III.8.4.1 Orientation du flux rotorique	74
III.8.4.2 Orientation du flux statorique.....	74
III.8.4.3 Orientation du flux magnétisant :	74
III.8.5 Modèle de la MADA à flux statorique orienté	75
III.8.6 Expressions des puissances active et réactive statoriques	76
III.8.7 Expressions des tensions rotoriques	77
III.8.8 Commande direct.....	79
III.8.8.1 Résultats de simulation et interprétations	80
III.8.9 Commande indirect.....	83

III.8.9.1	Commande sans boucle de puissance	83
III.8.9.2	Résultats de simulation et interprétations	84
III.8.9.3	Commande avec boucle de puissance.....	86
III.8.9.4	Résultats de simulation et interprétations	87
III.8.10	Robustesse de la régulation	89
III.9	Conclusion.....	91
Chapitre IV: Commander la MADA par PI flou		
IV.1.	INTRODUCTION.....	93
IV.2	Historique de la logique floue	93
IV.3	Domaine d'application	94
IV.4	Concept de la logique floue	95
IV.5	Notions de base de la logique floue.....	96
IV.5.1	Ensemble flou.....	96
IV.5.2	Différentes formes des fonctions d'appartenance	97
IV.5.3	Variables linguistiques	98
IV.5.4	Opérateurs de la logique floue.....	99
IV.5.4.1	Opérateur ET (Intersection floue)	99
IV.5.4.2	Opérateur OU (Union floue)	99
IV.5.4.3	Opérateur NON (complémentation floue).....	100
IV.5.5	Règles floues	100
IV.5.6	Descriptions d'une commande par la logique floue.....	101
IV.5.6.1	Interface de fuzzification.....	102
IV.5.6.2	Base des règles	102
IV.5.6.3	Mécanisme d'inférence flou	103
IV.5.6.4	Interface de défuzzification	104
IV.6	Avantages et inconvénients de la commande par la logique floue.....	105
IV.7	Pourquoi la logique floue dans la commande de machine asynchrone.....	105
IV.8	Application de la logique floue à la commande de la machine asynchrone.....	106
IV.8.1	Régulateur de puissance	106
IV.8.1.1	Application du régulateur PI flou aux puissances de la MADA	106
IV.8.1.2	Fuzzification	108
IV.8.1.3	Base de règles	109
IV.8.1.4	Mécanisme d'inférence	109
IV.8.1.5	Défuzzification	110
IV.8.2	Régulateur de courant.....	110
IV.9	Simulation et interprétation des résultats	111

IV.10 Test de robustesse.....	113
IV.11 Conclusion.....	114
Chapitre V: Modélisation et stratégie de commande des convertisseurs à trois niveaux à structure NPC	
V.1. INTRODUCTION	115
V.2. L'onduleur triphasé à trois niveaux type NPC.....	115
V.2.1 Topologie des onduleurs multi-niveaux	116
V.2.2 Présentation générale de l'onduleur triphasé à trois niveaux à structure N.P.C	116
V.2.3 Différente configurations d'un bras d'onduleur à trois niveaux.....	117
V.2.4 Modélisation de l'onduleur à trois niveaux	119
V.2.4.1 Commandabilité de l'onduleur à trois niveaux.....	119
V.2.4.2 Fonctions de connexion	120
V.2.4.3 Fonction de conversion.....	120
V.2.5 Stratégie de commande de l'onduleur triphasé a trois niveaux	122
V.2.5.1 Principe de la modulation de largeur d'impulsions MLI (Technique triangulaire-sinusoïdale).	122
V.2.5.2 Principe de la Commande triangulaire sinusoïdale à deux porteuses.....	124
V.2.5.3 Algorithme de commande.....	124
V.2.6 Résultats de simulation	124
V.3. Redresseur triphasé à trois niveaux Type NPC	127
V.3.1 Modélisation du redresseur.....	128
V.3.2 Commandabilité du redresseur	129
V.3.3 Modélisation du réseau électrique	130
V.3.4 Régulation du courant.....	131
V.3.5 Commandé par la stratégie triangulaire sinusoïdale	132
V.3.6 Résultats de simulation	133
V.4 Conclusion	136
Chapitre VI: Cascade Turbine-MADA-Onduleur-Redresseur	
VI.1. INTRODUCTION.....	137
VI.2. Structure de la cascade	137
VI.3. Modélisation du filtre intermédiaire de la cascade.....	137
VI.4 Commande de la MADA alimentée par deux convertisseurs	138
VI.5. Résultats de simulation.....	139
VI.6. Modélisation et Commande du pont Clamping.....	141
IV.6.1 Algorithme de commande du pont de Clamping.....	142
VI.7. Régulation de la tension de sortie du redresseur de courant triphasé à trois niveaux	142

VI.8. Simulation de la cascade avec (pont de Clamping + l'asservissement de la tension).....	144
VI.9.Conclusion.....	146
CONCLUSION GENERALE	147
ANNEXES	
BIBLIOGRAPHIE	

LISTES DES FIGURES

Chapitre I: État de l'art

Figure I.1: Répartition des sources primaires d'énergie dans le monde.....	3
Figure I.2: Capacité totale installée (MW) et prévisions 2001-2010.....	7
Figure I.3: Évolution des puissances éoliennes installées	7
Figure I.4: Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s).....	9
Figure I.5: Cartes saisonnières de la vitesse du vent (m/s).....	10
Figure I.6: Structure générale d'un système de conversion de l'énergie éolienne.	12
Figure I.7: Schéma de principe du rotor de Savonius.....	16
Figure I.8: Schéma de principe du rotor de Darrieus.....	16
Figure I.9: Eolienne en amont et en aval.	17
Figure I.10: Eolienne Lente	18
Figure I.11: Eolienne Rapide.....	18
Figure I.12: Principales composants de l'éolienne à axe horizontale.....	18
Figure I.13: Les composants de la nacelle d'une éolienne.	19
Figure I.14.: (a) Anémomètre. (b) Girouette.	20
Figure I.15: Eolienne directement connectée au réseau.	22
Figure I.16: Caractéristique couple-vitesse d'une machine asynchrone.	22
Figure I.17: Eoliennes à vitesse variable.	23
Figure I.18: Caractéristique de la puissance générée.....	23

Chapitre II: Turbine éolienne

Figure II.1: Principe de la théorie de Betz.....	26
Figure II.2: Coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse du vent.....	27
Figure II.3: Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.....	28
Figure II.4: Bilan des forces sur une pale.	29
Figure II.5: Caractéristique puissance vitesse d'une éolienne de grande puissance.....	29
Figure II.6: Flux d'air sur un profil de pale " Stall ".	31

Figure II.7: Variation de l'angle de calage d'une pale.....	31
Figure II.8: Influence de l'angle de calage sur le coefficient de puissance.....	32
Figure II.9: Système mécanique de l'éolienne.	32
Figure II.10: Modèle mécanique simplifiée de la turbine.....	33
Figure II.11: Schéma de la turbine éolienne.	34
Figure II.12: Coefficient de puissance en fonction de λ pour différents β	36
Figure II.13: Graphe informationnel causal du modèle de la turbine.....	38
Figure II.14: Schéma bloc du modèle de la turbine.....	39
Figure II.15: Diagramme de conversion de puissance.....	39
Figure II.16: Stratégies de commande de la turbine étudier.....	40
Figure II.17: Fonctionnement optimal de la turbine.....	41
Figure II.18: Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse....	42
.....	42
Figure II.19: Schéma bloc du modèle de la turbine en boucle ouvert.	42
Figure II.20: Allure de vitesse: (a) de vent; (b): Mécanique.	43
Figure II.21: Modèle de la turbine dans la zone 2 (M.P.P.T).....	44
Figure II.22: La vitesse de rotation de la turbine (Zone 2).....	44
Figure II.23: Le coefficient de puissance (Zone 2).....	44
Figure II.24: La vitesse spécifique λ	45

Chapitre III: Modélisation et la commande du MADA

Aucune entrée de table des matières n'a été trouvée.Chapitre IV: Commander la MADA par PI flou

Aucune entrée de table des matières n'a été trouvée.Chapitre V: Modélisation et stratégie de commande des convertisseurs à trois niveaux à structure NPC

Figure V.1 : Structure de l'onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC.....	117
Figure V.2 : structures d'un bras de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC.....	118
Figure V.3 : Schéma de principe de la technique triangulaire sinusoïdale.....	123
Figure V.4 : Simulation de l'onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC avec la stratégie triangulaire sinusoïdale à deux porteuses à l'aide de logiciel MATLAB/SIMULINK.	125
Figure V.5 : Différents signaux de la stratégie triangulaire sinusoïdale à deux porteuses de l'onduleur triphasé à trois niveaux pour $m = [12, 21, 24]$ et $r = 0.8$	126

Figure V.6 : Tension de sortie de l'onduleur triphasé à trois niveaux commandé par stratégie triangulaire sinusoïdale à deux porteuses et son spectre d'harmonique pour $m = [12, 21, 24]$ et $r=0.8$	127
Figure V.7 : Redresseur de courant triphasé à M.L.I à trois niveaux à structure NPC.	129
Figure V.8 : Diagramme de Fresnel sur les grandeurs complexes d'entrée du redresseur.....	130
Figure V.9 : Modélisation d'une phase du réseau électrique.....	131
Figure V.10 : Modèle équivalent de la boucle de courant	132
Figure V.11 : Schéma bloc du redresseur MLI à trois niveaux.....	133
Figure V.12 : Le courant du réseau et sa référence.	134
Figure V.13 : Les tensions redressées , et la différence	134
Figure V.14 : Les courants de sortie du redresseur triphasé à trois niveaux à structure NPC.....	135
Figure V.15.A : La tension du réseau et le courant d'une phase	135
Figure V.15.B : Le courant redressé dans la charge résistive.....	135

Chapitre VI: Cascade Turbine-MADA-Onduleur-Redresseur

Figure VI.1: Cascade d'une turbine, d'un redresseur de courant - onduleur de tension triphasé à trois niveaux alimentant la MADA.	137
Figure VI.2: Filtre intermédiaire de la cascade redresseur de courant triphasé à trois niveaux- onduleur triphasé à trois niveaux et son graphe informationnel.	138
Figure VI.3 : Représentation des puissances (active, réactive) et leurs références.	139
Figure VI.4 : Le courant du réseau et sa référence.	139
Figure VI.5 : Les tensions redressées U_{C1} , U_{C2} et la différence ΔU_C	139
Figure VI.6 : Les courants de sortie du redresseur triphasé à trois niveaux à structure NPC.	140
Figure VI.7 : La tension du réseau V_{res} et le courant d'une phase i_{res}	140
Figure VI.8 : Structure du pont de Clamping avec filtre intermédiaire.....	142
Figure VI.9 : Algorithme d'asservissement de la tension de sortie U_C du redresseur de courant triphasé à trois niveaux.....	143
Figure VI.10 : Boucle de tension continue.	144
Figure VI.11 : Représentation des puissances (active, réactive) et leurs références.	145
Figure VI.12 : Représentation de la tension continue.....	145

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I: État de l'art

Tableau I.1: Puissance éolienne totale installée- les 20 premiers pays en 2009 - évolution de 1997 à 2009...	8
Tableau I.2: classification des turbines éoliennes.....	13

Chapitre II: Turbine éolienne

Tableau II.1: Coefficients définissant l'évolution de C_p	35
---	----

Chapitre IV: Commander la MADA par PI flou

Tableau IV.1 : Matrice d'inférence floue.	103
Tableau IV.2 : Méthodes usuelles de l'inférence floue.	104
Tableau IV.3 : Table de règles pour le RLF de la puissance	109
Tableau IV.4 : Table de règles pour le RLF de la puissance.	111

Chapitre V: Modélisation et stratégie de commande des convertisseurs à trois niveaux à structure NPC

Tableau V.1 : Grandeurs électriques caractérisant chaque configuration possible d'un bras k.	119
---	-----

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'intense industrialisation des dernières décennies et la multiplication des appareils domestiques électriques ont conduit à des besoins planétaires en énergie électrique considérable. Face à cette demande, toujours croissante de nos jours, les pays industrialisés ont massivement fait appel aux centrales nucléaires. Cette source d'énergie présente l'avantage indéniable de l'absence de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques, mais le risque d'accident nucléaire, le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures.

Face à ces problèmes, et de façon à limiter l'emploi de centrales nucléaires, certains pays, aidés par la réglementation, se sont tournés vers de nouvelles formes d'énergie dites "renouvelables" faisant appel, de façon directe ou indirecte, à l'énergie solaire. Parmi celles-ci, l'éolien apparaît clairement en bonne place, non pas en remplacement des sources conventionnelles, mais comme énergie d'appoint complémentaire à l'énergie nucléaire [1].

Le développement d'énergie éolienne représente un grand investissement dans le domaine de la recherche technologique. Ces systèmes qui produisent de l'énergie électrique à partir du vent peuvent constituer une alternative technologique et économique aux différentes sources d'énergies épuisables. D'ailleurs, la croissance de l'industrie éolienne mondiale est de l'ordre de 30% par an depuis le début des années 2000 [2]. L'utilisation des aérogénérateurs présente des avantages importants. En effet, ils sont pour l'instant l'un des moyens les plus écologiques pour obtenir de l'électricité et cette source reste inépuisable. En outre, la production d'énergie éolienne a été de plus en plus acceptée par les investisseurs ainsi que les parcs éoliens sont en cours de construction, car ce secteur est devenu rentable. Le coût de l'énergie du vent a diminué au point où il y a des endroits que le prix de l'énergie éolienne est compétitif par rapport incitation [1].

L'énergie éolienne a non seulement un impact économique dans notre société, mais aussi un grand objectif environnemental et social. L'utilisation de cette énergie réduit les combustions des combustibles fossiles et des émissions conséquentes. Elle réduit également la dépendance des pays à la consommation du pétrole, en créant des emplois pour sa construction, son exploitation et son entretien.

De nombreux travaux de recherche sur la commande éolienne ont été menés. Grâce à ces inventions, les dernières générations d'éoliennes fonctionnent avec une vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de baisser les charges mécaniques ainsi que l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique produite, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe.

Aujourd'hui, la plupart des projets éoliens à vitesse variable d'une puissance supérieure à 1MW,

utilisent la machine asynchrone à double alimentation (MADA) [2] [5] [12]. Le principal avantage de cette machine est la possibilité de contrôler les puissances générées autour d'un point de fonctionnement.

Dans le cadre de notre travail, nous allons étudier un système éolien basé sur le générateur asynchrone à double alimentation (MADA) à vitesse variable et des convertisseurs statiques à trois niveaux. Ce mémoire est donc constitué d'une introduction générale, de six chapitres et d'une conclusion générale.

Un état de l'art des énergies renouvelables est présenté dans le premier chapitre de ce document. Quelques chiffres montrent l'importance et l'évolution dans le temps de la production d'énergie renouvelable mondiale. Dans ce cadre, la technologie éolienne est alors abordée et développée. Ainsi on présentera brièvement l'historique et la croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne, Puis nous sommes attachés à une étude plutôt descriptive de l'ensemble des composants d'un système éolien. Après nous avons examiné les deux grandes familles d'éoliennes existantes, à savoir les éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable et l'intérêt de ce dernier.

Dans le chapitre suivant, nous avons décrit en premier lieu la conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, ensuite nous étudions la modélisation mathématique de la turbine. La première partie du troisième chapitre, on présentera des généralités sur la MADA, ses applications, ses variantes de fonctionnement et ses avantages suivies 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. Ainsi la modélisation de la MADA est présente, sa mise en équation permettra de simuler son modèle dans le mode générateur. En ce qui concerne sa seconde partie nous allons étudier la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique par l'orientation du flux statorique de la MADA basée sur le régulateur classique PI. Cette dernière va nous permettre le contrôle indépendant des puissances. Une commande avancée nommée PI flou, utilisée pour contrôler la MADA alimentée à flux statorique orienté, afin de régler la puissance active et réactive du système qui aura l'objet traité par le quatrième chapitre.

Dans le cinquième chapitre on va aborder la modélisation des convertisseurs à trois niveaux à structure NPC (onduleur-redresseur) qui permettent l'échange d'énergie entre le rotor de la machine et le réseau.

Dans le dernier chapitre, on va étudier la modélisation d'une chaîne de conversion éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation et constituée d'un redresseur contrôlé par la technique de MLI, et un bus continu ; l'ensemble est relié au réseau via un onduleur à MLI, et un filtre. On aura donc, une cascade basée sur deux convertisseurs à trois niveaux.

Enfin, ce travail sera terminé par une conclusion générale et quelques perspectives de recherche envisagées.

CHAPITRE I

État de l'art

1.1 Énergies renouvelables

Le monde évolue et avec lui des caractéristiques comme l'augmentation de la population, de l'activité industrielle et le changement du style de vie sont indiscutables. La consommation énergétique mondiale augmente sans cesse depuis 40 ans et rien ne laisse présager un ralentissement de cette croissance, surtout dans les pays en voie de développement.

La demande d'énergie actuelle peut donc servir de référence et de minorant strict pour évaluer la consommation future. Les ressources énergétiques de la planète se présentent sous deux formes différentes : énergies renouvelables (énergies de flux) et énergies épuisables (énergies de stock) existent en quantités limitées [16].

Aujourd'hui plus de 85% de l'énergie produite est obtenue à partir des matières fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou de l'énergie nucléaire. La Figure I.1 montre la répartition en termes d'énergie primaire dans le monde pour toutes les ressources actuelles [5].

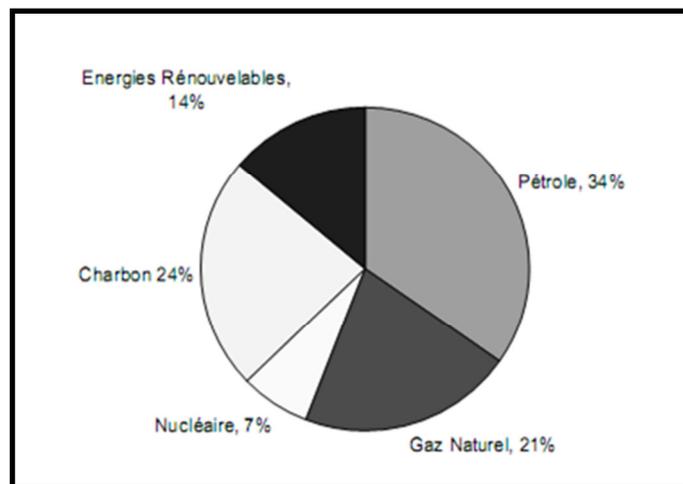


Figure I.1: Répartition des sources primaires d'énergie dans le monde.

Les formes de production d'énergie non renouvelables engendrent une forte pollution environnementale par rejet des gaz à effet de serre qui provoque un changement climatique irréversible ou dans le cas du nucléaire une pollution par radiations de longue durée qui pose le problème, aujourd'hui non résolu, du stockage des déchets radioactifs [2] [5].

Pour subvenir aux besoins en énergie de la société actuelle, il est nécessaire de trouver des solutions adaptées et de les diversifier. Actuellement, il y a principalement deux façons possibles d'agir. La première est de diminuer la consommation des récepteurs d'énergie et augmenter la productivité des centrales énergétiques en améliorant respectivement leur efficacité. Une deuxième méthode consiste à trouver et développer de nouvelles sources d'énergie associées à des technologies performantes et fiables sont indispensables pour tenter de maintenir le niveau de la production énergétique mondiale. Des recherches sont en cours dans le domaine de la fusion des noyaux atomiques qui, éventuellement, pourraient être une solution énergétique du futur, mais l'avenir de cette filière et encore moins son

avènement ne sont assurés [5] [16].

Dans l'immédiat, nous disposons de ressources en énergie renouvelable inépuisables, que nous sommes en mesure d'exploiter de plus en plus facilement et proprement. Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années.

1.1.1- Définition

On appelle énergie renouvelable un ensemble de sources d'énergie qui sont inépuisables à l'échelle humaine, largement disponible, essentiellement gratuites et sont compatibles avec un certain respect environnemental.

Les énergies renouvelables utilisent des sources inépuisables d'énergies d'origine naturelle : rayonnement solaire, vents, cycles de l'eau et du carbone dans la biosphère, flux de chaleur interne de la terre, effet de l'attraction lunaire et solaire sur les océans. Elles s'opposent ainsi aux énergies fossiles, dont les stocks forcément limités se sont constitués lors de la formation du système solaire (uranium, thorium), ou, au cours des âges géologiques, à partir d'une fraction infime de la biomasse terrestre qui a pu se fossiliser (charbon, pétrole, gaz naturel). Certaines sources d'énergies renouvelables se trouvent d'ailleurs à la charnière de la définition entre énergie de flux et énergie de stocks. Ainsi certains gisements de ressources géothermales peuvent-ils être exploités seulement durant quelques dizaines d'années, alors que leur reconstitution peut prendre un délai bien supérieur. De même, les gisements de tourbe, c'est-à-dire de végétaux en tout début de processus de fossilisation, nécessiteront plusieurs milliers d'années pour être à nouveau exploitables. Enfin, on englobe aussi dans les énergies renouvelables les flux de déchets de l'activité économique qui peuvent donner lieu à une valorisation énergétique : déchets de l'agriculture et de l'exploitation forestière, part combustible ou fermentescible des déchets industriels et des ordures ménagères.

Les énergies renouvelables sont d'origine majoritairement solaire et pour les énergies des vents et des marées, elles sont aussi un peu dues à l'énergie cinétique terrestre et à l'énergie de liaison gravitationnelle.

Parmi les énergies renouvelables trois grandes familles émergent : l'énergie d'origine mécanique (la houle, éolien), énergie électrique (panneaux photovoltaïques) ou l'énergie sous forme de la chaleur (géothermie, solaire thermique,...) en sachant qu'à la racine de toutes ces énergies est l'énergie en provenance du Soleil transformée ensuite par l'environnement terrestre [5] [16].

- ❖ Le solaire est une utilisation directe des rayons du Soleil pour produire chaleur ou électricité.
- ❖ La biomasse recoupe l'ensemble des énergies provenant de la dégradation de la matière organique.
- ❖ C'est l'énergie solaire transformée par les plantes chlorophylliennes qui sont utilisées soit directement (bois de chauffage) soit après de nouvelles transformations chimiques (biogaz, biocarburant).

- ❖ L'éolien a une origine plus complexe, l'énergie du vent, qui est utilisée d'une manière mécanique.
- ❖ L'hydroélectrique vient de la transformation de l'énergie solaire en énergie potentielle de gravitation par évaporation de l'eau, puis par transformation en électricité.
- ❖ La géothermie est l'utilisation directe du gradient de température terrestre (énergie renouvelable) ou des sources chaudes (énergie non renouvelable) [16].

Pour des raisons « environnementales » les énergies renouvelables (eau, vent, soleil) sont aujourd'hui de plus en plus utilisées dans la production de l'électricité. Ces énergies propres et gratuites représentent une bonne alternative aux ressources fossiles.

Parmi les sources renouvelables dénombrées, on compte **l'énergie éolienne**. Le développement de cette dernière représente un grand investissement dans le domaine de la recherche technologique. Ces systèmes qui produisent de l'énergie électrique à partir du vent peuvent constituer une alternative technologique et économique aux différentes sources d'énergies épuisables [2] [31].

D'ailleurs, la croissance de l'industrie éolienne mondiale est de l'ordre de 30% par an depuis le début des années 2000. L'utilisation des aérogénérateurs présente des avantages importants. En effet, ils sont pour l'instant l'un des moyens les plus écologiques pour obtenir de l'électricité et cette source reste inépuisable [2].

1.2 État de l'art, principes et éléments constitutifs de l'éolien

1.2.1 Historique de l'éolien

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau.

Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2 000 ans avant J.-C environ. Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone, avait conçu tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie utilisant la puissance du vent. La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J.-C. En Europe, les premiers moulins à vent ont fait leur apparition au début du Moyen Age. Utilisés tout d'abord pour mouliner le grain, d'où leur nom de " moulins ", ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés. Dès le XIV^{ème} siècle, les moulins à vent sont visibles partout en Europe et deviennent la principale source d'énergie. Seulement en Hollande et Danemark, vers le milieu du XIX^{ème} siècle, le nombre des moulins est estimé respectivement à plus de 30000 et dans toute l'Europe à 200000. A l'arrivée de la machine à vapeur, les moulins à vent commencent leur disparition progressive. [2] [5] [31].

L'arrivée de l'électricité donne l'idée à Poul La Cour en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice. Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pût être « redécouverte » et de nouveau utilisée

(dans les années 40 au Danemark 1300 éoliennes). Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux Etats-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées. Dans les années 60, fonctionnait dans le monde environ 1 million d'aérogénérateurs [5].

C'est avec la crise pétrolière des années 70 que cet intérêt ressurgit. Ainsi plusieurs pays commencèrent à investir de l'argent pour notamment améliorer la technologie des aérogénérateurs, ce qui donna naissance aux aérogénérateurs modernes.

L'éolien a eu une croissance moyenne annuelle de 40 % ces 5 dernières années. Ce développement s'est surtout exprimé en Europe. L'énergie éolienne est la source d'énergie qui croît le plus vite dans le monde. Cette progression est énorme par rapport à d'autres types d'énergies plus traditionnelles, telle que l'énergie nucléaire avec une croissance de 1% ou le charbon qui n'a pas du tout augmenté dans les années 90. Les perspectives sont tout aussi spectaculaires. L'EWEA (European Wind Energy Association) estime que 12% de l'électricité mondiale sera d'origine éolienne en 2020 et plus de 20% en 2040.

Le coût de l'énergie éolienne est en baisse constante depuis plusieurs années. Ce prix dépend de nombreux facteurs et est par conséquent différent d'un pays à l'autre, et même d'un site à l'autre puisque la vitesse du vent est un des facteurs de plus d'importance (la puissance produite par une éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent). Malgré tout, on peut dire que le coût de cette énergie a été divisé par deux ces 10 dernières années. Parmi les facteurs ayant provoqué cette baisse, on peut citer la baisse des prix des aérogénérateurs, l'augmentation de la rentabilité et de la disponibilité et la baisse des coûts de maintenance. Avec la tendance vers des turbines toujours plus grandes, la baisse des coûts d'infrastructure que cela entraîne et les réductions du coût des matériaux, le prix de l'énergie éolienne continue à diminuer régulièrement. Il faut de plus noter qu'en prenant en compte le coût correspondant à la pollution produite par les différentes sources d'énergie, le coût de l'énergie éolienne est encore plus compétitif [20] [31].

1.2.2 Situation actuelle de l'énergie éolienne dans le monde

Depuis environ une décennie le développement de l'énergie éolienne se poursuit à un rythme soutenu sur l'ensemble du globe. On comptabilisait fin 2010 pas moins de 203 GW de puissance éolienne installée dans le monde, contre 24.3 GW à la fin de l'année 2001 comme le montre l'histogramme de la figure I.2 [49].

Les pays qui s'intéressent au développement de l'éolien sont encore en phase de premier investissement (mise en service de champs d'éoliennes qui n'existaient pas auparavant). De fait, les capacités installées croissent en permanence mais à des rythmes différents selon les pays, et classer les États par puissance installée donne un résultat mouvant d'une année à l'autre. Néanmoins, il ressort des chiffres actuels que les plus gros pays investisseurs sont les pays occidentaux (Amérique et Europe), mais

l'Asie, avec l'Inde et la Chine, commence à tenir un rang important [49].

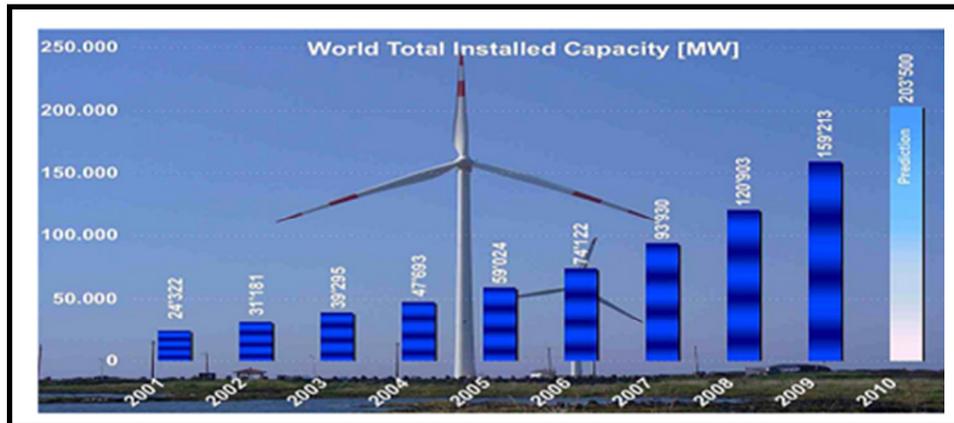


Figure I.2: Capacité totale installée (MW) et prévisions 2001-2010

En 2010, la Chine a investi 63 milliards de dollars dans l'éolien, les USA 18 milliards de dollars. La croissance des investissements dans l'éolien a été de 34% en 2010 [49].

Les chiffres de production par pays (donnés ci-dessous dans le tableau I.1) montrent que les pays comme les Etats-Unis et la Chine, en confirmant leur fort développement, rattrapent le retard qu'ils avaient par rapport à l'Europe. Ils ont respectivement installé 30,5% et 23,05% des nouvelles capacités en 2008, 27,5% et 38,54% en 2009, permettant ainsi aux États-Unis en 2008 de passer devant l'Allemagne qui était jusqu'alors la 1ère nation en termes de puissance éolienne installée [19].

La capacité de production électrique éolienne déployée en Europe a été multipliée par 5 entre l'année 2001 et fin 2008. Selon l'EWEA (European Wind Energy Association), 2009 a encore été une année record avec l'installation de 10.263 MW de nouvelles capacités éoliennes installées, et environ 10 00 MW supplémentaire sont attendus en 2010 par l'EWEA [Article]. La figure 1.3 illustre l'évolution de la capacité totale installée dans les pays leader en 2009 (Etats-Unis, Allemagne, Espagne et Chine) et en France, entre les années 2000 et 2008.

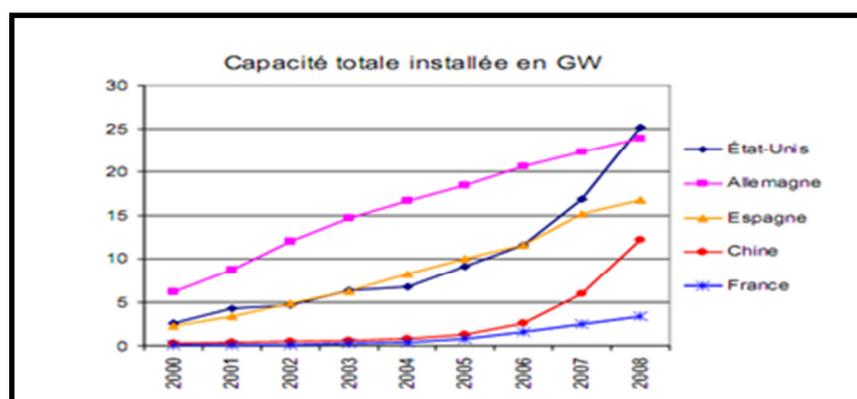


Figure I.3: Évolution des puissances éoliennes installées

Pour la France, qui en comparaison de ses voisins européens a pris un peu de retard, la production d'énergie éolienne a couvert 3.46% de la demande en 2008 et de 3 % de la demande en 2009 [49]. Notons que les principales causes de ce retard proviennent des lourdeurs administratives, ainsi que des problèmes

d'acceptation par la population de voir l'installation d'une ferme éolienne « près » de chez eux [19].

Rang (fin 2009)	Pays	MW (fin 1997)	MW (fin 1998)	MW (fin 1999)	MW (fin 2000)	MW (fin 2001)	MW (fin 2002)	MW (fin 2003)	MW (fin 2004)	MW (fin 2005)	MW (fin 2006)	MW (fin 2007)	MW (fin 2008)	MW (fin 2009)
01	États-Unis	1673	1820	2534	2564	4258	4685	6370	6725	9149	11603	16819	25170	35159
02	Chine	146	200	262	352	400	468	567	764	1266	2599	5899	12210	26010
03	Allemagne	2081	2875	4443	6095	8754	12001	16629	18528	18500	20622	20622	23903	25777
04	Espagne	427	834	1542	2535	3337	4830	6202	8263	10028	11630	11630	16754	19149
05	Inde	940	992	1035	1267	1507	1702	2110	3000	4430	6270	6270	9600	10926
06	Italie	103	178	283	682	682	785	904	1265	1718	2123	2123	3736	4850
07	France	10	21	25	95	95	148	248	386	757	1567	1567	3404	4492
08	Royaume-Uni	319	333	347	474	474	552	684	888	1353	1963	1963	3241	4051
09	Portugal	38	51	67	131	131	194	289	522	1022	1716	1716	2862	3535
10	Danemark	1066	1383	1771	2417	2383	2880	3110	3124	3128	3136	3125	3160	3465
11	Canada	25	82	125	137	207	236	322	444	683	1460	1846	2369	3319
12	Pays-Bas	319	361	409	440	481	682	908	1078	1224	1559	1747	2225	2229
13	Japon	18	30	68	142	275	334	506	896	1040	1309	1528	1880	2056
14	Australie	4	9	9	30	71	103	197	379	579	817	817	1494	1712
15	Suède	127	178	220	241	295	345	404	452	509	571	831	1067	1560
16	Irlande	53	73	73	119	125	137	186	339	495	746	805	1245	1260
17	Grèce	29	55	158	247	272	276	365	473	573	756	873	990	1087
18	Autriche	20	30	42	77	94	139	415	606	819	965	982	995	995
19	Turquie		9	9	19	19	19	21	21	201	65	207	333	801
20	Pologne	2	5	5	5	22	28	58	58	73	156	276	472	725
	Total Capacité Mondiale	7480	9667	13701	18040	24319	31180	41342	49463	59076	74117	93891	121266	157531

Tableau I.1: Puissance éolienne totale installée- les 20 premiers pays en 2009 - évolution de 1997 à 2009.

Toutefois le Comité opérationnel du Grenelle de l'Environnement a établi un objectif optimiste pour l'éolien, avec en vue une capacité totale installée de 25 GW à l'horizon 2020 (ce qui représente 40% des capacités nucléaires actuelles). Pour atteindre cet objectif des mesures sont mises en œuvre afin de faciliter le développement des projets de création de ferme éolienne.

1.2.3 Situation actuelle de l'énergie éolienne dans l'Algérie

Le domaine de l'énergétique éolienne a connu un grand essor avec l'élargissement de l'installation d'aérogénérateurs pour la production électrique dans les pays industrialisés. De plus, la volonté de réduire les émissions de gaz responsables de l'effet de serre, a poussé beaucoup de pays à s'intéresser davantage aux énergies renouvelables dont fait partie l'éolien. Les réalisations algériennes dans le domaine de l'énergie propre dite renouvelable sont très limitées en comparaison avec l'actuelle évolution du parc énergie renouvelable mondial ou européen, qui a atteint des objectifs très avancés. Par ailleurs, l'étude de la rentabilité des systèmes éoliens est étroitement liée à la source elle-même, à savoir, le vent.

En ce qui concerne l'Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et un climat très diversifiés. En effet, notre vaste pays, se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes. Le Nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200 km et un relief montagneux, représenté par les deux chaînes de l'Atlas télien et l'Atlas saharien. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le Sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien.

Une étude préliminaire de l'évolution saisonnière et annuelle de la vitesse moyenne du vent, a permis

de faire une première identification des régions ventées de l'Algérie. Cette représentation de la vitesse sous forme de carte, a deux objectifs : le premier est d'identifier les vastes régions avec de bonnes promesses d'exploitation de l'énergie éolienne. Le second est de mettre en évidence la variation relative de la ressource à travers l'Algérie.

La carte représentée en figure (I.4) montre que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement le Sud-Ouest avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar. Concernant le Nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El Kheiter ainsi que dans la région délimitée par Bejaia au Nord et Biskra au sud.

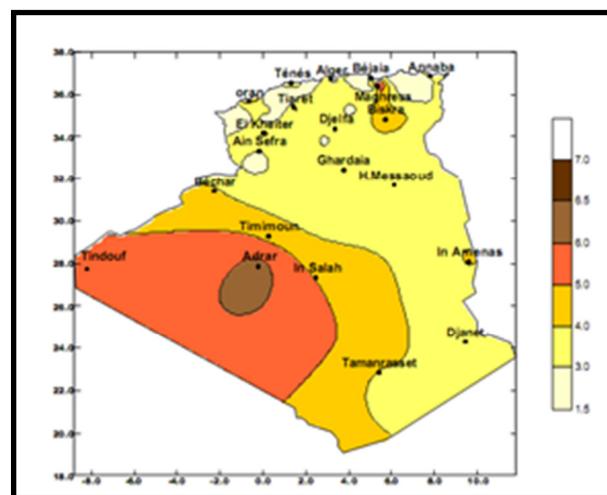


Figure I.4: Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s).

Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qu'on ne doit pas négliger, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne. Les cartes saisonnières représentées en figure (I.5) montrent clairement que l'automne et l'hiver sont moins ventées que le reste des saisons et que le printemps en est la plus ventée. Néanmoins, on remarque que la région de Tiaret fait l'exception avec une vitesse plus faible en été qu'en hiver. D'un autre côté, des régions telles que Biskra, Adrar et Annaba sont caractérisés par une vitesse relativement constante tout au long de l'année [48].

La première expérience du pompage d'eau avec un éolien en Afrique a été effectuée à Adrar l'an 1957 au Ksar sidiassa, pour l'irrigation de 50 Hec, ce système éolien a été saboté en 1962 à la sortie des français de l'Algérie [9] [16].

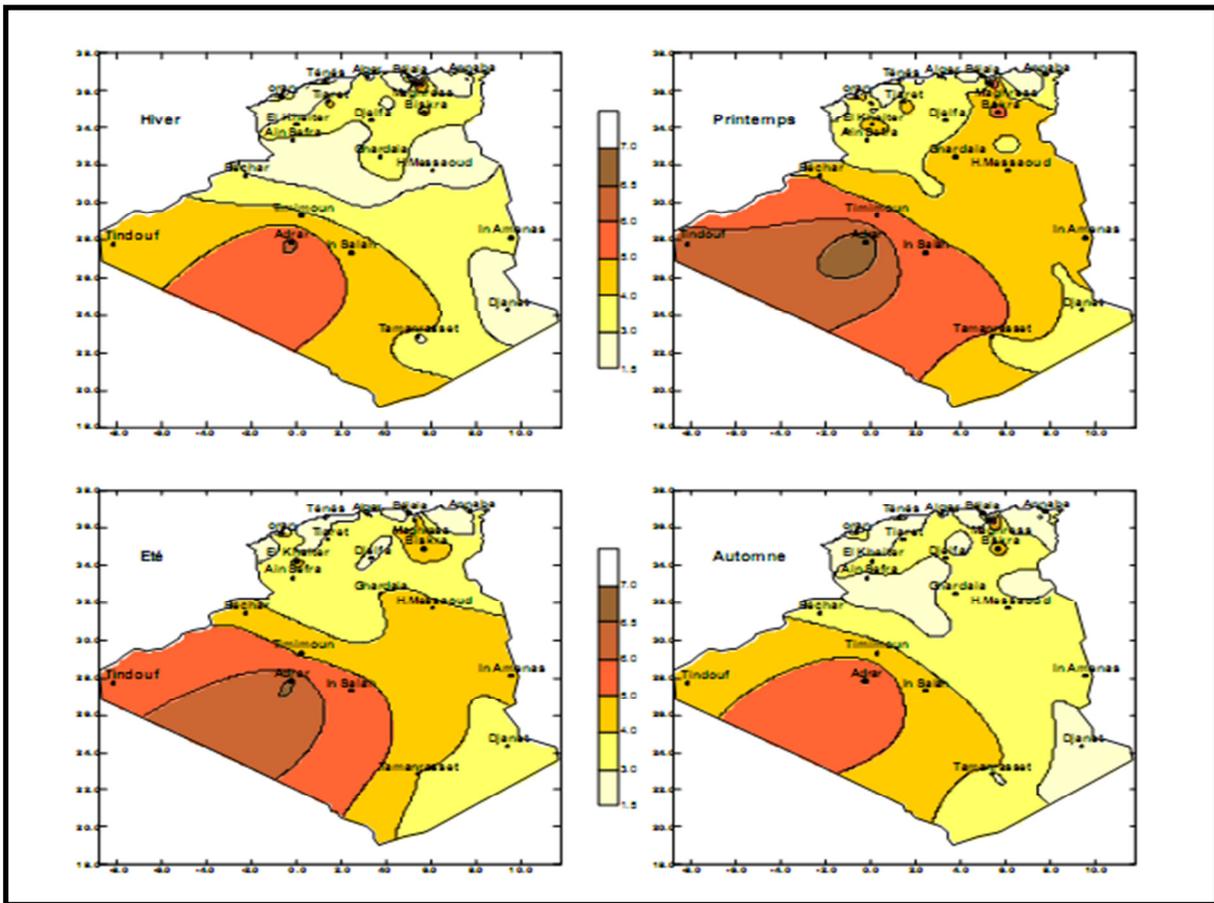


Figure I.5: Cartes saisonnières de la vitesse du vent (m/s).

L'intérêt d'utiliser l'éolien pour la production d'électricité en Algérie a fait que le Centre de Développement des Energies Renouvelables s'est muni de moyens importants pour la réalisation d'études poussées à l'échelle régionale afin de détecter des sites ventés dans les régions prédéfinies. En effet, en considérant les paramètres suivants [47]:

- ❖ L'accessibilité de la région, (topographie).
- ❖ L'identification des régions protégées.
- ❖ La capacité de raccordement au réseau.
- ❖ Les contraintes environnementales.
- ❖ Le risque foncier.
- ❖ et autres contraintes.

Différents résultats utiles au bon choix des systèmes éoliens selon les régimes des vents locaux sont produits, à savoir :

- ❖ L'Analyse de la climatologie du site.
- ❖ L'établissement des Atlas éoliens de la région (vent et potentiel).
- ❖ Le choix optimal de l'emplacement de la ferme éolienne.
- ❖ L'estimation de la production d'énergie électrique de la ferme éolienne.

- ❖ L'efficacité des fermes éoliennes.
- ❖ et le coût du KWh produits.

Trois raisons principaux plaident en faveur d'un développement des énergies renouvelable en Algérie [9]:

- ❖ 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 du fait de leur caractère inépuisable et de leur impact limité sur l'environnement et 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'emploi.

1.2.4 D'où vient le vent ?

On estime que chaque année le vent, raison d'être des aérogénérateurs, distribue entre 2,5 et 5.10¹⁵ kWh. Ce potentiel énorme que représente l'énergie éolienne est en réalité la résultante de plusieurs phénomènes qui engendrent différents types de forces à l'origine des mouvements d'air que l'on appelle le vent.

Dans un premier temps, l'air est réchauffé par l'ensoleillement mais de façon non uniforme, principalement à cause de la forme sphérique de la Terre. Une fois l'air chauffé, celui-ci va chercher à occuper un plus grand volume en se dilatant et être à l'origine d'une force de pression qui va s'exercer sur une partie de l'atmosphère sous forme de mouvements de convection de l'équateur vers les pôles. Puis intervient la force de Coriolis qui est directement issue de la rotation de la Terre. Cette force engendre dans l'hémisphère Nord une force qui a tendance à dévier le vent vers la droite, tandis que dans l'hémisphère Sud, le vent sera plutôt dévié vers la gauche. Enfin, la troisième force correspond aux frottements. Il s'agit des frictions entre le sol et les masses d'air déplacées, ou encore entre les différentes masses d'air qui auront modifié leurs trajectoires aux abords des reliefs rencontrés [50].

1.2.5 Principe de fonctionnement d'une éolienne

Un aérogénérateur est un système plus communément appelé éolienne a pour rôle d'extraire une partie de l'énergie cinétique du vent et la convertir en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. Cette conversion se fait en deux étapes:

- ❖ Au niveau de la turbine, qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent pour la convertir en énergie mécanique. Cette dernière est transmise à la génératrice au moyen d'un arbre de transmission et un éventuel réducteur de vitesse.
- ❖ Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

L'ensemble de la chaîne de conversion est illustré par la figure (I.6). fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécaniques, électriques ou d'automatique [2] [6] [8] [10] [37].

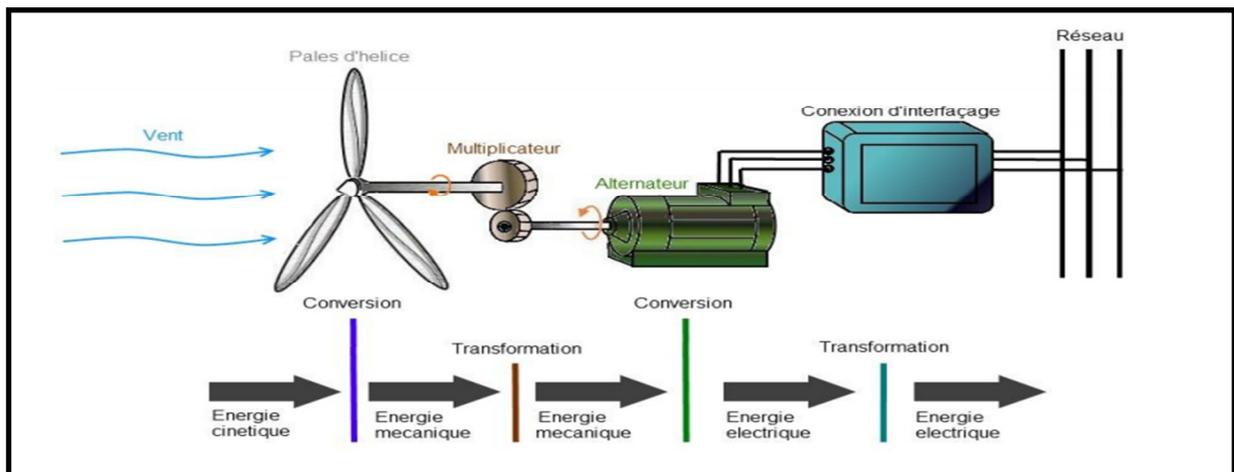


Figure I.6: Structure générale d'un système de conversion de l'énergie éolienne.

I.2.6 Avantages et désavantages de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type de l'énergie.

Cette source d'énergie a également des désavantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

I.2.6.1 Avantages de l'énergie éolienne [2] [44]

- ❖ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable inépuisable, c'est-à-dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- ❖ L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie.
- ❖ Du point de vue écologique: L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement car l'exploitation de cette énergie évite déjà aujourd'hui l'émission de 6.3 million de tonnes de CO₂, 21 mille tonnes de SO₂ et 17.5 mille tonnes de NO_x. Ces émissions sont principaux responsables des pluies acides [20].
- ❖ Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement environ 2% du sol est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et d'autres utilisations.
- ❖ Une éolienne est en grande partie recyclable car construite en acier. Après son temps de fonctionnement (environ 20 ans), elle est entièrement démontable.
- ❖ L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle [2].
- ❖ C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.

- ❖ C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- ❖ Ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.

1.2.6.2 Désavantages de l'énergie éolienne [2] [20] [44] [50]

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolienne a quelques désavantages.

- ❖ **L'impact visuel:** Ça reste néanmoins un thème subjectif.
- ❖ **Le bruit:** il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée.
- ❖ **L'impact sur les oiseaux:** certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études démontrent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas piéger par les aéro turbines.
- ❖ **Interférences électromagnétiques :** La rotation de l'hélice de l'éolienne peut causer des problèmes particuliers, parce qu'elle crée des signaux parasites intermittents qui interfèrent avec les trajectoires originales de transmission hertzienne. Cependant, dans la plupart des cas, si des interférences électromagnétiques apparaissent, il existe des solutions bon marché et efficaces comme par exemple l'installation d'un récepteur ou transmetteur pour renforcer le signal original.
- ❖ **Sécurité :** Il y a peu de chance d'avoir des dégâts ou des morts suite à une cassure ou une fragmentation de l'hélice. Les dangers peuvent aussi être minimisés en éloignant les turbines des zones résidentielles, mais surtout en effectuant des contrôles sérieux lors de la construction des turbines.

1.2.7 Les différents types des turbines éoliennes

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. Le tableau I-2 présente une classification des turbines éoliennes.

ECHELLE	DIAMÈTRE DE L'HÉLICE	PUISSANCE DELIVRÉE
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40KW
Moyenne	12 m à 45 m	De 40 KW à 1 MW
Grande	46 m et plus	1 MW et plus

Tableau I.2: classification des turbines éoliennes [44].

1.2.7.1 Les raisons pour choisir une grande éolienne

- ❖ Le principe des économies d'échelle vaut évidemment également pour les éoliennes. Ainsi, une grande éolienne produit normalement de l'électricité à un moindre coût qu'une petite. La raison pour cela est que les coûts de fondations, de construction, de raccordement au réseau et d'autres composants de l'éolienne (le système contrôle-commande, p.ex.) sont plus ou moins les mêmes, quel que soit la taille de l'éolienne.
- ❖ Les grandes éoliennes sont particulièrement appropriées à l'installation en mer. Le coût des fondations n'augmente pas proportionnellement avec la taille de l'éolienne, et les coûts d'entretien sont dans une large mesure indépendants de la taille.
- ❖ Dans les zones où il est difficile de trouver des sites pour plus qu'une seule éolienne, une grande éolienne avec une tour haute tire mieux partie de la ressource éolienne qu'une petite.

1.2.7.2 Les raisons pour choisir une éolienne plus petite

- ❖ Il arrive que le réseau électrique local soit trop faible pour supporter la production électrique d'une grande éolienne. C'est souvent le cas dans les parties les plus extérieures du réseau où la densité de la population et les besoins en électricité est très basse.
- ❖ La production d'électricité est moins fluctuante dans un parc éolien composé de plusieurs petites éoliennes, étant donné que les variations du vent sont aléatoires, ayant donc tendance à s'annuler. Et en plus, comme déjà mentionné, le choix d'éoliennes plutôt petites peut se révéler avantageux dans un réseau électrique faible.
- ❖ Les coûts liés à l'usage de très grandes grues et à la construction de chemins suffisamment robustes pour supporter le transport des composants de l'éolienne constituent un autre facteur qui, dans certains endroits, rend plus économique le choix de petites éoliennes.
- ❖ Avec plusieurs éoliennes d'une moindre puissance, on assure la répartition du risque en cas de défaillance temporaire d'une éolienne (p.ex. par suite d'une foudre).

Des considérations esthétiques du paysage peuvent parfois dicter le choix d'éoliennes plus petites. Cependant, il faut savoir, que la vitesse de rotation d'un grand rotor est en général beaucoup moins rapide que celles d'un petit, ce qui a pour résultat qu'une seule grande éolienne attire souvent moins l'attention que plusieurs petites.

On distingue aussi le "grand éolien", qui concerne les machines de plus de 250 KW, de l'éolien de moyenne puissance (entre 36 KW et 250 KW) et du petit éolien (inférieur à 36 KW) [44].

Il existe deux principaux types d'éoliennes qui se différencient essentiellement dans leur organe capteur d'énergie à savoir l'aéroturbine. En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol on obtient une éolienne à axe vertical ou à axe horizontal.

1.2.8 Les éoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles [8] [27] et il s'agit d'une turbine à axe vertical de forme cylindrique qui peut facilement être installée sur le toit d'une maison moderne et dont les avantages sont : faible impact visuel, pratiquement pas de bruit et très grande tolérance aux vents forts [44].

Cependant, les vents sont faibles à proximité du sol, ce qui induit un moins bon rendement. 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 [24].

Elles présentent des avantages et des inconvénients que nous pouvons citer comme suit [6] [44].

1.2.8.1 Avantages des éoliennes à axe vertical

- ❖ La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- ❖ Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- ❖ Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

1.2.8.2 Inconvénient des éoliennes à axe vertical

- ❖ Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- ❖ La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
- ❖ Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour.
- ❖ L'efficacité globale des éoliennes à axe vertical n'est pas impressionnante.
- ❖ L'éolienne ne démarre pas automatiquement. Cependant, ceci ne constitue qu'un inconvénient mineur dans le cas d'une éolienne raccordée au réseau, étant donné qu'il est alors possible d'utiliser la génératrice comme un moteur absorbant du courant du réseau pour démarrer l'éolienne).

De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation [2] [8] :

1.2.8.3 Rotor de Savonius

Le rotor de Savonius figure (I.7) (du nom de son inventeur, breveté en 1925) dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes, il en résulte alors un couple

moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur [39].

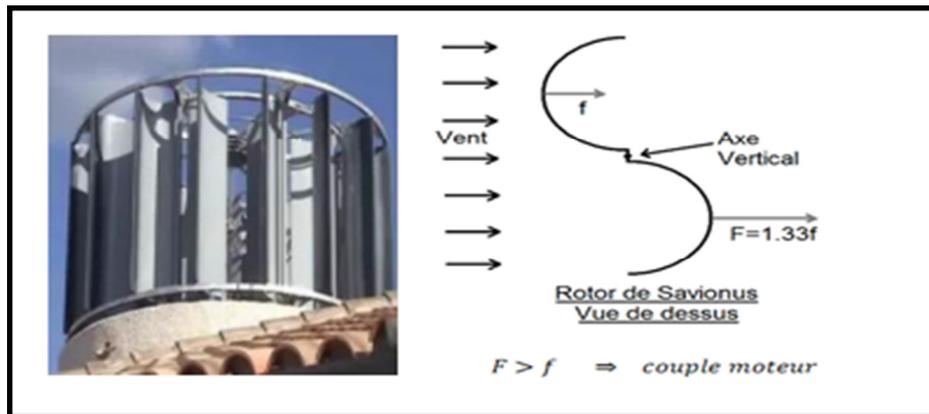


Figure I.7: Schéma de principe du rotor de Savonius.

1.2.8.4 Rotor de Darrieus

Les éoliennes à variation cyclique d'incidence dont la structure est la plus répandue sont celles de Darrieus (ingénieur français qui déposa le brevet au début des années 30) figure (I.8). Leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle-même. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur) [39].

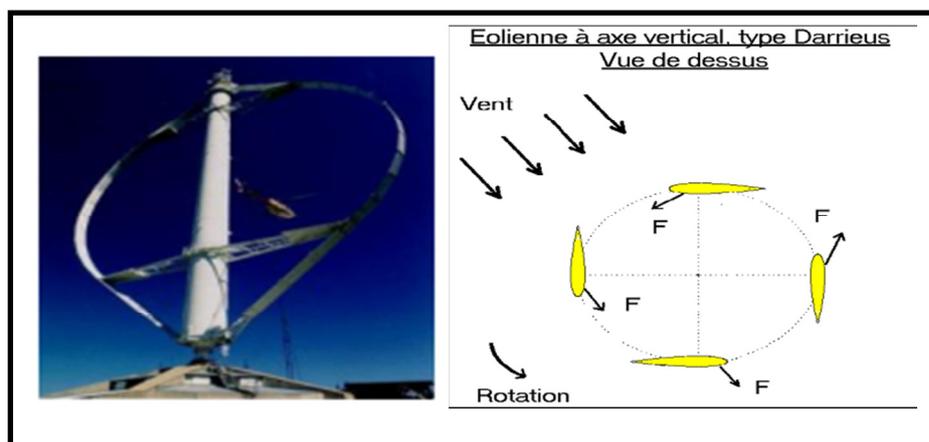


Figure I.8: Schéma de principe du rotor de Darrieus.

1.2.9 Les éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre

1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien .Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études multicritères.

Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal [44].

Elles présentent des avantages et des inconvénients que nous pouvons citer comme suit [6].

1.2.9.1 Avantages des éoliennes à axe horizontal

- ❖ Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- ❖ Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
- ❖ Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.

1.2.9.2 Inconvénient des éoliennes à axe horizontal

- ❖ Coût de construction très élevé.
- ❖ L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.

On peut distinguer les éoliennes dont l'hélice est en amont par rapport au vent, "hélice au vent" figure (I.9.a), et celles dont l'hélice est en aval par rapport au vent, "hélice sous le vent" figure (I.9.b).

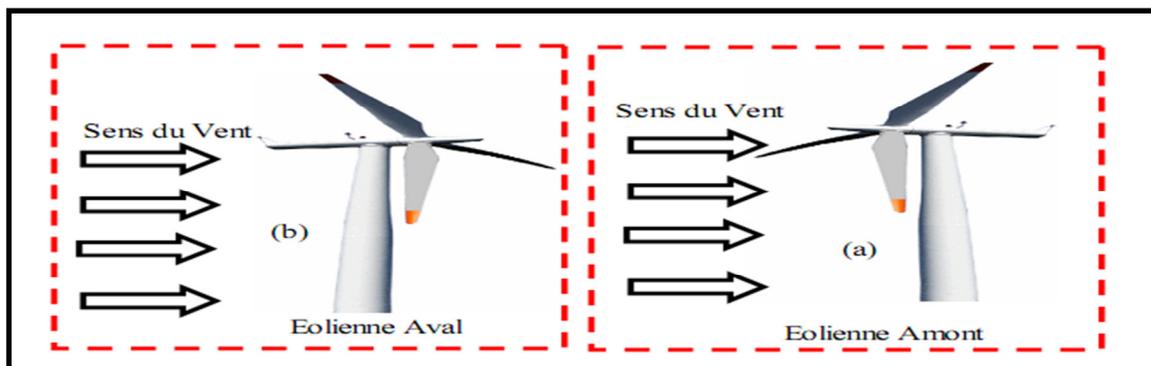


Figure I.9: Eolienne en amont et en aval.

1.2.9.3 Eoliennes lentes

Les éoliennes lentes figure (I-10) sont munies d'un grand nombre de pales entre (20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Ces éoliennes multipales sont surtout adaptées aux vents de faible vitesse [2].



Figure I.10: Eolienne Lente

1.2.9.4 Eoliennes rapides

Les éoliennes rapides figure (I.11) ont un nombre de pales assez réduit, qui varie en général entre 2 et 4 pales. Elles sont les plus utilisées dans la production d'électricité en raison de leur efficacité, de leur poids et de leur rendement élevé. Par contre, elles présentent l'inconvénient de démarrer difficilement [2].



Figure I.11: Eolienne Rapide

1.2.10 Principales composantes des éoliennes à axe horizontal

L'éolienne à axe horizontale figure (I.12), étant le sujet de notre étude, sera décrit en citant ses différents composants.

En générale, l'éolienne à axe horizontale est constituée de trois éléments principaux ; La tour (mat), la nacelle et les pales qui sont supportées par le moyeu [30].

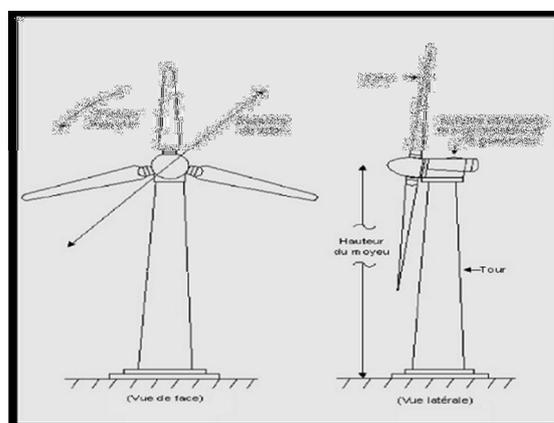


Figure I.12: Principales composantes de l'éolienne à axe horizontale.

1. La tour :

C'est un élément porteur, généralement un tube en acier ou un treillis métallique. Avec l'augmentation des puissances nominales des éoliennes, le mat devient de plus en plus haut pour éviter les perturbations près du sol mais aussi permettre l'utilisation de pales plus longues. La tour a une forme conique ou cylindrique. A l'intérieur sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, l'appareillage de connexion au réseau de distribution et l'échelle d'accès à la nacelle [30].

2. La nacelle :

C'est le coffret qui se trouve en haut de la tour. IL contient et protège les différents composants mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique. Elle comprend les éléments suivants (Figure I.13) [2] [24] [27] [37].

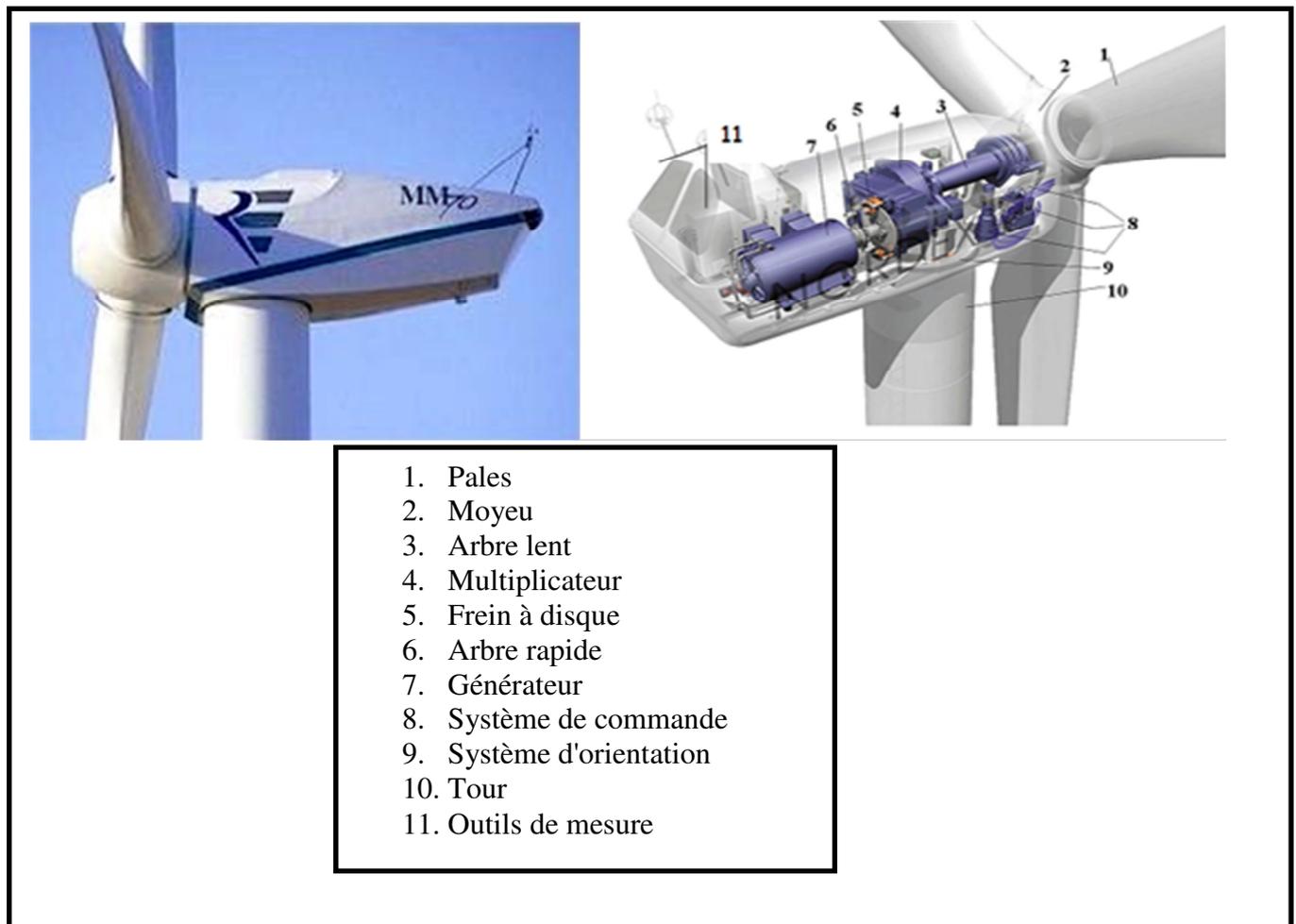


Figure I.13: Les composants de la nacelle d'une éolienne.

Le moyeu : C'est le support des pales et relie le rotor à la nacelle, il doit être capable de supporter des à-coups importants, surtout au démarrage de l'éolienne, ou lors de brusques changements de vitesse du vent. C'est pour cette raison que le moyeu est entièrement moulé et non réalisé par soudure. Il transmet le mouvement de rotation à l'arbre de transmission qui lui est solidaire.

L'arbre de transmission

Il est composé de deux arbres:

- ❖ **L'arbre primaire:** cet arbre transmet l'effort fourni par le rotor au multiplicateur. Il est dit arbre lent, car il tourne à des vitesses comprises entre (20 - 40 tr/min).
- ❖ **L'arbre secondaire:** il entraîne la génératrice à des vitesses élevées (environ 2000 tours/minute) et est muni d'un frein à disque actionné en cas d'urgence.

Un multiplicateur : Appelé aussi transmission, relie l'arbre (primaire) de la turbine éolienne à l'arbre (secondaire) de la génératrice électrique. Il adapte la vitesse de rotation de la turbine éolienne à celle du générateur électrique. Il permet de transformer une puissance à couple élevé et à vitesse lente en une puissance à couple faible et vitesse rapide.

Le frein à disque: qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge.

La génératrice : La fonction de la génératrice est de transformer l'énergie mécanique disponible sur l'arbre de sortie du multiplicateur en énergie électrique. Elle peut être synchrone ou asynchrone. Dans notre cas c'est une génératrice asynchrone à cage d'écureuil. Le générateur qui est dans le cas de cette étude une MADA.

Le système de commande : Le système de commande de l'éolienne est composé d'un certain nombre d'ordinateurs qui surveillent sans cesse l'état de l'éolienne, tout en recueillant des statistiques sur son fonctionnement. Il est possible de surveiller ou de régler entre 100 et 500 paramètres différents dans une éolienne moderne. Comportant aussi tous les convertisseurs d'électronique de puissance (onduleur, redresseur), ainsi que les systèmes de régulation de puissance, de courant et de tension et d'orientation des pales et de la nacelle.

Système d'orientation de la nacelle: Les grandes éoliennes utilisent des moteurs électriques ou hydrauliques pour faire pivoter la nacelle face au vent.

Les outils de mesure du vent: Nous avons deux types: une girouette figure (I.14.b) pour évaluer la direction du vent et un anémomètre figure (I.14.a) pour en mesurer la vitesse.

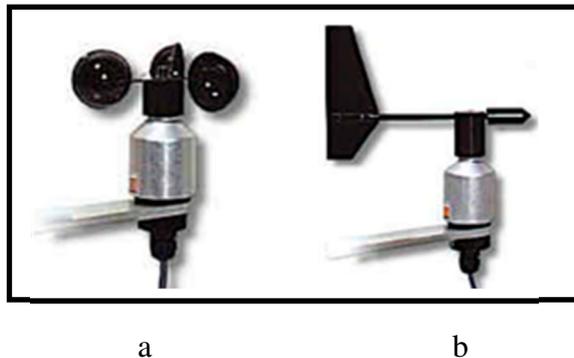


Figure I.14.: (a) Anémomètre. (b) Girouette.

Le système de refroidissement : Il comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur. Il existe un certain type d'éoliennes comportant un refroidissement par air ou par eau.

La protection contre la corrosion: Les différentes parties de l'éolienne sont protégées contre la corrosion par un revêtement spécial à plusieurs couches. Les éléments particulièrement exposés aux intempéries, comme par exemple le moyeu du rotor, sont galvanisés.

3. Les pales :

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

Les pales sont réalisées en fibre de verre ou en matériaux composites comme la fibre de carbone qui est légère et résistante. Elles permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Leur nombre est de trois pales dans la plupart des aérogénérateurs, car cette condition constitue un compromis entre les performances de la machine et des raisons de stabilité. Elles sont inclinables de façon à adapter automatiquement les caractéristiques mécaniques de l'éolienne à la vitesse du vent.

1.3 Les éoliennes connectées au réseau

C'est dans les grandes puissances (au-delà de 100 kW) que l'on rencontre des systèmes reliés au réseau et produisant "au fil du vent". Bien que la première machine qui vient à l'esprit pour de tels systèmes soit la génératrice synchrone, cette dernière caractérisé par la présence de la fluctuation du couple qui se propage jusqu'à la puissance électrique produit. Cette génératrice connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur statique pour découpler la fréquence de réseau à la vitesse de rotation de génératrice synchrone. Cette génératrice est caractérisée par son bon rendement, adapté à la faible vitesse et son prix est plus élevé.

Le faible coût et la standardisation des machines asynchrones a conduit à une très large domination des génératrices asynchrones à cage jusqu'à des puissances dépassant le mégawatt.

Sur le marché de l'industrie éolienne, on distingue deux technologies d'éoliennes, du point de vue vitesse de rotation : les éoliennes à vitesse fixe et les éoliennes à vitesse variable.

1.3.1 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.15).

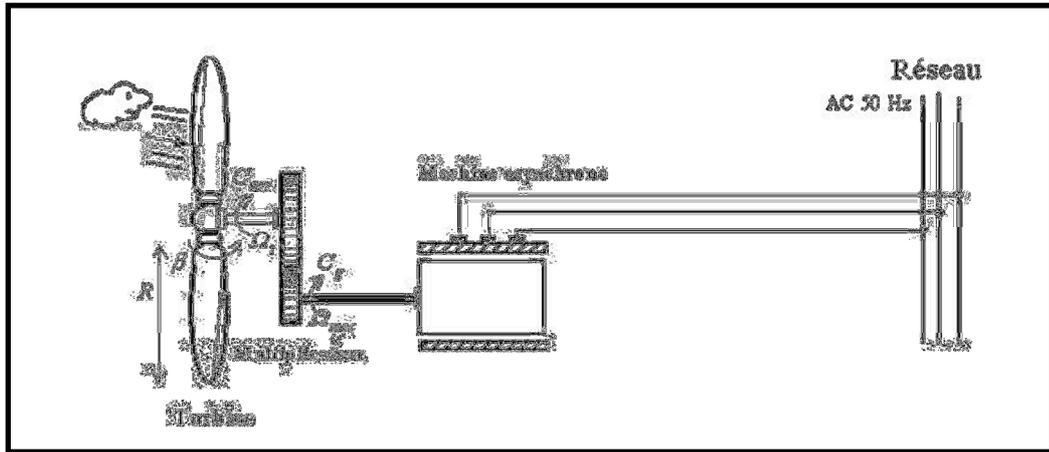


Figure I.15: Eolienne directement connectée au réseau.

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 $\Omega_s = 1500 \text{ tr/min}$, ce qui nécessite l'adjonction d'un multiplicateur pour adapter la génératrice à celle du rotor de l'éolienne figure (I.16) [1].

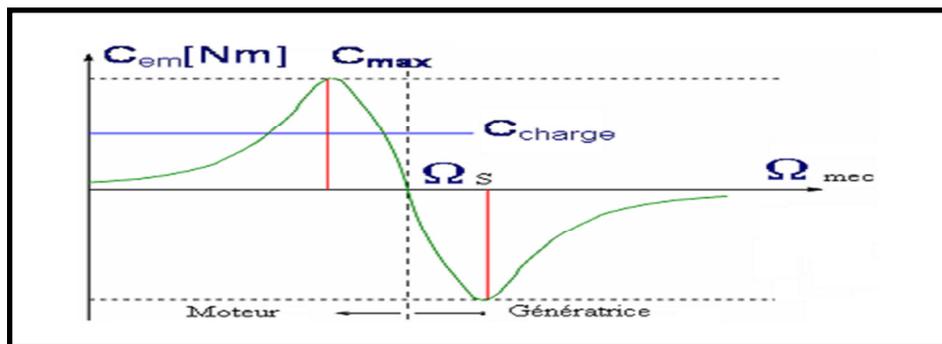


Figure I.16: Caractéristique couple-vitesse d'une machine asynchrone.

I.3.2 Avantages du fonctionnement à vitesse fixe [2]

Le fonctionnement à vitesse fixe présente les avantages suivants:

- ❖ Un système électrique plus simple.
- ❖ Une Plus grande fiabilité.
- ❖ Une faible probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne.
- ❖ L'absence de système électronique de commande.
- ❖ Un coût moins cher.

I.3.3 Inconvénients du fonctionnement à vitesse fixe [2]

Néanmoins il possède les inconvénients suivants:

- ❖ La puissance extraite n'est pas optimisée.
- ❖ La maintenance de la boîte à vitesse.

- ❖ L'absence de gestion de l'énergie réactive par le générateur.
- ❖ La magnétisation de la machine non gérée.

I.4 Les éoliennes à vitesse variable

La configuration de la figure (I.17.a), est basée sur une machine asynchrone à cage, pilotée au stator de manière à fonctionner à vitesse variable, par des convertisseurs statiques. La configuration de la figure (I.17.b), est basée sur une machine asynchrone à double alimentation à rotor bobine. La vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance, situés au circuit rotorique.

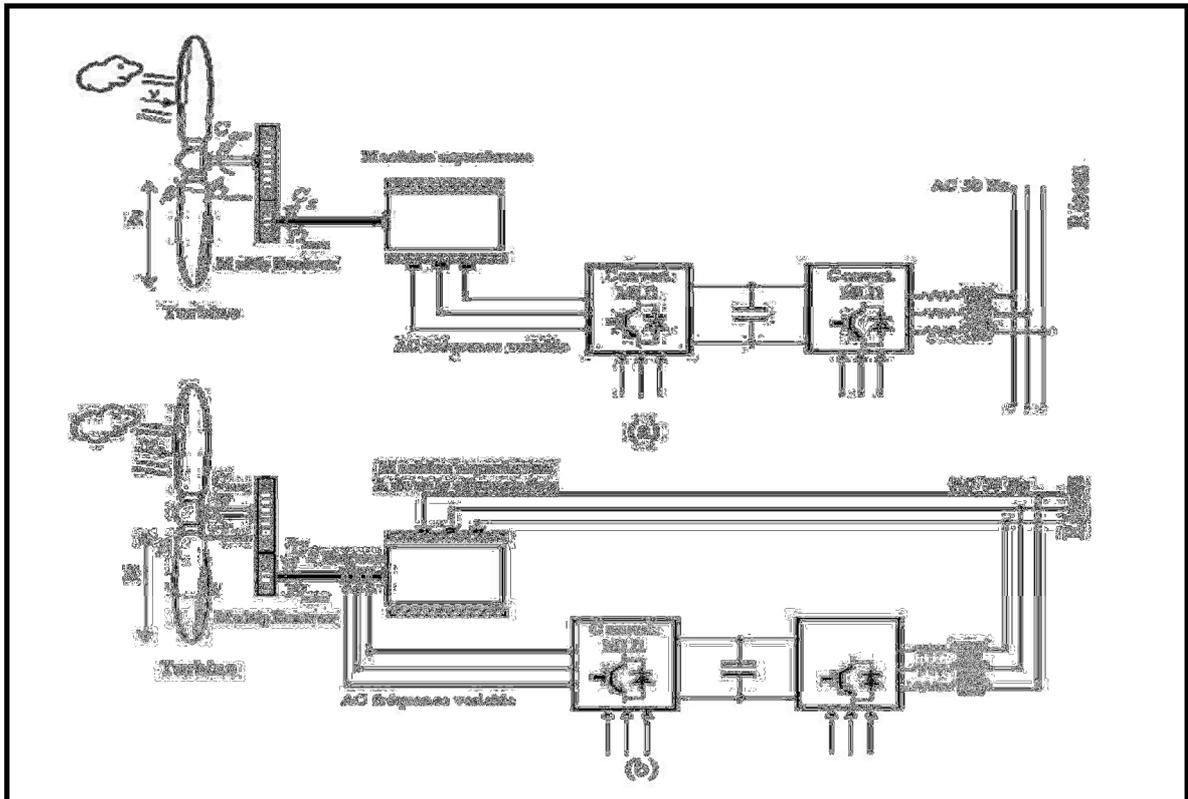


Figure I.17: Eoliennes à vitesse variable.

I.5 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.18).

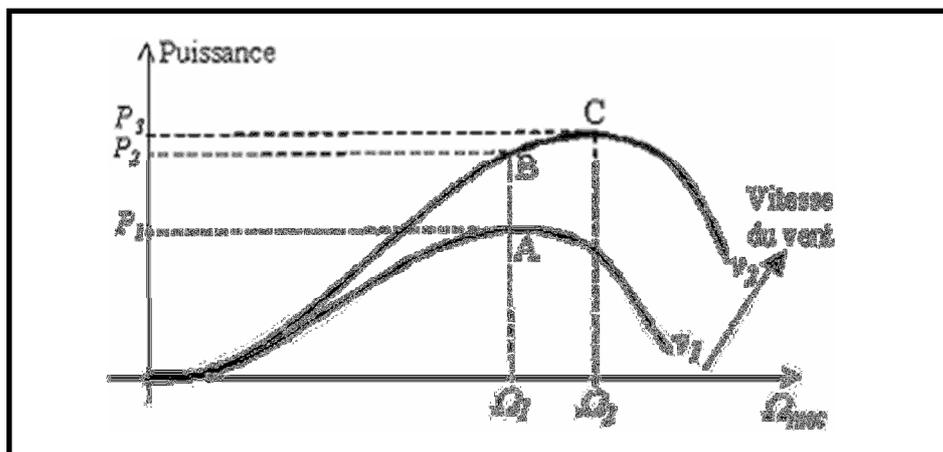


Figure I.18: Caractéristique de la puissance générée.

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.

Les techniques d'extraction maximale de puissance consistent à ajuster le couple électromagnétique de la génératrice pour fixer la vitesse à une valeur de référence (Ω_{ref}) calculée pour maximiser la puissance extraite.

1.6 Conclusion

Une brève description sur les systèmes éoliens a été présentée dans ce chapitre. Comme beaucoup d'énergies renouvelables, le gisement éolien mondial est considérable puisqu'il est très supérieur à la consommation énergétique actuelle de l'humanité. Cependant le développement de son exploitation dépendra, non pas des difficultés technologiques surmontées actuellement côté pratique, mais de données économiques et politiques favorisant ou non les diverses formes d'énergies exploitables.

Et on peut dire aussi que l'éolienne est une source de production d'énergie qui représente dans certains cas l'une des meilleures solutions adaptées. Et ne consomme aucun combustible et ne participe pas à l'effet de serre.

Dans ce chapitre, nous avons présenté un bref historique sur le développement des éoliennes et leur introduction progressive dans le marché mondial et local de l'énergie électrique. Puis nous nous sommes attachés à une étude plutôt descriptive de l'ensemble des composants d'un système éolien. Cette étude nous a permis de comprendre le principe de fonctionnement d'une éolienne d'une manière générale et nous a donné une idée sur les techniques de contrôle des différentes structures. Après nous avons examiné les deux grandes familles d'éoliennes existantes, à savoir les éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable.

La structure à vitesse variable à base d'une machine asynchrone en double alimentation stator rotor a attiré notre attention vu les avantages qu'elle présente et qui peuvent être encore améliorés si on l'associe à une turbine à calage variable des pales, c'est la raison pour laquelle nous allons consacrer le reste de ce mémoire pour l'étude de cette structure.

Vue l'importance de l'énergie éolienne on s'intéressera dans le chapitre suivant à la conception et la simulation d'un modèle de la turbine éolienne.

CHAPITRE II

Turbine éolienne

II.1. INTRODUCTION

Un système de conversion d'énergie éolienne est composé de la turbine éolienne ayant une caractéristique qui lui est propre et qui dépend des paramètres de construction définissant son potentiel à prélever l'énergie de la masse d'air en mouvement.

Le besoin de contrôle des turbines éoliennes remonte à leurs origines d'utilisation. Le but principal était la limitation de la puissance et de la vitesse de rotation pour protéger les turbines des vents forts. A nos jours, les turbines éoliennes sont devenues de tailles et de puissances plus grandes, les spécifications de contrôle plus exigeantes et les mécanismes de régulation plus sophistiqués. De plus, on s'est entendu à ce que les systèmes de commande pas simplement gardent la turbine dans sa zone de fonctionnement sûre, mais également améliorer l'efficacité et la qualité de conversion d'énergie ce qui demande une modélisation plus précise et plus exigeante et des techniques de commande différentes pour chaque gamme de vitesse de vent, faible, moyenne ou forte.

Dans ce chapitre du mémoire, on va essayer d'entamer les points suivants

- ❖ Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique (Loi de Betz).
- ❖ Différentes zones de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable.
- ❖ Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne.
- ❖ Modélisation de la turbine éolienne à vitesse variable.
- ❖ Technique d'extraction du maximum de puissance
- ❖ Résultats de simulation de la turbine.

II.2 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

Loi de Betz

L'éolienne est un système complet permettant de convertir l'énergie (mécanique) du vent en énergie électrique. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site [44].

La théorie globale du moteur éolien à axe horizontal a été établie par Albert Betz [2] [6] [15] [34]. Il suppose que les pales sont placées dans un air animé à l'infini en amont d'une vitesse V_1 et à l'infini en aval d'une vitesse V_2 . La production d'énergie ne pouvant se faire que par la conversion de l'énergie cinétique du vent, la vitesse V_2 est nécessairement inférieure à V_1 . Il en résulte que la veine de fluides traverse les pales en s'élargissant.

Désignons par V 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:

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (\text{II.1})$$

Ainsi, la masse de l'air en mouvement de densité ρ (elle varie avec la pression de l'air et la température) traversant la surface S balayée par les pales de l'éolienne comme présenté à la figure II.1 est donnée par:

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

Telle que $S = \pi \cdot R^2$ avec R étant le rayon du rotor.

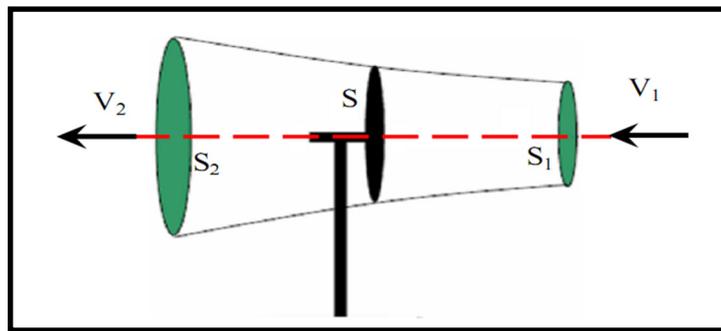


Figure II.1: Principe de la théorie de Betz

La puissance extraite du vent par l'éolienne P_m est égale à la masse multipliée par le carré de la diminution de la vitesse (selon la seconde loi de Newton) :

$$P_m = m \cdot \left(\frac{V_1^2 - V_2^2}{2} \right) \quad (\text{II.3})$$

En remplaçant m par son expression dans (II.2):

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2) \cdot \left(\frac{V_1^2 - V_2^2}{2} \right) \quad (\text{II.4})$$

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

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot V_1^3}{2} \quad (\text{II.5})$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et celle du vent non perturbé sera alors :

$$\frac{P_m}{P_v} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} \quad (\text{II.6})$$

Le ratio $\frac{P_m}{P_v}$ est appelé coefficient de puissance (C_p).

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation (II.6) présenté dans la figure (II.2), en traçant la courbe de $\frac{P_m}{P_v}$ en fonction de $\frac{V_2}{V_1}$. Nous pouvons constater aisément que la fonction atteint son maximum pour $\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{3}$, la valeur maximale pour la puissance extractible du vent ne dépasse pas la valeur maximale de $16/27$ soit 0,59 de la puissance totale.

Ceci a été dérivé la première fois par A. Betz, c'est pourquoi on l'appelle le " facteur de Betz " ou " limite de Betz " [37]. Cette valeur est la valeur théorique maximale du coefficient de puissance, donc, l'efficacité théorique maximale qu'un convertisseur d'énergie éolienne peut avoir est 59,3%. Il est bien de mentionner que cette valeur du coefficient de puissance a été obtenue pour un idéal convertisseur de flux sans frottement.

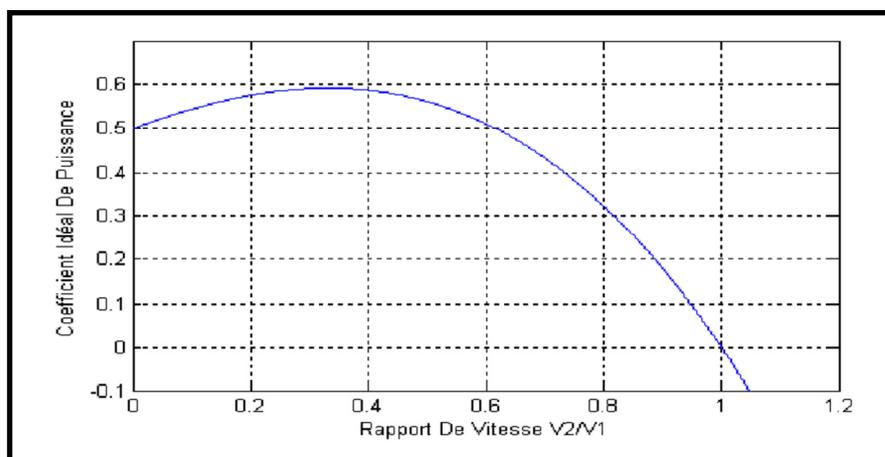


Figure II.2: Coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse du vent.

Dans des cas réels, l'éolienne aura toujours un plus petit coefficient maximum de puissance que le facteur de Betz; à cause des pertes aérodynamiques qui dépendent de la conception du rotor et de la construction (nombre de pales, poids, rigidité, etc.). Le coefficient de puissance et l'efficacité d'un système d'éoliennes sont différents. L'efficacité d'une éolienne inclut la perte dans la transmission mécanique, la production d'électricité, les pertes du convertisseur, etc., où le coefficient de puissance est l'efficacité de convertir la puissance du vent en puissance mécanique dans l'arbre du rotor.

Cette limite n'est 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. La figure (II.3) donne un aperçu sur les coefficients de puissance (C_p) en fonction de la vitesse réduite (λ) pour différents types d'éoliennes.

Sachant que les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8m. D'après la figure (II.3) on remarque que leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. En ce qui concerne les éoliennes à marche rapide, elles sont les plus utilisées et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts. Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, on remarque leur coefficient de puissance atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Ce type d'éolienne fonctionne rarement au-dessous d'une vitesse de vent de 3m/s [2].

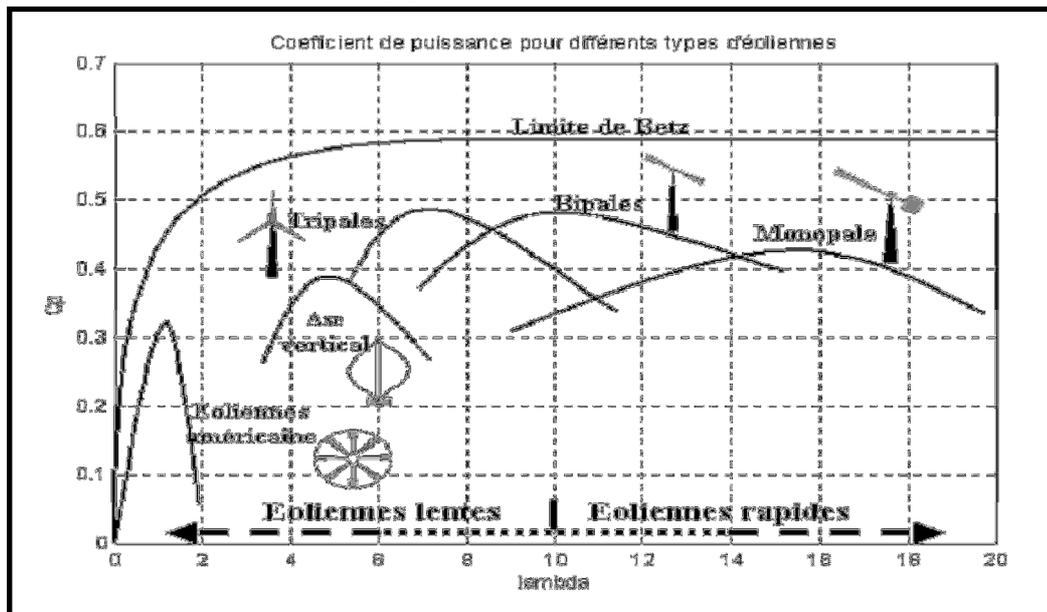


Figure II.3: Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.

II.3 Stratégies de fonctionnement d'une éolienne

II.3.1 Bilan des forces sur une pale

La figure (II.4) représente la section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur. La vitesse du vent arrivant face à cette pale, est représentée par le vecteur \vec{V} . Le vecteur \vec{V}_{rot} représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée \vec{V}_{res} .

L'action du vent sur la pale produit une force \vec{F}_{res} qui se décompose en une poussée axiale \vec{F}_{ax} directement compensée par la résistance mécanique du mat et une poussée en direction de la rotation \vec{F}_{rot} qui produit effectivement le déplacement.

Chaque turbine éolienne est ainsi dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur nominale pour une vitesse de vent nominale donnée. Lorsque la vitesse de vent devient trop élevée ou si la génératrice nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale [15].

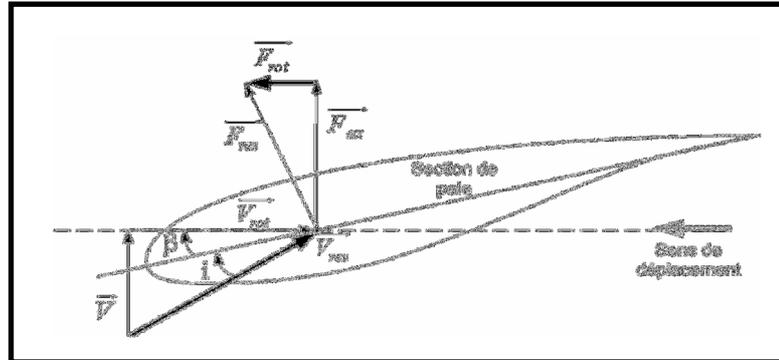


Figure II.4: Bilan des forces sur une pale.

II.3.2 Les différentes zones de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable

Les objectifs de la régulation sont d'assurer la sécurité de l'éolienne par vents forts et de limiter la puissance. Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer sur son arbre une puissance dénommée puissance nominale P_n . Cette dernière est obtenue à partir d'une vitesse du vent V_n , dénommée vitesse nominale. Lorsque la vitesse du vent est supérieure à V_n la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques (turbines, mat et structure), de sorte que la puissance récupérée par la turbine ne dépasse pas la puissance nominale de l'éolienne [2].

La caractéristique Puissance-vitesse d'une éolienne peut se décomposer en quatre (4) zones présentées dans la figure (II.5) [1] [7].

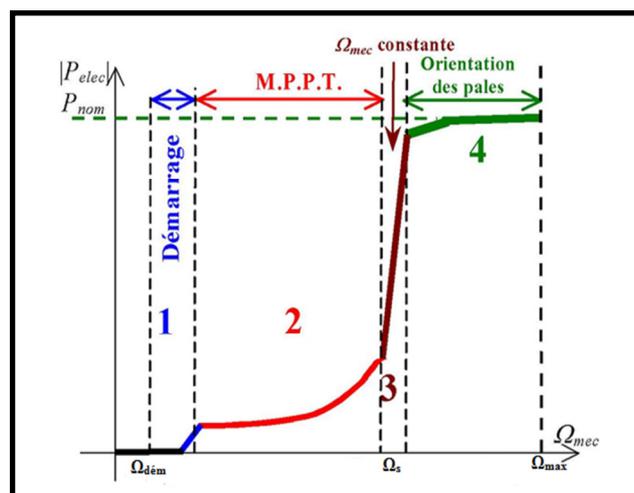


Figure II.5: Caractéristique puissance vitesse d'une éolienne de grande puissance.

Zone 1 : C'est la zone de démarrage de la machine, elle commence lorsque la vitesse mécanique est supérieure à une certaine vitesse de démarrage Ω_{dem} . (C'est la vitesse mécanique de la génératrice pour la

quelle éolienne a démarré).

Zone2 : Lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale MPPT (Maximum Power Point Tracking). Pour extraire le maximum de puissance, l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale afin d'obtenir un C_p maximal. Dans cette zone, la vitesse mécanique varie et peut atteindre une valeur proche de la vitesse nominale, la puissance électrique augmente rapidement.

Zone3 : Au-delà, l'éolienne fonctionne à vitesse constante. Dans cette zone, la puissance de la génératrice atteint des valeurs plus importantes, jusqu'à 90% de la puissance nominale P_{nom} .

Zone4 : Arrivée à la puissance nominale P_{nom} , une limitation de la puissance générée est effectuée à l'aide d'un système d'orientation des pales. Au-delà de la vitesse Ω_{max} , un dispositif d'urgence est actionné de manière à éviter une rupture mécanique.

Par sécurité, si la vitesse du vent devient trop importante et risque d'endommager l'éolienne, l'angle de calage des pales se fixe à 90° . C'est la mise en drapeau qui met fin au fonctionnement de l'éolienne jusqu'à ce que la vitesse du vent devienne moins importante.

En pratique le passage de la zone 2 à la zone 4 est un peu particulier. En effet la vitesse de rotation est contrôlée par le couple électromagnétique C_{em} en zone 2 et, en zone 4 c'est la puissance qui doit être contrôlée par le dispositif d'orientation des pales.

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

II.3.3 Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne

La plupart des grandes turbines éoliennes utilisent deux principes de contrôle aérodynamique pour limiter la puissance extraite à la valeur de la puissance nominale de la génératrice:

II.3.3.1 Système à décrochage aérodynamique « Stall »

La plupart des éoliennes connectées au réseau électrique nécessitent une vitesse de rotation fixe pour des raisons de cohérence de fréquence avec le réseau. Le système de limitation de vitesse le plus simple et le moins coûteux est un système de limitation naturelle (intrinsèque à la forme de la pale) dit "Stall". Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence i devient important, c'est à dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale V_n , l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale (Figure II.6) et par conséquent une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation.

Ce système est simple et relativement fiable mais il manque de précision car il dépend de la masse

volumique de l'air et de la rugosité des pales donc de leur état de propreté. Il peut, dans certains cas, être amélioré en autorisant une légère rotation de la pale sur elle-même (système "Stall actif") permettant ainsi de maximiser l'énergie captée pour les faibles vitesses de vent. Pour les fortes vitesses de vent, la pale est inclinée de façon à diminuer l'angle de calage β et renforcer ainsi l'effet "Stall" de la pale. La répercussion des variations de vitesse de vent sur le couple mécanique fournie par l'éolienne est ainsi moins importante [8].

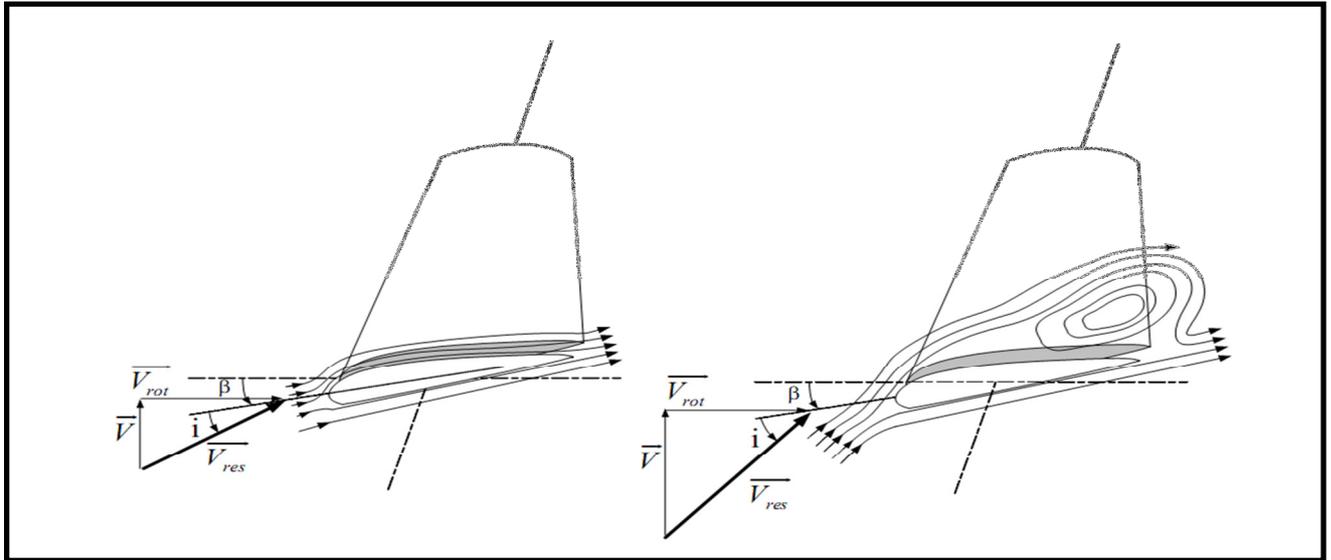


Figure II.6: Flux d'air sur un profil de pale " Stall ".

II.3.3.2 Système à pas variable ou à calage variable ou système « pitch »

Sur une éolienne contrôlée à calage variable (appelée aussi une éolienne à pas variable), le contrôleur électronique vérifie plusieurs fois par seconde la puissance de sortie de l'éolienne. En cas de puissance de sortie trop élevée, le contrôleur électronique de l'éolienne envoie une commande au dispositif de calage (Le calage des pales est commandé par un vérin hydraulique alimenté par une centrale hydraulique [15]) qui pivote immédiatement les pales légèrement sur le côté, hors du vent. Inversement, les pales seront pivotées de manière à pouvoir mieux capter de nouveau l'énergie du vent, dès que le vent aura baissé d'intensité (Figure II.7).

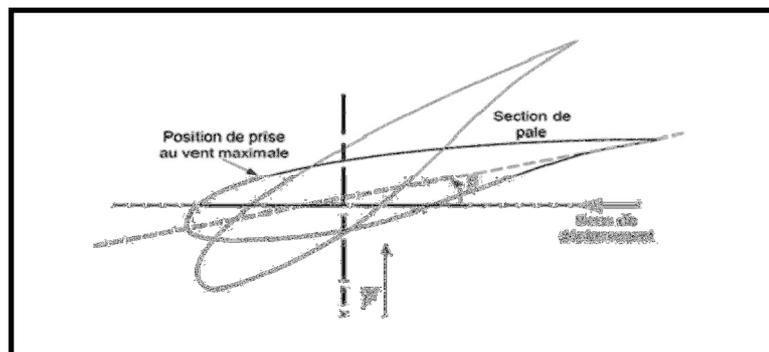


Figure II.7: Variation de l'angle de calage d'une pale.

Concevoir une éolienne à pas variable suppose une ingénierie très avancée afin d'assurer le positionnement exact des pales. En général, le 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 assurer le meilleur rendement possible à tout moment (Figure II.8) [24].

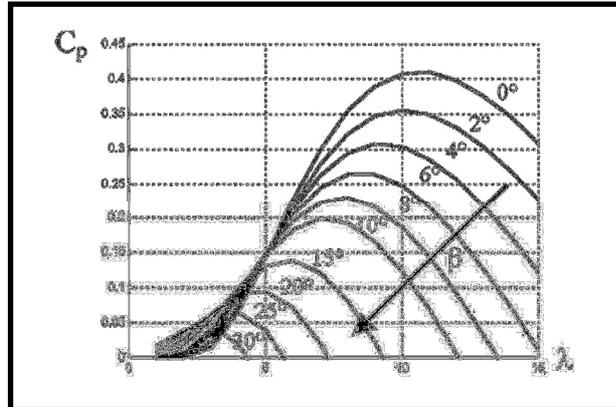


Figure II.8: Influence de l'angle de calage sur le coefficient de puissance.

II.4 Modélisation de la turbine éolienne à vitesse variable

La vitesse du vent qui représente la grandeur d'entrée du système de conversion d'énergie éolienne, a une variation aléatoire et a une caractéristique très fluctuante. Alors la modélisation de la turbine éolienne est indispensable et cela pour une meilleure exploitation de la vitesse du vent [39].

II.4.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine

La partie mécanique de la turbine que nous étudions comprend trois pales orientables et de longueur R . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse $\Omega_{turbine}$ qui est relié à un multiplicateur de gain G . Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique (figure II.9).

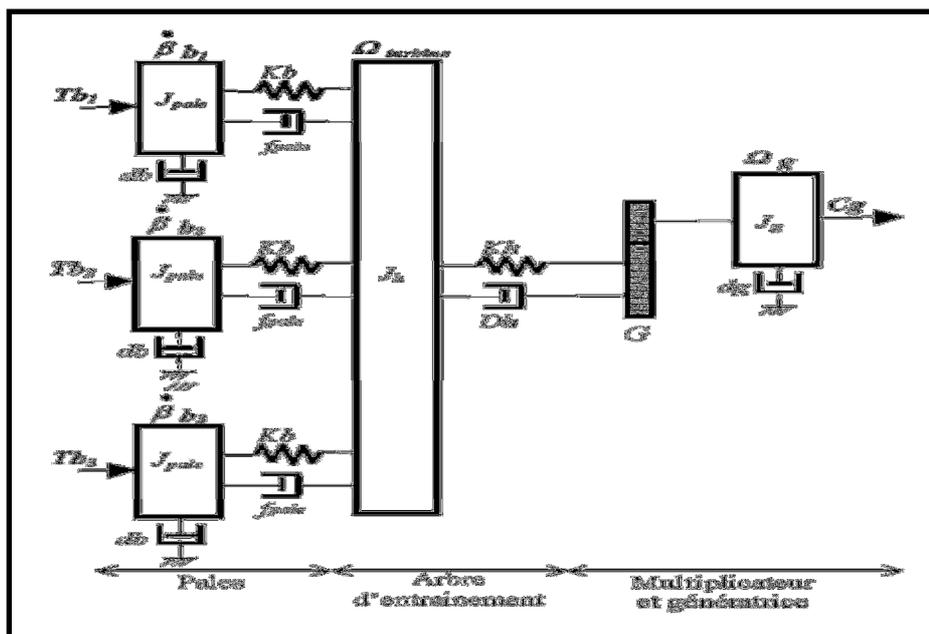


Figure II.9: Système mécanique de l'éolienne.

Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc :

- ❖ La même inertie J_{pale} ;
- ❖ La même élasticité Kb ;
- ❖ Le même coefficient de frottement par rapport à l'air db .

Ces pales sont orientables et présentent toutes un même coefficient de frottement par rapport au support f_{pale} . Les vitesses d'orientation de chaque pale sont notées $\dot{\beta}b_1$, $\dot{\beta}b_2$, $\dot{\beta}b_3$. Chaque pale reçoit une force Tb_1, Tb_2, Tb_3 qui dépend de la vitesse de vent qui lui est appliquée.

L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par :

- ❖ Son inertie J_h .
- ❖ Son élasticité Kh .
- ❖ Son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur Dh

Le rotor de la génératrice possède :

- ❖ Une inertie Jg .
- ❖ Un coefficient de frottement dg ;

Ce rotor transmet un couple entraînant (C_g) à la génératrice électrique et tourne à une vitesse notée Ω_{mec} .

Si l'on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toute les forces de poussée ($Tb_1 = Tb_2 = Tb_3$) alors on peut considérer l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. De par la conception aérodynamique des pales, leur coefficient de frottement par rapport à l'air (db) est très faible et peut être ignoré. De même, la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice.

On obtient alors un modèle mécanique comportant deux masses (Figure II.10).

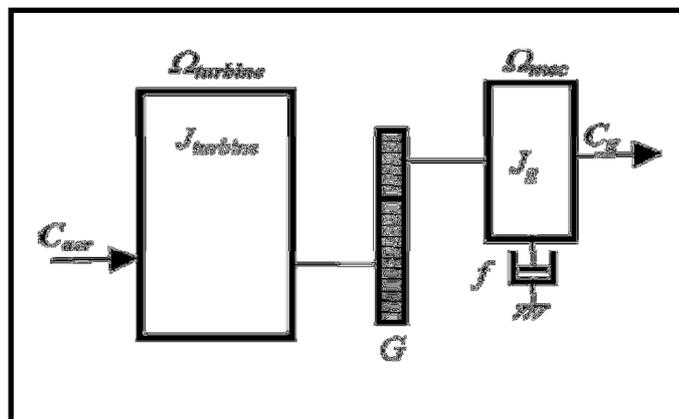


Figure II.10: Modèle mécanique simplifiée de la turbine.

II.4.2 Modélisation de la turbine

Le dispositif, que nous étudions ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G (figure II.11).

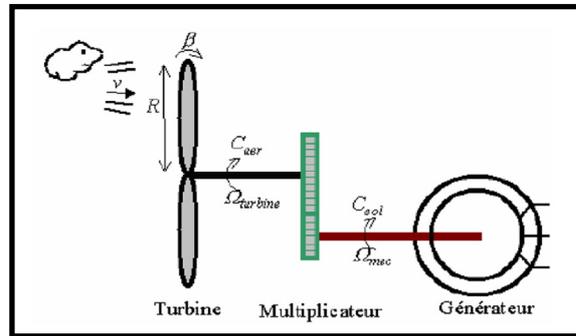


Figure II.11: Schéma de la turbine éolienne.

II.4.2.1 Production d'énergie mécanique

En combinant les équations (II.2), (II.5) et (II.6), la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi [2] [15]:

$$P_{aéro} = \frac{P_m}{P_v} \cdot P_v = C_p \cdot P_v = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \quad (II.7)$$

Avec:

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_{turbine}}{V_1} \quad (II.8)$$

Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse G , la puissance mécanique P_{mg} disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par:

$$P_{aéro} = \frac{1}{2} \cdot C_p \left(\frac{R \cdot \Omega_{mec}}{G \cdot V_1} \right) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \quad (II.9)$$

Avec:

C_p : Coefficient de puissance.

λ : Vitesse spécifique.

β : Angle d'inclinaison des pales [°].

ρ : Densité de l'air.

R : Longueur de la pale.

V_1 : Vitesse du vent.

$\Omega_{turbine}$: Vitesse de rotation de la turbine (avant le multiplicateur).

Ω_{mec} : Vitesse de rotation du générateur (après le multiplicateur).

G : Rapport du multiplicateur.

$$G = \frac{\Omega_{mec}}{\Omega_{turbine}} \quad (II.10)$$

II.4.2.2 Le coefficient de puissance

Le coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$ représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. La modélisation du couple éolien va donc dépendre essentiellement de la prise en compte de la spécificité du coefficient $C_p(\lambda, \beta)$ puisqu'il dépend grandement du type et de la caractéristique de la turbine. Plusieurs expressions du coefficient de puissance ont été proposées dans la littérature [6], ou par des constructeurs de turbines éoliennes.

La turbine à vent est un système aérodynamique complexe à modéliser, cependant des modèles mathématiques simples sont souvent utilisés. L'expression de coefficient de puissance que nous allons utiliser dans notre étude est donnée par [6] :

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \cdot \left(C_2 \cdot \frac{1}{\lambda_i} - C_3 \cdot \beta - C_4 \right) \cdot \exp\left(\frac{-C_5}{\lambda_i}\right) + C_6 \cdot \lambda_i \quad (II.11)$$

Dans cette formule, le paramètre λ_i dépend également de λ et β

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \cdot \beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3} \quad (II.12)$$

Les six coefficients définis, $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ dépendent de la turbine considérée sont présentés dans le tableau suivants [6]:

Coefficient	Valeur
C_1	0.5176
C_2	116
C_3	0.4
C_4	5
C_5	21
C_6	0.0068

Tableau II.1: Coefficients définissant l'évolution de C_p .

La figure (II.12) représente le coefficient de puissance C_p , calculé à partir de l'équation (II.11), en fonction du rapport de vitesse λ pour différents angles d'inclinaison des pales β . On remarque que si,

pour un angle constant β_i , on pouvait maintenir le coefficient de vitesse λ constant et égal λ_{opt} à chaque instant, la puissance captée par l'éolienne serait maximale [31]. Cette figure montre le λ_{opt} correspondant à un angle d'inclinaison des pales β_i . Cette condition ne peut être vérifiée qu'avec l'utilisation de la vitesse variable. En effet, afin de maintenir $\lambda = \lambda_{opt}$, il est nécessaire de faire varier la vitesse de rotation du générateur (et de l'éolienne) avec les variations de vitesse du vent, selon l'équation (II.8).

Pour un fonctionnement à vitesse de rotation fixe, le coefficient λ varie avec la vitesse du vent : la puissance captée est maximale seulement pour une vitesse du vent donnée (généralement la vitesse nominale de fonctionnement).

Le fonctionnement à vitesse de rotation variable permet d'optimiser l'énergie captée par l'éolienne mais demande la mise en œuvre d'un convertisseur avec sa commande, ce qui entraîne un surcoût par rapport à la vitesse fixe.

Sur cette figure, plusieurs courbes sont distinguées mais nous sommes intéressés à celle qui possède le plus haut sommet. Cette courbe est caractérisée par le point optimal ($\lambda_{opt} = 8.1, C_{p \max} = 0.48$ et $\beta = 0^\circ$) qui est le point correspondant au maximum du coefficient de puissance C_p et donc au maximum de la puissance mécanique récupérée [15].

Nous remarquons que l'augmentation β de permet de dégrader le coefficient C_p , et par conséquent, provoquer la diminution de la puissance mécanique récupérée sur l'axe de la turbine éolienne.

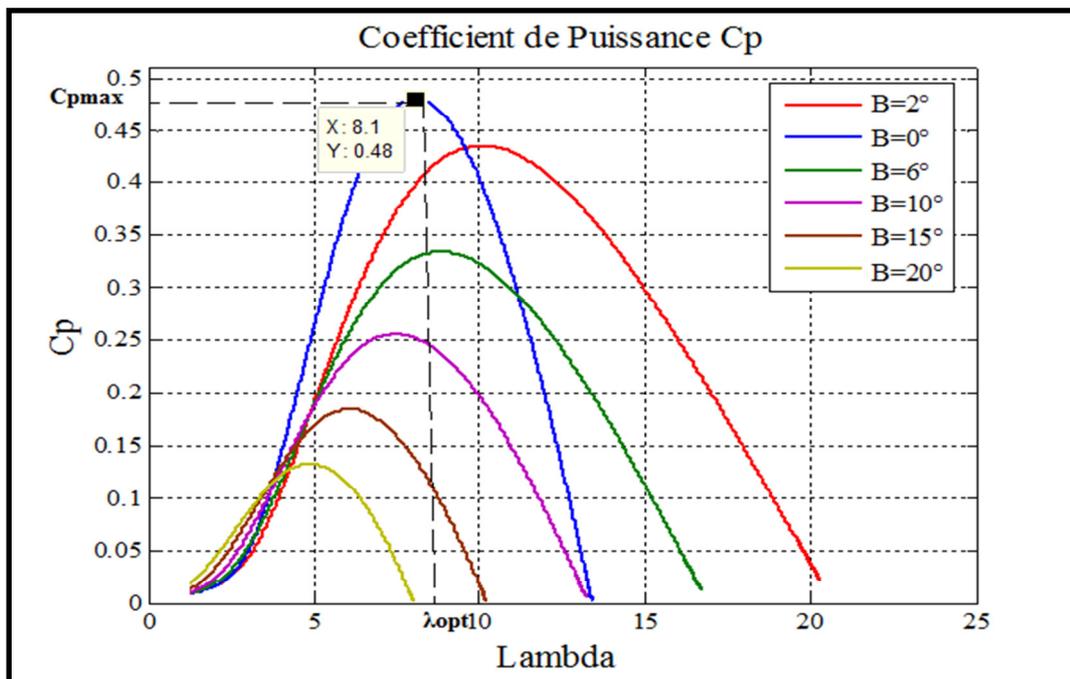


Figure II.12: Coefficient de puissance C_p en fonction de λ pour différents β .

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique est donc directement déterminé par [1]:

$$C_{aéro} = \frac{P_{aéro}}{\Omega_{turbine}} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V_i^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (II.13)$$

II.4.2.3 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice (Figure II.11). Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aéro}}{G} \quad (II.14)$$

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

II.4.2.4 Equation dynamique de l'arbre

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie $J_{turbine}$ et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice [1].

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

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

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

Où J est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice. Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{vis} , et le couple issu du multiplicateur C_g .

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (II.18)$$

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f :

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \quad (II.19)$$

Avec:

$$f = \frac{f_{turbine}}{G^2} + f_g \quad (II.20)$$

II.4.2.5 Graphe informationnel causal du modèle de la turbine (GIC)

Une représentation globale du modèle de cette turbine utilisant le graphe informationnel causal est montré par la figure (II.13).

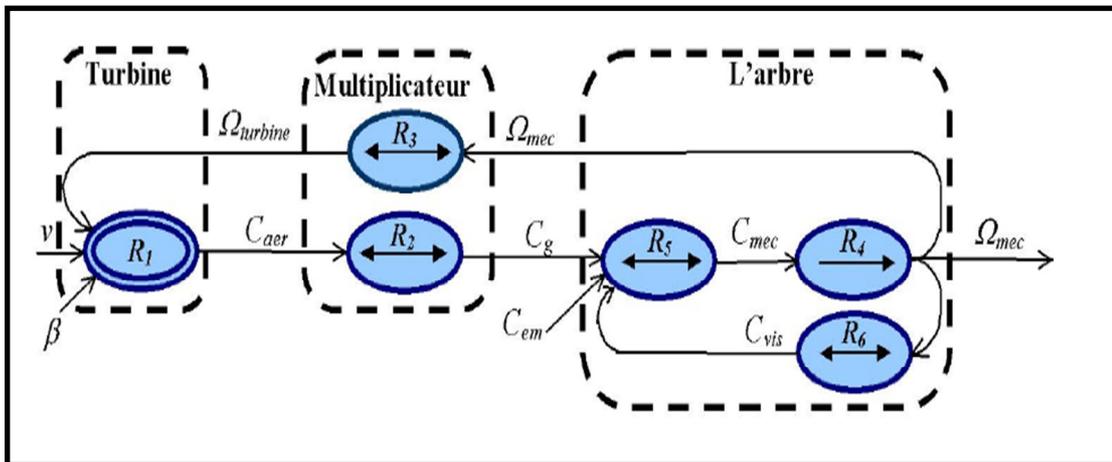


Figure II.13: Graphe informationnel causal du modèle de la turbine.

Avec :

R_1 = l'équation (II.13).

R_2 = l'équation (II.14).

R_3 = l'équation (II.15).

R_4 = l'équation (II.17).

R_5 = l'équation (II.18).

R_6 = l'équation (II.19).

Ce graphe illustre les principes de causes à effets des grandeurs qui interviennent au niveau de la turbine. Cette dernière génère le couple aérodynamique (relation R_1) qui est appliqué au multiplicateur. Les entrées de la turbine sont la vitesse du vent, l'angle d'orientation des pales, et la vitesse de rotation de la turbine. Le modèle du multiplicateur transforme la vitesse mécanique et le couple aérodynamique respectivement en vitesse de rotation de la turbine et en couple de multiplicateur (relations R_4 et R_3). Le modèle de l'arbre décrit la dynamique de la vitesse mécanique, il a donc deux entrées : le couple du multiplicateur, le couple électromagnétique fourni par la génératrice.

Le GIC montre que la vitesse de la turbine peut être contrôlée par action sur deux entrées : l'angle d'orientation des pales et le couple électromagnétique de la génératrice. La vitesse du vent est considérée comme une entrée perturbatrice à ce système.

Le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine se déduit aisément du GIC et est représenté par la figure (II.14).

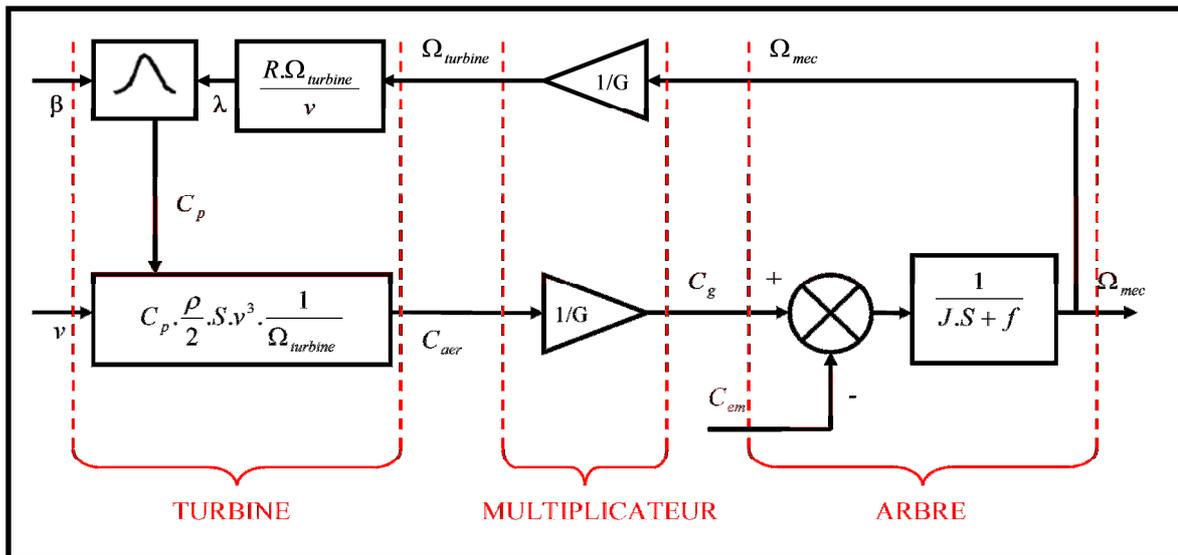


Figure II.14: Schéma bloc du modèle de la turbine.

II.5 Technique d'extraction du maximum de puissance

II.5.1 Bilan de puissance

L'équation (II.7) quantifie la puissance captée par la turbine éolienne. Cette puissance peut être essentiellement maximisée en ajustant le coefficient C_p . Ce coefficient étant dépendant de la vitesse de la génératrice (ou encore du ratio de vitesse λ), l'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet de maximiser la puissance électrique générée (le couple) en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quel que soit la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice. En régime permanent, la puissance aérodynamique $P_{aér}$ diminuée des pertes (représentées par les frottements visqueux) est convertir directement en puissance électrique (figure II.15).

$$P_{elec} = P_{aér} - Pertes \tag{II.21}$$

La puissance mécanique stockée dans l'inertie totale J et apparaissant sur l'arbre de la génératrice (P_{mec}) est exprimée comme étant le produit entre le couple mécanique (C_{mec}) et la vitesse (Ω_{mec}).

$$P_{mec} = C_{mec} \cdot \Omega_{mec} \tag{II.22}$$

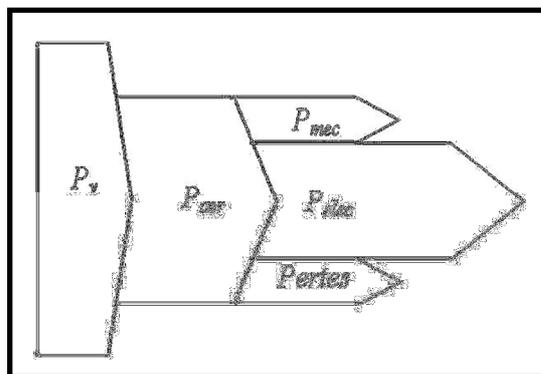


Figure II.15: Diagramme de conversion de puissance.

Dans cette partie, nous présentons l'un des différentes stratégies pour contrôler le couple électromagnétique (et indirectement la puissance électromagnétique convertie) afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée. Ce principe est connu sous la terminologie Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T) et correspond à la zone 2 de la caractéristique de fonctionnement de l'éolienne. A travers la bibliographie nous avons distingué deux familles de structures de commande pour la maximisation de la puissance extraite [1]:

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

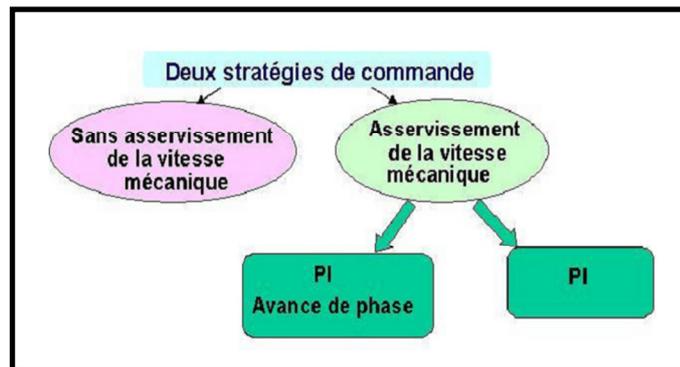


Figure II.16: Stratégies de commande de la turbine étudiée.

Dans notre mémoire, nous sommes intéressés au contrôle le couple électromagnétique par asservissement de la vitesse mécanique en utilisant le simple régulateur classique PI.

II.5.2 Maximisation de la puissance extraite

Le vent est une grandeur stochastique, de nature très fluctuante. Ces fluctuations constituent la perturbation principale de la chaîne de conversion éolienne et créent donc des variations de puissance.

Pour cette étude, on supposera que la machine électrique et son variateur sont idéaux et donc, quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique développé est à tout instant égal à sa valeur de référence.

$$C_{em} = C_{em.ref} \quad (II.23)$$

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

Comme a été expliqué auparavant, la vitesse est influencée par l'application de trois couples : Un couple éolien, un couple électromagnétique et un couple résistant. En regroupant l'action de ces trois couples, la vitesse mécanique n'est plus régie que par l'action de deux couples, le couple issu du multiplicateur C_g et le couple électromagnétique C_{em} .

$$\frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (C_g - f \cdot \Omega_{mec} - C_{mec}) \quad (II.24)$$

La structure de commande consiste à régler le couple apparaît sur l'arbre de la turbine de manière à fixer sa vitesse à une référence

Le couple électromagnétique de référence $C_{em\ ref}$ permettant d'obtenir une vitesse mécanique de la génératrice égale à la vitesse de référence Ω_{ref} obtenu par la relation suivant :

$$C_{em\ ref} = PI.(\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (II.25)$$

PI : est le régulateur de vitesse ;

Ω_{ref} : est la vitesse mécanique de référence.

Cette vitesse de référence dépend de la vitesse de la turbine à fixer ($\Omega_{turbine\ ref}$) pour maximiser la puissance extraite. En prenant en compte le gain du multiplicateur, on a donc :

$$\Omega_{ref} = G.(\Omega_{turbine\ ref}) \quad (II.26)$$

La référence de la vitesse de la turbine correspond à celle correspondant à la valeur optimale du ratio de vitesse $\lambda_{Cp\ max}$ (à β constant et égal à 0°) permettant d'obtenir la valeur maximale du C_p . figure (II.17).

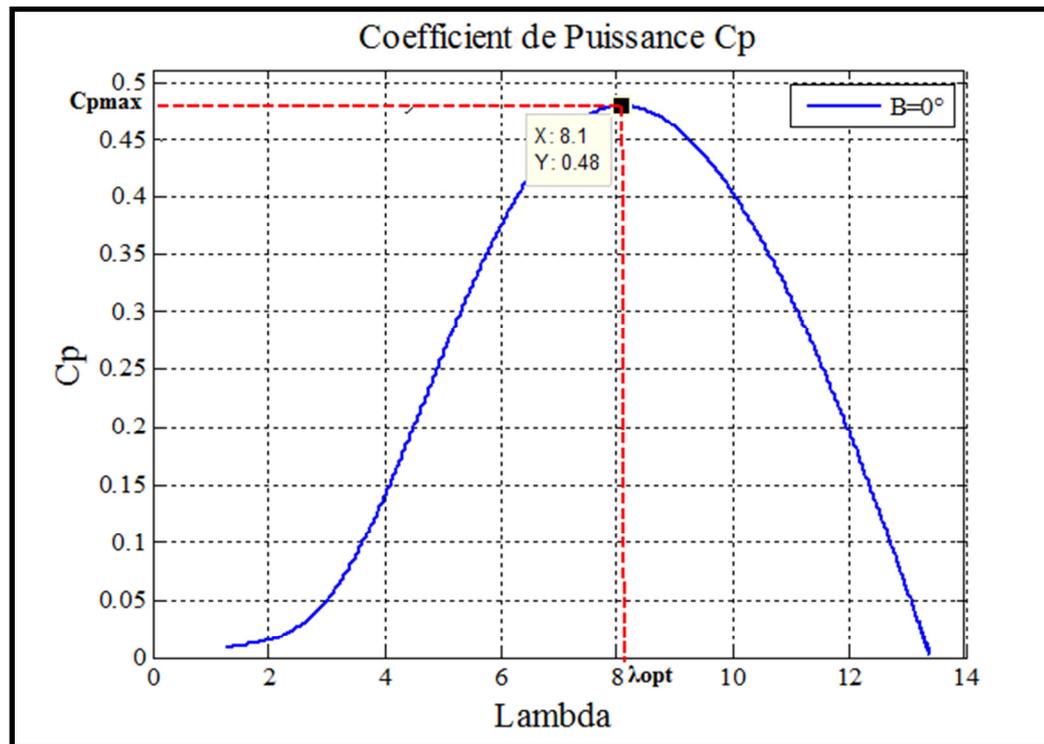


Figure II.17: Fonctionnement optimal de la turbine.

Elle est obtenue à partir de l'inversion de l'équation (II.8):

$$\Omega_{turbine\ ref} = \frac{\lambda_{Cp\ max} . V_1}{R} \quad (II.27)$$

II.5.3 Conception du correcteur de vitesse

L'action de correcteur de vitesse doit accomplir deux tâches:

- ❖ Il doit asservir la vitesse mécanique à sa valeur de référence.

- ❖ Il doit atténuer l'action du couple éolien qui constitue une entrée perturbatrice.

La représentation simplifiée sous forme de schéma blocs présenté dans la figure II.18.

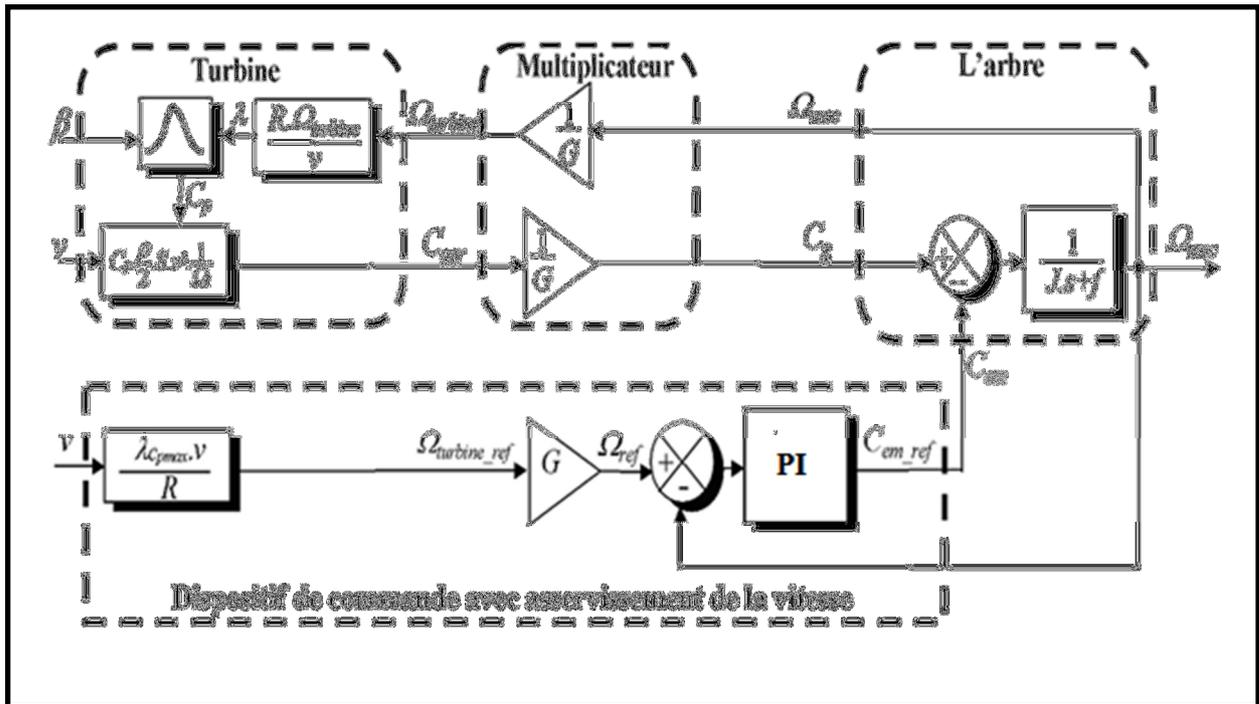


Figure II.18: Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse.

Différentes technologies de correcteur peuvent être considérer pour l'asservissement de vitesse. Dans l'annexe (B) nous détaillons le type de régulateur de correcteur proportionnel intégral (PI).

II.6 Résultats de simulation

Le modèle de la turbine présenté dans la figure (II.19) ainsi que toutes les structures de commande sont faits sous l'environnement Matlab/Simulink. Les résultats de simulation que nous allons présenter dont prévus pour une turbine de 10 kW dont les paramètres sont donnés dans l'annexe (A).

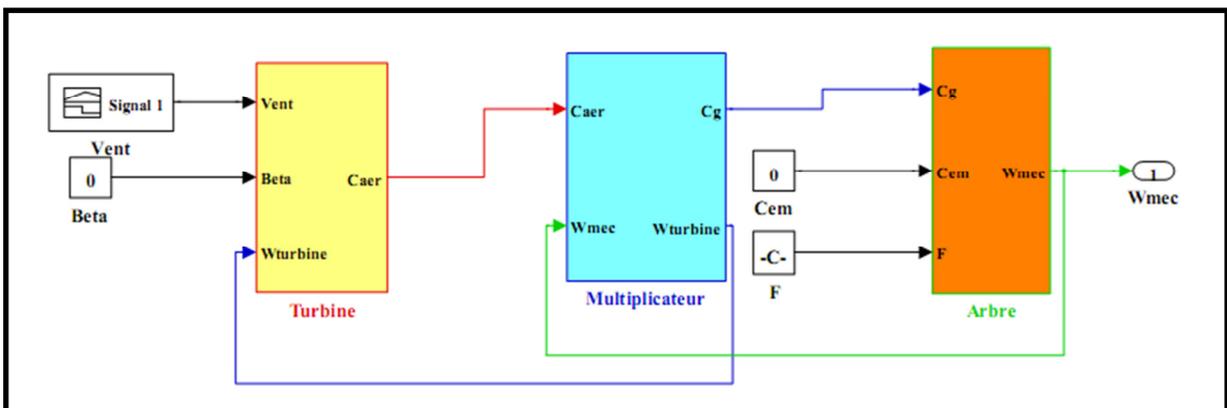


Figure II.19: Schéma bloc du modèle de la turbine en boucle ouverte.

La figure (II.20.a) présente le profil du vent qui sera appliqué pour la turbine éolienne dont valeur moyenne est autour de (6.5m/s). Cette vitesse est estimée en l'Algérie et en particulier dans le sud et l'ouest.

Les résultats de simulation montrent que la variation de la vitesse mécanique (rotor) figure (II.20.b) est adaptée à la variation de la vitesse du vent. Ceci montre l'influence de la variation de la vitesse mécanique en fonction de la vitesse du vent.

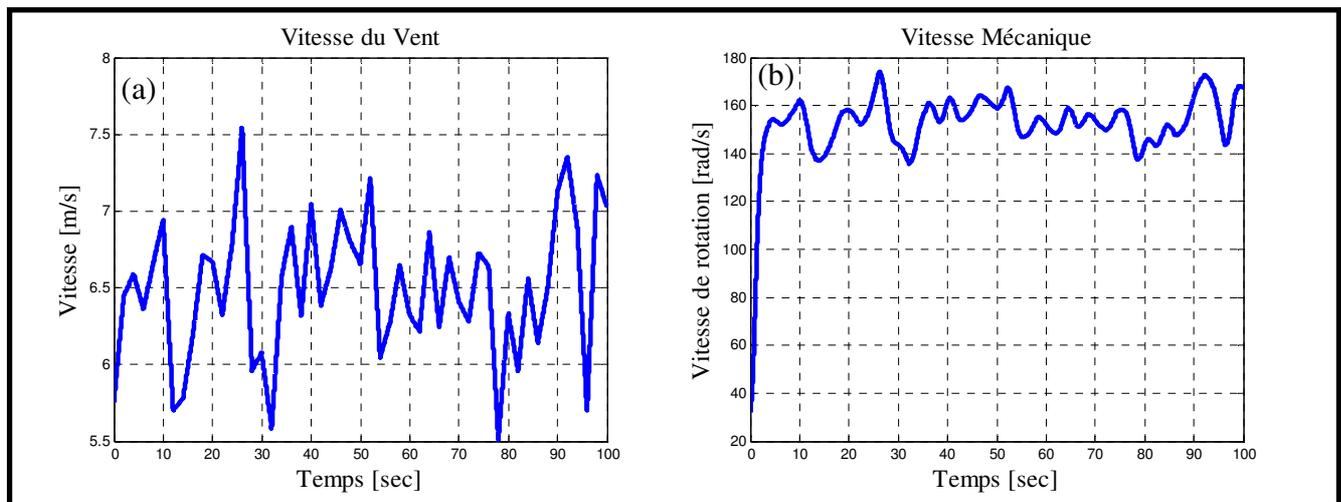


Figure II.20: Allure de vitesse: (a) de vent; (b): Mécanique.

Afin d'exploiter le maximum d'énergie cinétique du vent disponible, le système nommé MPPT est indispensable. La puissance captée par la turbine éolienne peut être essentiellement maximisée en ajustant le coefficient C_p . Ce coefficient étant dépendant de la vitesse de la génératrice (ou encore du ratio de vitesse λ). A cet effet il est nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser la puissance électrique générée (le couple) en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quelle que soit la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice. La figure (II.21) montre le modèle de la turbine dans la zone 2 (M.P.P.T) de fonctionnement de l'éolienne.

Nous avons effectué des simulations pour asservir la vitesse mécanique. Pour montrer cela, on a adapté un régulateur classique de type PI (Annexe B). La simulation du fonctionnement de la turbine dans la zone 2 a été réalisée par le logiciel Matlab/Simulink pendant une durée égale à 100s.

La figure (II.22) montre l'allure de la vitesse mécanique obtenue par le profil du vent représenté sur la figure (II.20.a). On constate que la vitesse mécanique suit à chaque instant sa valeur de référence.

Concernant le coefficient de puissance représenté dans la figure (II.23) est obtenu pour un angle de calage fixe ($\beta = 0^\circ$), qui nous donne un $\lambda_{opt} = 8.1$ montré dans la figure (II.24).

On remarque que le C_p et λ atteignent ces valeurs maximums, ils cherchent à être gardés en maximum possible dont le but d'augmenter la production, et varie légèrement selon le changement de la vitesse du vent.

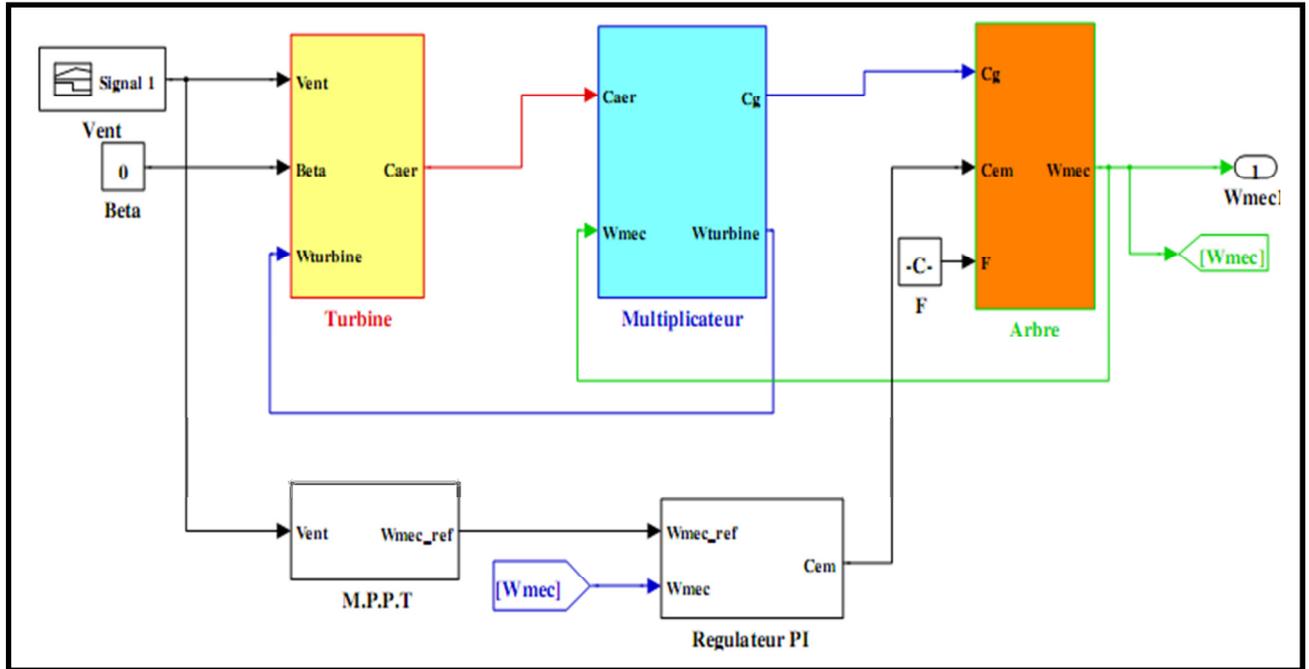


Figure II.21: Modèle de la turbine dans la zone 2 (M.P.P.T).

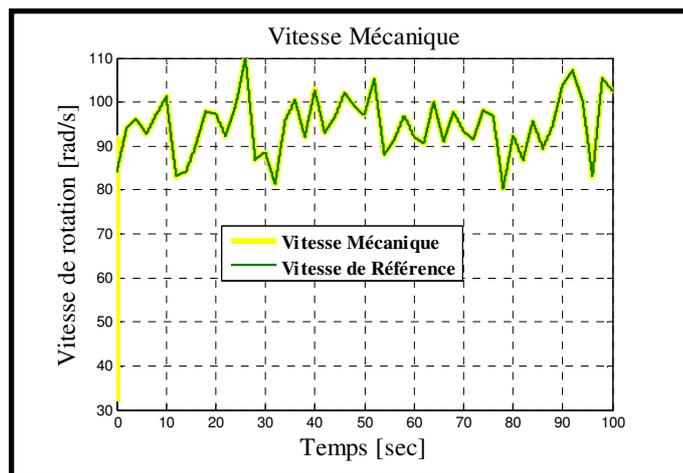


Figure II.22: La vitesse de rotation de la turbine (Zone 2).

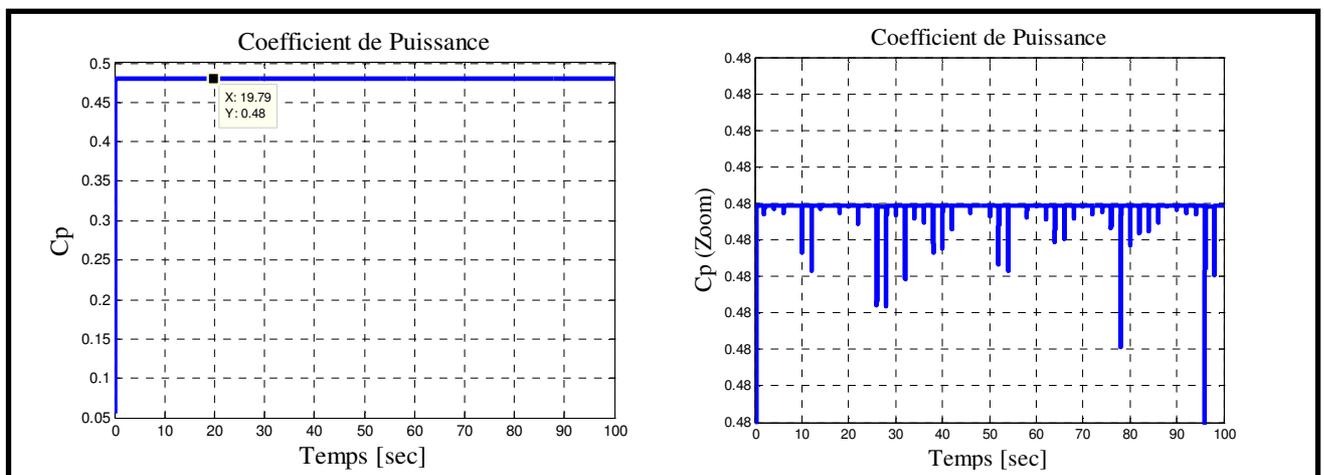


Figure II.23: Le coefficient de puissance (Zone 2).

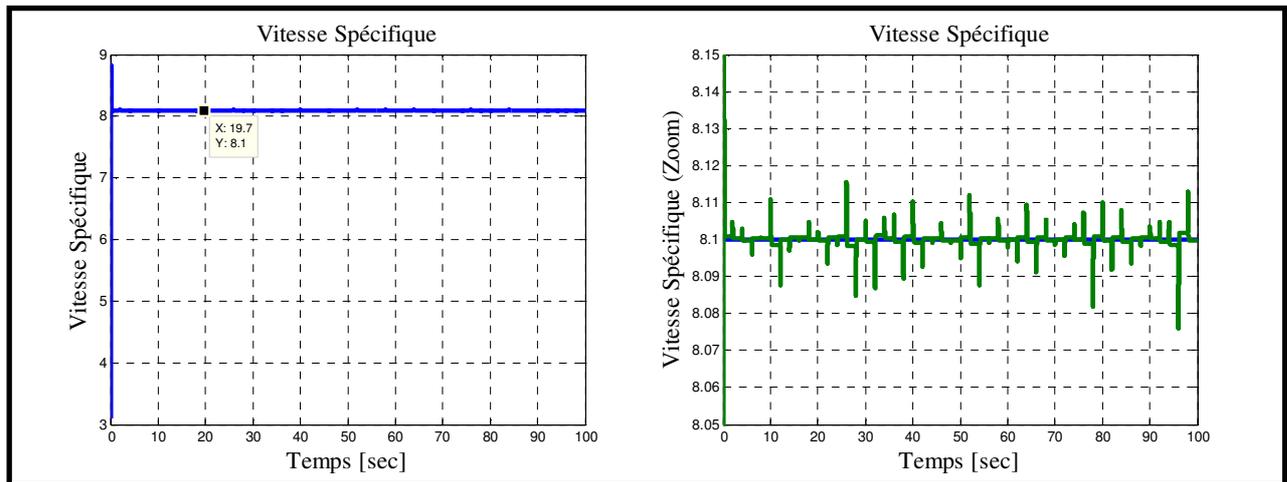


Figure II.24: La vitesse spécifique λ .

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit en premier lieu la conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique (Loi de Betz), la régulation mécanique de la puissance d'une éolienne a été décrite.

Par la suite un modèle mathématique de la turbine a été établi par sa simulation.

Après avoir présenté les différentes zones de fonctionnement d'une éolienne, nous avons détaillé la zone particulière, où la maximisation de l'énergie extraite du vent est effectuée. Cette opération est réalisée par le contrôle du couple électromagnétique généré.

Dans le prochain chapitre, nous allons étudier la modélisation et la commande de la génératrice asynchrone à double alimentation (MADA).

CHAPITRE III

Modélisation et la Commande du MADA

III.1. INTRODUCTION

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) porte un caractère qui permet d'occuper un large domaine d'application.

Ce type de machine est utilisé comme génératrice dans la plupart des projets de centrale éolienne, car il offre de grands avantages de fonctionnement.

Intégrée dans un système éolien, la génératrice asynchrone à double alimentation permet de fonctionner sur une large plage de vitesses de vent, et d'en tirer le maximum de puissance possible, pour chaque vitesse de vent.

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 transitée 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 de cette génératrice [1] [2] [27].

Il existe plusieurs types de machines asynchrones à double alimentation que nous allons décrire ci-dessous. Par ailleurs nous allons nous intéresser plus particulièrement à la génératrice utilisant des convertisseurs MLI (modulation de largeur d'impulsion) qui sont les plus utilisés et sont alors dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la machine (seulement 30%). Ainsi le surcoût engendré par la présence de bobinages au rotor est alors compensé par l'économie réalisée sur les convertisseurs.

La commande vectorielle par orientation du flux présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour le cas de la machine asynchrone double alimentée aussi bien en fonctionnement par générateur ou moteur. Dans cette optique, nous avons proposé une loi de commande pour la MADA basée sur l'orientation du flux statorique, utilisée pour la faire fonctionner en génératrice. Cette dernière met en évidence les relations entre les grandeurs statoriques et rotoriques. Ces relations vont permettre d'agir sur les signaux rotoriques en vue de contrôler l'échange de puissance active et réactive entre le stator de la machine et le réseau [7].

Nous allons commencer ce chapitre par une description générale de la MADA, ainsi que son principe de fonctionnement, ces applications et ses avantages. Ensuite, nous allons présenter son modèle mathématique qui est une étape très importante et nécessaire, que soit pour étudier les comportements ou/et élaborer des commandes des différents types des machines (à courant continu DC ou alternatif AC), nous proposons la modélisation classique de la machine asynchrone à double

alimentations en utilisant la transformation de Park, en se basant sur les hypothèses simplificatrices pour simplifier les calculs, nous citons les propriétés des différents repères et les équations mathématiques (magnétiques et électriques) qui gèrent la machine dans chaque repère. Enfin nous terminerons ce chapitre par l'étude de la commande vectorielle de la MADA accompagnée d'une interprétation des résultats de simulation de cette dernière.

III.2. Description et modes de fonctionnement de la MADA

III.2.1. Description de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation est aussi couramment appelée machine généralisée, car sa structure permet de considérer son comportement physique de façon analogue à une machine synchrone, à la différence près que le rotor n'est plus une roue polaire alimentée en courant continu ou un aimant permanent. Son rotor (figure III.1), est constitué d'un bobinage triphasé alimenté en alternatif. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne [15].

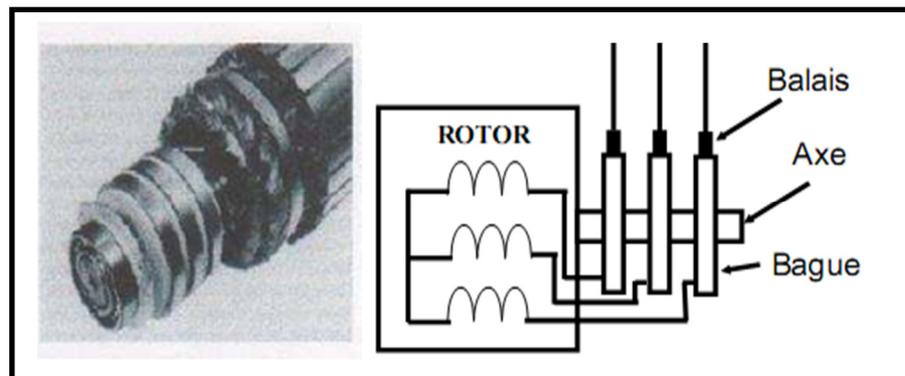


Figure III.1 : Structure de rotor bobinée.

Elle présente aussi un stator (figure III.2) analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone), constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. Le rotor tourne à l'intérieur de la cavité de la machine, il est séparé du stator par un entrefer.

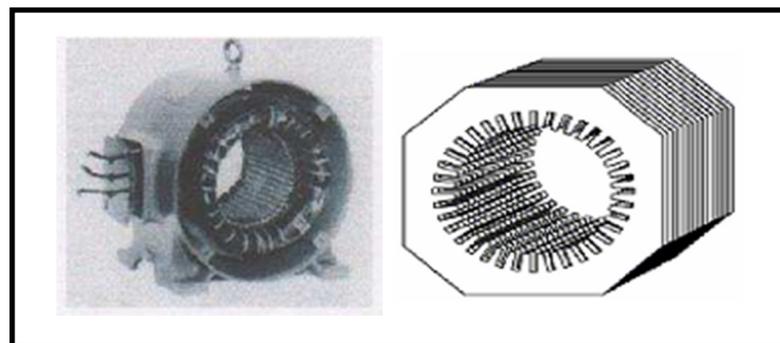


Figure III.2 : Structure de stator à induction.

Cette machine peut fonctionner comme générateur ou moteur. Le stator de la MADA connecté directement au réseau et le rotor et connecté à un convertisseur statique (figure III.3).

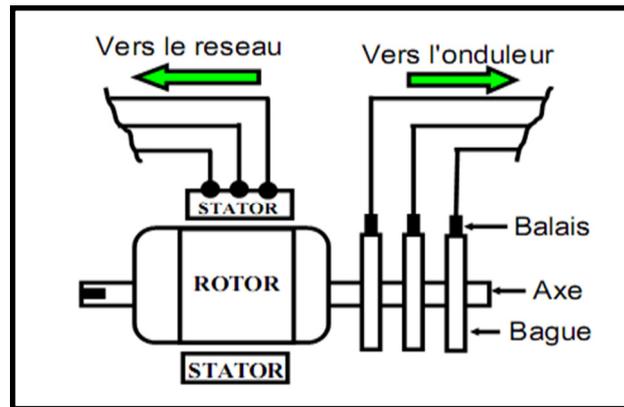


Figure III.3 : Structure d'une machine asynchrone à double alimentation.

III.2.2 Principe de fonctionnement

Malgré la présence des contacts glissants, la majorité des projets éoliens reposent sur l'utilisation de la machine asynchrone pilotée par le rotor [7]. L'insertion d'un convertisseur entre le rotor et le réseau permet de contrôler le transfert de puissance entre le stator et le réseau, mais également pour les vitesses supérieures au synchronisme, du rotor vers le réseau. C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance.

La figure (III.4) montre le schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné pilotée par le rotor.

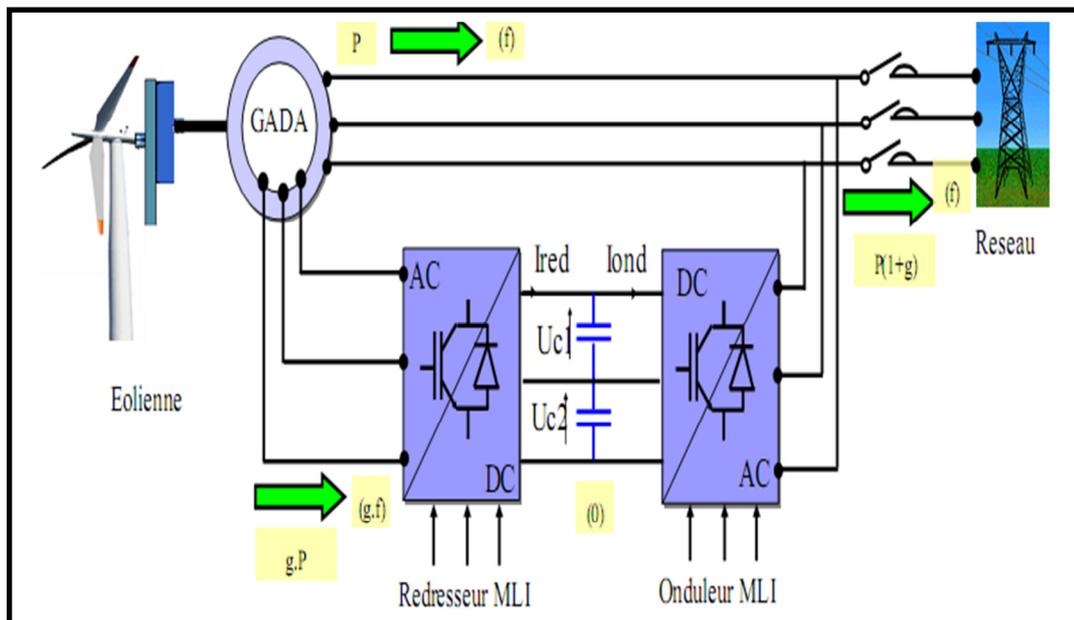


Figure III.4 : Schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné pilotée par le rotor.

Pour expliquer son principe de fonctionnement, en négligeant toutes les pertes. En prenant en compte cette hypothèse, la puissance P est fournie au stator et traverse l'entrefer : une partie de cette puissance

fournie, $(1-g).P$, est retrouvée sous forme de puissance mécanique ; le reste, $g.P$ sort par les balais sous forme de grandeur alternatives de fréquence $g.f$. Ces grandeurs, de fréquence variable, sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique, auquel elle est renvoyée, par l'intermédiaire du deuxième convertisseur. Donc le réseau reçoit $(1+g).P$. Les bobinages du rotor sont accessibles grâce à un système de balais et de collecteurs comme il est illustre sur la figure (III.3).

Une fois connecté au réseau, un flux magnétique tournant à vitesse fixe apparaît au stator. Ce flux dépend de la reluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage et donc du courant statorique. Pendant la rotation, le flux magnétique généré par le stator crée des f.e.m dans le bobinage du rotor. Le rapport entre les f.e.m créés au rotor et au stator est :

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

N_r et N_s : sont respectivement le nombre de spires des bobinages rotorique et statorique.

ω_s et ω_{mec} : sont respectivement les pulsations de synchronisme et mécanique de la machine. En définissant le glissement par :

$$g = \frac{\omega_s - \omega_{mec}}{\omega_s} \quad (III.2)$$

L'équation (III.1) devient :

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

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

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

Donc le rapport entre S_r au rotor et la puissance S_s au stator devient :

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

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

III.2.3. Mode de fonctionnement de la MADA

Comme la machine asynchrone à cage, la MADA fonctionne en moteur et en générateur, la

différence réside dans le fait que pour la MADA ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement.

Effectivement, une machine doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au-dessus pour être en générateur. Ici c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité fonctionnement en hyper ou hypo synchrone aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur [6] [15]. Cette propriété fondamentale a fait de la MADA le choix par excellence des entraînements à vitesse variable et surtout ces dernières années pour la génération d'énergie éolienne à vitesse variable. Nous allons présenter successivement ces différents modes de configurations fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation dont le stator est relié directement au réseau et le rotor est relié au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur [12].

Où : P_s représente la puissance statorique, P_r la puissance rotorique et P_m la puissance mécanique.

III.2.3.1. Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

La figure (III.5) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement moteur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor.

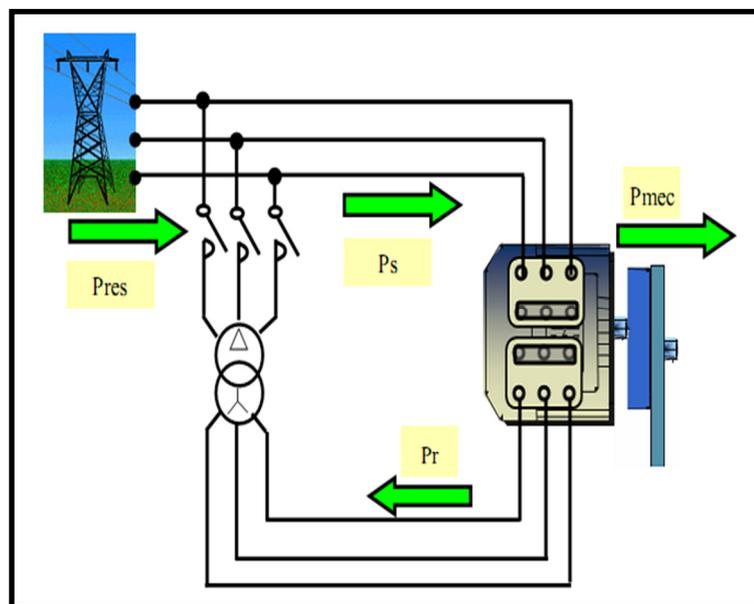


Figure III.5 : Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.

III 2.3.2 Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

La figure (III.6) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. On a donc un fonctionnement moteur en dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce

fonctionnement.

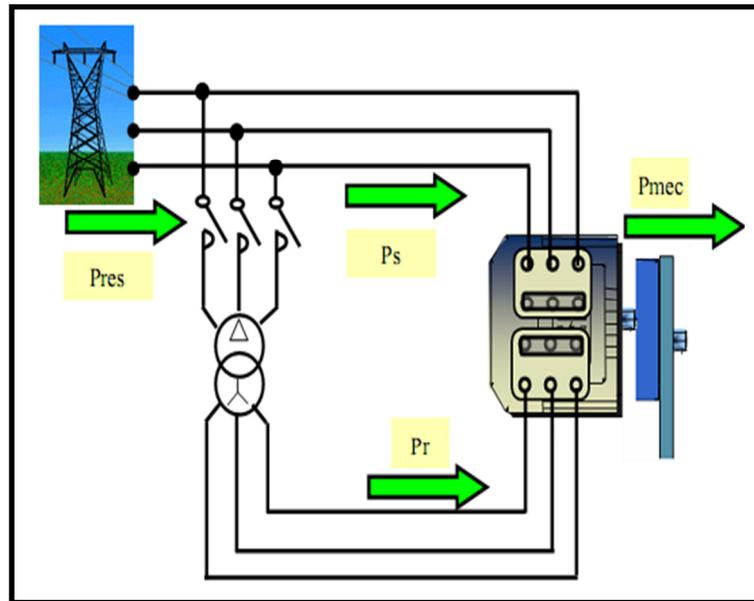


Figure III.6 : Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.

III.2.3.3 Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone

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

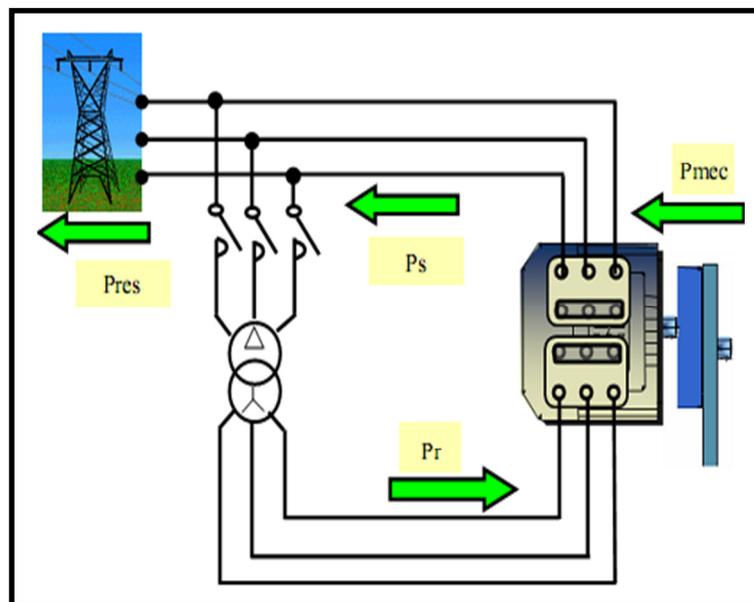


Figure III.7 : Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone.

III.2.3.4 Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone

La figure (III.8) montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut avoir

ce mode fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en pertes joule dans le rotor.

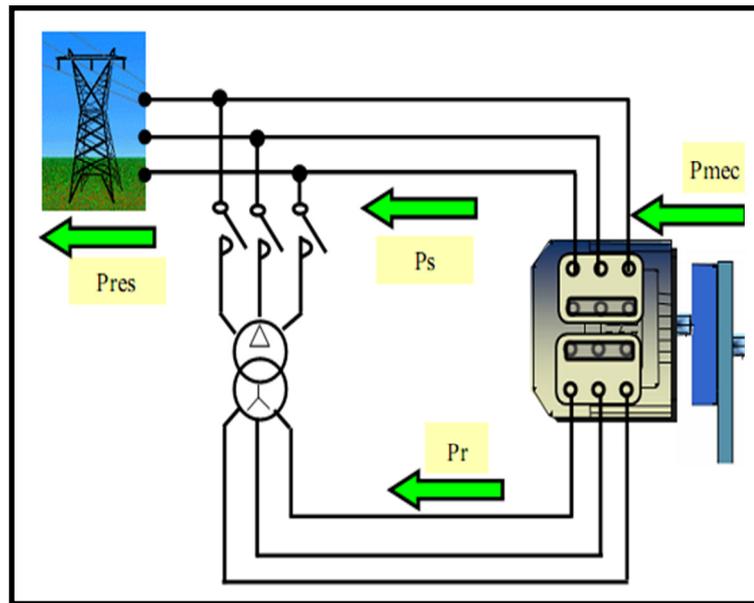


Figure III.8 : Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone.

III.3 Domaine d'applications de la MADA

Actuellement la machine asynchrone à double alimentation occupe une large place dans les applications industrielles, grâce à ces nombreux avantages. En effet, la MADA est très utilisée en mode générateur dans les applications d'énergie renouvelable notamment dans les systèmes éoliens [21]. De plus, le fonctionnement en générateur présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée telles que:

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

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

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

On note que les applications de la MADA en moteur sont relativement très limitées, parmi celles-ci on trouve principalement, la traction électrique et les systèmes de pompage.

III.4 Avantages et inconvénients de la MADA

Comme les autres machines, la MADA présente quelques avantages et inconvénients qui sont liés à plusieurs facteurs, sa structure, sa stratégie de commande et ses applications [2] [21].

III.4.1 Avantages de la MADA

Le principal avantage de la MADA est la possibilité de fonctionner à vitesse variable ce qui permet [21]:

- ❖ L'accessibilité au stator et au rotor offre l'opportunité d'avoir plusieurs degrés de liberté pour bien contrôler le transfert des puissances et le facteur de puissance avec toutes les possibilités de récupération ou l'injection d'énergie dans les enroulements de la machine.
- ❖ La capacité de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse autour de la vitesse de synchronisme. De plus, l'application de la commande vectorielle associée à une technique de commande moderne permet d'obtenir un couple nominal sur une grande plage de vitesse.
- ❖ Dans la MADA, le circuit rotorique peut être piloté par un convertisseur de fréquence de puissance relativement faible par rapport au stator. Ce convertisseur rotorique de haute commutation est utilisé pour réaliser de hautes performances dynamiques en termes de temps de réponse, de minimisation des harmoniques et d'amélioration de rendement.
- ❖ L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille des convertisseurs d'environ 70 % en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques. Ce dispositif est par conséquent économique et, contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur.
- ❖ En fonctionnement générateur, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée.
- ❖ Son utilisation est préférée pour ses propriétés de réglage de vitesse par action sur des résistances placées dans le circuit rotorique, et encore sa possibilité de démarrer sans demander un courant important du réseau.
- ❖ Un fonctionnement en régime dégradé, si l'un des deux onduleurs tombe en panne, plus souple que la machine à simple alimentation.

III.4.2 Inconvénients de la MADA

Tout d'abord, la MADA est une machine asynchrone ; alors le premier inconvénient est que sa structure est non linéaire, ce qui implique la complexité de sa commande. En plus de ça, on peut citer les inconvénients suivants [21]:

- ❖ Le marché traditionnel est conquis par la MAS à cage, très étudiée et très connue, la nouveauté

peut effrayer.

- ❖ Elle est plus volumineuse qu'une MAS à cage de puissance équivalente. L'aspect multi-convertisseurs, augmente le nombre de convertisseurs et par conséquent le prix.
- ❖ Un autre inconvénient apparaît lors de l'étude de cette machine, ce dernier est la stabilité notamment en boucle ouverte. En effet, dans le cas de la machine asynchrone conventionnelle celle-ci est garantie par la relation fondamentale de l'autopilotage réalisant l'asservissement de la vitesse par la fréquence du stator. Par conséquent, les deux forces magnétomotrices du stator et du rotor deviennent synchronisées. Mais dans le cas de la machine asynchrone à double alimentation, la rotation des forces magnétomotrices devient fonction des fréquences imposées par les deux sources d'alimentation externes. De ce fait, une certaine synchronisation entre elles est exigée afin de garantir une stabilité à la machine.

III.5 Différentes topologies de la MADA

A travers nos lectures, nous avons distingué deux types de dispositifs utilisant la machine asynchrone pour la production de l'énergie éolienne : Un dispositif tournant à vitesse fixe et utilisant un moteur à cage et un autre dispositif tournant à vitesse variable. Ce dernier est appelé communément machine asynchrone à double alimentation (MADA). Toutefois il est à noter que dans le cadre de notre étude nous avons besoin d'une machine qui offre la plage de variation de la vitesse la plus grande possible afin de maximiser le rendement. Pour cela notre recherche s'est restreinte aux topologies utilisant des convertisseurs bidirectionnels. Nous avons ainsi, pu distinguer plusieurs variantes se basant sur des architectures différentes utilisant toutes une MADA pour la conversion électromécanique [2] [8] [9] [27] [30].

III.5.1 Structure à énergie rotorique dissipée

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la (Figure III.9), le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO.

Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation de la machine.

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

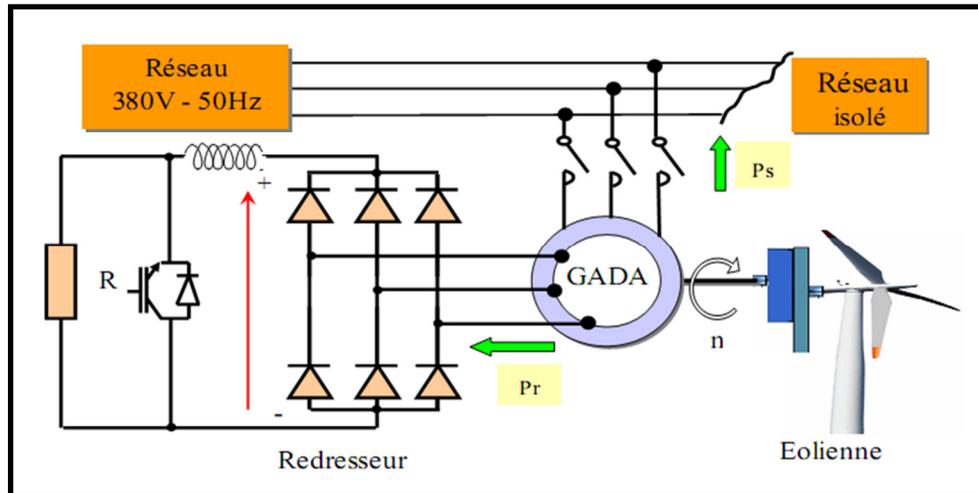


Figure III.9 : MADA avec contrôle du glissement par dissipation d'énergie.

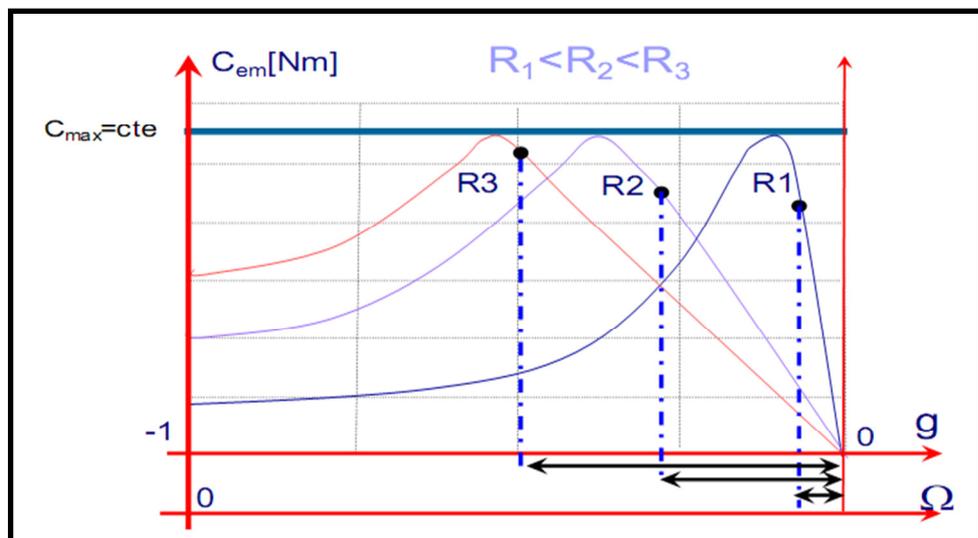


Figure III.10 : Effet de la variation de la résistance rotorique sur le couple électromagnétique.

III.5.2 Structure de Kramer

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

L'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Ce système est avantageux s'il permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. Afin de respecter cette contrainte, le glissement est maintenu inférieur à 30%. L'utilisation de thyristors pour l'onduleur nuit au facteur de puissance, de plus le redresseur est unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau) donc le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures au synchronisme. Cette solution n'est plus utilisée au profit de la structure de Scherbius avec convertisseurs à IGBT.

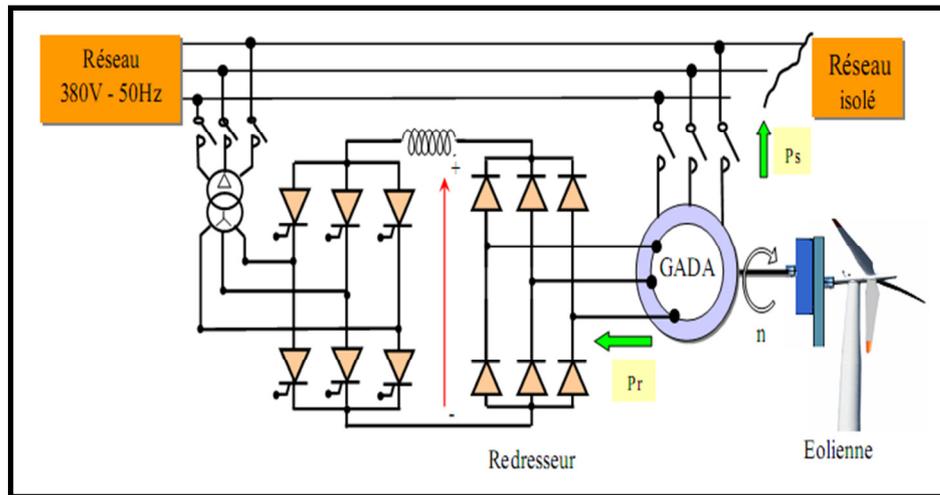


Figure III.11 : Structure de Kramer

III.5.3 Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

Afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'association redresseur-onduleur peut être remplacée par un cyclo convertisseur, l'ensemble est alors appelé structure de Scherbius (figure III.12).

La plage de variation de vitesse est doublée par rapport à la structure de Kramer. En effet si la variation du glissement doit rester inférieure à 30% pour maintenir l'efficacité du système, cette variation peut être positive (fonctionnement hypo synchrone) ou négative (fonctionnement hyper synchrone).

Le principe du cyclo convertisseur est de prendre des fractions des tensions sinusoïdales du réseau afin de reproduire une onde de fréquence inférieure (Figure III.13). Son utilisation génère par conséquent des perturbations harmoniques importantes qui nuisent au facteur de puissance du dispositif. Les progrès de l'électronique de puissance ont conduit au remplacement du cyclonconvertisseur par une structure à deux convertisseurs à IGBT commandés en MLI.

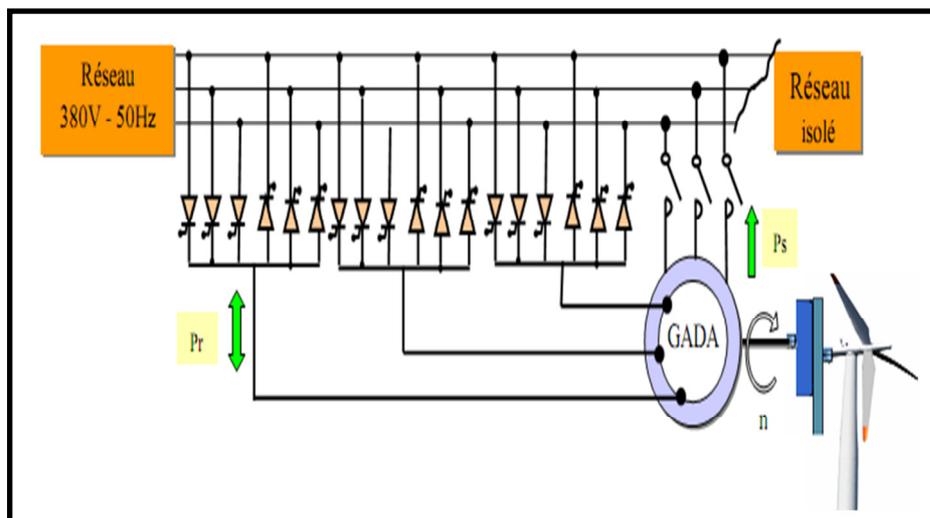


Figure III.12 : Structure de Scherbius avec cyclo convertisseur

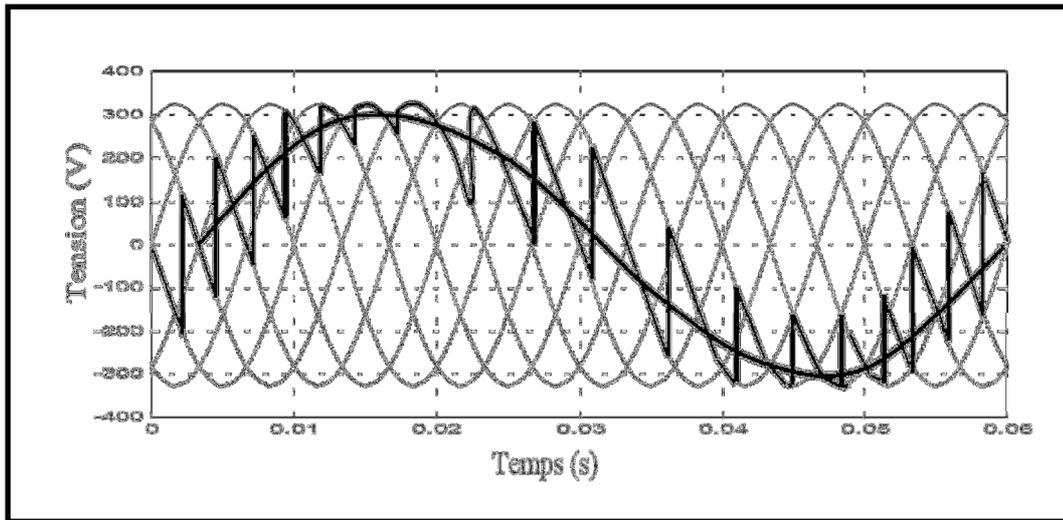


Figure III.13 : Principe de fonctionnement du cyclo convertisseur

III.5.4 Structure de Scherbius avec convertisseur MLI

Cette configuration (Figure III.14) a les mêmes caractéristiques que la structure de Scherbius avec cyclo convertisseur. Toutefois les interrupteurs utilisés ici (transistors IGBT) peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO. L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en Modulation de Largeur d'Impulsions dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées).

La bidirectionnalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hypo synchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau. Si le glissement reste inférieur à $\pm 30\%$ autour du synchronisme, le convertisseur est alors dimensionné pour un tiers de la puissance nominale de la machine et ses pertes représentent moins de 1% de cette puissance. De plus, le fonctionnement hyper synchrone permet de produire de l'énergie du stator vers le réseau mais également du rotor vers le réseau. La puissance totale ainsi produite peut alors dépasser la puissance nominale de la machine et le facteur de puissance de l'ensemble peut être maintenu unitaire. La présence d'un convertisseur à MLI peut toutefois entraîner des $\frac{dv}{dt}$ importants dans les enroulements rotoriques et faire circuler des courants de fréquences élevés dans ces mêmes enroulements.

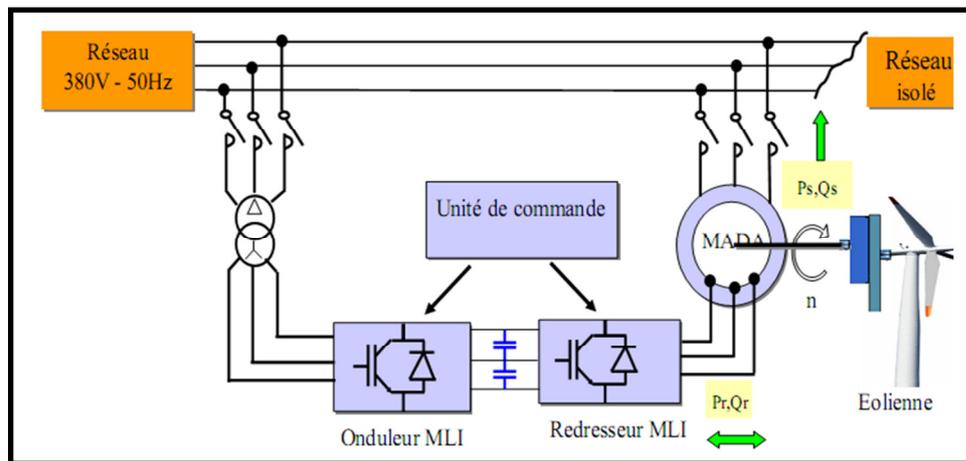


Figure III.14 : Structure de Scherbius avec convertisseur MLI

III.6 Choix de la meilleure structure

La structure à énergie rotorique dissipée présente un mauvais rendement. En effet, si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance (pertes par effet joule) ; ce qui nuit au rendement du système. De plus, cela augmente la puissance transmise dans le convertisseur ainsi que la taille de la résistance.

La structure de Kramer a remplacé la précédente dans le but de réduire les pertes d'énergie par effet joule. Mais l'utilisation de thyristors pour l'onduleur nuit au facteur de puissance, de plus le redresseur est unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau), donc le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures au synchronisme.

Cette structure est alors abandonnée au profit de la structure de Scherbius avec cyclo convertisseur. Mais son utilisation génère des perturbations harmoniques importantes qui nuisent aussi au facteur de puissance du dispositif, malgré son avantage par rapport à la précédente. On fait alors appel à la structure de Scherbius avec convertisseur MLI.

Cette structure, de par ses qualités est la meilleure et la plus utilisée dans la plupart des éoliennes à vitesse variable basées sur la MADA.

Partant de ce constat, nous avons retenu la structure de Scherbius avec convertisseur MLI pour le reste de notre étude.

III.7 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation MADA

Le modèle mathématique permet principalement d'observer les différentes évolutions des grandeurs électromécaniques d'une part, et d'autre part de prévoir le contrôle nécessaire pour pallier aux différents problèmes qui accompagnent les opérations de variation de charge, de vitesse...etc.

La machine est alimentée en tension, les composantes du vecteur de commande de l'équation d'état seront donc des tensions. Les différentes grandeurs seront, dans un premier temps exprimées dans leurs

repères respectifs.

La machine asynchrone à double alimentation comporte trois bobines statoriques décalées entre elles par un angle de $(\frac{2\pi}{3})$, et aussi trois bobines rotoriques identiques et similaires à celles du stator.

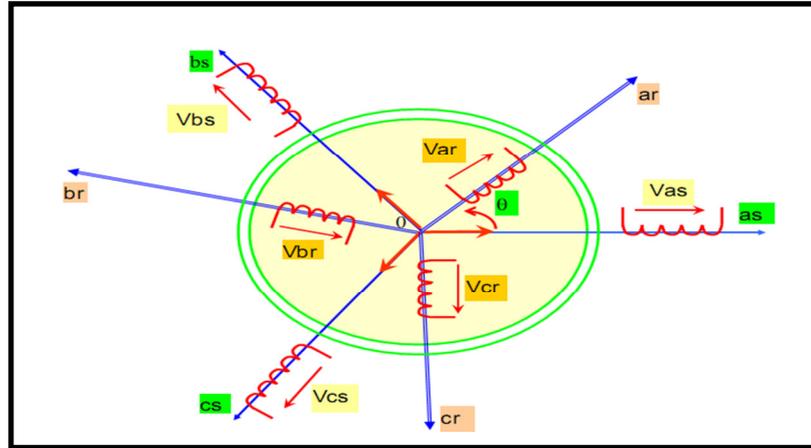


Figure III.15 : Représentation spatiale de la MADA.

Avec :

a_s, b_s, c_s : Phases du stator.

a_r, b_r, c_r : Phases du rotor.

III.7.1 Hypothèses simplificatrices

La machine asynchrone à double alimentation (MADA), avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie propre est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte. Afin d'établir un modèle simple, la mise en équations nous impose certaines hypothèses simplificatrices, qui sont:

- ❖ La machine est de constitution symétrique, par conséquent, la somme des courants et des tensions est égale à zéro.
- ❖ On considère que la force magnétomotrice créée par chacune des phases statoriques et rotoriques est à répartition sinusoïdale.
- ❖ On suppose que le circuit magnétique n'est pas saturé, condition nécessaire pour considérer les flux comme fonction linéaire des courants.
- ❖ Le circuit magnétique est parfaitement feuilleté donc seuls les enroulements inducteur et induit sont parcourus par des courants (absence de phénomène d'hystérésis et de courants de Foucault).
- ❖ La densité de courant est uniforme dans la section des conducteurs élémentaires (absence d'effet pelliculaire).
- ❖ L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encochage est négligé. Les inductances propres

sont constantes et les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes rotoriques et statoriques.

- ❖ Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température.

III.7.2 Equation électrique et magnétique

Dans le domaine de la modélisation des machines électriques il y a deux approches différentes une première qui est basée sur le calcul des champs et qui demande un moyen de calcul très puissant. Cette méthode s'adresse beaucoup plus au constructeur. Une deuxième approche est basée sur le modèle électromécanique où on trouve plus de simplifications. Dans notre cas nous allons basés sur cette dernière.

III.7.2.1 Equation électrique

La loi faraday et la loi d'ohm permettent de relier les tensions des enroulements aux flux totalisés et aux courants dans les bobinages obéissent à l'équation suivante.

$$V = R i + \frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{III.6})$$

De là, on déduit celle des phases statoriques et rotoriques sous forme matricielle (simple et condensée) :

- ❖ Au niveau du stator

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.7})$$

$$[v_{sabc}] = R_s [i_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sabc}] \quad (\text{III.8})$$

- ❖ Au niveau du rotor

$$\begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.9})$$

$$[v_{rabc}] = R_r [i_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{rabc}] \quad (\text{III.10})$$

Avec :

v_{sa}, v_{sb}, v_{sc} : Les tensions simples triphasées au stator.

i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} : Les courants statoriques.

$\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}$: Les flux propres au stator.

v_{ra}, v_{rb}, v_{rc} : Les tensions simples triphasées au rotor.

i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} : Les courants rotoriques.

$\Phi_{ra}, \Phi_{rb}, \Phi_{rc}$: Les flux propres au rotor.

R_s : La résistance des enroulements statoriques.

R_r : La résistance des enroulements rotoriques.

III.7.2.2 Equation magnétique

On définit le vecteur flux par :

$$[\Phi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \text{ Et } [\Phi_{rabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.11})$$

Les vecteurs courants par :

$$[i_{sabc}] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \text{ Et } [i_{rabc}] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.12})$$

Chaque flux comporte une interaction avec les courants de toutes les phases y compris la sienne. La forme matricielle est donnée par :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sabc} \\ \Phi_{rabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{sr}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sabc} \\ i_{rabc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.13})$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}, [L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (\text{III.14})$$

$$[M_{SR}] = [M_{RS}]^t = M_{SR} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\Pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{4\Pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{4\Pi}{3}\right) & \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\Pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\Pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\Pi}{3}\right) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{III.15})$$

Avec :

L_s : L'inductance propre d'une phase statorique.

M_s : L'inductance mutuelle entre deux phases statoriques.

L_r : L'inductance propre d'une phase rotorique ;

M_r : L'inductance mutuelle entre deux phases rotorique.

M_{sr} : L'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

III.7.3 Application de la transformation de Park

La transformation de Park, définie par la matrice de rotation $[P(\theta)]$, permet de ramener les variables du repère triphasé (a, b, c) sur les axes d'un repère diphasé tournant (d, q, 0). Les grandeurs statoriques et rotoriques sont alors exprimées dans un même repère (figure III.16).

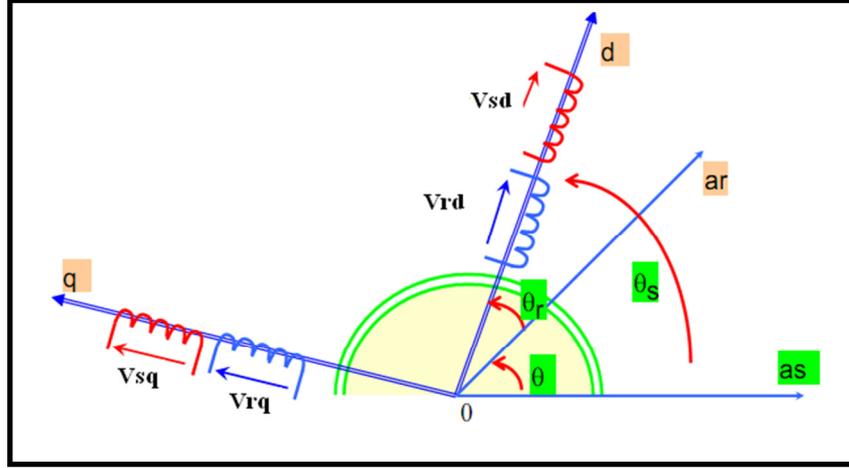


Figure III.16 : Transformation de Park

Revenons au choix de ces angles de transformation pour chaque ensemble de grandeurs (statoriques et rotoriques). Si l'on note par θ_s (respectivement par θ_r) l'angle de la transformation de Park des grandeurs statoriques (respectivement rotoriques). On remarque sur la figure (III.16) que θ_s et θ_r sont naturellement liés à θ par la relation rigide.

$$\theta_s - \theta_r = \theta \quad (\text{III.16})$$

La matrice de changement de base $[P(\theta_s)]$ définie par :

$$[P(\theta_s)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_s & \cos\left(\theta_s - \frac{2\Pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_s + \frac{2\Pi}{3}\right) \\ -\sin \theta_s & -\sin\left(\theta_s - \frac{2\Pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s + \frac{2\Pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.17})$$

Et son inverse est défini par

$$[P(\theta_s)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_s & -\sin \theta_s & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta_s - \frac{2\Pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s - \frac{2\Pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta_s + \frac{2\Pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s + \frac{2\Pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.18})$$

On a ainsi :

$$[i_{dqo}] = [P(\theta_s)] [i_{abc}] \quad (III.19)$$

$$[V_{dqo}] = [P(\theta_s)] [V_{abc}] \quad (III.20)$$

$$[\Phi_{dqo}] = [P(\theta_s)] [\Phi_{abc}] \quad (III.21)$$

La matrice $[P(\theta_s)]$ représente la matrice de transformation appliquée au stator. La transformation des grandeurs rotoriques s'obtient en remplaçant l'indice (s) par l'indice (r).

II.7.4 Modélisation de la machine asynchrone dans le repère de Park

III.7.4.1 Equation électrique :

$$[V_{sabc}] = [R_s] [i_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sabc}] \quad (III.22)$$

La transformation linéaire $[P(\theta_s)]$ appliquée à l'équation (III.22)

$$[P(\theta_s)]^{-1} [V_{sdqo}] = [R_s] [P(\theta_s)]^{-1} [i_{sdqo}] + \frac{d}{dt} ([P(\theta_s)]^{-1} [\Phi_{sdqo}]) \quad (III.23)$$

Soit en multipliant à gauche par $[P(\theta_s)]$

$$[V_{sdqo}] = [R_s] [i_{sdqo}] + \frac{d}{dt} ([\Phi_{sdqo}]) + [P(\theta_s)] \frac{d}{dt} ([P(\theta_s)]^{-1}) [\Phi_{sdqo}] \quad (III.24)$$

On démontre que :

$$[P(\theta_s)] \frac{d}{dt} ([P(\theta_s)]^{-1}) = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} (\theta_s) \quad (III.25)$$

On obtient les équations électriques suivantes.

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \Phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_s \Phi_{sd} \\ V_{so} = R_s i_{so} + \frac{d\Phi_{so}}{dt} \end{cases} \quad (III.26)$$

Ou :

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} \quad (III.27)$$

De façon analogue, la transformation des grandeurs rotoriques conduit au système :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - \omega_r \Phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + \omega_r \Phi_{rd} \\ V_{ro} = R_r i_{ro} + \frac{d\Phi_{ro}}{dt} \end{cases} \quad (III.28)$$

Ou :

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (\text{III.29})$$

III.7.4.2 Equation magnétique :

Les transformations proposées établissent les relations entre les flux d'axes (d,q,o) et les flux d'axe (a,b,c):

$$[\Phi_{sdqo}] = [P(\theta_s)][\Phi_{sabc}] \text{ et } [\Phi_{rdqo}] = [P(\theta_r)][\Phi_{rabc}] \quad (\text{III.30})$$

En développant les expressions des flux, elles deviennent au:

❖ Au niveau du stator

$$[\Phi_{sdqo}] = [P(\theta_s)][L_s][i_{sabc}] + [M_{SR}][i_{rabc}] \quad (\text{III.31})$$

Soit :

$$[\Phi_{sdqo}] = [P(\theta_s)][L_s][P(\theta_s)]^{-1}[i_{sdqo}] + [P(\theta_s)][M_{SR}][P(\theta_r)]^{-1}[i_{rdqo}] \quad (\text{III.32})$$

❖ Au niveau du rotor

$$[\Phi_{rdqo}] = [P(\theta_r)][M_{SR}][i_{sabc}] + [L_r][i_{rabc}] \quad (\text{III.33})$$

Soit :

$$[\Phi_{rdqo}] = [P(\theta_r)][M_{sr}][P(\theta_s)]^{-1}[i_{sdqo}] + [P(\theta_r)][L_r][P(\theta_r)]^{-1}[i_{rdqo}] \quad (\text{III.34})$$

On démontre que :

$$[P(\theta_s)][L_s][P(\theta_s)]^{-1} = \begin{bmatrix} 1_s - M_s & 0 & 0 \\ 0 & 1_s - M_s & 0 \\ 0 & 0 & 1_s - 2M_s \end{bmatrix} \quad (\text{III.35})$$

$$[P(\theta_s)][M_{SR}][P(\theta_r)]^{-1} = \frac{3}{2}M_{SR} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.36})$$

On définit :

$L_s = 1_s - M_s$: L'inductance cyclique statorique.

$M = \frac{3}{2}M_{SR}$: L'inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.

$L_{so} = 1_s + 2M_s$: L'inductance homopolaire statorique.

Ainsi l'expression des flux totalisés prend la forme suivante :

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = L_s i_{sd} + M_{sr} i_{rd} \\ \Phi_{sq} = L_s i_{sq} + M_{sr} i_{rq} \\ \Phi_{so} = L_{so} i_{so} \end{cases} \quad (\text{III.37})$$

On obtient de la même manière pour le rotor :

$$\begin{cases} \Phi_{rd} = L_r i_{rd} + M_{sr} i_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_r i_{rq} + M_{sr} i_{sq} \\ \Phi_{ro} = L_{ro} i_{ro} \end{cases} \quad (\text{III.38})$$

Avec :

$L_r = l_r - M_r$: Inductance cyclique rotorique.

$L_{ro} = l_r + 2M_r$: Inductance homopolaire rotorique.

Quand les sommes des composantes (a,b,c) sont nulles, la troisième équation toujours vérifiée car identiquement nulle.

Les équations de Park. Statoriques et rotoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \Phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_s \Phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - \omega_r \Phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + \omega_r \Phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.39})$$

Les flux sont donnés dans le système :

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = L_s i_{sd} + M_{sr} i_{rd} \\ \Phi_{sq} = L_s i_{sq} + M_{sr} i_{rq} \\ \Phi_{rd} = L_r i_{rd} + M_{sr} i_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_r i_{rq} + M_{sr} i_{sq} \end{cases} \quad (\text{III.40})$$

III.7.5 Choix du référentiel

Il existe différentes possibilités concernant le choix de l'orientation du repère d'axes d, q qui dépendent des objectifs de l'application.

III.7.5.1 Référentiel lié au stator

Il se traduit par les conditions :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0, \quad \frac{d\theta}{dt} = -\frac{d\theta_r}{dt} = -\omega_r \quad (\text{III.41})$$

Les équations électriques prennent la forme :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - \omega_r \Phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} + \omega_r \Phi_{rd} \end{array} \right. \quad (III.42)$$

Ce référentiel est préférable lors de l'étude des grandeurs rotoriques.

III.7.5.2 Référentiel lié au rotor

Il est avantageux pour l'étude des grandeurs statorique. Il se traduit par la relation :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0, \quad \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} = \omega \quad (III.43)$$

Et les équations de tension deviennent :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \Phi_{sq} \omega_s \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \Phi_{sd} \omega_s \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} \end{array} \right. \quad (III.44)$$

III.7.5.3 Référentiel lié au champ tournant

Il se traduit par :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s, \quad \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega \quad (III.45)$$

Ce choix est préférable en vue d'étudier la commande ou on a besoin d'une orientation du flux, et ne résume aucune simplification.

III.7.6 Equation des puissances et du couple

La puissance électrique instantanée P_E fournie aux enroulements statoriques et rotoriques s'exprime en fonction des grandeurs d'axes d, q

$$P_E = V_{sd} i_{sd} + V_{sq} i_{sq} + V_{rd} i_{rd} + V_{rq} i_{rq} \quad (III.46)$$

Elle se décompose en trios de termes :

1. puissance dissipée en pertes joule :

$$P_j = R_s (i_{sd}^2 + i_{sq}^2) + R_r (i_{rd}^2 + i_{rq}^2) \quad (III.47)$$

2. puissance représentant les échanges d'énergie électromagnétiques avec les sources :

$$P_{ech} = i_{sd} \left(\frac{d\Phi_{sd}}{dt} \right) + i_{sq} \left(\frac{d\Phi_{sq}}{dt} \right) + i_{rd} \left(\frac{d\Phi_{rd}}{dt} \right) + i_{rq} \left(\frac{d\Phi_{rq}}{dt} \right) \quad (III.48)$$

3. puissance mécanique P_{mec} regroupant l'ensemble des termes liés aux dérivées des positions angulaires :

$$P_{mec} = (\Phi_{sd} i_{sq} - \Phi_{sq} i_{sd}) \left(\frac{d\Phi_s}{dt} \right) + (\Phi_{rd} i_{rq} - \Phi_{rq} i_{rd}) \left(\frac{d\Phi_r}{dt} \right) \quad (III.49)$$

En tenant compte des équations des flux (III.40) on peut donc écrire que :

$$P_{mec} = (\Phi_{sd} I_{sq} - \Phi_{sq} I_{sd}) \left(\frac{d}{dt} (\theta_s - \theta_r) \right) \quad (III.50)$$

Or la puissance mécanique est aussi égale à :

$$P_{mec} = C_{em} \cdot \Omega \quad (III.51)$$

Avec :

$$\Omega = \frac{W_m}{P} \quad (III.52)$$

On en tire l'expression scalaire du couple :

$$C_{em} = P (\Phi_{sd} i_{sq} - \Phi_{sq} i_{sd}) \quad (III.53)$$

On peut exprimer l'équation du couple par d'autres expressions telles que :

$$C_{em} = P \frac{M_{sr}}{L_s} (\Phi_{sq} i_{rd} - \Phi_{sd} i_{rq}) \quad (III.54.a)$$

$$C_{em} = P \frac{M_{sr}}{L_r} (\Phi_{rd} i_{sq} - \Phi_{rq} i_{sd}) \quad (III.54.b)$$

$$C_{em} = P \frac{M_{sr}}{\sigma L_r L_s} (\Phi_{rd} \Phi_{sq} - \Phi_{sd} \Phi_{rq}) \quad (III.54.c)$$

$$C_{em} = P (\Phi_{rq} i_{rd} - \Phi_{rd} i_{rq}) \quad (III.54.d)$$

III.7.7 Equation mécanique

Le principe fondamental de la dynamique nous permet d'écrire :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{em} - C_r - f\Omega_{mec} \quad (III.55)$$

$$\text{Avec } \Omega_{mec} = \frac{\omega}{P}$$

III.7.8 Mise sous forme d'équation d'état

Pour une bonne représentation de la machine asynchrone à double alimentation, nous considérons comme variable d'états les flux statoriques (Φ_{sd}, Φ_{sq}), les courants rotoriques (I_{rd}, I_{rq}) et la vitesse de rotation ω .

Le système d'équation présentant la machine dans le repère (d-q) lié au champ tournant à la vitesse de synchronisme ω_s à l'aide des expressions de système d'équation (III.39) (III.40) et (III.55) Nous obtenons le modèle de la machine asynchrone à double alimentation suivant.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Phi_{sd}}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} \Phi_{sd} + \omega_s \Phi_{sq} + \frac{R_s M_{sr}}{L_s} i_{rd} + V_{sd} \\ \frac{d\Phi_{sq}}{dt} = -\omega_s \Phi_{sd} - \frac{R_s}{L_s} \Phi_{sq} + \frac{R_s M_{sr}}{L_s} i_{rq} + V_{sq} \\ \frac{di_{rd}}{dt} = \frac{R_s M_{sr}}{\sigma L_r L_s^2} \Phi_{sd} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_r L_s} \omega \Phi_{sq} - \left[\frac{R_r}{\sigma L_r} + \frac{R_s M_{sr}^2}{\sigma L_r L_s^2} \right] i_{rd} + (\omega_s - \omega) i_{rq} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_r L_s} V_{sd} + \frac{1}{\sigma L_r} V_{rd} \\ \frac{di_{rq}}{dt} = \frac{M_{sr}}{\sigma L_r L_s} \omega \Phi_{sd} + \frac{R_s M_{sr}}{\sigma L_r L_s^2} \Phi_{sq} - (\omega_s - \omega) i_{rd} - \left[\frac{R_r}{\sigma L_r} + \frac{R_s M_{sr}^2}{\sigma L_r L_s^2} \right] i_{rq} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_r L_s} V_{sq} + \frac{1}{\sigma L_r} V_{rq} \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{P^2 M_{sr}}{L_s J} (\Phi_{sq} i_{rd} - \Phi_{sd} i_{rq}) - \frac{P}{J} C_r - \frac{f}{J} \omega \end{array} \right. \quad (III.56)$$

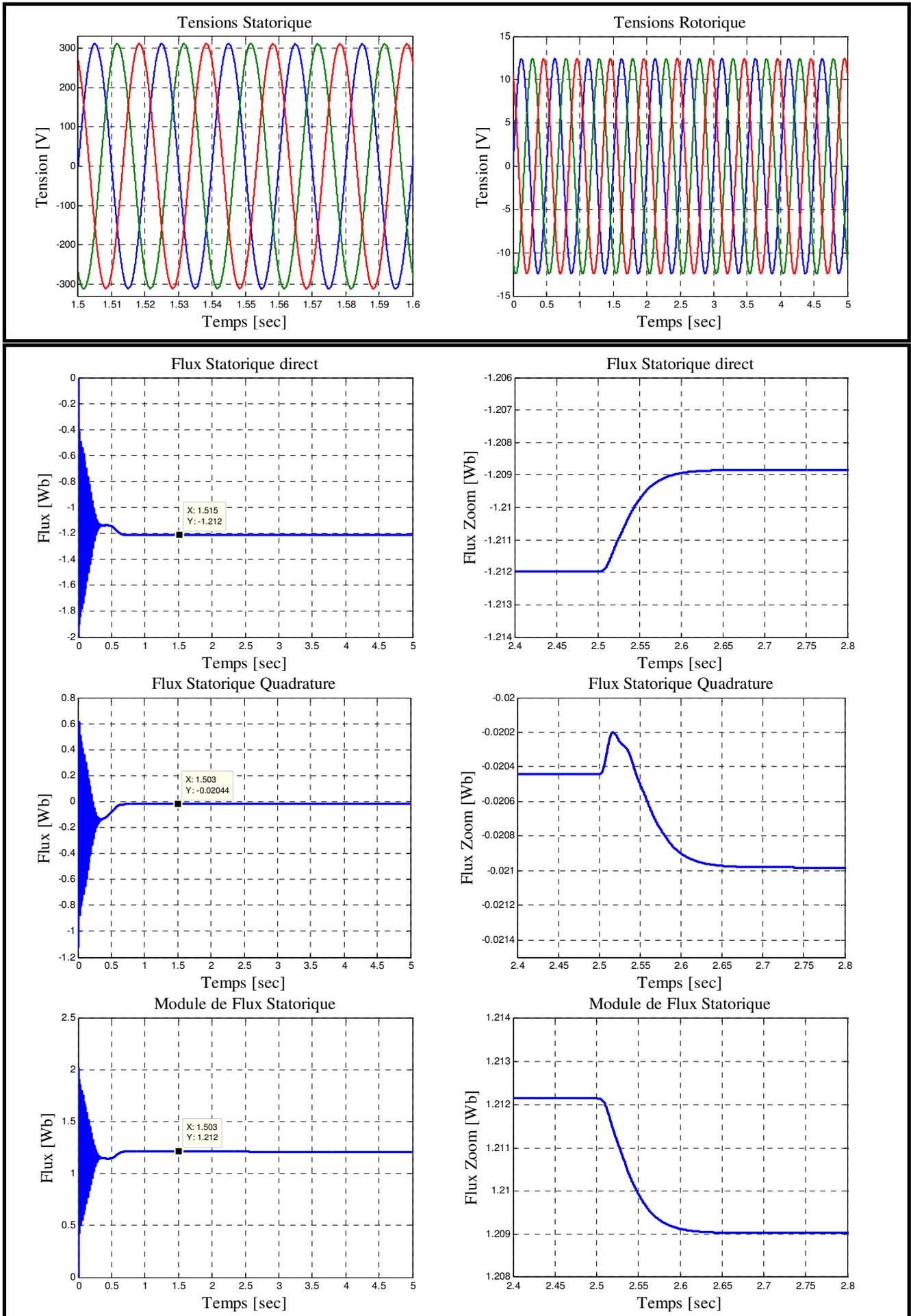
Où σ est le coefficient de dispersion de Blondel : $(\sigma = 1 - \frac{M_{sr}^2}{L_r L_s})$

III.7.9 Simulation et interprétation des résultats

La simulation a été effectuée sous l'environnement MATLAB/Simulink traitant le comportement d'une machine asynchrone à double alimentation. Son modèle est basé sur les équations obtenues avec la transformation de Park (plan (d-q)) liée au champ tournant. Les paramètres de la machine utilisés en simulation sont donnés en (annexe A).

Les résultats montrés sur les figures ci-dessous (figure III.17) sont ceux obtenus pour le modèle d'une machine asynchrone à double alimentation, de puissance 7,5MW, alimentée directement par deux sources de tension triphasées parfaites, l'une au niveau du stator avec une fréquence du réseau sinusoïdal 220/380V, 50Hz, et l'autre au niveau du rotor avec une amplitude de 12.44V et une fréquence égale à la fréquence rotorique $g\omega$.

Le rotor de la machine est entraîné à une vitesse fixe proche de la vitesse de synchronisme égale à 1440 tr/min.



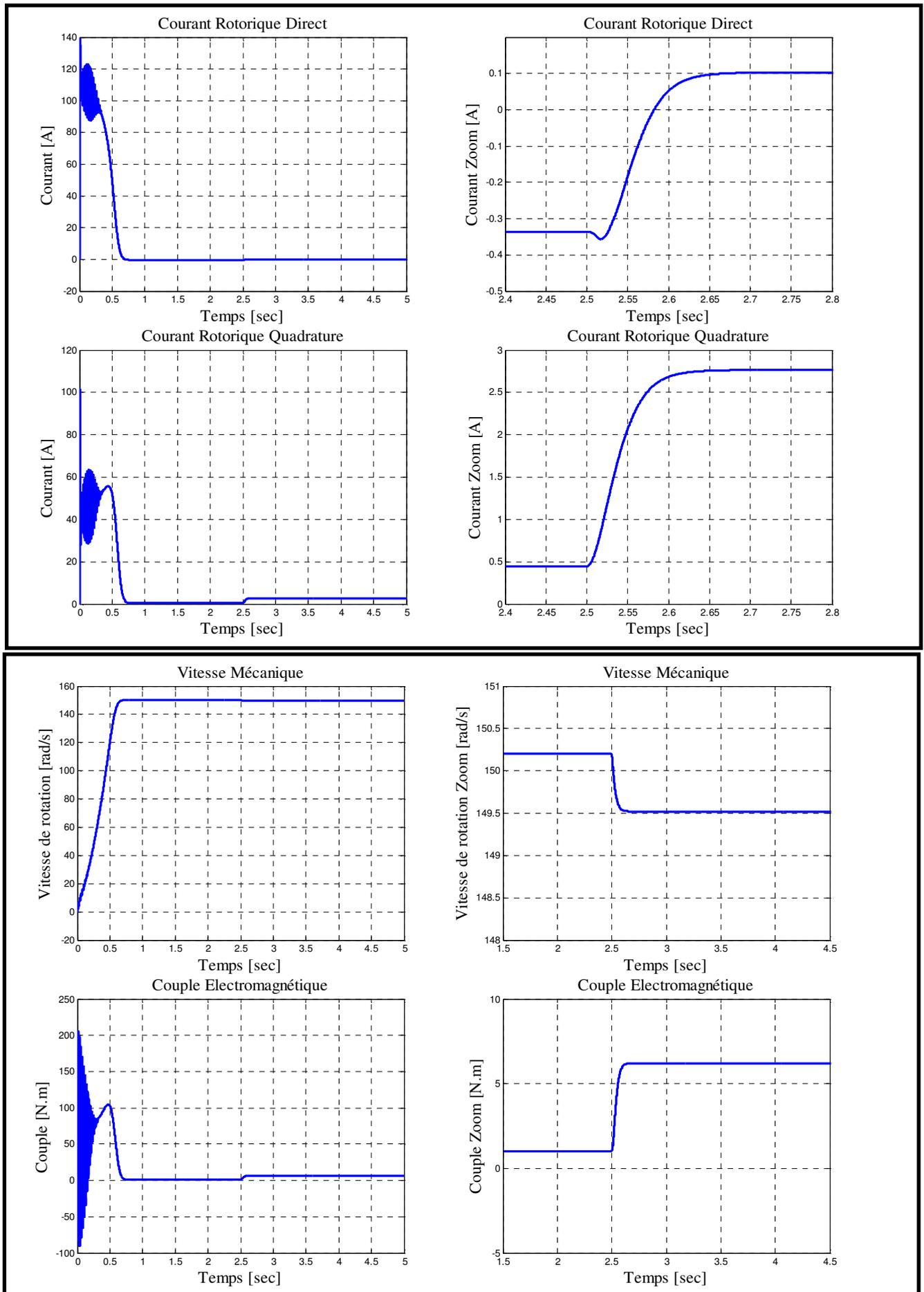


Figure III.17 : Comportement de la MADA lors d'un démarrage à vide avec application d'un couple résistant à l'instant $t=2.5$ s.

La simulation s'effectue au départ d'un démarrage à vide. On remarque que le régime transitoire est oscillatoire pour toutes les grandeurs de la machine.

L'analyse des courbes représente l'évolution des flux statoriques signalant que ces flux (Φ_{sd} , Φ_{sq} , Φ_s) prennent tous des régimes transitoires oscillatoires et se stabilisent aux valeurs respectivement de $[1.21, -0.02, 1.21]$ Wb .

Pendant la phase de démarrage, les courants rotoriques (I_{rd} , I_{rq}) sont fortement oscillatoires, leurs valeurs dépassent (100A). De telles valeurs peuvent causer la destruction de la machine par échauffement en cas d'un démarrage répété. En régime permanent, ces courants rotoriques se stabilisent à des valeurs proches de zéro au bout d'un temps égal à 0.7s.

Après un régime transitoire, on constate que le comportement de la vitesse de la MADA à vide atteint sa valeur crête proche de 157rad/s au bout d'un temps égal à 0.7s.

La courbe représentant les variations des couples électromagnétique montre que l'amplitude de couple atteint une valeur avoisine de (200N.m) pendant la phase de démarrage. Puis se stabilise à une valeur proche de (1N.m), cette valeur est défini par le couple de frottement de la machine.

Après que le régime permanent s'est établi. On applique un couple de charge à la machine $C_r=+5.2\text{N.m}$ dans un instant ($t=2.5\text{s}$).

On observe dès l'application du couple résistant que le couple électromagnétique augmente afin de compenser le couple résistant; cette augmentation induit une légère diminution de la vitesse qui traduit un glissement supplémentaire correspondant au glissement nominal de la machine, et une augmentation du courant rotorique.

Comme on peut souligner un autre point important, c'est la variation notée au niveau du flux lors de l'application du couple résistant, ceci met en évidence le couplage naturel existant entre le flux et le couple.

Nous avons constaté sur l'ensemble des figures représentées, que la machine présente un régime de démarrage lent et avec des dépassements plus importants, ce qui nécessite l'introduction d'une commande pour améliorer les performances dynamiques de la machine.

III.8 Commande vectorielle

III.8.1 Description de la commande

Les qualités de la machine à courant continu, résumées essentiellement dans le découplage naturel entre le flux et le couple, on fait de cette machine et pendant longtemps, le meilleur moyen utilisé dans les entraînements électrique à vitesse variable [3].

Cependant, la présence du collecteur mécanique dont est dotée la machine à courant continu limite son emploi à des domaines où la vitesse et la puissance sont relativement réduites. Cette limitation a contraint les chercheurs à la remplacer par la machine asynchrone à cage ou à rotor bobiné. En effet, la machine à induction de par sa simplicité de construction, sa robustesse, son faible coût et nécessite peu d'entretien, qualités que ne possède pas la machine à courant continu. En revanche, la commande de la machine à induction est difficile. Cette difficulté vient du fait que dans cette machine le couple électromagnétique résulte de l'interaction entre les courants imposés dans les enroulements du stator et les courants induits dans le rotor. Par conséquent, toute variation du couple induite par augmentation ou diminution du courant statorique se traduit aussi par une évolution du flux induit dans le rotor. Donc pour obtenir un contrôle dynamique performant du couple, il faut, par un système de commande extérieur à la machine, réaliser un découplage des grandeurs du couple et du flux [3].

Pour maîtriser ces difficultés, et pour obtenir une situation équivalente à celle de la machine à courant continu Blaschke et Hasse en 1971 ont proposé une technique de commande dite la commande vectorielle en anglais (field oriented control) ou la commande par orientation du flux, elle consiste à séparer la commande du flux de celle du couple en orientant le flux selon l'axe direct de repère choisi. Aujourd'hui, grâce à cette technique de commande et au développement des systèmes numériques, plusieurs entraînements à courant continu sont remplacés par des machines à courant alternatif, ce qui permet un réglage de vitesse plus performant de point de vue rapidité et précision. L'application de cette dernière à la machine asynchrone à double alimentation présente une solution attractive pour réaliser des performances meilleures pour les applications de la production d'énergie dans une gamme de vitesse limitée [21] et constitue actuellement un domaine de recherche.

III.8.2 Principe de la commande vectorielle

La commande d'une machine à courant alternatif est effectuée en général par deux techniques, l'une classique (commande scalaire), et l'autre moderne (commande vectorielle). Dans les applications nécessitant des performances dynamiques importantes, il faut pouvoir agir directement sur le couple instantané. C'est facile pour la machine à courant continu, où la force magnétomotrice de l'induit établit un angle droit avec l'axe du flux inducteur, et ceci quel que soit la vitesse de rotation, ainsi le couple est proportionnel au produit du flux inducteur et du courant d'induit. Si la machine est excitée séparément, et l'on maintient le flux inducteur constant, le couple est directement proportionnel au courant d'induit, on obtient donc de bonnes performances dynamiques puisque le couple peut être contrôlé aussi rapidement que le courant d'induit peut l'être [21]. Par contre, dans une machine asynchrone, l'angle entre le champ tournant du stator et celui du rotor varie avec la charge, il en résulte des interactions complexes et des réponses dynamiques oscillatoires. Pour obtenir une situation équivalente à celle de la machine à courant continu, on introduit la technique de la commande vectorielle. Le principe de cette dernière consiste à

transformer le modèle de la machine asynchrone à une structure similaire à celle de la machine à courant continu à excitation séparée et compensée.

En effet, en absence de la saturation et de la réaction magnétique d'induit, le flux principal de l'inducteur est proportionnel au courant d'excitation I_f . Il n'est pas affecté par le courant d'induit I_a à cause de l'orientation perpendiculaire des flux statoriques et rotoriques. C'est pourquoi, le couple électromagnétique d'une machine à courant continu à excitation séparée est directement proportionnel au courant de l'induit I_a pour une valeur constante du flux, ce qui présente un réglage rapide du couple. Et pour la machine asynchrone, l'angle entre les deux champs statoriques et rotoriques est différent de 90° . L'idée proposée par Blaschke et Hasse c'est de décomposer le vecteur des courants statoriques ou rotoriques en deux composantes, l'une produit le flux, et l'autre produit le couple. Ce qui permet d'avoir un angle de 90° entre les deux flux de la machine, et on obtient une caractéristique similaire à celle de la machine à courant continu à excitation séparée figure (III.18). Il s'agit de placer le référentiel (d-q) de sorte que le flux soit aligné sur l'axe direct. Ainsi, le flux est commandé par la composante directe du courant et le couple est commandé par l'autre composante figure (III.19).

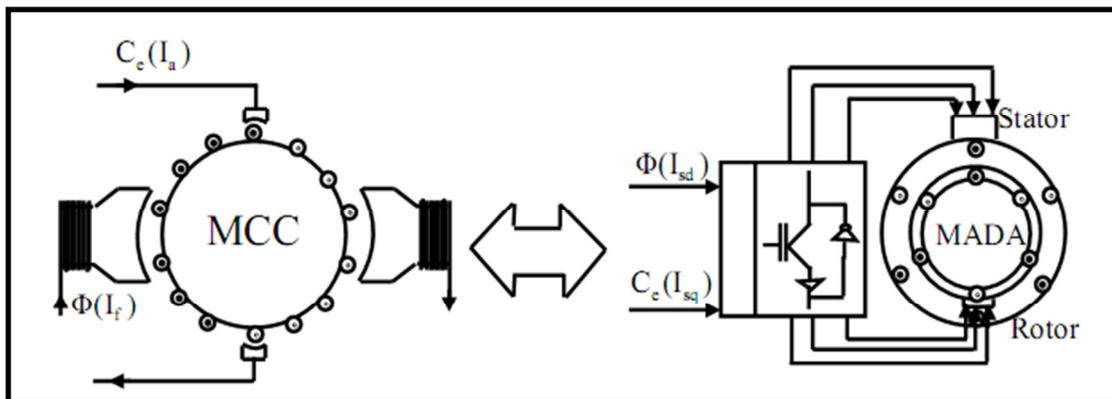


Figure III.18 : Analogie entre la commande de la machine à courant continu et la MADA.

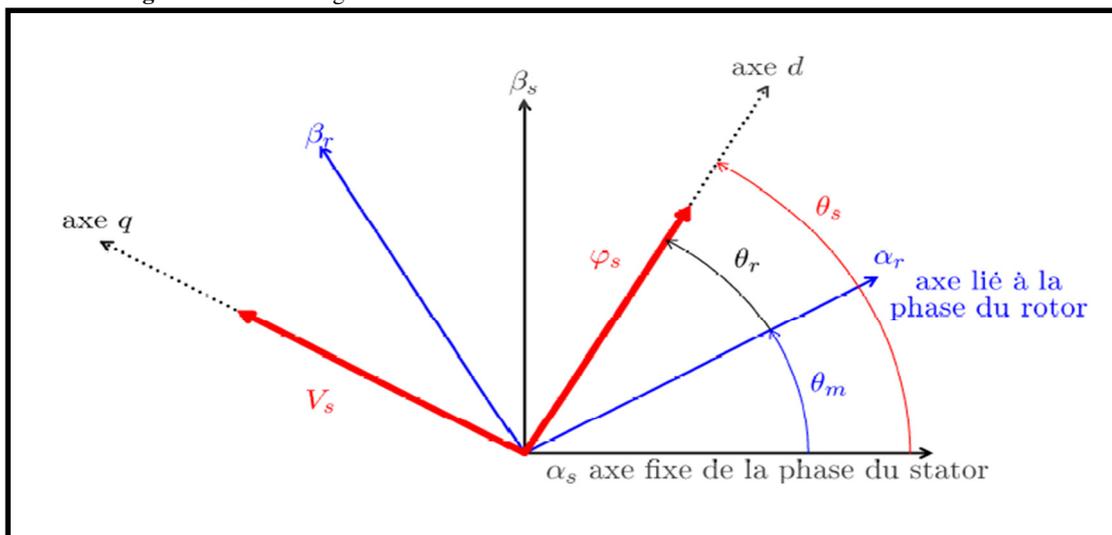


Figure III.19 : Position du référentiel par rapport au flux.

III.8.3 Variantes de la commande vectorielle

La commande à flux orienté appliquée aux moteurs électriques est utilisée pour obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants. De nombreuses variantes de ce principe de commande ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classer [2] [7] [21] :

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

III.8.4 Procédé d'orientation du flux

La méthode du flux orienté est basée sur le choix du repère de référence. Par le choix du repère lié au champ tournant, il découle que le flux à orienter statorique, rotorique ou d'entrefer doit coïncider avec l'axe «d». Afin d'obtenir un couple maximal, nous devons imposer l'une des conditions suivantes [2] :

III.8.4.1 Orientation du flux rotorique :

$$\begin{cases} \Phi_{rd} = \Phi_r \\ \Phi_{rq} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.57})$$

III.8.4.2 Orientation du flux statorique :

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = \Phi_s \\ \Phi_{sq} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.58})$$

III.8.4.3 Orientation du flux magnétisant :

$$\begin{cases} \Phi_d = \Phi \\ \Phi_q = 0 \end{cases} \quad (\text{III.59})$$

Dans le cadre de cette thèse, nous développons la commande vectorielle de la génératrice asynchrone à double alimentation avec orientation du repère (d, q) suivant le flux statorique. Cette dernière se décompose en trois parties :

- ❖ Le contrôle du flux
- ❖ Le contrôle des courants statoriques

❖ Le découplage ou compensation.

Pour établir la commande vectorielle de la génératrice, on considère l'hypothèse simplificatrice que les enroulements statoriques ou rotoriques de la machine sont supposés triphasés équilibrés, donc, toutes les composantes homopolaires sont annulées.

III.8.5 Modèle de la MADA à flux statorique orienté

Dans ce qui suit nous allons supposer que l'axe «d» du repère de Park est orienté suivant le flux statorique. Ce choix n'est pas au hasard mais il se justifie par le fait que la machine est souvent couplée à un réseau puissant de tension et de fréquence constante, ce qui entraîne un flux constant au stator de la machine [6].

Nous rappelons le système d'équations différentielles électrique et magnétique décrivant la machine asynchrone à double alimentation dans un repère lié au champ tournant qui est donné dans les systèmes d'équation (III. 39) et (III. 40).

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

Ainsi :

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = \Phi_s \\ \Phi_{sq} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.60})$$

Les systèmes d'équation (III. 39) et (III. 40) peuvent se simplifier sous la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_s \Phi_s \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - \omega_r \Phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + \omega_r \Phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.61})$$

Si on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse souvent acceptée pour les machines de grande puissance utilisée pour la production d'énergie éolienne les équations des tensions de la machine se réduisent à la forme suivante [2] [6]:

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \Phi_s \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - \omega_r \Phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + \omega_r \Phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.62})$$

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

$$\begin{cases} \Phi_s = L_s i_{sd} + M_{sr} i_{rd} \\ 0 = L_s i_{sq} + M_{sr} i_{rq} \\ \Phi_{rd} = L_r i_{rd} + M_{sr} i_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_r i_{rq} + M_{sr} i_{sq} \end{cases} \quad (III.63)$$

L'expression du couple électromagnétique devienne alors :

$$C_{em} = -P \frac{M_{sr}}{L_s} \Phi_s i_{rq} \quad (III.64)$$

Cette relation rappelle la relation du couple électromagnétique de la MCC à excitation séparée donc le fonctionnement de la MADA est similaire à celui de la MCC (Machine à Courant Continu).

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 (III.64) montre que le couple électromagnétique C_{em} est directement proportionnel au courant rotorique i_{rq} en quadrature.

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'énergie par la MADA, il est pratique de d'élaborer un modèle pour le contrôle indépendant des puissances active et réactive. Un tel modèle peut être élaboré en établissant les relations qui lient les puissances active et réactive aux courants et tension rotoriques.

III.8.6 Expressions des puissances active et réactive statoriques

Les puissances active et réactive statorique, dans le repère orthogonal, s'écrivent :

$$\begin{cases} P = v_{sd} i_{sd} + v_{sq} i_{sq} \\ Q = v_{sq} i_{sd} - v_{sd} i_{sq} \end{cases} \quad (III.65)$$

Sous l'hypothèse d'un flux statorique orienté, ce système d'équations peut se simplifier sous la forme :

$$\begin{cases} P = v_s i_{sq} \\ Q = v_s i_{sd} \end{cases} \quad (III.66)$$

Les puissances active P et réactive Q sont donc en fonction des courants statoriques i_{sd} et i_{sq} respectivement, sur lesquels nous avons au qu'une action directe. Nous devons donc chercher une relation entre les courants rotoriques et les courants statoriques.

A partir des expressions des flux statoriques, nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{V_s}{\omega_s L_s} - \frac{M_{sr}}{L_s} i_{rd} \\ i_{sq} = -\frac{M_{sr}}{L_s} i_{rq} \end{cases} \quad (III.67)$$

En remplaçant les courants statoriques direct et quadrature par leurs expressions dans les équations des puissances active et réactive, on trouve :

$$\begin{cases} P = -\frac{V_s M_{sr}}{L_s} i_{rq} \\ Q = -\frac{V_s M_{sr}}{L_s} i_{rd} + \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} \end{cases} \quad (\text{III.68})$$

Il ressort de l'expression (III.68) que le contrôle des puissances active et réactive au stator est découplé. En effet, avec une inductance magnétisante constante et un réseau électrique puissant, la puissance active sera directement proportionnelle au courant rotorique d'axe «q», et la puissance réactive proportionnelle au courant rotorique d'axe «d» à une constante près $\frac{V_s^2}{L_s \omega_s}$ imposée par le réseau [6].

III.8.7 Expressions des tensions rotoriques

Afin de pouvoir contrôler correctement la machine, il nous faut établir la relation entre les courants et les tensions rotoriques qui seront appliqués à la machine. En remplaçant dans l'équation des flux les courants statoriques par l'expression (III.67), on obtient :

$$\begin{cases} \Phi_{rd} = \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) i_{rd} + \frac{M_{sr} V_s}{\omega_s L_s} \\ \Phi_{rq} = \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) i_{rq} \end{cases} \quad (\text{III.69})$$

En introduisant ces expressions dans les équations des tensions rotoriques, on trouve :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} + \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) \frac{di_{rd}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) i_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) \frac{di_{rq}}{dt} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) i_{rd} + g \frac{M_{sr} V_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III.70})$$

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

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) i_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) i_{rd} + g \frac{M_{sr} V_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III.71})$$

A partir des équations que nous venons de mettre en place, il est possible d'établir les relations entre les tensions appliquées au rotor de la machine et les puissances statoriques que cela engendre. En examinant les équations (III.68) et (III.70), on peut imaginer le schéma bloc de la MADA qui est le système à réguler ; comportant en entrées les tensions rotoriques et en sorties les puissances actives et réactives engendrées figure (III.20).

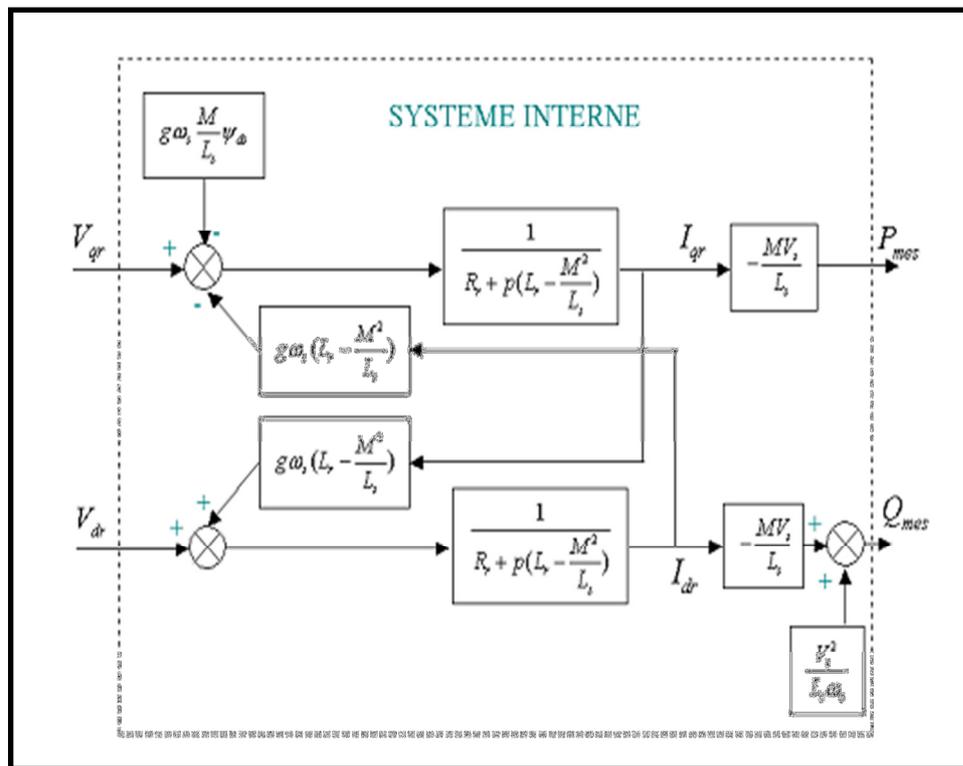


Figure III.20 : Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances.

Avec :

V_{rd} et V_{rq} : Les composantes déphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus.

L'expression $\left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s}\right)$ représente le terme de couplage entre l'axe direct et l'axe quadrature. Son influence entre les deux axes reste minimale. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser. Le terme $g \frac{M_{sr} V_s}{L_s}$ représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Son influence n'est pas négligeable car il entraîne une erreur de traînage.

Ce schéma fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances actives et réactives statoriques. Il montre également que nous pouvons 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 active pour l'axe «d» rotorique. La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau. La consigne de puissance active devra permettre de garder le coefficient de puissance de l'éolienne optimal [8] [27].

Ainsi, il existe deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette machine [12] :

- ❖ 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 est appelée **méthode directe**, car les régulateurs de puissances 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 (III.68) et (III.70).

L'intérêt que présente la méthode directe est que sa mise en œuvre est simple. Cependant, elle présente plus de perturbations entre les deux puissances. La méthode indirecte quant à elle, a l'avantage de contrôler les courants rotoriques ; ce qui permettra de faire une protection de la machine en limitant ces courants.

III.8.8 Commande directe

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

Considérons le schéma bloc du système à réguler de la figure (III.20) 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 $\frac{M_{sf} V_s}{L_s}$. Dans notre étude, nous avons considéré que l'éolienne était raccordée à un réseau de forte puissance et stable, donc ce terme est constant.

Pour réguler la machine, nous allons mettre en place une boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur indépendant tout en compensant les termes de perturbation qui sont présents dans le schéma bloc de la figure (III.20).

Nous négligerons les termes de couplage entre les deux axes de contrôle du fait de la faible valeur du glissement. Nous obtenons alors une commande vectorielle avec un seul régulateur par axe, présentée sur la figure (III.21) [12].

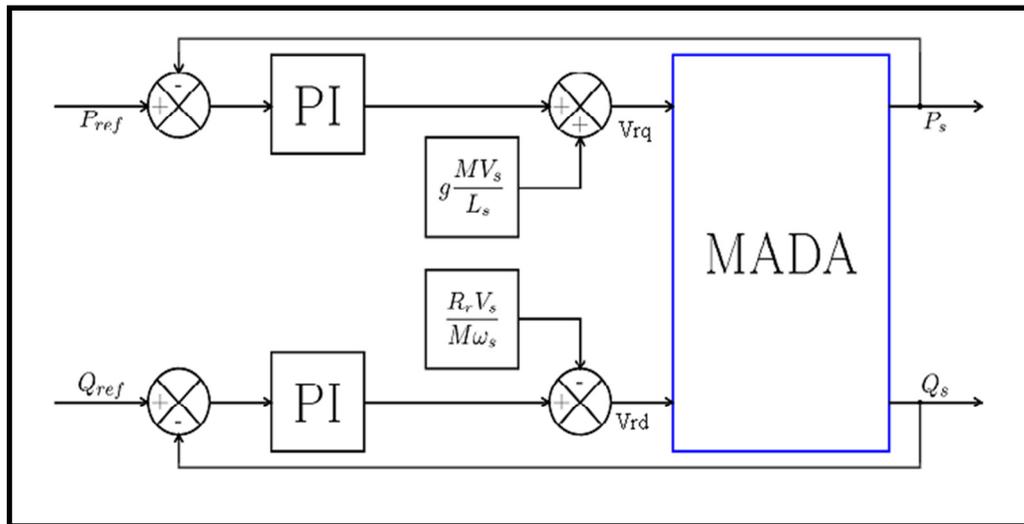


Figure III.21 : Schéma bloc de commande direct.

Le régulateur de type proportionnel Intégral (PI) utilisé pour commander la MADA en génératrice, est simple et rapide à mettre en œuvre et offrant des performances acceptables [12]. C'est pour cela qu'il retenu notre attention pour une étude globale du système de génération éolien.

La figure (III.22) 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 deux régulateurs utilisés dans la figure (III.21). La détermination des paramètres K_p et K_i du régulateur fait intervenir des méthodes classiques de calcul des régulateurs continus. La synthèse de ces régulateurs est détaillée dans l'annexe C.

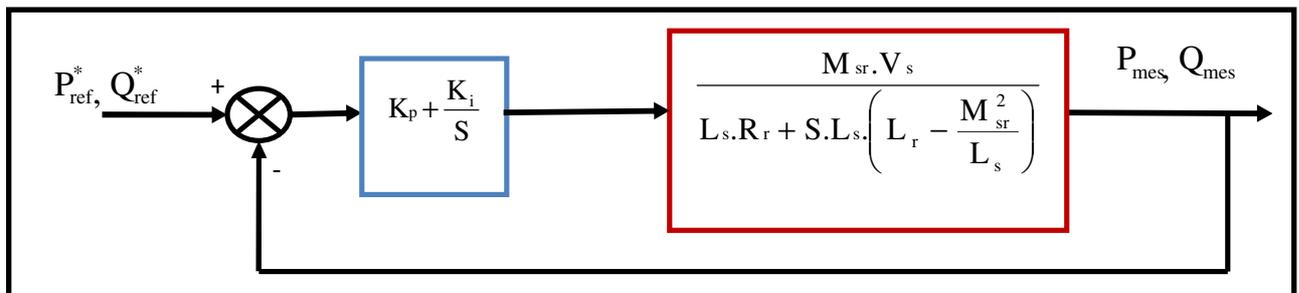


Figure III.22 : Système régulé par un PI.

III.8.8.1 Résultats de simulation et interprétations

La stratégie de la commande directe à base des régulateurs PI des puissances actives et réactives générées au niveau du stator de la machine asynchrone à double alimentation a été implémentée dans un environnement MATLAB, afin d'effectuer des tests de la régulation. Nous avons donc soumis ce système à des échelons de puissance active et réactive afin d'observer le comportement de sa régulation.

Les figures ci-dessous montrent les performances de la commande vectorielle en puissance active et réactive rotorique appliquée à une machine asynchrone doublement alimenté de puissance 10kW entraînée à une vitesse fixe.

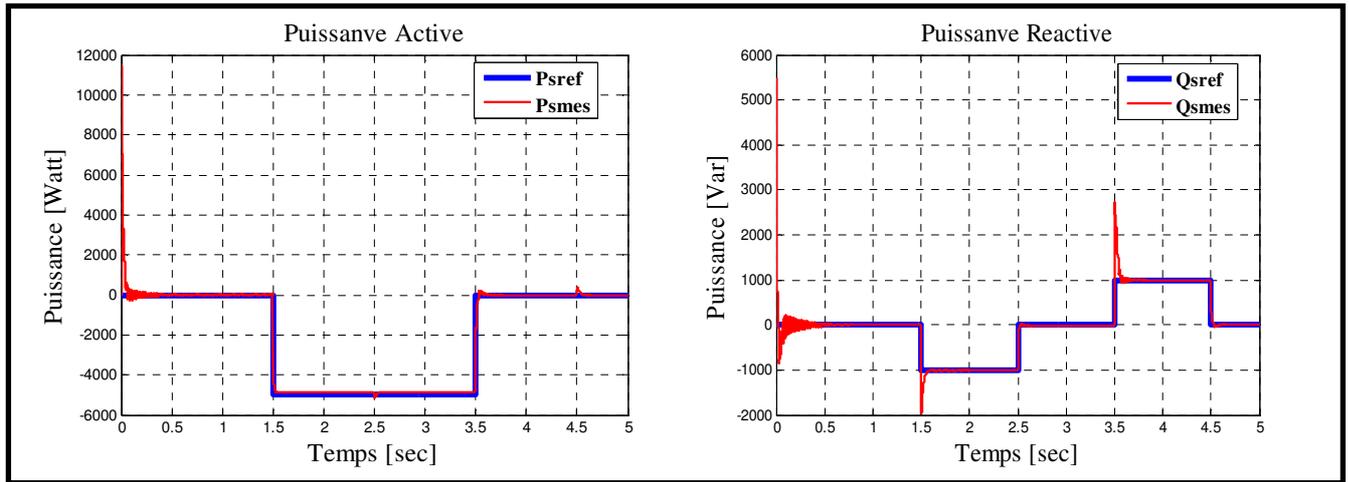


Figure III.23 : La puissance active et réactive statorique pour la commande vectorielle directe de la puissance.

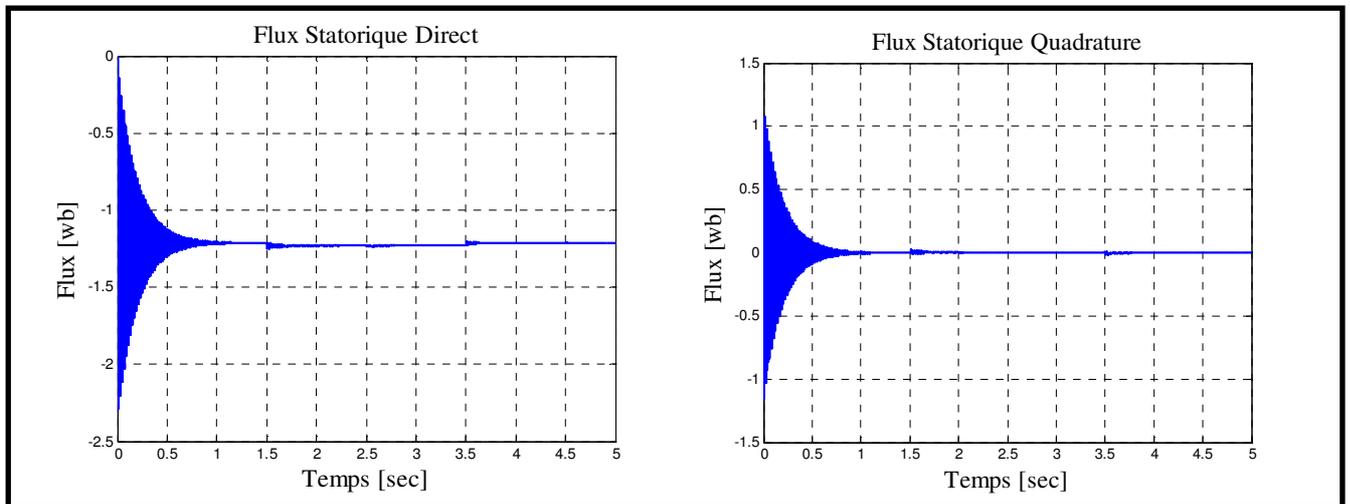


Figure III.24 : Le flux statorique selon l'axe d et q pour la commande vectorielle directe de la puissance.

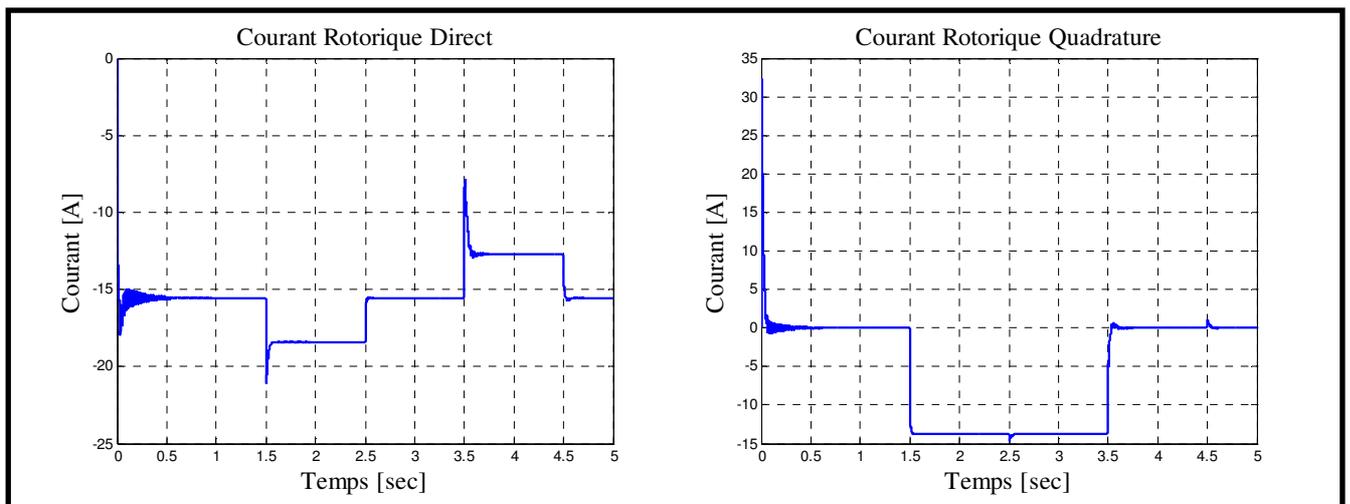


Figure III.25 : Le courant rotorique selon l'axe d et q pour la commande vectorielle directe de la puissance.

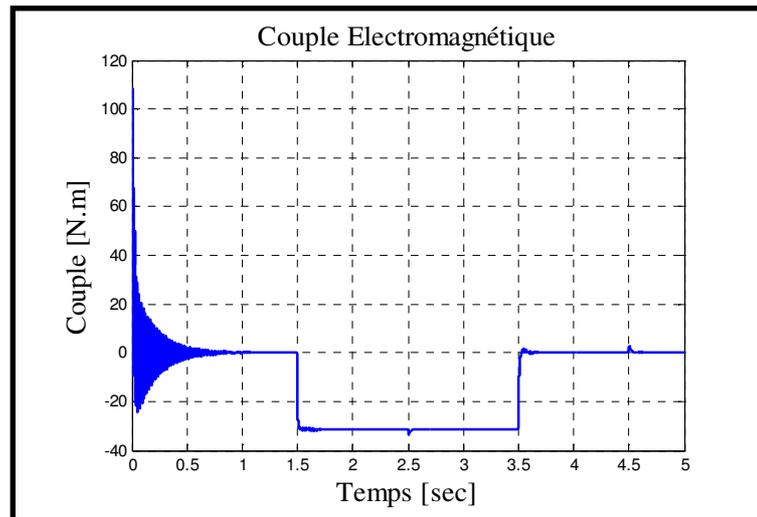


Figure III.26 : Couple électromagnétique pour la commande vectorielle directe de la puissance.

Les résultats de simulation présentent des différentes courbes qui sont obtenus par la commande des puissances actives et réactives générées au niveau du stator de la MADA. Cette commande permet de découpler les expressions de puissance active et réactive du générateur ou en cours celle du flux et du couple. La composante quadrature du courant rotorique i_{rq} contrôle le couple électromagnétique et la composante directe i_{rd} contrôle la puissance réactive échangée entre le stator et le réseau.

D'après les résultats obtenus, on constate que le contrôle direct utilisant des régulateurs PI présente un bon découplage au réglage des puissances actives et réactives au niveau du stator. Après un régime transitoire. Une bonne poursuite des allures à leurs valeurs de références imposées dans le cas d'un entraînement à vitesse constante

On peut remarquer que les échelons de puissances figure (III.23) sont bien suivis par la génératrice aussi bien pour la puissance active que pour la puissance réactive. Cependant on observe l'effet du couplage entre les deux axes (d et q) car un échelon imposé à l'une des deux puissances (active ou réactive) induit de faibles pic sur la seconde.

La puissance active du côté statorique est négative entre les instants $t=1.5s$ et $t= 3.5s$ ce qui signifie que le réseau dans ce cas est un récepteur de l'énergie fourni par la MADA.

La puissance réactive est nulle entre les instants $t=0s$ et $t=1.5s$, c'est une condition de fonctionnement de la MADA pour avoir un facteur de puissance unitaire. Enfin le fonctionnement de contrôle de puissance réactive nous permet d'avoir une puissance négative (comportement capacitif) ou positive (comportement inductif).

Nous pouvons constater que le flux statorique figure (III.24) suit sa référence suivant l'axe (d) avec une composante quadrature presque nulle, ce qui signifie que le découplage de la machine est réalisé avec succès.

On voit clairement que la composante quadrature du courant rotorique i_{rq} figure (III.25) contrôle le couple électromagnétique figure (III.26) donc la puissance active. La composante directe du courant rotorique i_{rd} contrôle le flux et donc la puissance réactive transitée entre le stator et le réseau. Cela est constaté lors des variations des composantes directes et quadratures des courants rotoriques qui sont respectivement les images des puissances réactives et actives.

On note que le couple électromagnétique réagit spontanément quand il y a une demande en puissance active, indépendamment de la puissance réactive.

III.8.9 Commande indirect

Elle se base sur les équations régissant le fonctionnement de la machine défini au paragraphe précédent ; 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 [27]:

Nous aurons donc un bloc de commande constitué de deux sous-systèmes. Le premier calcule les courants de référence à partir des consignes (Puissances actives et réactives), le deuxième calcule les tensions de référence à partir des courants rotoriques calculés par le premier sous-système [30].

A partir du bloc de commande nous pouvons élaborer deux structures, l'une utilise une boucle régulant le courant, et l'autre se base sur la première en lui ajoutant une boucle régulant les puissances.

III.8.9.1 Commande sans boucle de puissance

Dans le souci de garantir une bonne stabilité du réseau, nous introduisons une boucle de régulation des courants rotoriques dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer à la machine [12] [27].

On établit alors le système de régulation donné par la figure (III.27).

Les régulateurs de cette structure sont calculés de la même façon que pour la commande directe. Ils sont identiques pour chaque axe. La synthèse de ces régulateurs est détaillée dans (l'annexe C).

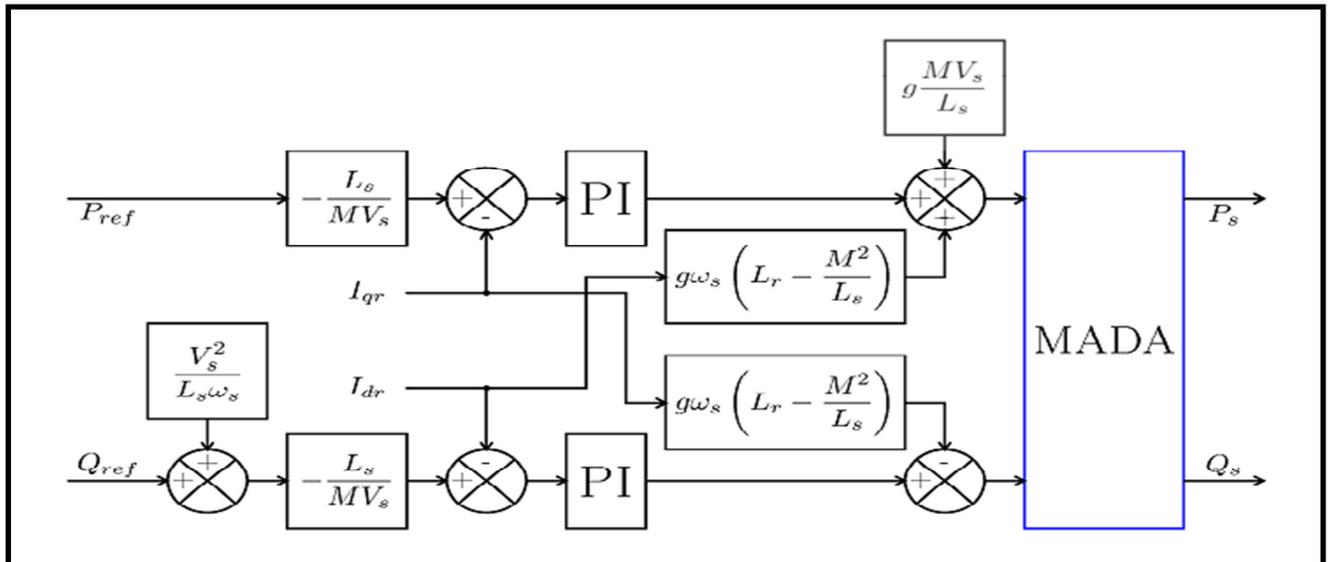


Figure III.27 : Schéma bloc de la commande indirecte sans boucle de puissance.

III.8.9.2 Résultats de simulation et interprétations

Pour évaluer et tester la technique de contrôle indirecte par des régulateurs PI sans boucle de puissance, une étude de simulation a été effectuée sous l'environnement MATLAB pour effectuer des tests de cette régulation.

Nous avons donc soumis ce système à des échelons de puissance active et réactive similaire à celle de la commande direct afin d'observer le comportement de sa régulation.

Les résultats de simulation obtenus de cette régulation montrent bien les grandes performances du contrôle indirecte des puissances actives et réactives sans boucle de puissance dans le cas d'un fonctionnement à vitesse constante, ceci a été confirmé par le découplage parfait et la bonne poursuite des allures de puissance (active et réactive) et aussi les allures de courant avec ces références.

La figure (III.29) démontre que notre système présente une dynamique importante et nous pouvons également observer la présence d'une erreur statique au niveau de la puissance active et réactive ceci est dû au fait que dans ce mode de contrôle, la puissance n'est pas mesurée directement mais elle est plutôt reconstruite à partir de la mesure des courants rotoriques c'est-à-dire que les puissances sont donc restées en boucle ouverte. Ce sont en effet ces mêmes courants qui sont asservis.

Or les équations utilisées pour la reconstruction sont basées sur le modèle simplifié qui néglige la résistance R_s .

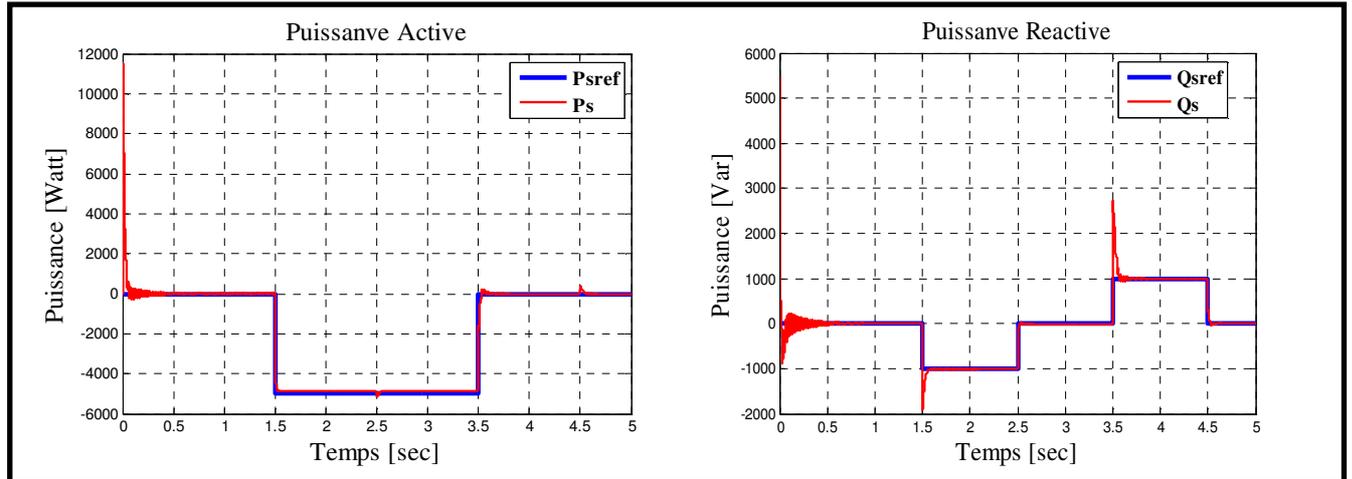


Figure III.28 : La puissance active et réactive statorique pour la commande vectorielle indirecte sans boucle de puissance.

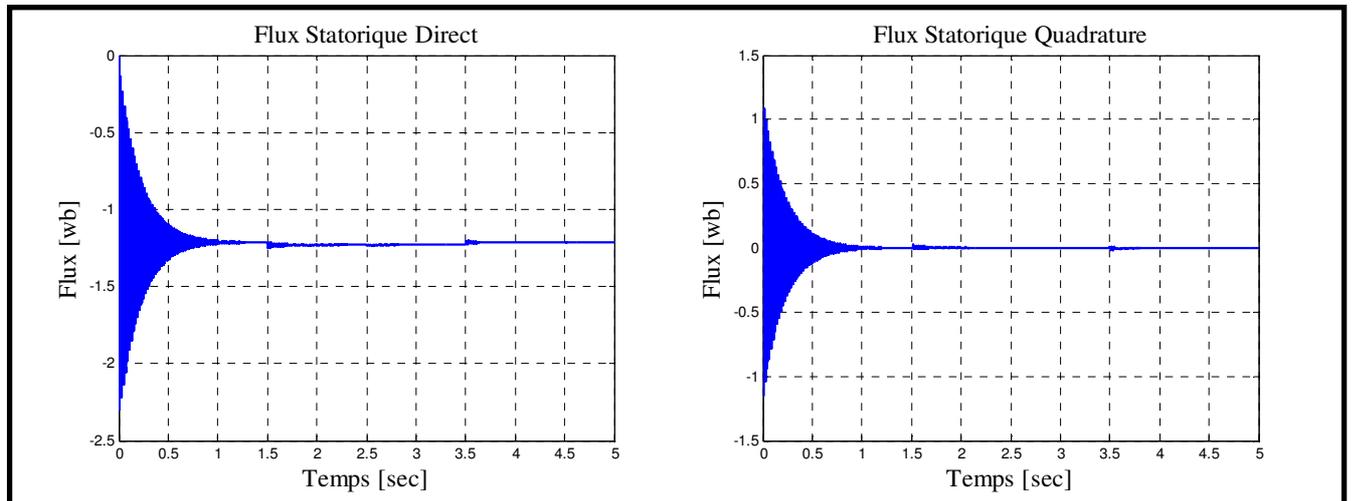


Figure III.29 : Le flux statorique selon l'axe d et q la commande vectorielle indirecte sans boucle de puissance.

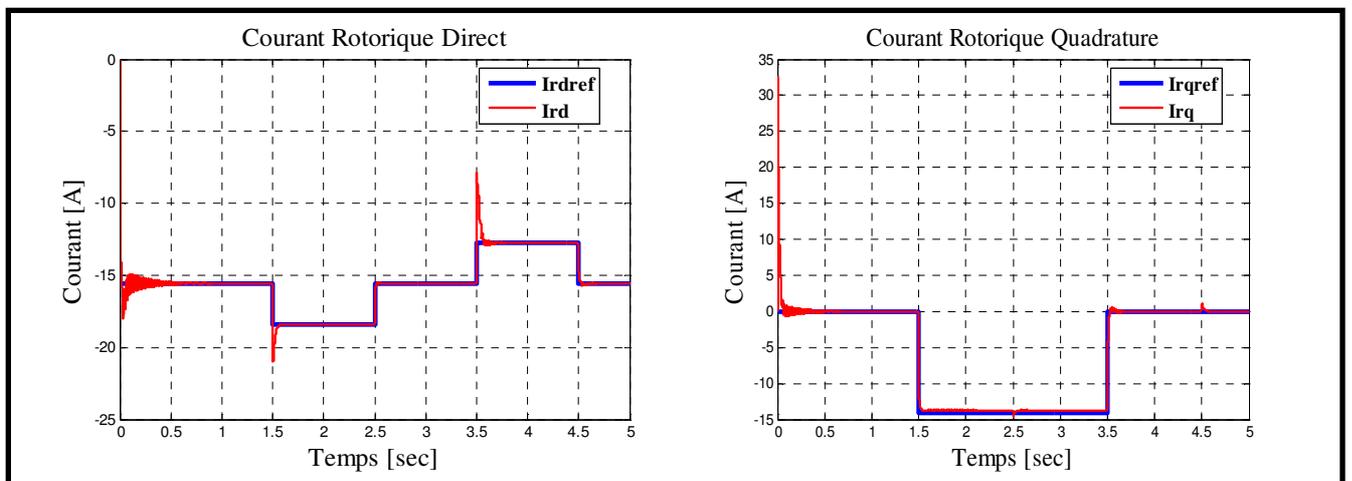


Figure III.30 : Le courant rotorique selon l'axe d et q pour la commande vectorielle indirecte sans boucle de puissance.

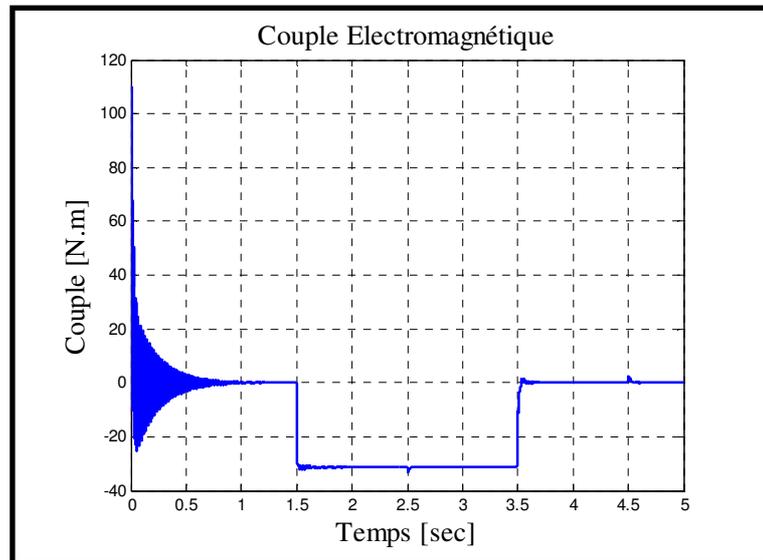


Figure III.31 : Couple électromagnétique pour la commande vectorielle indirecte sans boucle de puissance.

III.8.9.3 Commande avec boucle de puissance

Afin d’améliorer la commande précédente, nous allons introduire une boucle de régulation supplémentaire au niveau des puissances afin d’éliminer l’erreur statique tout en préservant la dynamique du système. Nous aboutissons au schéma bloc présenté par la figure suivante, sur lequel on distingue bien les deux boucles de régulation pour chaque axe, l’une contrôlant le courant et l’autre la puissance [2] [12].

Ce type de structure figure (III.32) est composé de deux boucles, la première est celle du courant tel qu’effectuée dans la section précédente, et la deuxième boucle est celle des puissances. Ainsi on aboutit à une régulation de la puissance à partir de consignes que l’on impose. Les gains des régulateurs de courants sont établis de la même manière que précédemment. Les régulateurs intervenants dans la boucle de puissance sont de type proportionnel intégral, car celui-ci offre des résultats suffisamment probants. Ces derniers seront illustrés dans (l’annexe C) [30].

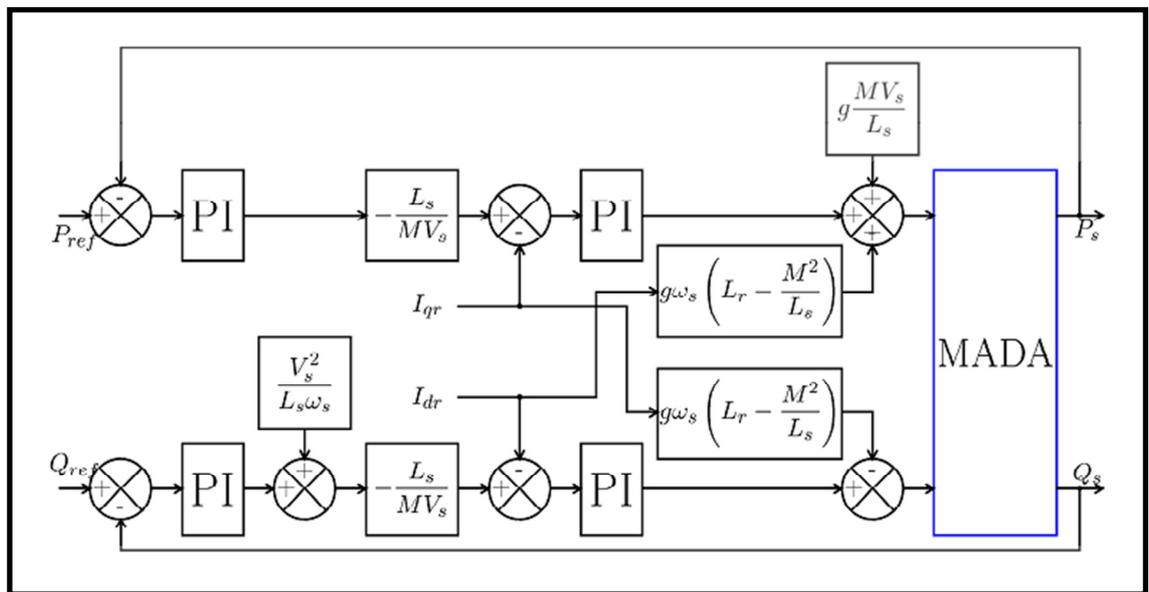


Figure III.32 : Schéma bloc de la commande indirecte avec boucle de puissance.

III.8.9.4 Résultats de simulation et interprétations

Pour évaluer et tester la technique de contrôle indirect des puissances actives et réactives par des régulateurs PI, une étude de simulation a été effectuée sous l'environnement MATLAB. Dans ce cas, les gains des régulateurs PI sont calculés par la même méthode utilisée dans la section précédente. Les paramètres de régulateurs utilisés dans cette simulation sont:

- ❖ Pour la boucle de puissance : $K_{P(p_{mes}, Q_{mes})} = 10^{-3}$; $K_{i(p_{mes}, Q_{mes})} = 100$.
- ❖ Pour la boucle de courant : $K_{P_{irdq}} = 857.1425$; $K_{i_{irdq}} = 6,2.10^4$.

Dans cette section, on est amené à représenter toutes les figures de simulation qui nous permettent d'évaluer les performances apportées par le système de réglage considéré pour un fonctionnement à vitesse constante.

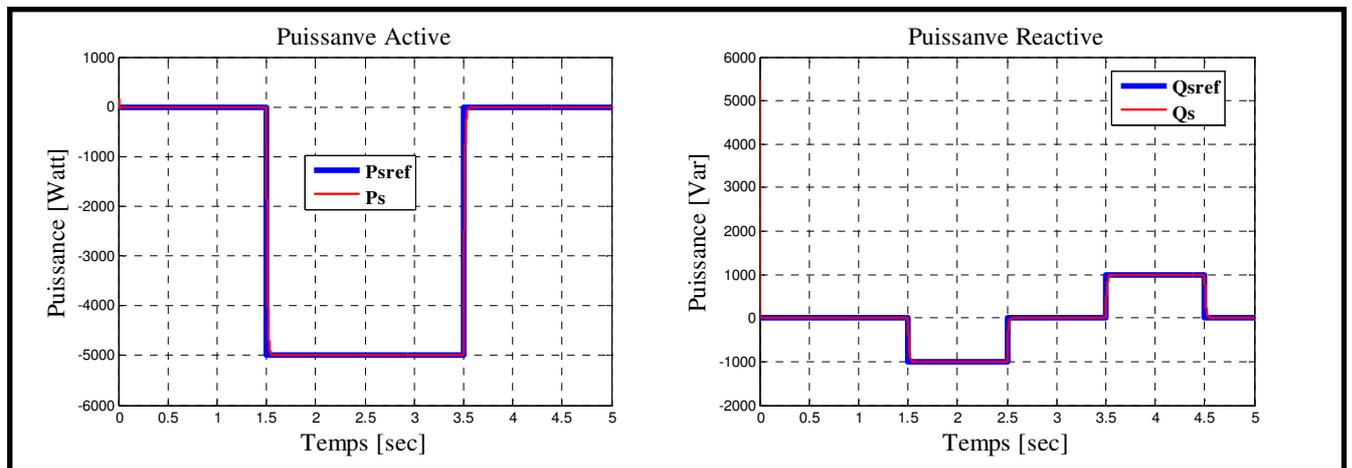


Figure III.33 : La puissance active et réactive statorique pour la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance.

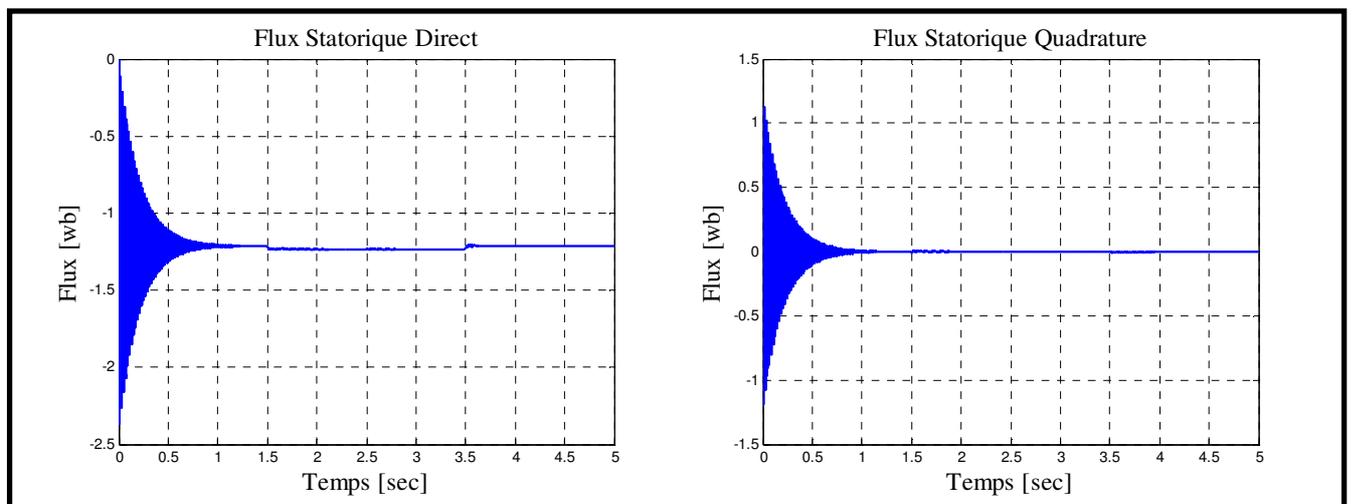


Figure III.34 : Le flux statorique selon l'axe d et q pour la commande vectorielle directe de la puissance.

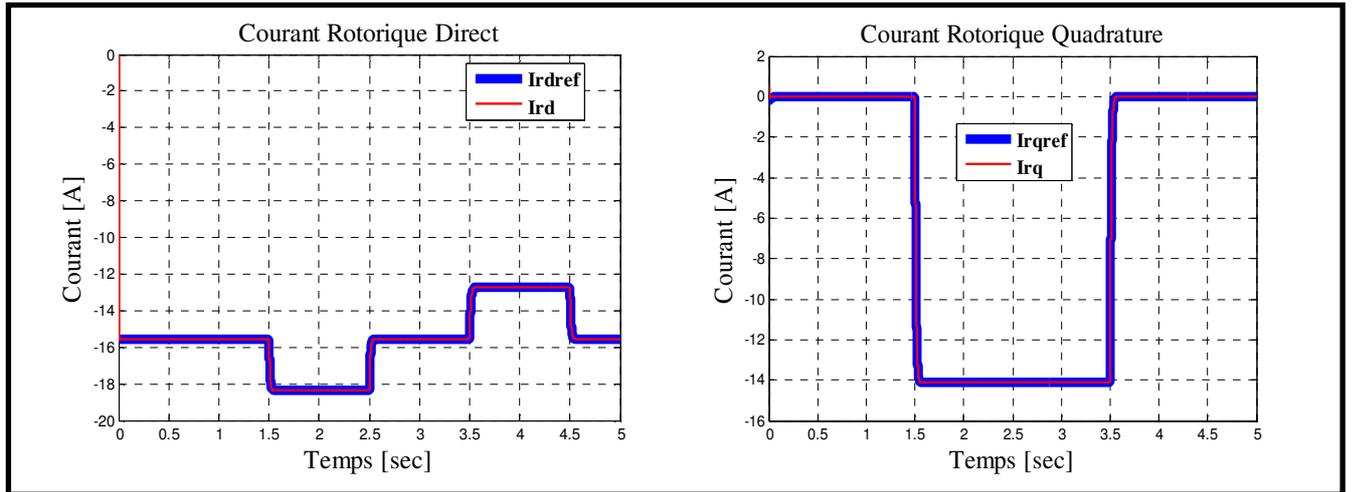


Figure III.35 : Le courant rotorique selon l'axe d et q pour la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance.

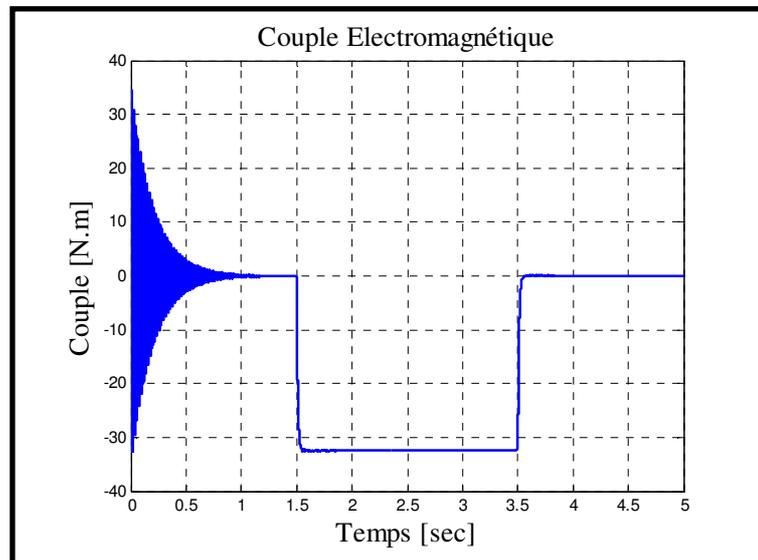


Figure III.36 : Couple électromagnétique pour la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance.

D'après ces résultats on constate que :

Les figures présentées dans cette section démontrent que notre système présente une dynamique satisfaisant et une erreur statique nulle.

Que ce soit pour la puissance active ou réactive, on observe une dynamique qui réagit rapidement et sans dépassement. Les échelons sont correctement suivis et il n'y a plus d'erreur sur les puissances. Le couplage entre les deux puissances est annulé et peu perceptible par rapport au constat des commandes direct et indirect sans boucle de puissance afin d'observer l'effet du couplage entre les deux axes (d et q) car un échelon imposé à l'une des deux puissances (active ou réactive) induit des pics sur la seconde. Donc cette commande ne devrait pas poser de problème par la suite du modèle de la machine.

On obtient aussi des bons résultats en terme de dynamique et de réponse aux consignes des courants rotorique direct et quadrature, comme on peut le voir sur la figure (III.35).

On peut remarquer aussi que le couple électromagnétique dépend directement de la puissance active et ceci traduit par sa forme identique (figures III.33, III.36). Dans ce cas, on peut conclure que la puissance active est une conséquence du couple électromagnétique; alors que la puissance réactive est une conséquence de l'excitation du circuit rotorique.

Cette commande est donc plus performante que la commande directe qui présente plus de perturbations entre les deux puissances. Nous allons donc retenir la commande indirecte avec boucle de puissance pour le reste de notre étude. De plus, elle permet de pouvoir limiter simplement les courants rotoriques de la machine en fixant une limite dans la boucle de courant.

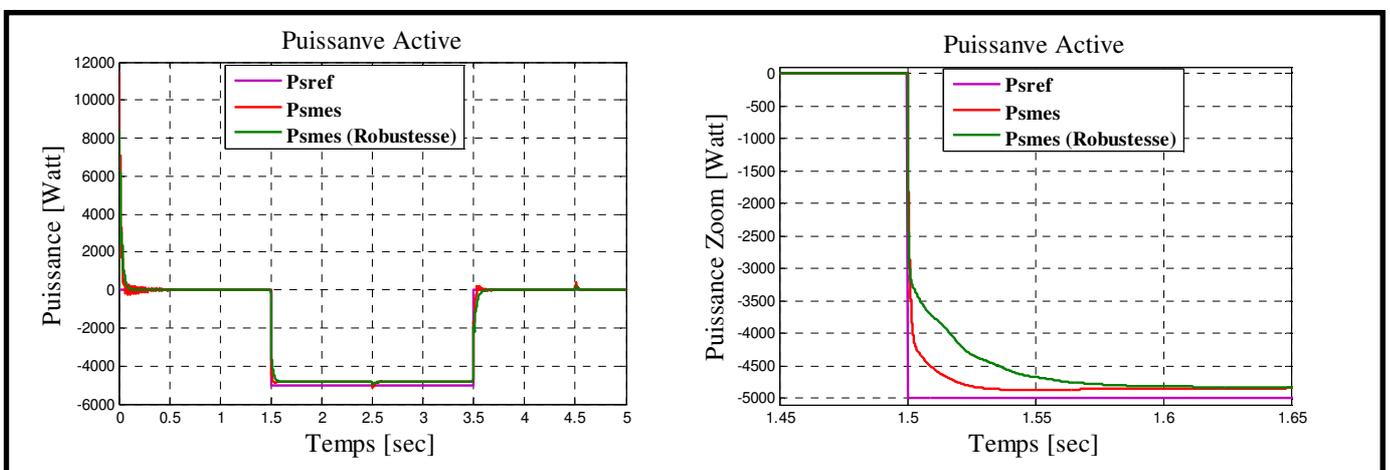
III.8.10 Robustesse de la régulation

Pour une évaluation plus juste de la méthode de contrôle, on fait appel à des tests de robustesses qui seront l'objectif de cette section.

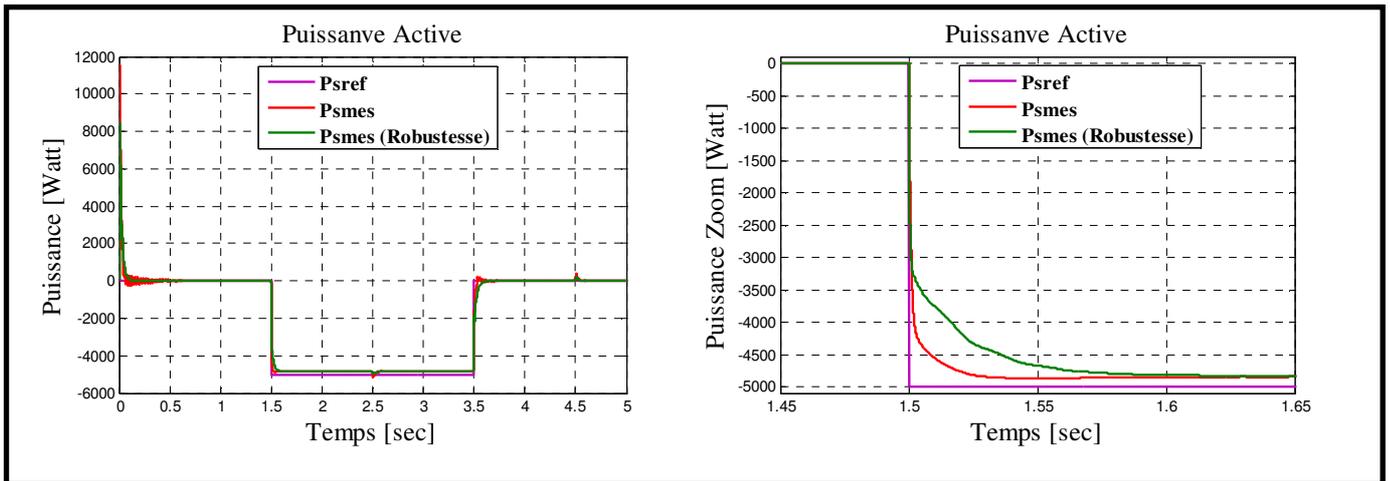
L'évaluation de la robustesse des systèmes de contrôles est un point important, surtout pour les systèmes comportant plusieurs entités en interaction ou les systèmes à fortes variations de paramètres, ainsi que dans le cas où la mesure des paramètres demeure des incertitudes importantes [12] [26].

L'objectif de l'essai de robustesse est d'examiner la sensibilité de la commande face aux éventuelles variations des paramètres du système. En effet les calculs de régulateurs sont basés sur des fonctions de transfert dont les paramètres sont supposés fixes. Toutefois, ces paramètres sont soumis à des variations entraînées par différents phénomènes physiques (saturation des inductances, échauffement des résistances...). Ajoutons à cela que l'identification de ces paramètres est soumise à des imprécisions dues à la méthode employée et aux appareils de mesure [6]. Conditions de l'essai :

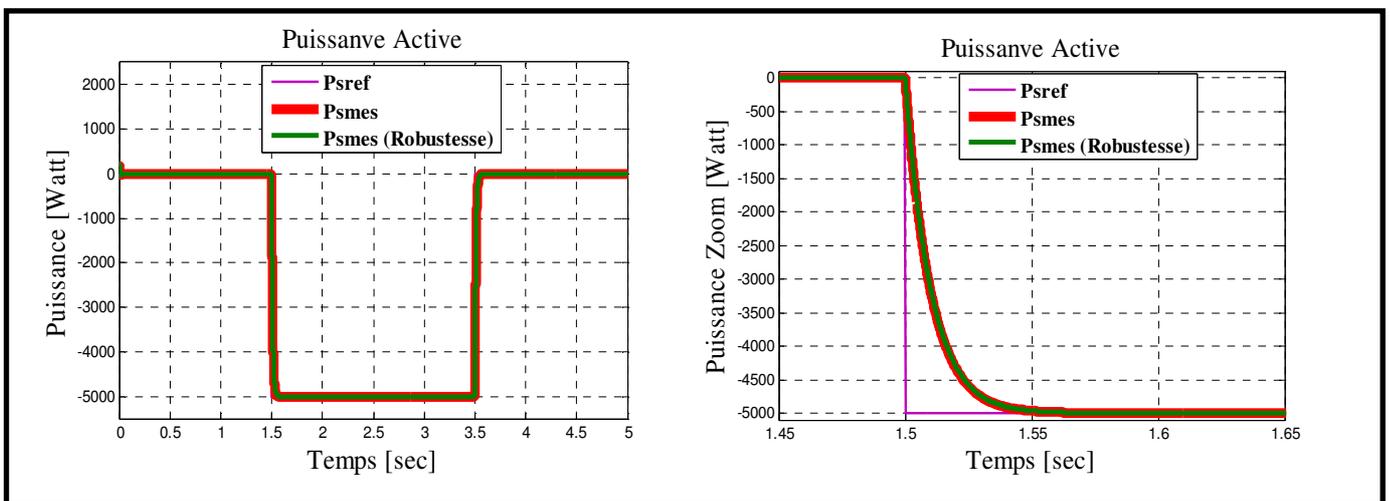
- Résistances R_s et R_r multipliées par 5.
- Inductances L_s , L_r et M_{sr} , divisées par 2.



A : La puissance active pour la commande vectorielle directe.



B : La puissance active pour la commande vectorielle indirecte sans boucle de puissance.



C : La puissance active pour la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance.

Figure III.37 : Effet sur la puissance active des variations de paramètres de la machine.

La figure III.37 présente l'évolution de la puissance active lors des variations des paramètres de la machine asynchrone à double alimentation. On remarque que ces variations affectent peu le système qui parvient tout de même à garantir le contrôle des puissances.

Ces essais de robustesse nous ont dévoilé les points faibles de la commande directe et indirecte sans boucle de puissance vis-à-vis des variations des paramètres du système.

Le suivi des puissances est toujours assuré et la stabilité n'est pas affectée par ces variations de paramètre.

En effet, la variation des paramètres de la machine asynchrone à double alimentation a engendré une légère augmentation de temps de réponse pour la commande directe et indirecte sans boucle de puissance, alors qu'elle ne varie pas pour la commande indirecte avec boucle de puissance. Cependant, l'utilisation d'une boucle supplémentaire sur la puissance va permettre de corriger l'erreur statique de la commande sans boucle de puissance et d'atténuer le retard de la réponse que présente cette commande.

Cette augmentation est due essentiellement au fait que les régulateurs sont dimensionnés à base des fonctions de transfert dont les paramètres sont supposés constantes.

La commande indirecte avec bouclages des puissances nous permet d'avoir un système avec une robustesse suffisante. Nous fonctionnons avec des régulateurs PI qui ne sont pas des garants d'une grande robustesse. Cependant, le bouclage des puissances nous garantit un niveau de robustesse acceptable.

Par ailleurs si plusieurs paramètres de la machine varient en même temps, il n'y a aucun doute que les régulateurs n'arriveront plus à faire fonctionner le système convenablement et de maintenir le système stable ; il faudrait alors faire appel à d'autres types de régulateurs plus robustes (PI flou, LQG et RST par exemple).

III.9 Conclusion

En premier lieu de ce chapitre, nous avons vu brièvement une description générale de la machine asynchrone à double alimentation précisant ainsi sa constitution, sa structure, son principe et le mode de fonctionnement, domaine d'application, différents topologie et quelques avantages et inconvénient de la MADA.

Ensuite, nous avons présenté le modèle mathématique de la machine asynchrone à double alimentation en vue d'une alimentation triphasée sinusoïdale pour un fonctionnement en générateur qui est obtenu par des transformations de passage d'un système triphasé à un système biphasé puis on applique la transformation de Park, sur la base d'un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. Du point de vue de la modélisation, le modèle d'état de la machine obtenu est un modèle non linéaire fortement couplé.

Enfin nous avons terminé la première partie de ce chapitre par une simulation de la MADA en boucle ouvert.

En ce qui concerne cette deuxième partie de ce chapitre qui nous a permis d'établir la synthèse de la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la machine asynchrone à double alimentation utilisée en fonctionnement génératrice. Trois modes de contrôles ont été détaillés en utilisant un régulateur proportionnel intégral (PI). La commande directe, basé sur l'hypothèse d'un découplage parfait entre les deux axes directs et en quadratures et la commande indirecte avec et sans boucle de puissance, qui tient compte du couplage entre les axes et utilise des termes de compensation pour le corriger.

Le développement de différentes méthodes de commande a permis de mettre en évidence des aspects intéressants pour la poursuite de l'étude du système éolien. Effectivement, nous avons pu voir que la commande directe nous a donné des résultats satisfaisants avec une facilité de mise en service.

En revanche, la commande indirecte avec boucle de puissance reste plus complexe à mettre en œuvre, elle permet aussi d'obtenir un système plus performant et plus robuste. La présence d'une boucle

des courants dans la commande indirecte lui offre un avantage, par rapport à la commande directe permettant la limitation des courants rotoriques pour protéger la machine. Cette commande permettra d'avoir un fonctionnement optimal du système de génération électrique en minimisant les éventuels soucis liés aux variations des paramètres.

Nous tiendrons donc la méthode indirecte avec boucle de puissance pour la commande de la MADA au sein d'un système éolien dans le reste de notre travail.

Dans le prochain chapitre, nous allons étudier la commande de la génératrice asynchrone à double alimentation (MADA) par PI flou.

CHAPITRE IV

Commande la MADA par PI Flou

IV.1. INTRODUCTION

La logique floue, ou plus généralement le traitement des incertitudes, est l'une des classes de l'intelligence artificielle. Elle a pour objet l'étude et la représentation des connaissances imprécises et le raisonnement approché. Elle a été connue en première fois comme une branche mathématique complémentaire à la théorie de la logique classique, puis elle a trouvé sa place parmi les techniques de commande basées sur l'intelligence artificielle. Elle a été conçue au milieu des années soixante à l'université de Berkley en Californie par le professeur Lotfi Zadeh qui a introduit la notion des variables linguistiques et des ensembles flous. La première application expérimentale de cette technique de commande est celle réalisée par Mamdani. La logique floue ne remplace pas nécessairement les systèmes classiques de régulation. Elle est complémentaire et utilisée particulièrement lorsqu'on ne dispose pas de modèle mathématique précis du processus à commander, ou lorsque ce dernier présente de forts non linéarités ou imprécisions. De plus, l'intérêt de la logique floue réside dans sa capacité de traiter l'imprécis, l'incertain et le vague. Ainsi, le succès de la commande par la logique floue trouve en grande partie son origine dans sa capacité à traduire une stratégie de contrôle d'un opérateur qualifié en ensemble de règles linguistiques facilement interprétables [21]. Actuellement la logique floue a trouvé son application dans plusieurs domaines, telles que, la gestion, la médecine et la commande des systèmes. Dans ce dernier domaine d'application, on peut citer la commande des bras robotiques, des machines-outils, des réacteurs chimiques, des véhicules, des appareils électroménagers ...etc.

Dans ce chapitre, on présentera un aperçu général sur la théorie de la logique floue et ses principes de base. Ensuite on montrera comment construire un régulateur flou, et l'appliquer au réglage de puissance active et réactive de la MADA. Des résultats de simulation seront aussi présentés pour montrer l'amélioration du comportement dynamique de la puissance active et réactive de la MADA.

IV.2 Historique de la logique floue

Ce sont les premières approches du concept d'incertitude d'Heisenberg développées par des chercheurs américains dans les années 20 et 30 qui ont conduit à l'apparition de la logique floue. Mais ce n'est qu'en 1965 que les bases théoriques de cette logique sont proposées par le professeur Lotfi Zadeh, dans un article intitulé «Fuzzy sets» (Ensembles flous). Cet automaticien, de réputation internationale, a depuis réalisé de nombreuses avancées théoriques qui ont contribué à la modélisation de phénomènes sous forme floue, dans le but de palier les limitations dues aux incertitudes des modèles classiques à équation différentielle.

Voici l'essentiel de l'historique de la logique floue [34] :

- ❖ En 1973, Lotfi Zadeh propose d'appliquer la logique floue pour résoudre les problèmes de réglage.

- ❖ En 1975, le professeur Mamdani propose à Londres, une première application très encourageante du réglage par la logique floue et développe une stratégie pour le contrôle d'une chaudière à vapeur.
- ❖ En 1978, c'est la société danoise F.L. Smidth-Fuller qui réalise le contrôle d'un four à ciment : c'est la première véritable application industrielle de la logique floue.
- ❖ En 1983, c'est un épurateur d'eau à commande par la logique floue qui est mis au point avec succès.
- ❖ A partir de 1985, la logique floue est introduite par le chercheur M. Suegno au Japon. Ce type de commande fut alors l'objet des premières réalisations remarquables développées à la fin des années 80 et au début des années 90 telles que le métro Sendai (1987) et le lave-linge Aïsaïgo Pay Fuzzy de Matsushita (1990).

Depuis, la logique floue connaît au Japon un véritable essor dû au fait que les sociétés japonaises ont vite compris ses avantages, à la fois techniques et commerciaux:

- ❖ Facilité d'implantation.
- ❖ Solutions de problèmes multi variables complexes.
- ❖ Robustesse vis-à-vis des incertitudes.
- ❖ Possibilité d'intégration du savoir-faire de l'expert.

Depuis peu, il se développe aussi bien en Europe qu'aux USA une intense activité de recherche afin d'introduire le principe du réglage par la logique floue dans de nombreuses applications industrielles telles que : le traitement des eaux, les grues, les métros, les systèmes de ventilation et de climatisation et les automobiles. Enfin, il est intéressant de noter que depuis quelques années des processeurs flous sont apparus sur le marché, et sont de véritables processeurs dédiés à des applications de réglage par la logique floue.

IV.3 Domaine d'application

Les systèmes flous ont été utilisés dans une large variété d'applications industrielles, gestionnaires et médicales. Parmi ses applications on peut citer [21] [34]:

- ❖ Systèmes audio-visuels (appareils de photos autofocus, caméscope à stabilisateur d'images, photocopieurs, ...).
- ❖ Appareils électroménagers (lave-linge, aspirateurs, autocuiseurs, ...etc.).
- ❖ Systèmes autonomes mobiles.
- ❖ Systèmes de transport (train, métro, ascenseur, ...).
- ❖ Systèmes de conditionnement d'ambiance.
- ❖ Systèmes de décision, diagnostic, reconnaissance.

- ❖ Systèmes de contrôle/commande dans la plupart des domaines industriels de production, transformation, traitement de produit et déchet.
- ❖ Systèmes d'autoroute automatisés : direction automatique, freinage et contrôle de la manette des gaz pour les véhicules.
- ❖ Robotique : contrôle de la place et organisation de chemin.
- ❖ Produits de consommation courante.

IV.4 Concept de la logique floue

L'homme perçoit, raisonne, imagine et décide à partir des modèles ou de représentation. Sa pensée n'est pas binaire. L'idée de la logique floue est de capturer l'imprécision de la pensée humaine et de l'exprimer avec des outils mathématiques appropriés. La résolution d'un problème exige la recherche d'un modèle qui est le plus objectif et le plus certain possible. Les modèles de notre cerveau peuvent être assez compliqués et également vagues, flous ou imprécis. L'homme ne raisonne pas comme l'ordinateur : au tout ou rien [21]. La logique floue inspire ses caractéristiques du raisonnement humain. Elle est basée sur la constatation que la plupart de phénomènes ne peuvent être représentés à l'aide de variables booléennes qui ne peuvent prendre que deux valeurs (0 ou 1). Peut-on considérer un homme de taille 1.7 m grand ou petit ? N'est-il pas ni vraiment grand, ni vraiment petit ? Pour répondre à ce type de question, la logique floue considère la notion d'appartenance d'un objet à un ensemble, non plus comme une fonction booléenne, mais comme une fonction qui peut prendre toutes les valeurs entre 0 et 1.

En effet, elle caractérise un homme par un degré de vérification ou un degré d'appartenance à "homme de grande taille" compris entre 0 et 1. On peut également définir une fonction "homme de taille moyenne", et une fonction "homme de petite taille"...etc.

Alors, un homme de taille quelconque a trois degrés d'appartenance aux trois catégories "taille petite, taille moyenne et taille grande".

Un homme de taille 1.75 m appartient à la catégorie de "taille grande" avec un degré de vérification de 50% et à la catégorie de "taille moyenne" avec le même degré de vérification. Tandis qu'il appartient à la catégorie de "taille petite" avec un degré de vérification de 0%. Cela peut être traduit par la figure (IV.1).

Cette représentation montre que le passage d'une catégorie à une autre ne se fait pas brutalement comme dans le cas de la logique classique, mais il se fait progressivement. Mathématiquement, on peut définir ou associer une fonction $\mu_A(x)$ qui exprime le degré d'appartenance de l'élément x à la catégorie A , où :

x : est la taille de l'homme.

A : est la catégorie ou la classe (petite, moyenne, grande).

Telle que pour la catégorie (grande) par exemple on a :

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{Pour } x \geq 1.8 \\ 0 & \text{Pour } x \leq 1.7 \\ 10(x-1.7) & \text{Pour } 1.7 < x < 1.8 \end{cases} \quad (\text{IV.1})$$

De la même manière, on peut définir la fonction $\mu_B(x)$, $\mu_C(x)$ pour les catégories moyenne et petite, respectivement. On appelle $\mu_A(x)$, $\mu_B(x)$ et $\mu_C(x)$ fonctions d'appartenance.

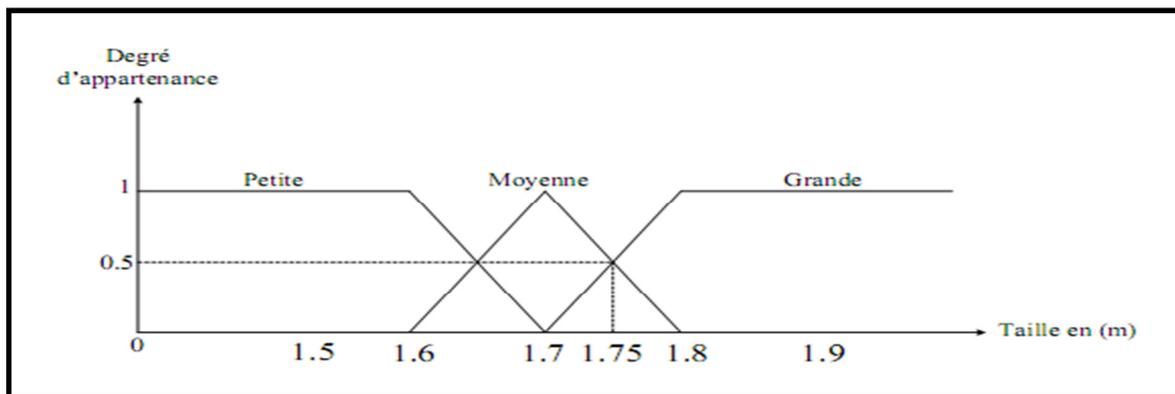


Figure IV.1 : Concept flou des différentes catégories de la taille d'un homme.

IV.5 Notions de base de la logique floue

Cette section n'a pas pour but de donner un état de lieux complet de la logique floue, mais uniquement fournir quelques notions de base de la logique floue d'une manière abrégée.

IV.5.1 Ensemble flou

Dans la théorie classique des ensembles, c'est la fonction caractéristique qui définit l'ensemble. Cette fonction ne prend que les deux valeurs discrètes 0 (l'élément n'appartient pas ...) ou 1 (...appartient à l'ensemble).

Un ensemble flou est défini par une fonction d'appartenance qui peut prendre toutes les valeurs réelles comprises entre 0 et 1. C'est l'élément de base de la logique floue. Il a été introduit en première fois par Zadeh en 1965. Le concept de ce dernier a pour but d'éviter le passage brusque d'une classe à une autre et de permettre des graduations dans l'appartenance d'un élément à une classe ; c'est-à-dire d'autoriser un élément à appartenir plus ou moins fortement à une classe [21].

Les trois catégories "Petite, Moyenne, Grande" définies précédemment, associées à leurs fonctions d'appartenance, sont appelées des ensembles flous. Et on peut définir également **l'univers de discours ou l'univers de référence** comme étant l'ensemble des valeurs réelles que peut prendre la variable floue x (la taille de l'homme). Dans un domaine continu les ensembles flous sont définis par leurs fonctions d'appartenance. Tandis que dans le cas discret les ensembles flous sont des valeurs discrètes dans

l'intervalle $[0 \ 1]$.

IV.5.2 Différentes formes des fonctions d'appartenance

Le choix de la forme des fonctions d'appartenance est subjectif et soumis aux préférences du concepteur. Les formes géométriques les plus répandues en pratique sont : trapézoïdale et triangulaire.

L'allure de la forme trapézoïdale est définie par quatre points A, B, C, D (figure IV.2). Le triangle peut être considéré comme un cas spécial du trapèze lorsque deux points coïncident ($B=C$).

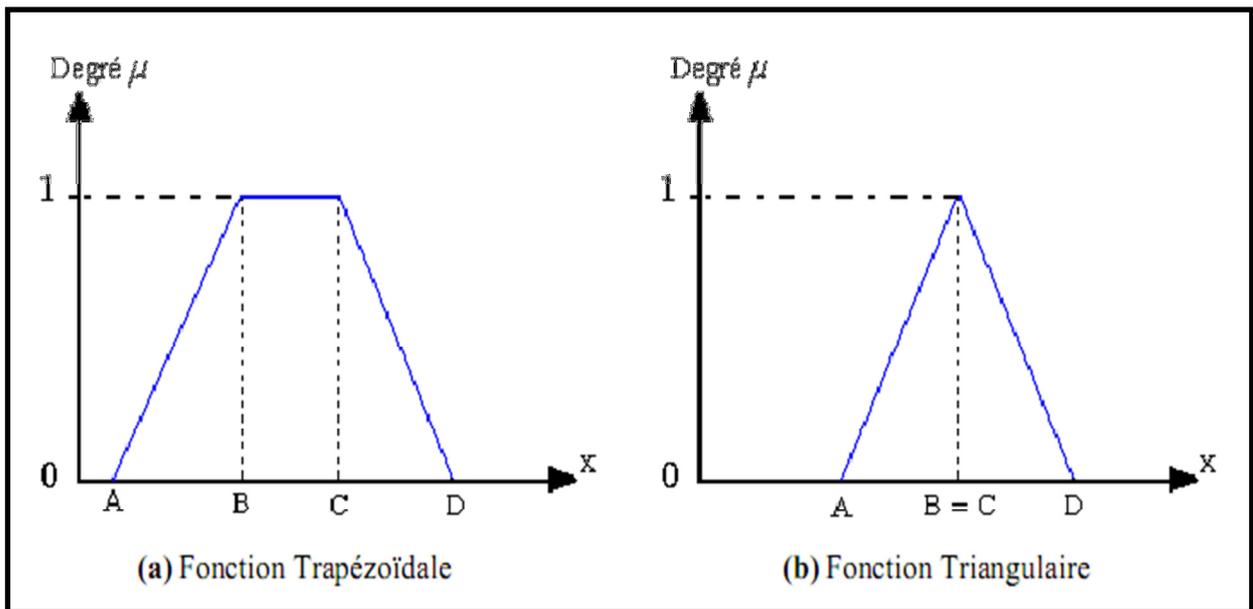


Figure IV.2 : Forme des fonctions d'appartenances usuelles.

Généralement ces deux formes sont suffisantes pour délimiter les ensembles flous. Cependant, la forme gaussienne (cloche) donne, dans certains cas, une meilleure représentation des ensembles flous (figure IV.3).

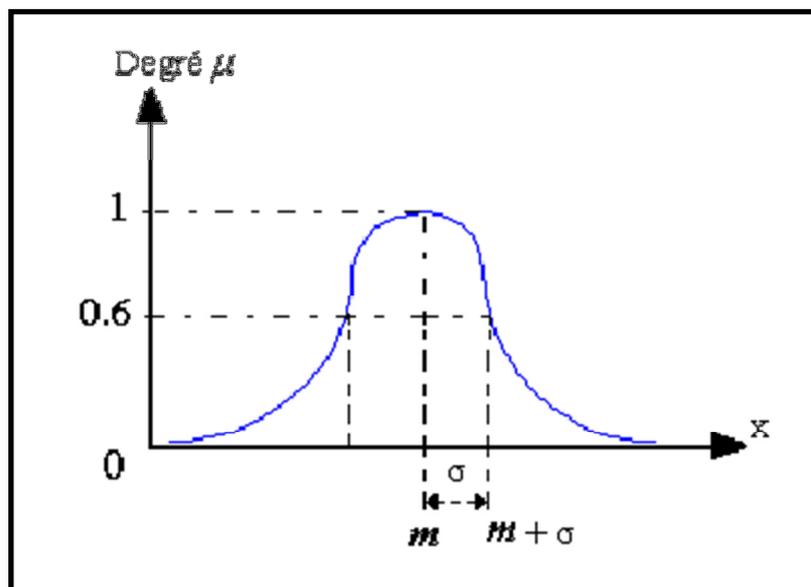


Figure IV.3 : Forme de la fonction d'appartenance gaussienne.

Les fonctions de ces formes sont données par :

$$\text{❖ Fonction trapézoïdale : } \mu(x) = \max\left[0, \min\left(\frac{x-A}{B-A}, 1, \frac{D-x}{D-C}\right)\right] \quad (\text{IV.2})$$

$$\text{❖ Fonction triangulaire : } \mu(x) = \max\left[0, \min\left(\frac{x-A}{B-A}, 1, \frac{C-x}{C-B}\right)\right] \quad (\text{IV.3})$$

$$\text{❖ Fonction gaussienne : } \mu(x) = \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (\text{IV.4})$$

IV.5.3 Variables linguistiques

Le concept des variables linguistiques joue un rôle important dans le domaine de la logique floue. Une variable linguistique comme son nom le suggère, est une variable définie à base de mots ou des phrases au lieu des nombres. En effet, la description d'une certaine situation, d'un phénomène ou d'un procédé contient en général des expressions floues comme "quelque, beaucoup, souvent, chaud, froid, rapide, lent, grand, petit ...etc" [21]. Ce genre d'expressions forme ce qu'on appelle des variables linguistiques de la logique floue.

On peut représenter une variable linguistique par un triplé (V, U, T_v) , tels que : V est une variable numérique (Vitesse, Taille, Température) définie sur un univers de référence U et T_v est un ensemble de catégories floues de U , qui sont utilisées pour caractériser V à l'aide de fonctions d'appartenance.

Considérons la vitesse de rotation d'une machine électrique comme une variable linguistique définie sur un univers de discours $U = [0,100]$ rd/s, et son ensemble de catégories floues $T_{\text{vitesse}} = (\text{Lente}, \text{Rapide}, \text{Moyenne})$.

Ces trois ensembles flous de T_{vitesse} peuvent être représentés par des fonctions d'appartenance comme le montre la figure (IV.4).

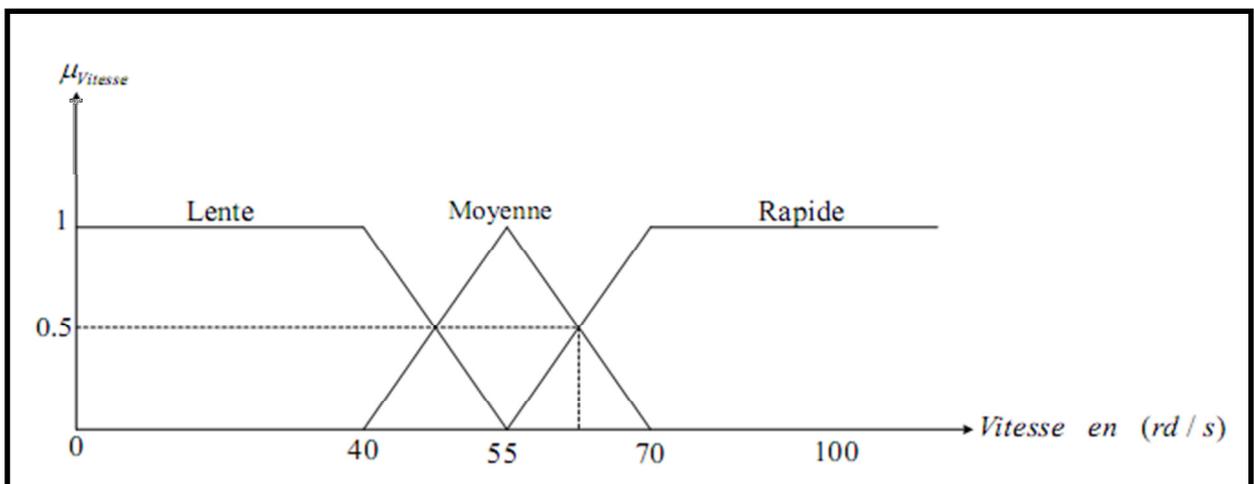


Figure IV.4 : Représentation graphique des ensembles flous d'une variable linguistique.

IV.5 4 Opérateurs de la logique floue

Dans la théorie des ensembles classiques on définit les relations intersection, union et complémentation qui sont traduites par les opérateurs ET, OU, NON . Ces opérateurs existent également en logique floue, mais sont adaptés aux spécificités de cette logique pour traiter les ensembles flous. Ainsi des opérateurs homologues à ceux de la logique booléenne sont créés en essayant de respecter un certain nombre de propriétés et afin de retrouver les opérations de base existant en logique classique [34].

Soient E et F, deux sous-ensembles flous d'une variable linguistique définis sur l'univers de discours UD par leurs fonctions d'appartenance respectives μ_E et μ_F .

IV.5 4.1 Opérateur ET (Intersection floue)

Le sous-ensemble flou, correspondant à l'intersection des sous-ensembles E et F est défini par les éléments x de l'univers de discours UD qui appartiennent à E et F.

Dans la logique floue, l'opérateur ET peut être exprimé par :

$$\mu_{E \cap F}(x) = \min\{\mu_E(x), \mu_F(x)\} \quad \forall x \in UD \quad (IV.5)$$

Ou bien :

$$\mu_{E \cap F}(x) = \mu_E(x) \cdot \mu_F(x) \quad \forall x \in UD \quad (IV.6)$$

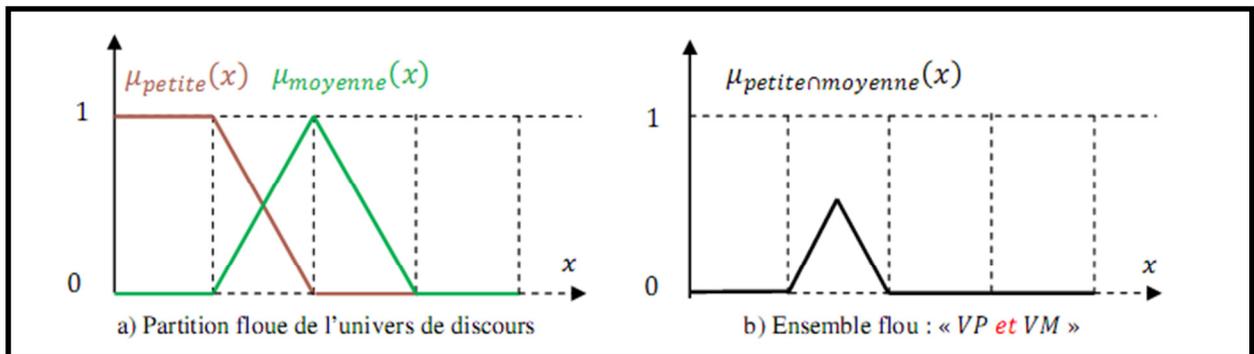


Figure IV.5 : Intersection des sous-ensembles flous « petite » et « moyenne » pour la variable linguistique (vitesse).

IV.5 4.2 Opérateur OU (Union floue)

Le sous-ensemble flou correspondant à l'union des sous-ensembles E et F est un sous-ensemble de l'univers de discours UD défini par tous les éléments x de UD qui appartiennent ou bien à E ou bien à F, ce que l'on note $(E \cup F)$. L'opérateur OU est généralement réalisé par la formation du maximum, que l'on exprime comme suit :

$$\mu_{E \cup F}(x) = \max\{\mu_E(x), \mu_F(x)\} \quad \forall x \in UD \quad (IV.7)$$

Ou bien :

$$\mu_{E \cup F}(x) = \mu_E(x) + \mu_F(x) \quad \forall x \in UD \quad (IV.8)$$

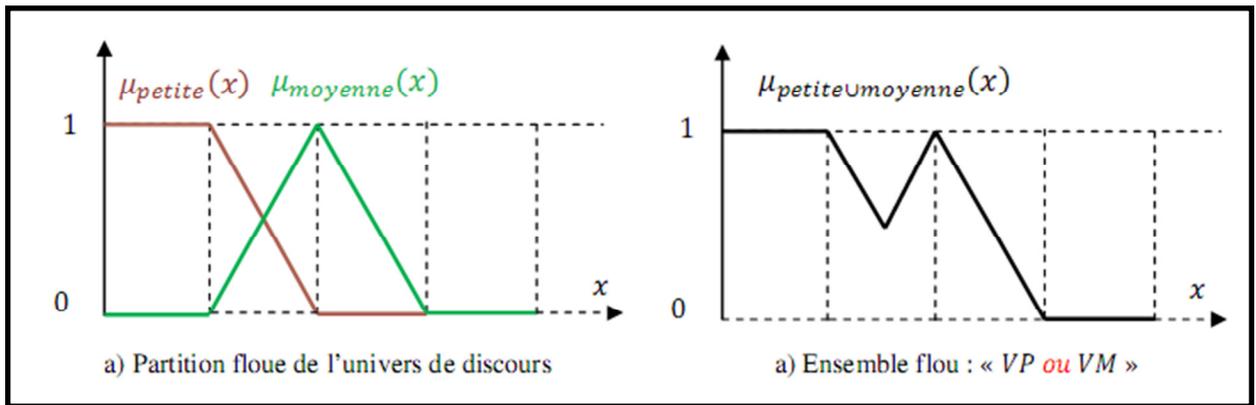


Figure IV.6 : Union des sous-ensembles flous « petite » et « moyenne » pour la variable linguistique (vitesse).

IV.5 4.3 Opérateur NON (complémentation floue)

Comme l'illustre la figure (IV.7), le sous-ensemble flou complémentaire du sous-ensemble E est un sous-ensemble de l'univers de discours UD défini par les éléments x de l'UD qui n'appartiennent pas au sous-ensemble flou E. On peut exprimer ça par :

$$\mu_{\bar{E}}(x) = 1 - \mu_E(x) \quad \forall x \in UD \quad (IV.9)$$

Le complément flou représente l'opération NON de la logique classique au sens flou.

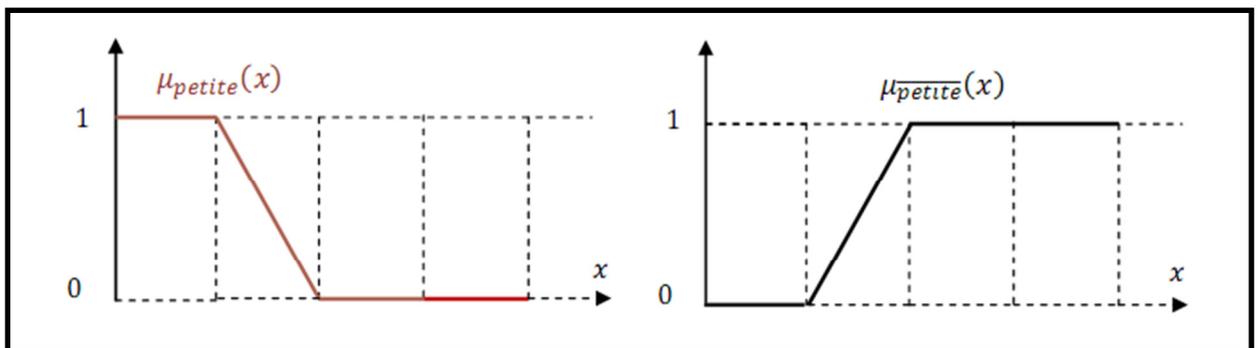


Figure IV.7 : Complémentation du sous-ensemble flou « petite ».

IV.5 5 Règles floues

La règle floue est une relation exprimée à l'aide d'une implication entre deux propositions floues. Par exemple, considérons deux variables linguistiques (V_1, U, T_{v1}) , (V_2, U, T_{v2}) et les deux propositions suivantes " V_1 est A ", " est B ", où A et B sont deux ensembles flous de V_1 et V_2 . On peut définir la règle floue par l'expression "si V_1 est A Alors V_2 est B".

- ❖ La proposition " V_1 est A " est la condition de l'implication.
- ❖ La proposition " V_2 est B " est la conclusion de l'implication.

Généralement, plusieurs règles floues sont nécessaires pour prendre une décision face à une situation

donnée. On s'intéresse au cas de plusieurs règles floues dans le domaine de la commande et la régulation. Les règles floues peuvent être décrites de plusieurs façons [21]:

- ❖ **Linguistiquement** : dans ce cas, on exprime les règles de façon explicite comme dans l'exemple suivant :

Si l'accélération est faible et la vitesse est faible Alors faire appel à un grand couple".

- ❖ **Symboliquement** : il s'agit, dans ce cas, d'une description linguistique où l'on remplace la désignation des ensembles flous par des symboles tels que (PG, PP, ...etc) désignant (Positif Grand, Positif Petit, ...etc)
- ❖ **Par matrice d'inférence** : dans ce cas, on rassemble toutes les règles qui sont désignées symboliquement dans un tableau appelé "Matrice d'inférence". Les entrées du tableau représentent les degrés d'appartenance des variables linguistiques des entrées aux différents ensembles flous. Et l'intersection d'une colonne et d'une ligne donne l'ensemble flou de sortie défini par la règle.

IV.5 6 Descriptions d'une commande par la logique floue

La commande par la logique floue est en pleine expansion. En effet, cette méthode permet d'obtenir une loi de réglage souvent très efficace sans devoir faire des modélisations approfondies. Par opposition à un régulateur standard ou à un régulateur à contre-réaction d'état, le régulateur par logique floue ne traite pas une relation mathématique bien définie, mais utilise des inférences avec plusieurs règles, se basant sur des variables linguistiques. Par des inférences avec plusieurs règles, il est possible de tenir compte des expériences acquises par les opérateurs d'un processus technique [21].

Généralement le traitement d'un problème par la logique floue se fait en trois étapes :

- ❖ La quantification floue des entrées, appelée aussi la **Fuzzification**. Elle permet la conversion des variables des entrées qui sont des grandeurs physiques, en grandeurs floues, ou variables linguistiques.
- ❖ L'établissement des règles liant les sorties aux entrées, appelé **l'Inférence floue**.
- ❖ La **Défuzzification** qui est l'opération inverse de la **fuzzification**. Elle consiste à transformer les variables linguistiques en variables réelles ou numériques.

Le schéma bloc d'un contrôleur flou est illustré par la figure (IV.8) [21] [34] :

Le contrôleur flou comporte essentiellement quatre parties ; une interface de Fuzzification, une base des règles, un mécanisme d'inférence et une interface de Défuzzification.

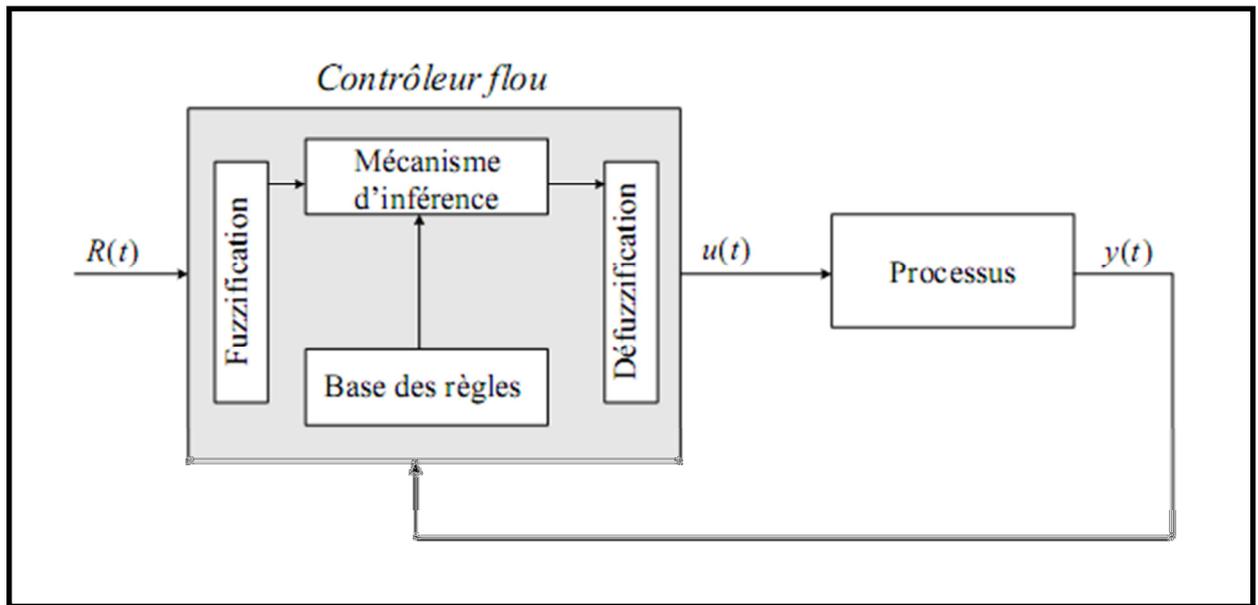


Figure IV.8 : Configuration de base d'un régulateur par logique floue (RLF).

Avec :

$R(t)$: est le signal de référence.

$u(t)$: est le signal de commande.

$y(t)$: est la sortie du système à commander.

IV.5.6.1 Interface de fuzzification

La fuzzification est l'opération de projection des variables physiques réelles sur des ensembles flous caractérisant les valeurs linguistiques prises par ces variables [21] [34]. Le bloc de fuzzification effectue les fonctions suivantes :

- ❖ Définition des fonctions d'appartenance de toutes les variables d'entrées.
- ❖ Transformation des grandeurs physiques (réelles ou numériques) à des grandeurs linguistiques ou floues.
- ❖ Représentation d'échelle transférant la plage des variables d'entrées aux univers de discours correspondants.
- ❖ Pour les fonctions d'appartenance, on utilise généralement les formes triangulaires et trapézoïdales.

IV.5.6.2 Base des règles

Ce bloc est une base de connaissance qui correspond à l'expertise ou au savoir-faire de l'opérateur sur le comportement du système. Elle est composée de l'ensemble des informations et des connaissances dans le domaine d'application et le résultat de commande prévu. Elle permet de déterminer le signal de sortie du contrôleur flou et exprime la relation qui existe entre les variables d'entrées transformées en

variables linguistiques et les variables de sortie converties également en variables linguistiques. Ainsi, elle est constituée par une collection de règles données sous la forme «Si...Alors». D'une manière générale, on peut exprimer la $i^{\text{ème}}$ règle floue par la relation suivante :

Si x_1 est $F_1^{(i)}$ et x_2 est $F_2^{(i)}$ et... x_n est $F_n^{(i)}$ Alors y_j est $G_j^{(i)}$

Où :

$i = 1, \dots, m$. m : est le nombre total des règles.

$F_1^{(i)}, F_2^{(i)}, \dots, F_n^{(i)}$: sont les ensembles flous des entrées (x_1, x_2, \dots, x_n) et $G_j^{(i)}$ est l'ensemble flou correspondant à la sortie y_j .

On peut écrire les règles d'inférence sous forme d'une matrice appelée Matrice d'inférence, qui est généralement antisymétrique. A titre d'exemple, si on considère un contrôleur flou à deux entrées caractérisées par trois ensembles flous et une sortie, alors la matrice d'inférence peut prendre la forme suivante :

$X_2 \backslash X_1$	$F_1^{(1)}$	$F_1^{(2)}$	$F_1^{(3)}$
$F_2^{(1)}$	G^1	G^4	G^7
$F_2^{(2)}$	G^2	G^5	G^8
$F_2^{(3)}$	G^3	G^6	G^9

Tableau IV.1 : Matrice d'inférence floue.

IV.5.6.3 Mécanisme d'inférence flou

L'inférence floue ou la logique de prise de décision est le cœur du contrôleur flou qui possède la capacité de simuler les décisions humaines et de déduire (inférer) les actions de commande floue à l'aide de l'implication floue et des règles d'inférence de la logique floue [21]. Elle utilise les variables floues transformées par la fuzzification et les règles d'inférence pour créer et déterminer les variables floues de sortie, en se basant sur des opérations floues appliquées aux fonctions d'appartenance.

Comme on l'a mentionné, il existe plusieurs possibilités pour réaliser les opérateurs flous qui s'appliquent aux fonctions d'appartenance. On introduit la notion de mécanisme ou méthode d'inférence, qui dépend des relations utilisées pour réaliser les différents opérateurs dans une inférence, permettant ainsi un traitement numérique de cette dernière.

Pour le réglage par logique floue, on utilise en général l'une des trois méthodes suivantes :

- ❖ Méthode d'inférence Max-Min (Méthode de Mamdani).
- ❖ Méthode d'inférence Max-Produit (Méthode de Larsen).
- ❖ Méthode d'inférence Somme-Produit.

Le tableau suivant résume la façon utilisée par ces trois méthodes d'inférence pour représenter les trois opérateurs de la logique floue (Et, Ou Alors).

Opérateurs Flous			
Méthodes D'inférence	ET	OU	Alors
Max-Min	Minimum	Maximum	Minimum
Max-Produit	Minimum	Maximum	Produit
Somme-Produit	Produit	Moyenne	Produit

Tableau IV.2 : Méthodes usuelles de l'inférence floue.

IV.5.6.4 Interface de défuzzification

La défuzzification est la dernière étape dans la commande floue. Elle consiste à transformer les informations floues établies par le mécanisme d'inférence en une grandeur physique ou numérique pour définir la loi de commande du processus. Plusieurs méthodes ont été élaborées pour faire cette opération.

La méthode de défuzzification choisie est souvent liée à la puissance de calcul du système flou [21]. Parmi les plus couramment utilisées, on cite :

- ❖ **Méthode de Maximum** : cette méthode génère une commande qui représente l'abscisse de la valeur maximale de la fonction d'appartenance résultante issue de l'inférence floue. Cette méthode est simple, rapide et facile, mais présente certains inconvénients lorsqu'il existe plusieurs valeurs pour lesquelles la fonction d'appartenance résultante est maximale et ne tient pas compte de l'effet de toutes les règles.
- ❖ **Méthode de la moyenne des maximums** : cette méthode génère une commande qui représente la valeur moyenne de tous les maximums, dans le cas où il existe plusieurs valeurs pour lesquelles la fonction d'appartenance résultante est maximale.
- ❖ **Méthode du centre de gravité** : cette méthode génère une commande égale à l'abscisse du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante issue de l'inférence floue. Cette abscisse de centre de gravité peut être déterminée à l'aide de la relation générale suivante:

$$x_G = \frac{\int x \mu_{\text{rés}}(x) dx}{\int \mu_{\text{rés}}(x) dx} \quad (\text{IV.10})$$

L'intégrale du numérateur donne le moment de la surface, tandis que l'intégrale du dénominateur donne la surface de la fonction d'appartenance $\mu_{\text{rés}}(x)$.

Cette méthode est la plus utilisée dans les systèmes de commande floue, (car elle tient compte de toutes les règles et ne présente pas une confusion de prise de décision), malgré sa complexité, puisqu'elle demande des calculs importants.

IV.6 Avantages et inconvénients de la commande par la logique floue

La commande par logique floue réunit un certain nombre d'avantages et de désavantages. Les avantages essentiels sont [21] :

- ❖ Non nécessité d'une modélisation mathématique rigoureuse du processus ;
- ❖ La possibilité d'implanter des connaissances (linguistiques) de l'opérateur de processus ;
- ❖ La maîtrise du procédé avec un comportement complexe (fortement non- linéaire et difficile à modéliser);
- ❖ La réduction du temps de développement et de maintenance ;
- ❖ La simplicité de définition et de conception.

Par contre, les inconvénients sont [21] :

- ❖ Le manque de directives précises pour la conception d'un réglage (choix des grandeurs à mesurer, détermination de la fuzzification, des inférences et de la défuzzification) ;
- ❖ L'approche artisanale et non systématique (implantation des connaissances des opérateurs souvent difficile) ;
- ❖ La difficulté de montrer la stabilité dans tous les cas ;
- ❖ La cohérence des inférences non garantie a priori (apparition de règles d'inférence contradictoires possible).

IV.7 Pourquoi la logique floue dans la commande de machine asynchrone

Comme étudié dans le troisième chapitre, il est possible de modéliser les machines asynchrones en utilisant les équations d'état. La commande par logique floue est habituellement appliquée pour commander les procédés où la modélisation est impossible ou non- précise (une chaîne de production, par exemple). Pourquoi alors appliquer la logique floue à la commande des machines asynchrones ? Quels sont les intérêts de cette approche appliquée à ces machines asynchrones ? Les réponses à ces questions peuvent être résumées comme suit :

- ❖ La machine asynchrone est un procédé fortement non- linéaire. Un régulateur non- linéaire peut

donner de meilleures performances à ce système, par rapport au régulateur conventionnel. Etant donné que le RLF (Régulateur par Logique Flou) est un régulateur non- linéaire, nous pouvons alors l'utiliser afin d'obtenir un système de commande de haute performance ;

- ❖ L'implantation de la commande par logique floue est relativement plus facile que les autres méthodes modernes (commande adaptative classique, commande par réseau de neurones).

IV.8 Application de la logique floue à la commande de la machine asynchrone

Pour réaliser la commande indirecte des puissances actives et réactives avec boucle de puissance d'une machine asynchrone à double alimentation par logique floue, nous utilisons le schéma de commande par flux statorique orienté de la machine asynchrone à double alimentation, illustrée à la figure III.32; en remplaçant les régulateurs conventionnels (qu'ils soient de courant ou de puissance de type PI) par d'autres conçus par logique floue. Pour ce faire, nous allons suivre les étapes indiquées auparavant. Nous concevons en premier lieu le régulateur de puissance, puis nous passons aux régulateurs de courants.

IV.8.1 Régulateur de puissance

IV.8.1.1 Application du régulateur PI flou aux puissances de la MADA

Le schéma de base du régulateur flou repose sur la structure d'un régulateur classique à la différence que l'on va retenir la forme incrémentale (figure IV.9).

L'observation du processus montre que les grandeurs significatives pour le contrôle sont l'erreur de la puissance et la variation de cette erreur. On adoptera donc, pour les entrées du correcteur flou, ces deux grandeurs caractéristiques notées e et Δe . La sortie du régulateur ne sera pas les courants rotoriques, mais plutôt l'incrément des courants rotorique ΔI_{rdq} . Il suffit d'intégrer cette grandeur pour avoir la valeur du courant rotorique (direct et quadrature) de référence I_{rdq}^* . Cette configuration, analogue à celle d'un PI conventionnel, est souvent qualifiée de PI flou.

Les deux entrées du contrôleur flou sont l'erreur de vitesse et sa variation.

L'erreur de puissance statorique notée e est définie par :

$$e = P_{s\text{réf}} - P_s \quad (\text{IV.11})$$

La variation de l'erreur de puissance statorique notée Δe est définie par :

$$\Delta e = e(t + \Delta t) - e(t) = e(k + 1) - e(k) \quad (\text{IV.12})$$

La sortie du régulateur correspond à la variation de la commande ou du courant notée Δu .

Les trois grandeurs, e , Δe et Δu sont normalisées comme suit :

$$\begin{cases} E = K_e e \\ \Delta E = K_{\Delta e} \Delta e \\ \Delta U = K_{\Delta u} \Delta u \end{cases} \quad (\text{IV.13})$$

Où K_e , $K_{\Delta e}$ et $K_{\Delta u}$ sont des facteurs d'échelle ou de normalisation, et jouent un rôle déterminant sur les performances statiques et dynamiques de la commande.

On retrouve en entrée et en sortie du régulateur flou des gains dits « gains d'adaptation » ou gains de normalisation. Ces derniers jouent un rôle très important puisqu'ils permettent de fixer les performances de la commande (sensibilité du régulateur) et une flexibilité dans l'implémentation du régulateur tout en limitant les univers de discours des variables (d'entrée et de sortie) à un intervalle déterminé, par la normalisation des entrées et de sortie, d'où l'appellation « gain de normalisation ». Cependant, il n'existe aucune méthode systématique qui permet de déterminer ces paramètres, on doit donc procéder par la méthode essai-erreur (tâtonnement).

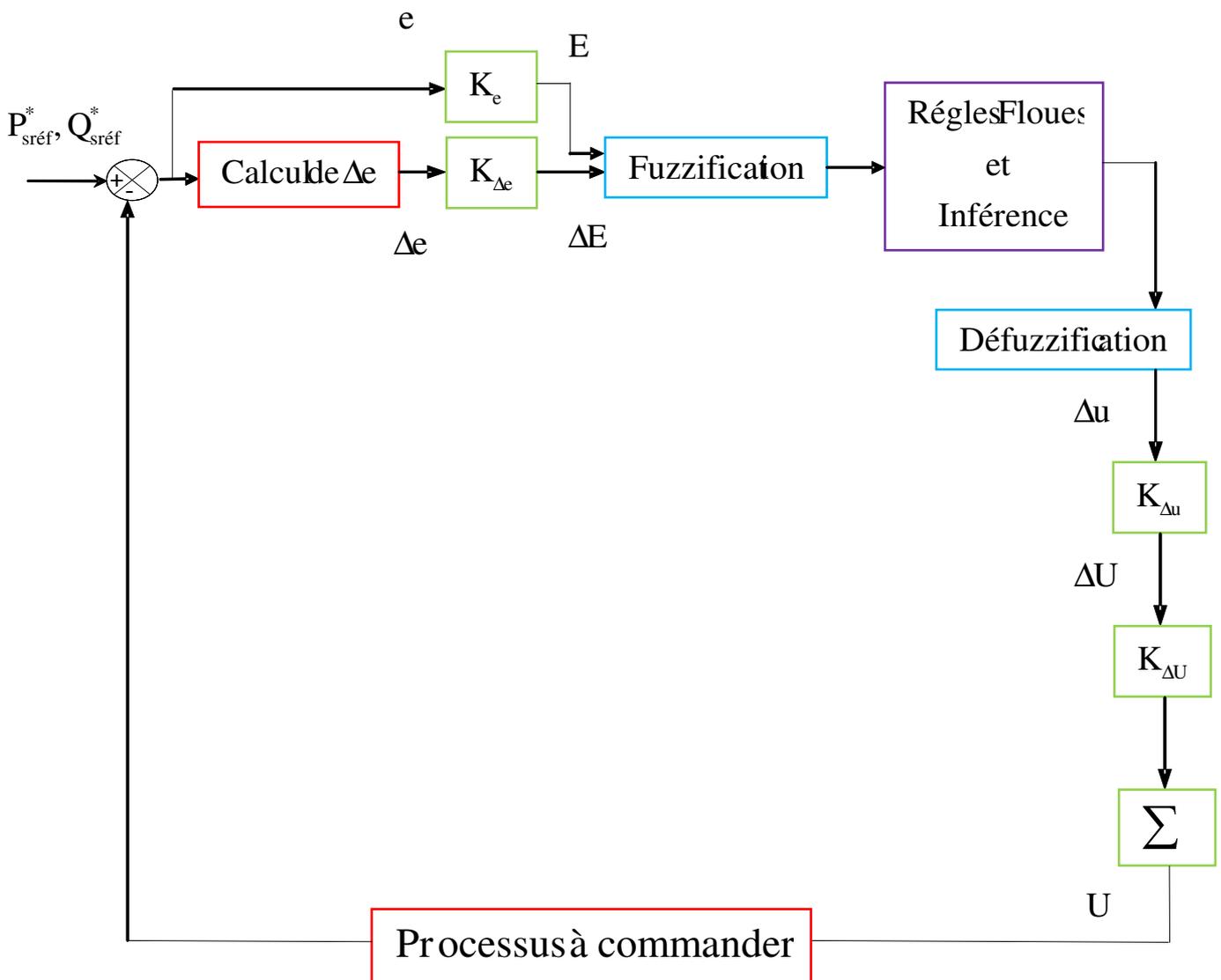


Figure IV.9 : Schéma synoptique d'un régulateur flou de la puissance.

IV.8.1.2 Fuzzification

Généralement, on introduit pour une variable x : trois, cinq ou sept ensembles flous. Une subdivision plus fine, c'est-à-dire, de plus de sept ensembles n'apporte aucune amélioration du comportement dynamique du réglage. Par contre, un tel choix compliquerait l'opération et influencerait sur le temps de calcul.

Dans le but d'améliorer le comportement dynamique du réglage de la machine, nous introduisons, pour les variables d'entrées et de sortie du RLF, sept ensembles représentés par des fonctions d'appartenance de forme triangulaire. Sauf pour les extrémités où la forme trapézoïdale est employée.

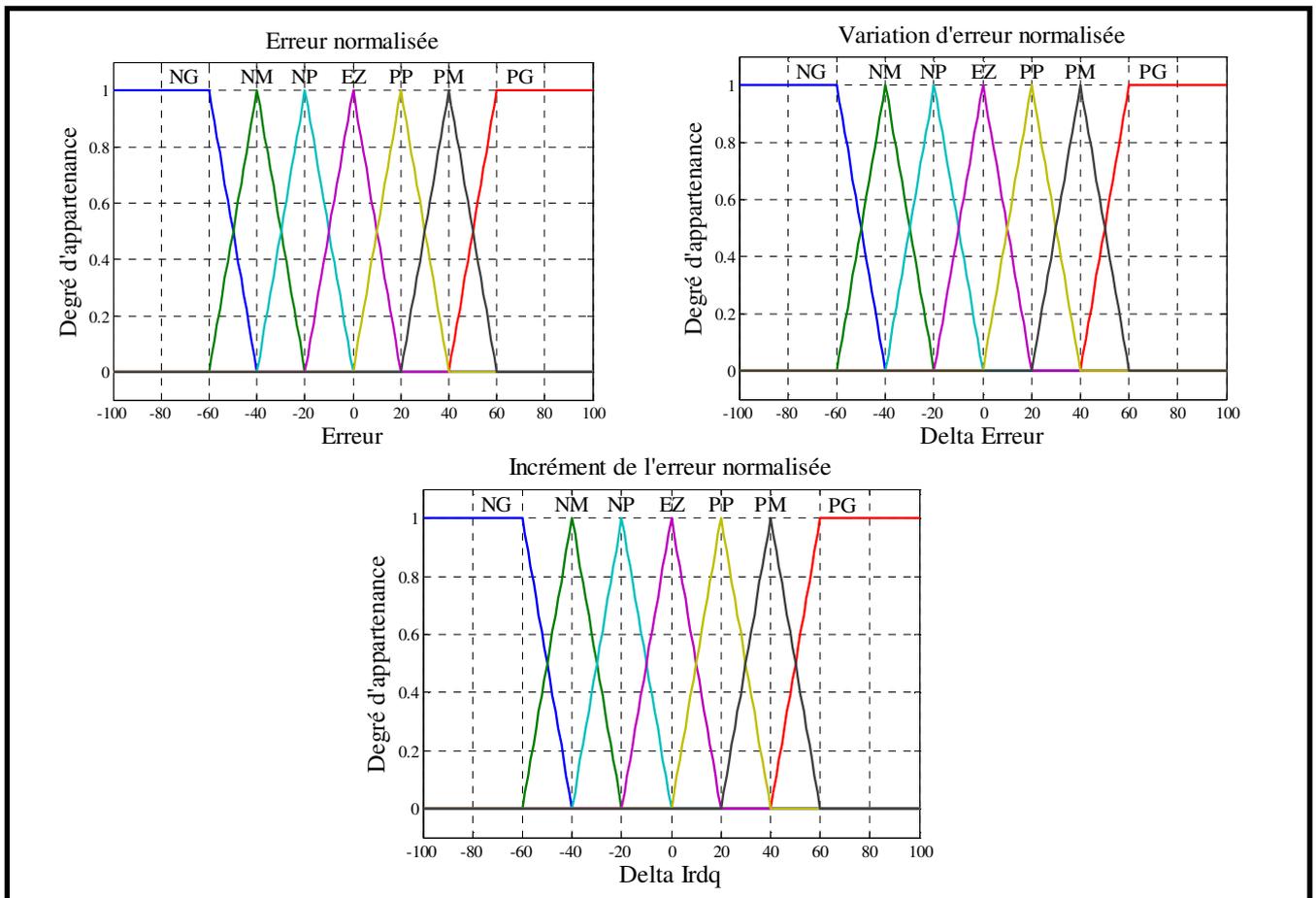


Figure IV.10 : Fonctions d'appartenance des différents variables linguistiques (RLF de puissance).

Les différents ensembles sont notés comme suit :

NG : Négatif Grand ;

NM : Négatif Moyen ;

NP : Négatif Petit ;

EZ : Environ Zéro ;

PP : Positif Grand ;

PM : Positif Moyen ;

PG : Positif Grand.

IV.8.1.3 Base de règles

La base des règles représente la stratégie de commande et le but désiré par le biais des règles de commande linguistiques [21]. Elle permet de déterminer la décision ou l'action à la sortie du contrôleur flou et exprimer qualitativement la relation qui existe entre les variables d'entrées et la variable de sortie.

A partir de l'étude du comportement du système, nous pouvons établir les règles de commande, qui relie la sortie avec les entrées. Comme nous l'avons mentionné, chacune des deux entrées linguistiques du contrôleur flou possède sept ensembles flous, ce qui donne un ensemble de quarante-neuf règles floues. Ces règles sont représentées dans une matrice dite « matrice d'inférence » (Tableau IV.3).

$E_{P,Q}$	NG	NM	NP	EZ	PP	PM	PG
$\Delta E_{P,Q}$							
NG	NG	NG	NG	NG	NM	NP	EZ
NM	NG	NG	NG	NM	NP	EZ	PP
NP	NG	NG	NM	NP	EZ	PP	PM
EZ	NG	NM	NP	EZ	PP	PM	PG
PP	NM	NP	EZ	PP	PM	PG	PG
PM	NP	EZ	PP	PM	PG	PG	PG
PG	EZ	PP	PM	PG	PG	PG	PG

Tableau IV.3 : Table de règles pour le RLF de la puissance.

D'après cette matrice, on peut définir les 49 règles, par exemple :

R_1 : Si E est NG et ΔE est NG Alors Δi_{rdq} est NG .

R_{19} : Si E est PP et ΔE est NP Alors Δi_{rdq} est EZ .

R_{41} : Si E est PM et ΔE est PM Alors Δi_{rdq} est PG .

.....

IV.8.1.4 Mécanisme d'inférence

A partir de la base des règles et les sous-ensembles flous correspondant à la fuzzification, le mécanisme d'inférence flou permet la détermination des variables floues de sortie. En effet, la traduction des opérateurs "ET", "OU" et "Alors" par des fonctions et la combinaison de ces différentes fonctions donnent la sortie floue du régulateur. Comme on l'a mentionné précédemment, plusieurs méthodes d'inférence ont été élaborées pour réaliser les opérateurs flous. Dans notre travail on a adopté la méthode d'inférence utilisée est celle de Mamdani (Max- Min), où l'opérateur «ET » est réalisé par la fonction Min, l'opérateur «Alors » de chaque règle par la fonction Min et la liaison entre toutes les règles (l'opérateur OU) par la fonction Max.

Alors la sortie floue résultante du régulateur c'est la contribution des 49 règles floues de la matrice d'inférence.

IV.8.1.5 Défuzzification

L'étape de la défuzzification est la dernière étape pour la conception d'un régulateur flou. Lorsque la sortie floue est calculée, il faut la transformer en une valeur numérique. Il existe plusieurs méthodes pour réaliser cette transformation. La plus utilisée est la méthode du centre de gravité, qu'on a adoptée dans notre travail.

IV.8.2 Régulateur de courant

Les mêmes étapes utilisées pour la conception du régulateur de vitesse seront répétées pour les régulateurs de courants, seulement on a :

- ❖ L'erreur e : au lieu d'être égale à $P_{s\text{réf}} - P_s$, elle sera égale à $e = i_{rd}^* - i_{rd}$ pour le régulateur de courant i_{rd} et $e = i_{rq}^* - i_{rq}$ pour le régulateur de courant i_{rq} ;
- ❖ La sortie du régulateur est V_{rd} pour le régulateur du courant i_{rd} et V_{rq} pour le régulateur de courant i_{rq} ;

Afin que la boucle interne soit plus rapide que la boucle externe (condition d'asservissement), on représente les variables d'entrées et de sortie par trois ensembles, représentés par les fonctions d'appartenances, comme le montre la figure IV.11. Trois ensembles pour chaque entrée, on aura donc neuf combinaisons possibles, d'où neuf règles pour chaque régulateur de courant (i_{rd}, i_{rq}) , montrées par le tableau IV.4.

De même que pour le régulateur de vitesse, la méthode d'inférence utilisée est celle de Mamdani (Max, Min) et la défuzzification est réalisée, par la méthode du centre de gravité.

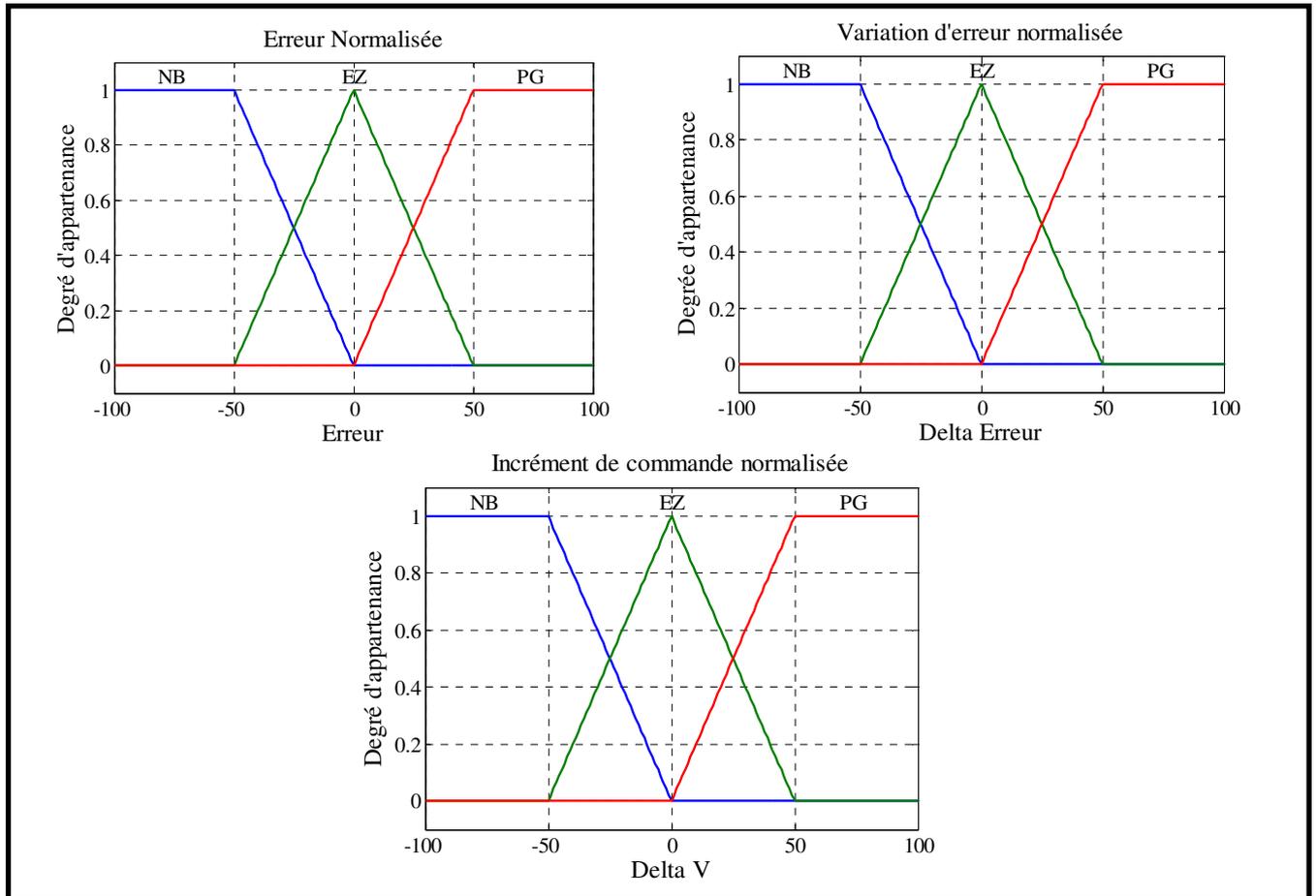


Figure IV.11 : Fonctions d'appartenances des différents variables linguistiques (RLF de courant).

E_{Irdq}	NP	EZ	PG
ΔE_{Irdq}			
NP	NP	NP	EZ
EZ	NP	EZ	PG
PG	EZ	PG	PG

Tableau IV.4 : Table de règles pour le RLF de la puissance.

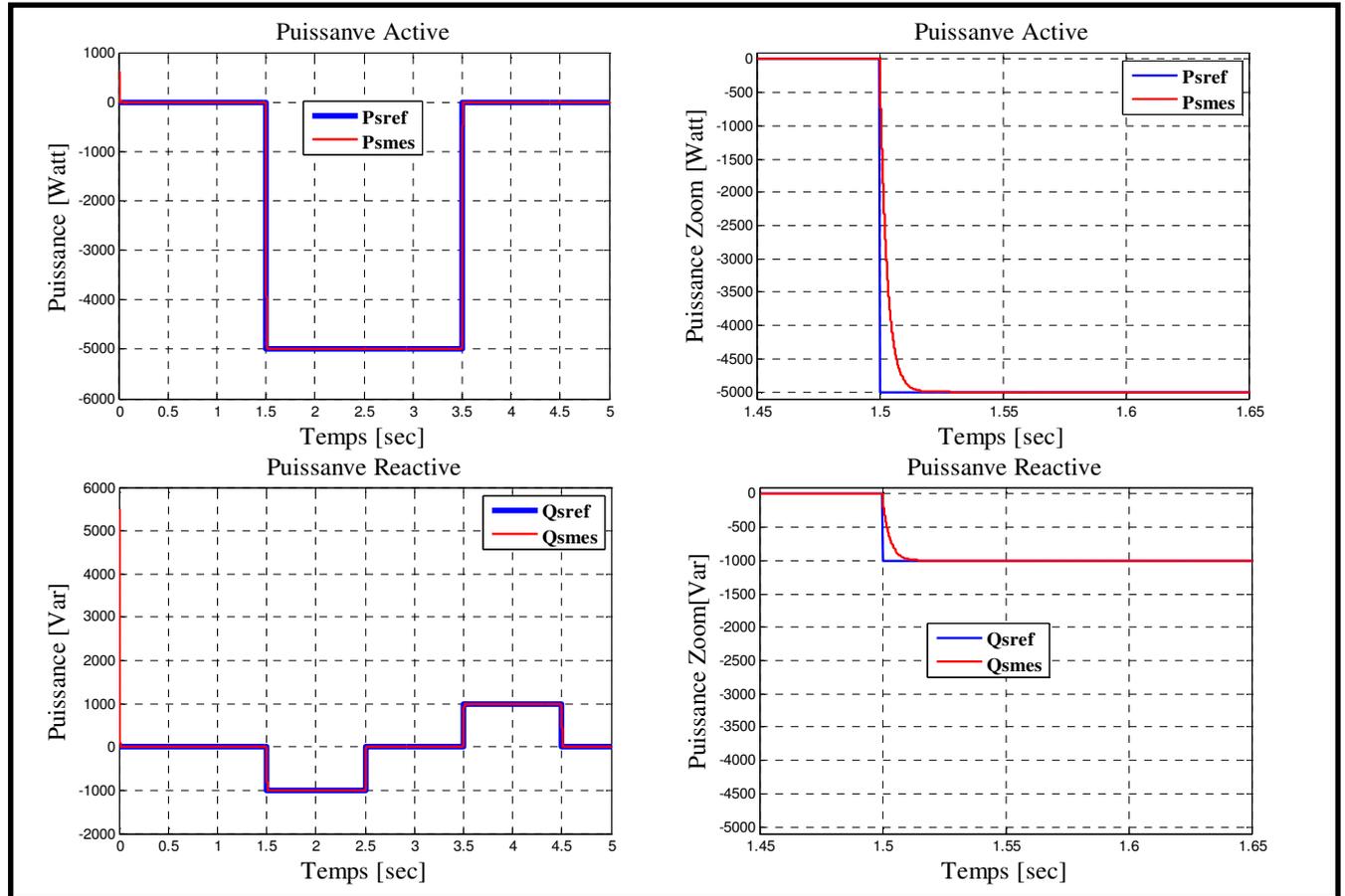
IV.9 Simulation et interprétation des résultats

Pour évaluer et tester la technique de contrôle indirecte des puissances actives et réactives par des régulateurs PI flou, une étude de simulation a été effectuée sous l'environnement MATLAB.

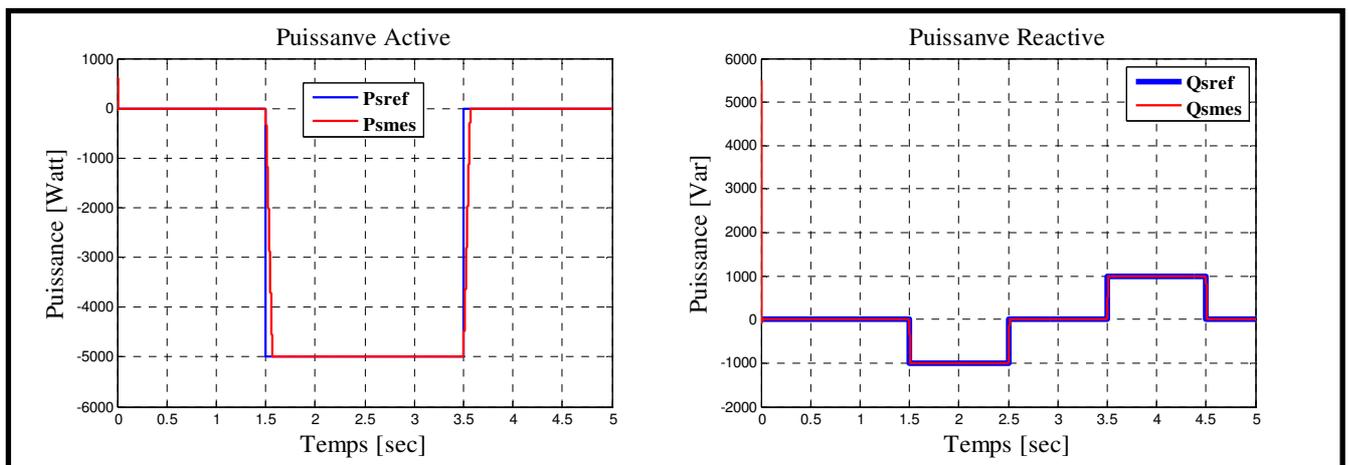
Dans cette partie, on va illustrer les résultats de simulation de la commande indirecte avec et sans boucle de la puissance active et réactive par un PI flou d'une machine asynchrone à double alimentation à

flux statorique orienté qui nous permet d'évaluer les performances apportées par le système de réglage considéré.

Nous avons donc soumis ces systèmes à des échelons de puissance active et réactive similaires à ceux de la commande indirect simulée en troisième chapitre afin d'observer le comportement de sa régulation.



A : La puissance active et réactive statorique pour la commande vectorielle indirecte sans boucle de puissance.



B : La puissance active et réactive statorique pour la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance.

Figure IV.12 : Comportement dynamique d'une machine asynchrone à double alimentation en utilisant des régulateurs à Logique floue (RLF).

D'après ces résultats on constate que :

Les figures présentées dans cette section démontrent que notre système présente une dynamique satisfaisante et une erreur statique nulle.

Les résultats de simulation obtenus de cette régulation montrent bien les grandes performances du contrôle indirecte des puissances actives et réactives sans et avec boucle de puissance par PI flou, ceci a été confirmé par la bonne poursuite des allures de puissance (active et réactive) avec ces références.

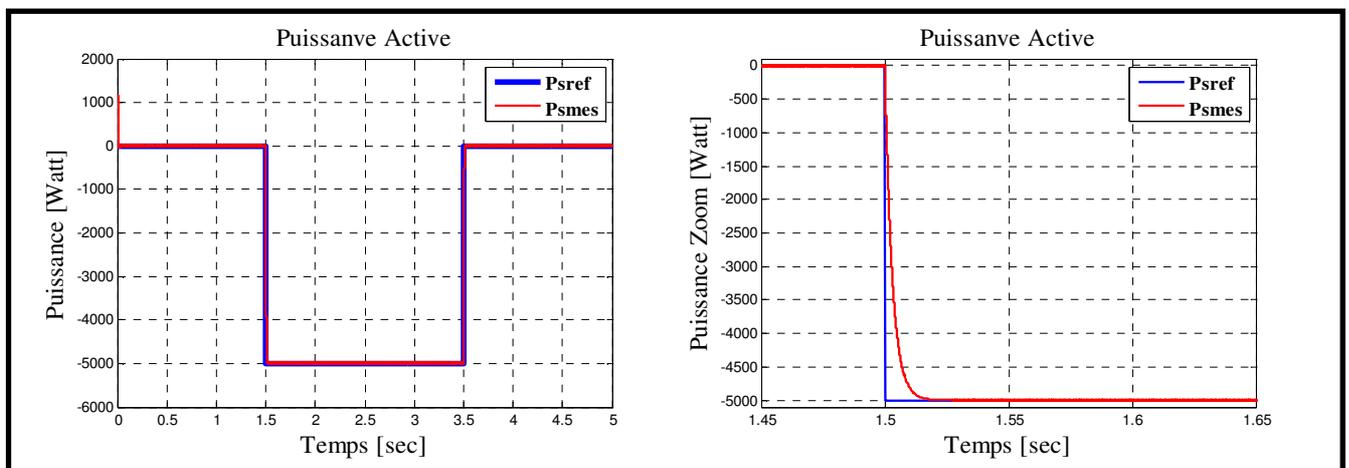
Que ce soit pour la commande vectorielle indirecte sans boucle de puissance on observe que les allures de la puissance active ou réactive ont une dynamique qui réagit rapidement sans dépassement, les échelons sont correctement suivis et il n'y a plus d'erreur sur les puissances. L'erreur statique entre les allures de puissance (active et réactive) avec ces références sont annulées par rapport à notre constat dans la commande indirect sans boucle de puissance avec régulateur classique PI.

IV.10 Test de robustesse

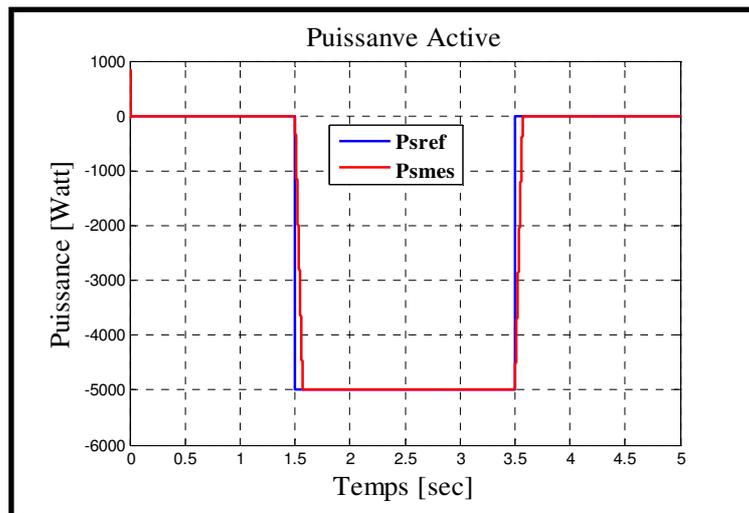
Dans le but de tester la robustesse du contrôleur flou vis-à-vis des variations paramétriques, on a refait le même travail de simulation qui a été achevé dans le cas du réglage de puissance sur le régulateur PI classique.

La figure (IV.13) illustre les réponses dynamiques de la puissance active lors des variations des paramètres de la machine asynchrone à double alimentation.

D'après les résultats obtenus, on peut constater que la variation des paramètres de la machine asynchrone ne provoque aucun effet indésirable au niveau de toutes les réponses dynamiques, et ceci montre la robustesse du contrôleur PI flou face à la variation de ces paramètres par rapport au régulateur PI classique.



A : La puissance active pour la commande vectorielle indirecte sans boucle de puissance.



B : La puissance active pour la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance.

Figure IV.13 : Effet sur la puissance active des variations de paramètres de la machine.

IV.11 Conclusion

Comme technique de commande avantageuse, la commande floue avec sa possibilité de contrôle des systèmes complexes sans nécessité de leur modélisation complète, était l'objet traité par ce quatrième chapitre, où on a présenté l'historique, le principe de la logique floue et les domaines d'application, ainsi que les bases de cette logique. Puis on a donné la description du contrôleur flou, avant de faire une application sur la commande de la machine asynchrone double alimentée à flux statorique orienté, afin de régler la puissance active et réactive du système.

Cette application est simulée en utilisant l'outil MATLAB, mais le dimensionnement du régulateur flou est fait par ajustement manuel en utilisant la méthode « essai-erreur », pour déterminer les trois gains de normalisation K_e , $K_{\Delta e}$ et $K_{\Delta u}$.

Les résultats de simulation obtenus montrent l'amélioration des performances dynamiques et la robustesse de ce régulateur vis-à-vis de la variation paramétrique (résistance statorique et rotorique, inductance statorique et rotorique).

Afin d'avoir un bon fonctionnement et un rendement élevé de la machine (MADA), il faut introduire des convertisseurs multi niveaux; ceci sera l'objectif du prochain chapitre.

CHAPITRE V

***Modélisation et stratégie de
commande des convertisseurs
à trois niveaux à structure
NPC***

V.1. INTRODUCTION

L'électronique de puissance connaît depuis longtemps un essor très important. A l'heure actuelle, cette discipline du génie électrique touche des domaines d'applications vastes et très divers pour des puissances couvrant une large gamme (de quelques watts à plusieurs centaines de mégawatts). Les structures de conversion d'énergie, principales actrices de cette spécialité, commutent des puissances de plus en plus importantes. Parmi les convertisseurs directs, en retenant uniquement ceux qui associent une source continue à une source alternative, nous définissons le domaine de la conversion continu-alternatif.

Dans leur principe, les structures de ces convertisseurs continu-alternatif sont naturellement réversibles en puissance instantanée, donc en puissance moyenne, autorisant ainsi des marches en onduleur lorsque la source continue fournit une puissance moyenne non nulle à la source alternative, mais aussi en redresseur dans le cas contraire [2] [15].

Nous allons présenter dans ce chapitre, l'étude d'un convertisseur triphasé constitué d'un onduleur et d'un redresseur à trois niveaux à structures NPC, en citant les stratégies de commande. Un travail de simulation dans un environnement Matlab/Simulink est effectué.

V.2. L'onduleur triphasé à trois niveaux type NPC

Un onduleur est un convertisseur statique capable de transformer l'énergie d'une source de tension continue en une énergie de tension alternative. Il existe plusieurs structures d'onduleurs ; dont chacun correspond à un type d'application déterminé ou permettant des performances recherchées [29].

L'apparition de nouveaux composants d'électronique de puissance a permis de développer de nouvelles structures d'une grande performance par rapport aux structures classiques, en l'occurrence, l'onduleur triphasé à trois niveaux à structure N.P.C.

En général, les onduleurs de tension multi-niveaux peuvent être vus comme des synthétiseurs de tension, dans lesquels la tension de sortie est synthétisée de plusieurs niveaux de tension discrets. Les avantages de cette nouvelle génération d'onduleurs sont [2] [15]:

- ❖ La tension des dispositifs existants peut être augmentée plusieurs fois sans complications au niveau des tensions statique et dynamique (les interrupteurs sont connectés en série).
- ❖ Les performances spectrales des formes d'ondes des grandeurs de sortie d'un onduleur multi-niveaux sont supérieures à celles d'un onduleur à deux niveaux.
- ❖ Les formes d'ondes des grandeurs de sorties d'un onduleur multi-niveaux limitent naturellement les problèmes des surtensions.

Les études faites sur les onduleurs monophasés et triphasés à trois niveaux à structure NPC ont montré que l'onduleur à trois niveaux peut être considéré comme l'association de deux onduleurs à deux niveaux.

Ces études ont montré que les onduleurs à trois niveaux offrent une grande amélioration sur la qualité des tensions de sortie. Ces améliorations peuvent être plus importantes par l'insertion des différentes stratégies de commande. Ces stratégies ont pour l'objectif d'éliminer certains rangs d'harmoniques, ainsi que la réduction des perturbations conduites par les convertisseurs statiques.

Dans cette partie on va s'intéresser à l'étude, la modélisation et la commande de l'onduleur de tension triphasé à trois niveaux de type NPC (Neutral Point Clamping) c'est-à-dire une structure à point milieu.

V.2.1 Topologie des onduleurs multi-niveaux

L'apparition des interrupteurs de puissances entièrement commandable à l'ouverture et à la fermeture (tels que MOSFET, GTO et IGBT..) a permis la conception des convertisseurs à plusieurs niveaux. Les onduleurs multi niveaux sont utilisés pour alimenter en moyenne et haute tension (2à13KV) et pour le contrôle des machines électriques puissantes et améliorer la qualité de l'énergie électrique.

Les onduleurs multi-niveaux comme tous équipements électriques présentent certains inconvénients.

- Leur topologie contient un nombre élevé d'interrupteurs statiques;
- Leur contrôle est difficile ;
- Ils exigent plusieurs sources de tension continue, généralement relevées aux bornes des condensateurs, qui ne donnent pas toujours la même valeur de tension.

Malgré ces inconvénients, les onduleurs multi-niveaux délivrent une onde de tension avec un taux d'harmonique réduit.

V.2.2 Présentation générale de l'onduleur triphasé à trois niveaux à structure N.P.C

Cette structure est représentée sur la figure (V.1) le bus continu d'entrée est composé de deux capacités en série (C_1, C_2), formant un point milieu noté (O) qui permet à l'onduleur d'accéder à un niveau de tension supplémentaire par rapport à l'onduleur classique à deux niveaux. La tension totale du bus continu vaut E ; dans les conditions normales de fonctionnement, celle-ci est uniformément répartie sur les deux capacités qui possèdent alors une tension ($E/2$) à leurs bornes: c'est l'hypothèse que l'on retiendra par la suite [24].

Cette structure se compose de trois bras, chacun des trois bras (A, B et C) de l'onduleur est composé de quatre interrupteurs commandés (K_{A1}, K_{A2}, K_{A3} et K_{A4} pour le bras A) et deux diodes de clamp (D_{clA1} et D_{clA2}) connectées au point milieu du bus continu. Les interrupteurs commandés sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant : il s'agit d'associations classiques d'un transistor et d'une diode en antiparallèle.

Dans ces onduleurs (NPC), les diodes connectées au point milieu de la source de tension protègent

les interrupteurs externes contre des tensions excessives.

L'application des règles d'interconnexions des sources nous conduit aux règles suivantes :

- K_{A2} et K_{A4} : ne doivent jamais être ouvert au même temps pour ne pas ouvrir la source de courant.
- K_{A2} et K_{A4} : ne doivent jamais conduire en même temps pour ne pas court-circuiter la source flottante $E/2$.
- K_{A1} et K_{A3} : ne doivent jamais être ouvert en même temps pour ne pas ouvrir la source de courant,
- K_{A1} et K_{A3} : ne doivent jamais conduire en même temps pour ne pas connecter deux sources de tensions de valeurs différentes E et $E/2$.

Ces règles nous permet de conclure que :

K_{A1} et K_{A3} forment une cellule de commutation et K_{A2} et K_{A4} forment une deuxième cellule de commutation.

Comme la charge est un réseau électrique à courant alternatif, les semi-conducteurs requis sont composés d'un transistor IGBT et d'une diode antiparallèle. Des diodes additionnelles notées D_{cl11} et D_{cl12} sont utilisées pour connecter un potentiel de chaque IGBT au point milieu, permettant ainsi l'obtention du zéro de la tension V_0 .

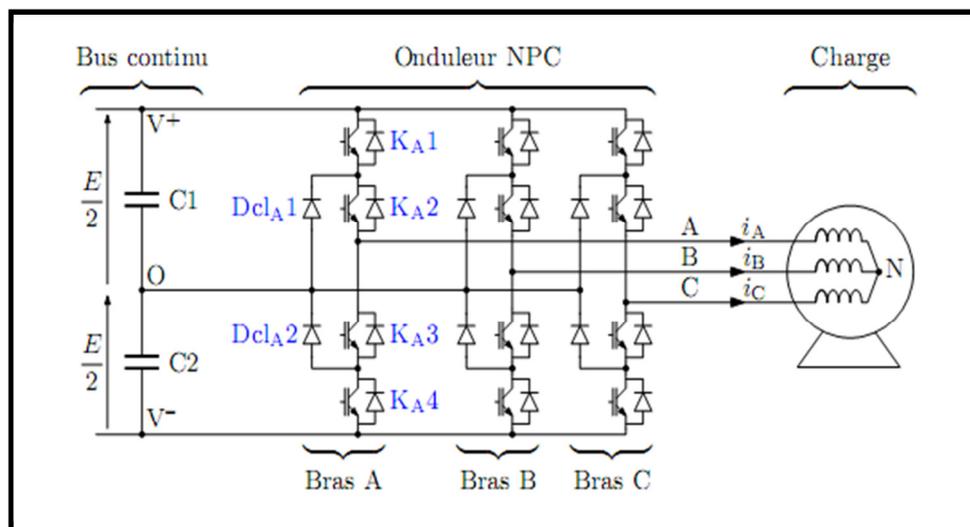


Figure V.1 : Structure de l'onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC.

V.2.3 Différente configurations d'un bras d'onduleur à trois niveaux

Une analyse topologie d'un bras de l'onduleur triphasé à trois niveaux figure (V.2) montre qu'il existe cinq configuration possible [2] [15] [24] [29]

Ces différentes configurations sont représentées dans le tableau (V.1) qui donne les grandeurs

électriques caractérisant chacune de ces configurations.

Avec :

« O » Origine des potentiels.

« K » Nombre de bras.

« V_K » Différence de potentiel entre le bras K et le point fictif O.

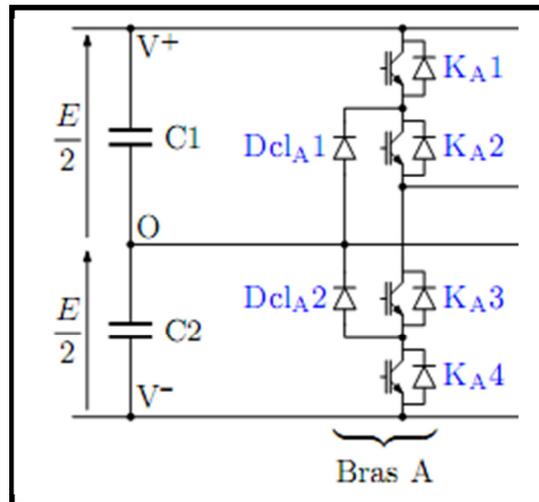


Figure V.2 : structures d'un bras de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC.

Pour simplifier on prend un seul bras (A) et par la suite en appliquant la même procédure pour les autres bras.

Première configuration E_0 :

Tous les interrupteurs de bras (A) sont ouverts : $V_1 = 0$.

Deuxième configuration E_1 :

Les interrupteurs K_{A1} et K_{A2} de bras (A) sont fermés : $V_1 = E/2$.

Troisième configuration E_2 :

Les interrupteurs D_{clA1} et K_{A2} de bras (A) sont fermés : $V_1 = 0$.

Quatrième configuration E_3 :

Les interrupteurs K_{A3} et K_{A4} de bras (A) sont fermés : $V_1 = -E/2$.

Cinquième configuration E_4 :

Les interrupteurs D_{clA2} et K_{A3} de bras (A) sont fermés : $V_1 = 0$.

Configuration	Grandeur électrique
E_0	$V_1 = 0$
E_1	$V_1 = E/2$
E_2	$V_1 = 0$
E_3	$V_1 = -E/2$
E_4	$V_1 = 0$

Tableau V.1 : Grandeurs électriques caractérisant chaque configuration possible d'un bras k.

V.2.4 Modélisation de l'onduleur à trois niveaux

V.2.4.1 Commandabilité de l'onduleur à trois niveaux

Un convertisseur est dit en mode commandable si les transitions entre ses différentes configurations dépendent uniquement de la commande externe (commande des bases des semi-conducteurs) et par suite une conduction continue de ce convertisseur [2] [15] [24] [29]. Pour l'onduleur à trois niveaux, cette condition de commandabilité implique que les transitions entre ses différentes configurations dépendent uniquement de la commande externe (commande des bases des semi-conducteurs) et non plus des commandes internes (grandeurs électriques). Nous supposons par la suite que cette condition est toujours vérifiée. De ce fait, on peut définir les fonctions de connexion.

Hypothèse

- ❖ La chute de tension aux bornes des semi-conducteurs est supposée faible (négligeable devant U_c).
- ❖ La charge est triphasée, couplée en étoile avec neutre isolé, alors on a :

$$\begin{cases} V_A + V_B + V_C = 0 \\ i_1 + i_2 + i_3 = 0 \end{cases} \quad (\text{V.1})$$

Avec :

V_A, V_B, V_C : Les tensions alternatives simples à la sortie de l'onduleur.

i_1, i_2, i_3 : Les courants à la sortie de l'onduleur.

Pour éviter la conduction simultanée des quatre interrupteurs d'un seul bras, qui peut engendrer leur destruction par croissance du courant lors du court-circuit, ou à une surtension dans le cas de l'ouverture de tous les interrupteurs, on définit la commande complémentaire suivante :

$$\begin{cases} B_{k1} = \overline{B_{k4}} \\ B_{k2} = \overline{B_{k3}} \end{cases} \quad (\text{V.2})$$

Avec B_{ks} la commande du transistor T_{ks} du bras k.

V.2.4.2 Fonctions de connexion

V.2.4.2.1 Fonctions de connexion des interrupteurs

On définit la fonction de connexion de chaque interrupteur T_{ks} comme étant une fonction qui décrit l'état ouvert ou fermé de celui-ci.

$$\begin{cases} F_{ks} = 1 & \text{Si } T_{ks} \text{ est fermé} \\ F_{ks} = 0 & \text{Si } T_{ks} \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (\text{V.3})$$

En traduisant la commande complémentaire par les fonctions de connexion des interrupteurs du bras k , on trouve :

$$\begin{cases} F_{k1} = 1 - F_{k4} \\ F_{k2} = 1 - F_{k3} \end{cases} \quad (\text{V.4})$$

La commande complémentaire est exprimée pour les trois bras comme suit :

$$\begin{cases} F_{11} = 1 - F_{14} \\ F_{12} = 1 - F_{13} \end{cases} \quad \begin{cases} F_{21} = 1 - F_{24} \\ F_{22} = 1 - F_{23} \end{cases} \quad \begin{cases} F_{31} = 1 - F_{34} \\ F_{32} = 1 - F_{33} \end{cases} \quad (\text{V.5})$$

V.2.4.2.2 Fonctions de connexion des demi-bras

La fonction de connexion F_{km}^b est associée au demi bras m avec $m=1$ pour le demi bras du haut et $m=0$ pour le demi bras du bas.

Les fonctions de connexion des demi-bras s'expriment au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs comme suit :

$$\begin{cases} F_{k1}^b = F_{k1} \cdot F_{k2} \\ F_{k0}^b = F_{k3} \cdot F_{k4} \end{cases} \quad (\text{V.6})$$

V.2.4.3 Fonction de conversion

On note:

- ❖ Les tensions simples aux bornes de chaque phase de la charge: V_A, V_B et V_C ;
- ❖ Les tensions entre chaque bras de l'onduleur et le point milieu M de l'alimentation continue de l'onduleur: V_{AM}, V_{BM} et V_{CM} ;
- ❖ La tension entre le point neutre de la charge et le point milieu de l'alimentation continue de l'onduleur V_{NM} .

Les potentiels aux nœuds A, B et C de l'onduleur par rapport au point milieu M s'expriment au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs et des tensions d'entrée comme suit:

$$V_{kM} = F_{i1} \cdot F_{i2} \cdot U_{c1} - F_{i3} \cdot F_{i4} \cdot U_{c2} \quad (V.7)$$

Avec :

$$k \in \{A, B, C\} \text{ et } i \in \{1, 2, 3\}$$

On introduisant les fonctions de connexion des demi-bras de (V.6) dans (V.7), ce système d'équations s'écrit sous forme matricielle comme suit:

$$\begin{bmatrix} V_{AM} \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} \cdot U_{c1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} \cdot U_{c2} \quad (V.8)$$

Les tensions composées sont données par la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{A0} \\ V_{B0} \\ V_{C0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{B0} \\ V_{C0} \\ V_{A0} \end{bmatrix} \quad (V.9)$$

En utilisant la relation (V.8), le système (V.9) se met sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} \cdot U_{c1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} \cdot U_{c2} \right\} \quad (V.10)$$

Le système matriciel donnant les expressions des tensions simples aux bornes de la charge:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} \cdot U_{c1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} \cdot U_{c2} \right\} \quad (V.11)$$

Si on prend en considération l'hypothèse $U_{c1} = U_{c2} = U_c$, l'équation (V.8) devient comme suit:

$$\begin{bmatrix} V_{AM} \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11}^b - F_{10}^b \\ F_{21}^b - F_{20}^b \\ F_{31}^b - F_{30}^b \end{bmatrix} \cdot U_c \quad (V.12)$$

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11}^b - F_{10}^b \\ F_{21}^b - F_{20}^b \\ F_{31}^b - F_{30}^b \end{bmatrix} \cdot U_c \quad (V.13)$$

Les courants d'entrée i_{d1} et i_{d2} sont exprimés en fonction des courants de charge i_1, i_2 et i_3 par les relations suivantes :

$$\begin{cases} i_{d1} = F_{11} \cdot F_{12} \cdot i_1 + F_{21} \cdot F_{22} \cdot i_2 + F_{31} \cdot F_{32} \cdot i_3 \\ i_{d2} = F_{13} \cdot F_{14} \cdot i_1 + F_{23} \cdot F_{24} \cdot i_2 + F_{33} \cdot F_{34} \cdot i_3 \end{cases} \quad (V.14)$$

D'où :

$$\begin{cases} i_{d1} = F_{11}^b \cdot i_1 + F_{21}^b \cdot i_2 + F_{31}^b \cdot i_3 \\ i_{d2} = F_{10}^b \cdot i_1 + F_{20}^b \cdot i_2 + F_{30}^b \cdot i_3 \end{cases} \quad (V.15)$$

Cette relation montre, que pour l'onduleur à trois niveaux, tout se passe comme si le courant i_{d1} était le courant d'entrée de l'onduleur à deux niveaux du haut, et i_{d2} le courant d'entrée de l'onduleur à deux niveaux du bas. Le courant i_{d0} est lié aux courants de charge comme suit :

$$i_{d0} = F_{11} \cdot F_{13} \cdot i_1 + F_{21} \cdot F_{23} \cdot i_2 + F_{31} \cdot F_{33} \cdot i_3 \quad (V.16)$$

En utilisant les fonctions de connexion des demi-bras, cette relation devient:

$$i_{d0} = (1 - F_{11}^b - F_{10}^b) i_1 + (1 - F_{21}^b - F_{20}^b) i_2 + (1 - F_{31}^b - F_{30}^b) i_3 \quad (V.17)$$

V.2.5 Stratégie de commande de l'onduleur triphasé à trois niveaux

Les récents progrès technologiques dans le domaine des dispositifs à semi-conducteur ont élargi le domaine d'application des techniques de modulation de largeur d'impulsions dans le contrôle de la tension de sortie des convertisseurs statiques.

Afin de générer une source de tension la plus sinusoïdale possible, différentes stratégies de modulation de largeur d'impulsions ont été proposées [2], on distingue:

- ❖ Commande pleine onde.
- ❖ Commande triangulaire sinusoïdale à échantillonnage naturel.
- ❖ Modulation vectorielle.
- ❖ Modulation calculée.

Dans cette partie, on va étudier un seul type de stratégie de commande par la triangulaire-sinusoïdale à deux porteuses bipolaires en dents de scie.

V.2.5.1 Principe de la modulation de largeur d'impulsions MLI (Technique triangulaire-sinusoïdale)

La commande par Modulation de Largeur d'Impulsion consiste à découper la tension de sortie générée par le convertisseur en une série de motifs élémentaires de période très faible, et de rapport cyclique variable dans le temps. L'évolution temporelle du rapport cyclique est alors déterminée par un signal modulant que l'on choisit en général sinusoïdal. Les ordres de commande de chaque cellule sont générés par l'intersection entre une porteuse triangulaire et le signal modulant. La commande par MLI nécessite autant de porteuse triangulaire qu'il y'a de cellule à commander.

Le principe de cette technique consiste à comparer un signal triangulaire d'amplitude fixe (V_p) et de fréquence (f_p) nettement supérieure appelée porteuse, aux trois signaux sinusoïdaux (r_1, r_2, r_3), d'amplitude variable (V_r) est décalées dans le temps de 120 degrés et de fréquence (f), appelée référence. L'intersection de ces deux signaux donne les instants de commutation des interrupteurs figure (V.3).

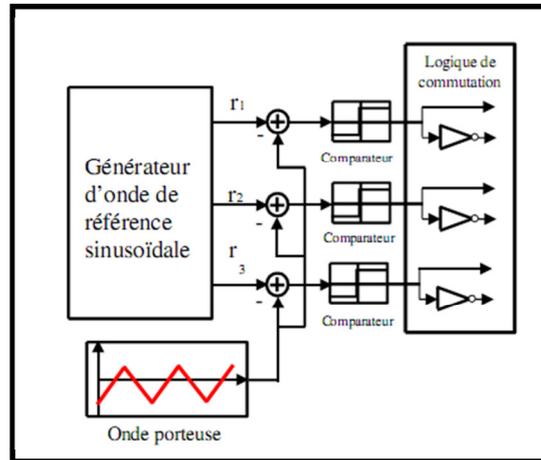


Figure V.3 : Schéma de principe de la technique triangulaire sinusoïdale.

Cette technique se caractérise par deux paramètres :

- ❖ **Indice de modulation** : est défini comme étant le rapport de fréquence de la porteuse (f_p) à celle de la référence (f).

$$m = \frac{f_p}{f} \quad (\text{V.18})$$

- ❖ **Coefficient de réglage en tension** : est défini comme étant le rapport de l'amplitude de la référence (V_r) à celle de la porteuse (V_p).

$$r = \frac{V_r}{V_p} \leq 1 \quad (\text{V.19})$$

La modulation est dite synchrone si l'indice m est entier, c.-à-d. lorsque la fréquence de la porteuse f_p est un entier multiple de la fréquence de l'onde de référence (f). En modulation synchrone, si l'indice de modulation m est impair le développement en série de fourrier de la tension de sortie ne comporte alors que des harmoniques impairs. Si l'indice (m) est pair, on trouve la composante continue ainsi que les harmoniques pairs et impairs.

La modulation est dite asynchrone si l'indice (m) n'est pas entier, elle est utilisée pour des valeurs suffisamment élevées. En modulation synchrone, si le maximum de la référence correspond à un pic de la porteuse, on dit que le calage est optimal et la tension bénéficie d'une double symétrie par rapport au

quart et au milieu de la période

V.2.5.2 Principe de la Commande triangulaire sinusoïdale à deux porteuses

Le principe de cette stratégie consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante (qui est l'image de l'onde de sortie qu'on veut obtenir) généralement sinusoïdale avec deux porteuses triangulaires bipolaires [29].

Les deux porteuses sont identiques et déphasées d'une demi-période de hachage $\frac{1}{2.f_p}$ l'une de l'autre

afin d'améliorer le taux d'harmoniques de la tension de sortie. La porteuse choisie est celle en dents de scie bipolaire. Elle permet une réduction du taux d'harmoniques. Ces harmoniques sont centrés autour des fréquences multiples de $2.m.f$.

V.2.5.3 Algorithme de commande

L'algorithme de la commande de la stratégie triangulaire sinusoïdale à deux porteuses pour l'onduleur à trois niveaux pour un bras K , peut être résumé en deux étapes [2] [24] [29]:

Etape 1 : la détermination des signaux intermédiaires V_{K1} et V_{K0}

$$\begin{cases} V_{\text{refk}} \geq U_{p1} \Rightarrow V_{k1} = U_{c1} \\ V_{\text{refk}} < U_{p1} \Rightarrow V_{k1} = 0 \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} V_{\text{refk}} \geq U_{p2} \Rightarrow V_{K0} = 0 \\ V_{\text{refk}} < U_{p2} \Rightarrow V_{K0} = -U_{c2} \end{cases} \quad (\text{V.20})$$

$$\text{Avec: } U_{c1} = U_{c2} = U_c = \frac{E}{2}$$

Etape 2 : détermination du signal V_{K2} et des ordres de commande B_{KS} des interrupteurs :

$$\begin{cases} V_{K2} = U_{C1} \Rightarrow B_{K1} = 1, B_{K2} = 1 \\ V_{K2} = -U_{C2} \Rightarrow B_{K1} = 0, B_{K2} = 0 \\ V_{K2} = 0 \Rightarrow B_{K1} = 1, B_{K2} = 0 \end{cases} \quad (\text{V.21})$$

Avec:

$$\begin{cases} V_{K2} = V_{K1} + V_{K0} \\ B_{K1} = \overline{B_{K4}} \\ B_{K2} = \overline{B_{K3}} \end{cases} \quad (\text{V.22})$$

V.2.6 Résultats de simulation

Le schéma de fonctionnement de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC avec la stratégie triangulaire sinusoïdale à deux porteuses sont représentés dans la figure (V.4). La simulation du fonctionnement a été réalisée à l'aide de logiciel MATLAB/SIMULINK pendant une durée égale à 0.02s.

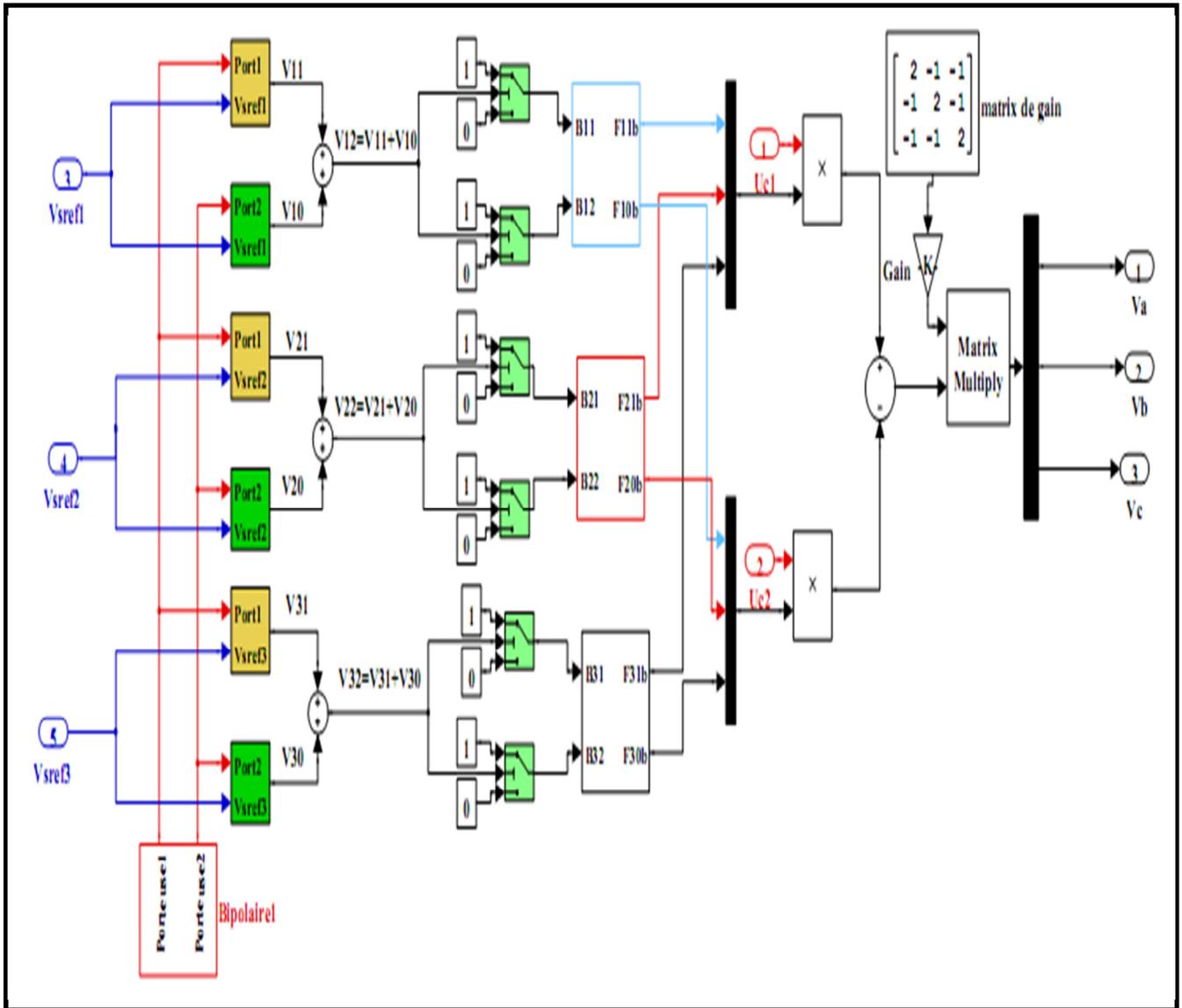
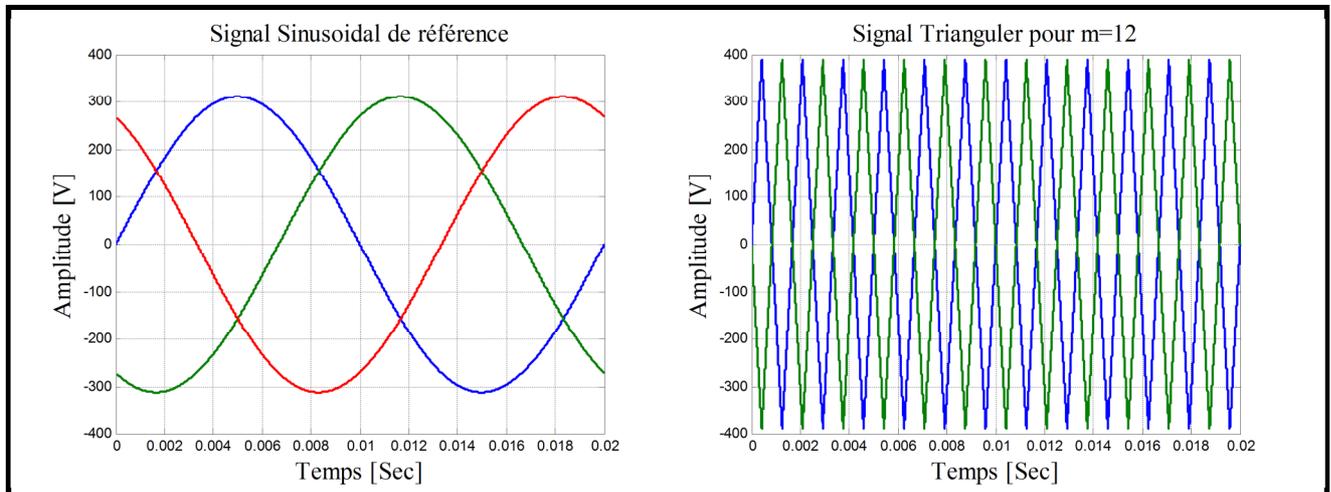


Figure V.4 : Simulation de l'onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC avec la stratégie triangulaire sinusoïdale à deux porteuses à l'aide de logiciel MATLAB/SIMULINK.

La figure (V.5) montre les tensions de référence et les porteuses pour respectivement $m = [12, 21, 24]$ pour $r = 0.8$.



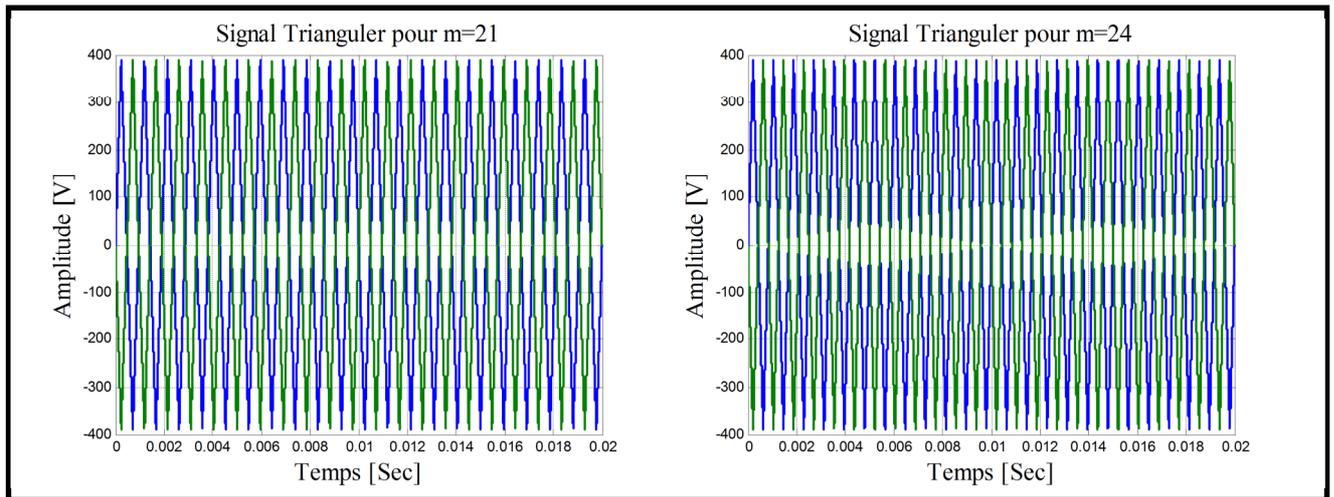
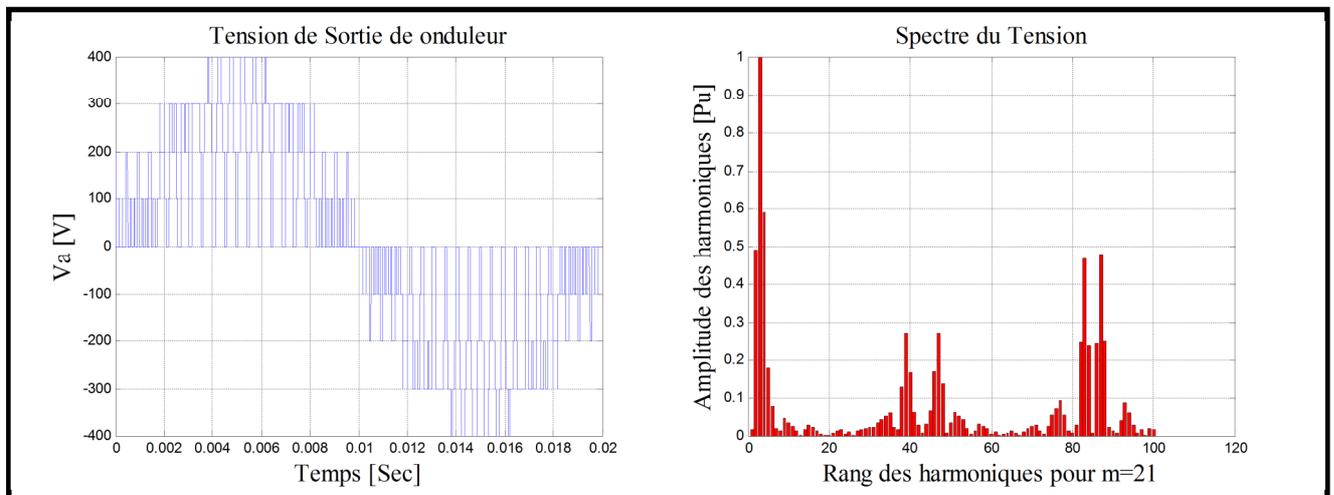
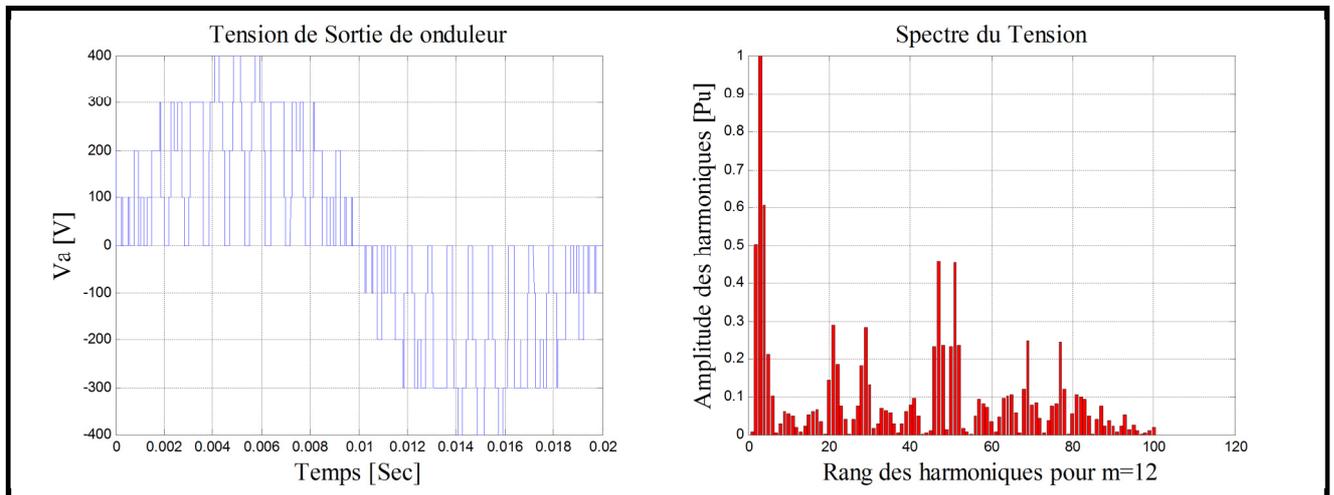


Figure V.5 : Différents signaux de la stratégie triangulaire sinusoïdale à deux porteuses de l'onduleur triphasé à trois niveaux pour $m = [12, 21, 24]$ et $r=0.8$.

Pour un taux de modulation $r = 0.8$, et pour trois valeurs d'indice de modulation m , la tension simple V_A ainsi que leurs spectres d'harmoniques sont représentés sur la figure (V.6).



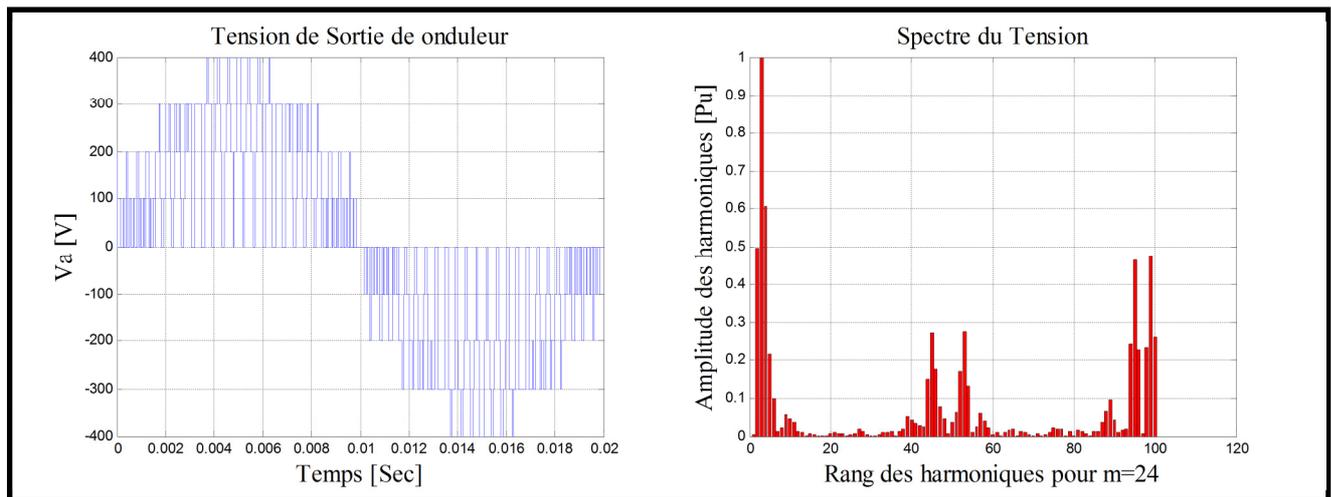


Figure V.6 : Tension de sortie de l'onduleur triphasé à trois niveaux commandé par stratégie triangulaire sinusoïdale à deux porteuses et son spectre d'harmonique pour $m = [12, 21, 24]$ et $r=0.8$.

La figure (V.6) montre la tension simple V_A et son spectre d'harmonique de l'onduleur à trois niveaux commandé par stratégie triangulaire sinusoïdale à deux porteuses pour trois valeurs d'indice de modulation et pour ($r = 0.8$).

Pour toutes les valeurs de l'indice de modulation m , on constate clairement qu'il y a une symétrie dans la tension simple V_A par rapport au quart de sa période, donc seuls les harmoniques impaires existent. Ils se regroupent en familles centrées autour des fréquences multiples $2.m.f$.

La présence des harmoniques est due au non sinusoïdal de la tension de sortie de l'onduleur. On effectue la décomposition d'un signal non sinusoïdal en série de Fourier donne naissance à une grandeur continue et des grandeurs sinusoïdales de fréquences égales à des multiples entiers de l'onde fondamentale [15].

Ces harmoniques provoquent des pertes énergétiques, produisent des couples pulsatoires dans les machines tournantes, échauffement et un vieillissement prématuré des appareils électriques.

L'augmentation de l'indice de modulation " m " permet de pousser les harmoniques vers des fréquences élevées, donc facilement filtrées par la machine ou par l'inductance de la charge.

V.3. Redresseur triphasé à trois niveaux Type NPC

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons vu que l'onduleur triphasé à trois niveaux utilise deux tensions d'entrée U_{C1} et U_{C2} qu'on a supposée égales et constantes. Ces deux tensions sont généralement délivrées en pratique par un redresseur.

Il existe Plusieurs types de redresseurs qui peuvent assurer l'alimentation réelle de l'onduleur à trois niveaux. Ces redresseurs peuvent être à MLI ou non. On distingue :

- ❖ Les redresseurs de tension monophasés ou triphasés.
- ❖ Les redresseurs de courant à MLI monophasés ou triphasés à deux ou trois niveaux.

Dans cette étude, nous utiliserons un redresseur de courant triphasé à trois niveaux, ce qui nous amène à étudier la cascade : redresseur triphasé à trois niveaux-onduleur triphasé à trois niveaux connecté au rotor. Cette cascade constitue une alimentation réelle de notre machine. Pour cela, nous présenterons d'abord le redresseur à trois niveaux à structure NPC [15] [29].

V.3.1 Modélisation du redresseur

La structure de l'onduleur à trois niveaux est réversible par sa conception. Ceci lui permet de fonctionner aussi en redresseur. On adoptera la convention génératrice pour la source de courant et la convention réceptrice pour la source de tension.

La figure (V.7) représente la structure générale du redresseur de courant triphasé à M.L.I à trois niveaux à structure NPC. Son rôle est de générer la tension de sortie continue aux bornes des capacités à partir d'une source alternative triphasée.

Le modèle de connaissance et de commande de ce redresseur est le même que celui élaboré dans la première partie de ce chapitre, en tenant compte des nouvelles conventions des deux sources du redresseur.

Ce redresseur va être commandé par la M.L.I. C'est-à-dire les grandeurs de sortie U_{C1} et U_{C2} seront modulées pour générer les grandeurs d'entrée V_A , V_B et V_C .

Pratiquement les paramètres du réseau (résistance et inductance) sont difficiles à identifier. Généralement, on ajoute en série un filtre d'entrée R.L de valeurs plus importantes pour pouvoir négliger les paramètres du réseau.

L'inductance dans le filtre permet également de respecter l'alternance des sources et de filtrer les harmoniques des courants du réseau [15] [29] [33].

Le redresseur de courant triphasé à trois niveaux constitué douze interrupteurs bidirectionnels et six diodes médianes entre chaque bras et le point milieu M, cette structure est représentée dans la figure (V.7).

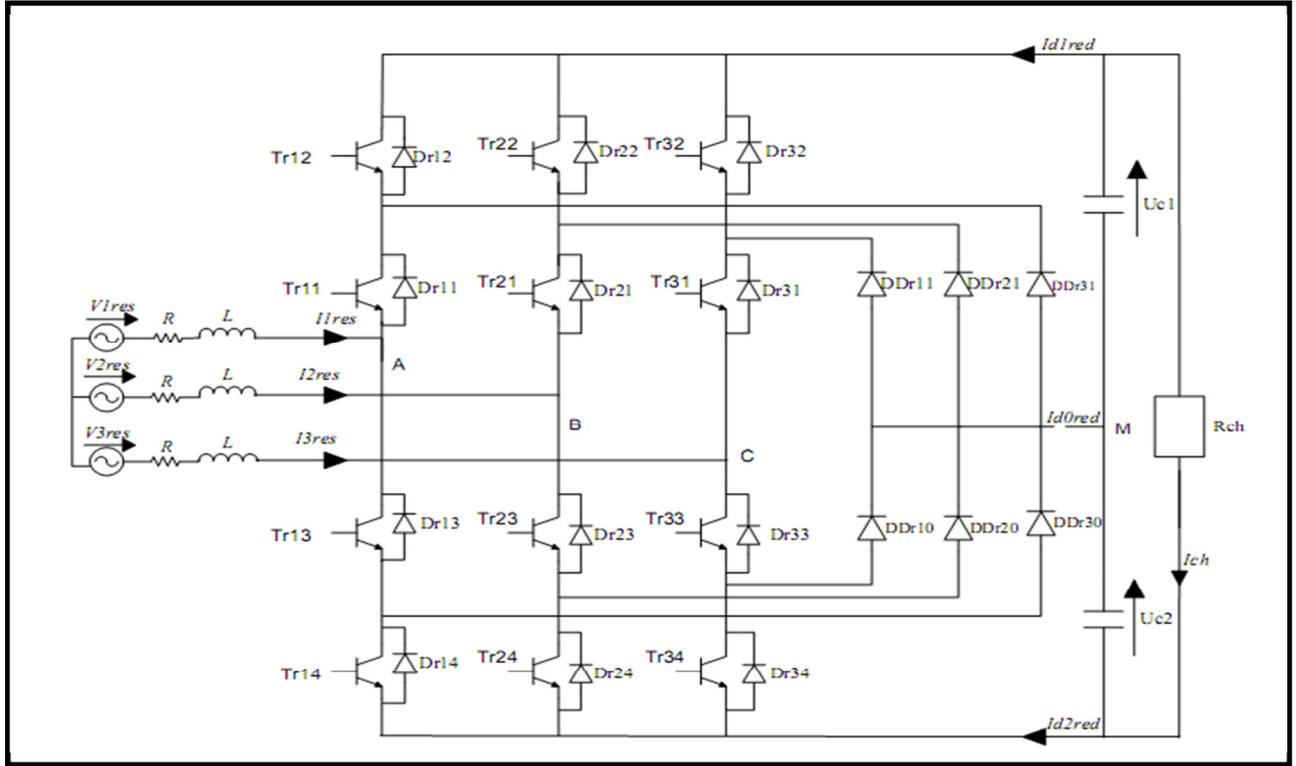


Figure V.7 : Redresseur de courant triphasé à M.L.I à trois niveaux à structure NPC.

Les tensions simples sont données par les fonctions de connexion de demi- bras selon le système suivant:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} \cdot U_{red1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} \cdot U_{red2} \right\} \quad (V.23)$$

Les courants de sortie du redresseur s’expriment en fonction des courants d’entrée et au moyen des fonctions de connexion des demi bras par les relations suivantes:

$$\begin{cases} i_{red1} = F_{11}^b \cdot i_{res1} + F_{21}^b \cdot i_{res2} + F_{31}^b \cdot i_{res3} \\ i_{red2} = F_{10}^b \cdot i_{res1} + F_{20}^b \cdot i_{res2} + F_{30}^b \cdot i_{res3} \end{cases} \quad (V.24)$$

Avec :

$$i_{red0} = -(i_{red1} + i_{red2}) \quad (V.25)$$

V.3.2 Commandabilité du redresseur

Pour assurer la commandabilité du redresseur, on doit s’assurer d’abord que la valeur initiale que prendre chacune des deux tensions U_{C1} , U_{C2} , soit supérieure à la valeur maximale V_{Max} de la tension du réseau. Cette condition doit être vérifiée à chaque instant. Ce type de condition est nécessaire également pour assurer un facteur de puissance unitaire. On peut voir ça clairement en faisant la représentation de Fresnel pour le circuit du réseau (figure V.8) [2].

On déduit la contrainte sur la valeur efficace de la tension d'entrée du redresseur V_A :

$$V_{A(\text{eff})} \leq \frac{U_c}{\sqrt{2}} \quad (\text{V.26})$$

Il existe entre les grandeurs électriques d'entrée du redresseur la relation suivante:

$$V_A = V_{\text{resK}} - R_{\text{res}} \cdot i_{\text{resK}} - L_{\text{res}} \frac{di_{\text{resK}}}{dt} \quad (\text{V.27})$$

En régime harmonique, on obtient les relations entre grandeurs complexes:

$$\bar{V}_A = \bar{V}_{\text{resK}} - R_{\text{res}} \cdot \bar{i}_{\text{resK}} - jL_{\text{res}} \cdot \omega \cdot \bar{i}_{\text{resK}} \quad (\text{V.28})$$

En négligeant la résistance R_{res} .

$$V_A \approx \sqrt{(V_{\text{resK}})^2 + (L_{\text{res}} \cdot \omega \cdot i_{\text{resK}})^2} \quad (\text{V.29})$$

Pour un fonctionnement à facteur de puissance unitaire, on trouve:

$$V_A^2 - V_{\text{resK}}^2 = (L_{\text{res}} \cdot \omega \cdot i_{\text{resK}})^2 \Rightarrow V_A > V_{\text{resK}} \text{ or } V_A < U_{\text{red}} \quad (\text{V.30})$$

$$V_{\text{resK}(\text{eff})} < V_{A(\text{eff})} < \frac{U_c}{\sqrt{2}} \Rightarrow V_{\text{resK}(\text{eff})} < \frac{U_c}{\sqrt{2}} \quad (\text{V.31})$$

D'où les deux contraintes à respecter:

$$i_{\text{resK}(\text{eff})} \leq \frac{1}{L_{\text{res}} \cdot \omega} \sqrt{\frac{U_c^2}{2} - V_{\text{resK}}^2} \quad (\text{V.32})$$

$$V_{\text{resK}(\text{eff})} \leq \frac{U_c}{\sqrt{2}} \quad (\text{V.33})$$

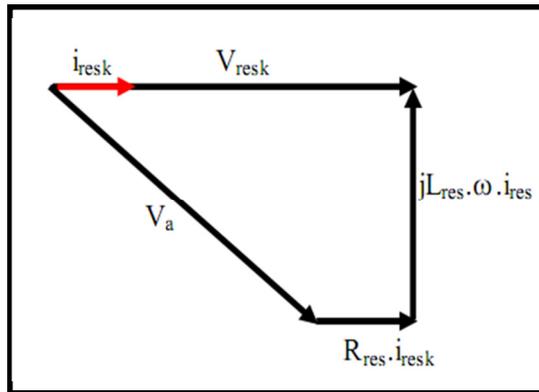


Figure V.8 : Diagramme de Fresnel sur les grandeurs complexes d'entrée du redresseur.

V.3.3 Modélisation du réseau électrique

Le réseau est modélisé par une source de tension en série avec une inductance, se comportant ainsi comme une source de courant. Vu que l'inductance du réseau faible et mal connue, elle est généralement insuffisante pour atténuer l'ondulation du courant. Il est donc nécessaire d'ajouter une

inductance L_{res} et une résistance R_{res} plus importantes en série, afin de négliger celles du réseau mal connu et de réduire l'effet de leurs variations [2]. En appliquant la loi des mailles au modèle de la figure (V.9), on trouve:

$$V_{resi} = R_{res} \cdot i_{resi} + V_{iN} + L_{res} \frac{di_{resi}}{dt} \quad (V.34)$$

Avec : V_{res} et i_{res} : respectivement la tension et le courant de la phase $i \in \{1, 2, 3\}$ du réseau triphasé.

V_{KN} : La tension liée au bras i du redresseur qui est en série avec l'impédance du réseau ($R_{res} - L_{res}$).

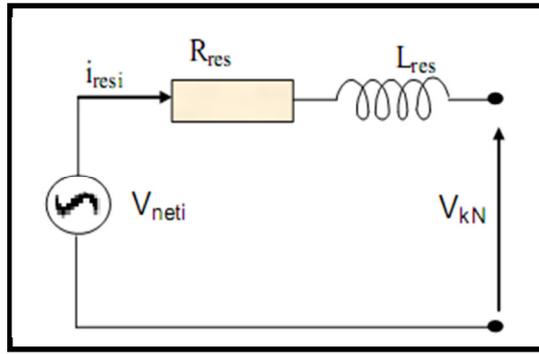


Figure V.9 : Modélisation d'une phase du réseau électrique.

Après la transformation de Laplace, le système prédéfini s'écrit sous la forme matricielle suivante:

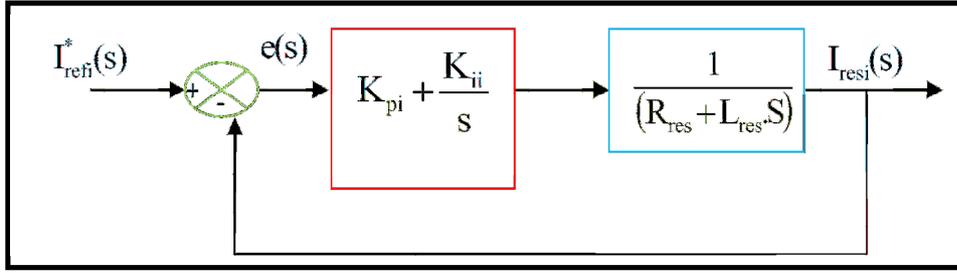
$$\begin{bmatrix} V_{res1} \\ V_{res2} \\ V_{res3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{res} + L_{res} & 0 & 0 \\ 0 & R_{res} + L_{res} & 0 \\ 0 & 0 & R_{res} + L_{res} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{res1} \\ i_{res2} \\ i_{res3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} \quad (V.35)$$

V.3.4 Régulation du courant

Le modèle de la boucle de courant est celui d'une phase du réseau figure (V.9). Ainsi, la fonction de transfert en boucle ouverte peut être modélisée par un premier ordre, ayant comme variable d'entrée la tension aux bornes de l'impédance ($V_{resK} - V_{KN}$), et pour variable de sortie le courant de phase i_i . La fonction de transfert en boucle ouverte du courant peut s'écrire comme suit [2] [33] [35]:

$$G(S) = \frac{1}{(R_{res} + L_{res} \cdot S)} \quad (V.36)$$

La fonction de transfert en boucle ouverte des boucles internes étant un premier ordre, un régulateur Proportionnel Intégral permet d'obtenir une erreur statique nulle en régime permanent [2]. L'algorithme de régulation de la boucle de courant avec un régulateur PI est présenté par la figure (V.10).

Figure V.10 : Modèle équivalent de la boucle de courant i_{res} .

V.3.5 Commandé par la stratégie triangulaire sinusoïdale

Cette stratégie de commande est identique à celle utilisée pour l'onduleur à trois niveaux, car l'onduleur est réversible.

On applique l'algorithme d'asservissement des courants pour chaque phase du réseau élaboré précédemment, figure (V.9).

Les courants de référence qui alimentent notre redresseur à trois niveaux sont définis par le système suivant:

$$\begin{cases} i_{ref1} = \sqrt{2} \cdot I_{eff} \cdot \sin(\omega t - \varphi) \\ i_{ref2} = \sqrt{2} \cdot I_{eff} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi\right) \\ i_{ref3} = \sqrt{2} \cdot I_{eff} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} - \varphi\right) \end{cases} \quad (V.37)$$

La valeur efficace du courant de référence du réseau doit être calculée de manière à avoir la conservation de la puissance à l'entrée et à la sortie, c'est-à-dire:

$$P_{res} = P_{Ch} \Leftrightarrow 3 \cdot V_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos \Phi - 3 \cdot R \cdot I_{eff}^2 = I_{red} \cdot U_{red} \quad (V.38)$$

$$U_{red} = U_{C1} + U_{C2} \quad (V.39)$$

On suppose un facteur de puissance unitaire côté réseau, et on néglige la résistance du réseau, on obtient:

$$\begin{cases} 3 \cdot I_{eff} \cdot V_{eff} = I_{red} \cdot U_{red} \\ U_{red} = R_{Ch} \cdot I_{red} \end{cases} \Rightarrow I_{eff} = \frac{U_{red}^2}{3 \cdot V_{eff} \cdot R_{Ch}} \quad (V.40)$$

Dans le cas d'une charge résistive, on a:

$$U_{red} \cdot I_{Ch} = P_r \quad (V.41)$$

$$3 \cdot V_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos \varphi - 3 \cdot R \cdot I_{eff}^2 = I_{red} \cdot U_{red} \quad (V.42)$$

$$3 \cdot V_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos \varphi - 3 \cdot R \cdot I_{eff}^2 = \frac{U_{red}^2}{R_{Ch}} \quad (V.43)$$

En supposant un facteur de puissance unitaire coté réseau et en négligeant les pertes joules, on trouve:

$$I_{\text{eff}} = \frac{U_{\text{red}}^2}{3 \cdot V_{\text{eff}} \cdot R_{\text{Ch}}} \quad (\text{V.44})$$

V.3.6 Résultats de simulation

Le schéma de fonctionnement de redresseur à trois niveaux à structure NPC avec la stratégie triangulaire sinusoïdale à deux porteuses sont représentés dans la figure (V.11). La simulation du fonctionnement a été réalisée à l'aide de logiciel MATLAB/SIMULINK pendant une durée égale à 0.2s.

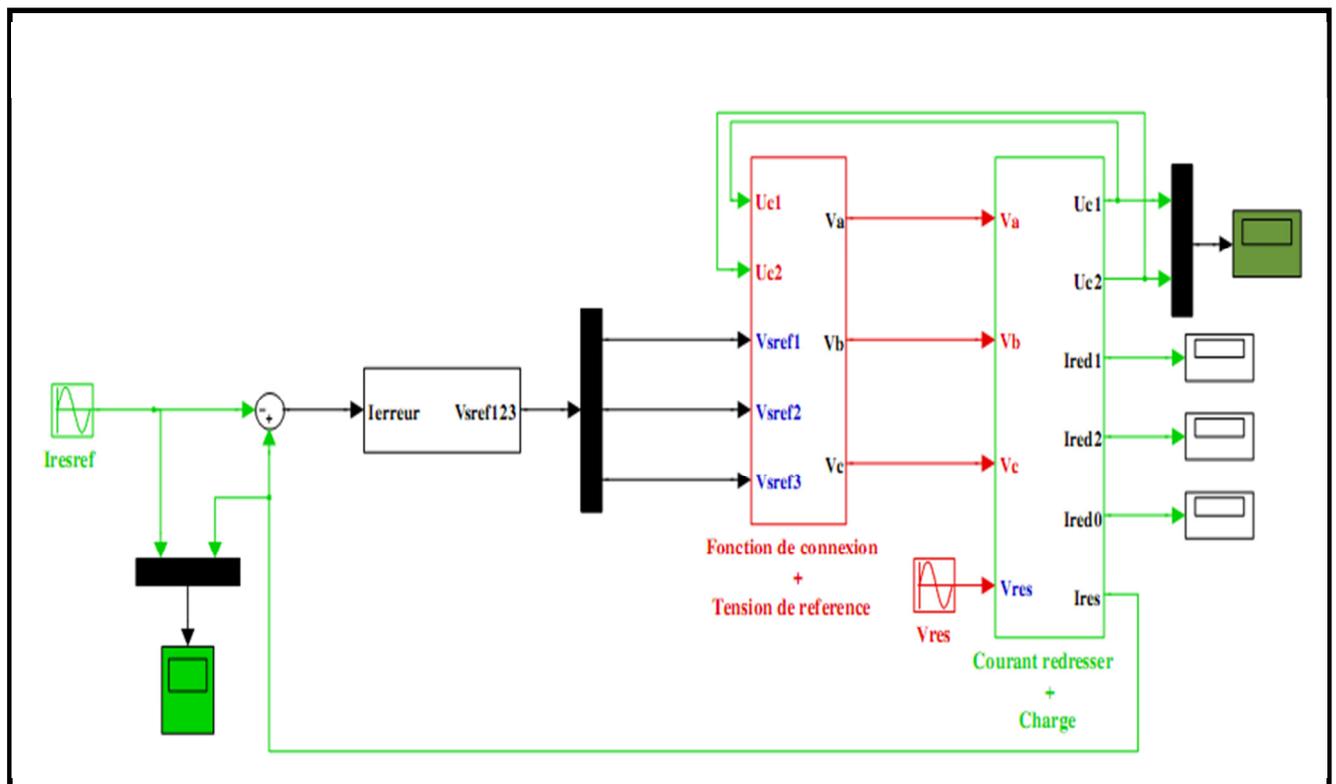


Figure V.11 : Schéma bloc du redresseur MLI à trois niveaux.

Les figures ci-dessous représentent les résultats de simulation du redresseur triphasé à trois niveaux commandés par la stratégie triangulaire sinusoïdale à deux porteuses lorsqu'il alimente une charge résistive.

Ces simulations sont faites pour une valeur de :

- ❖ Capacité du filtre intermédiaire est $C = 20\text{mF}$.
- ❖ Charge résistive $R_c = 25\Omega$.
- ❖ La tension efficace du réseau est $V_{\text{eff}} = \sqrt{2} \cdot 220\text{V}$.
- ❖ Fréquence $f = 50\text{Hz}$.
- ❖ Tension continue $U_c = 300\text{V}$.

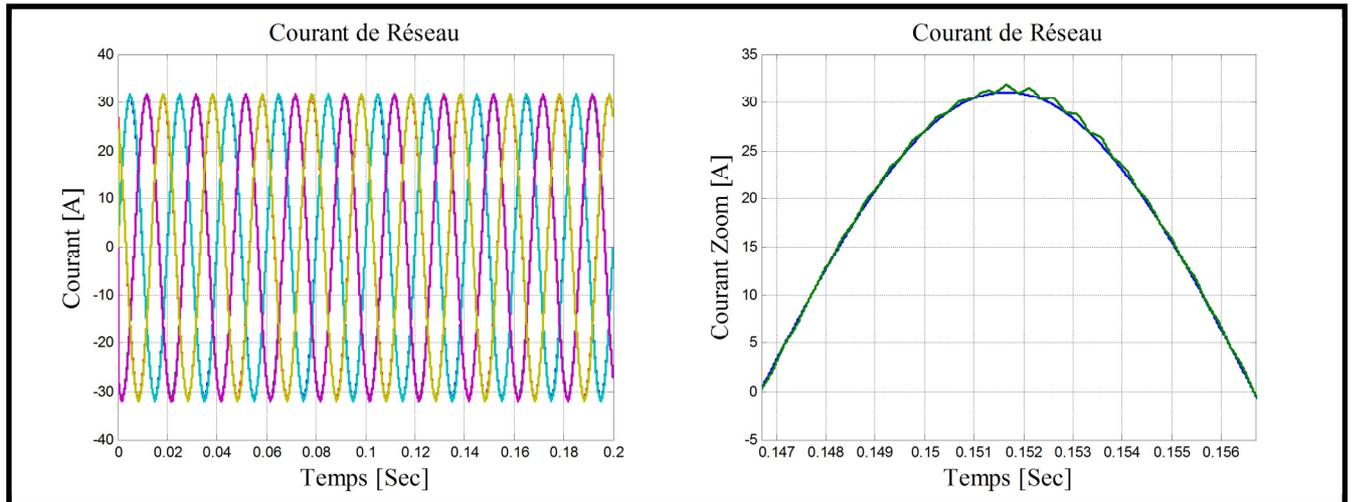
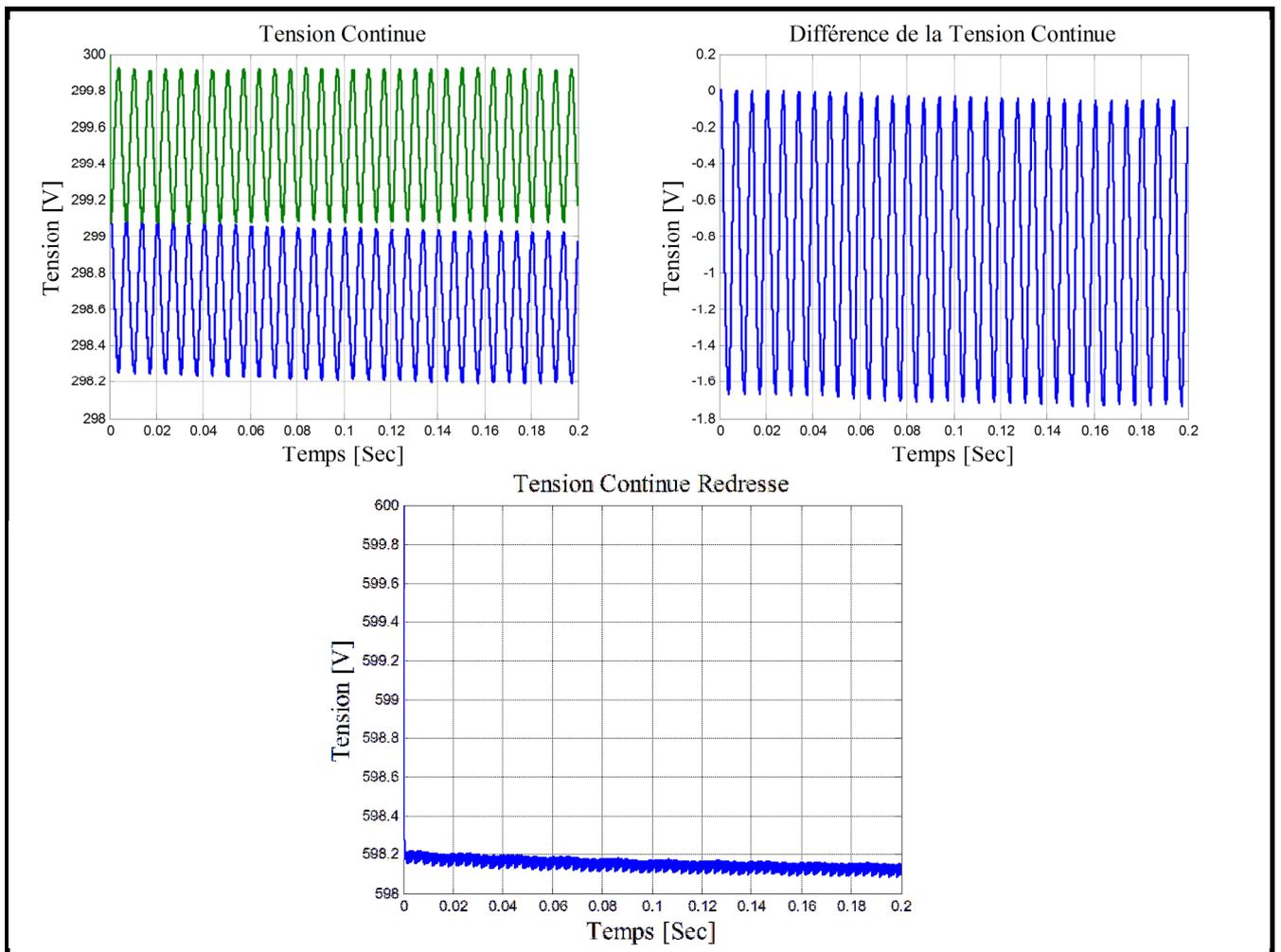


Figure V.12 : Le courant du réseau et sa référence.

Figure V.13 : Les tensions redressées U_{C1} , U_{C2} et la différence ΔU_C .

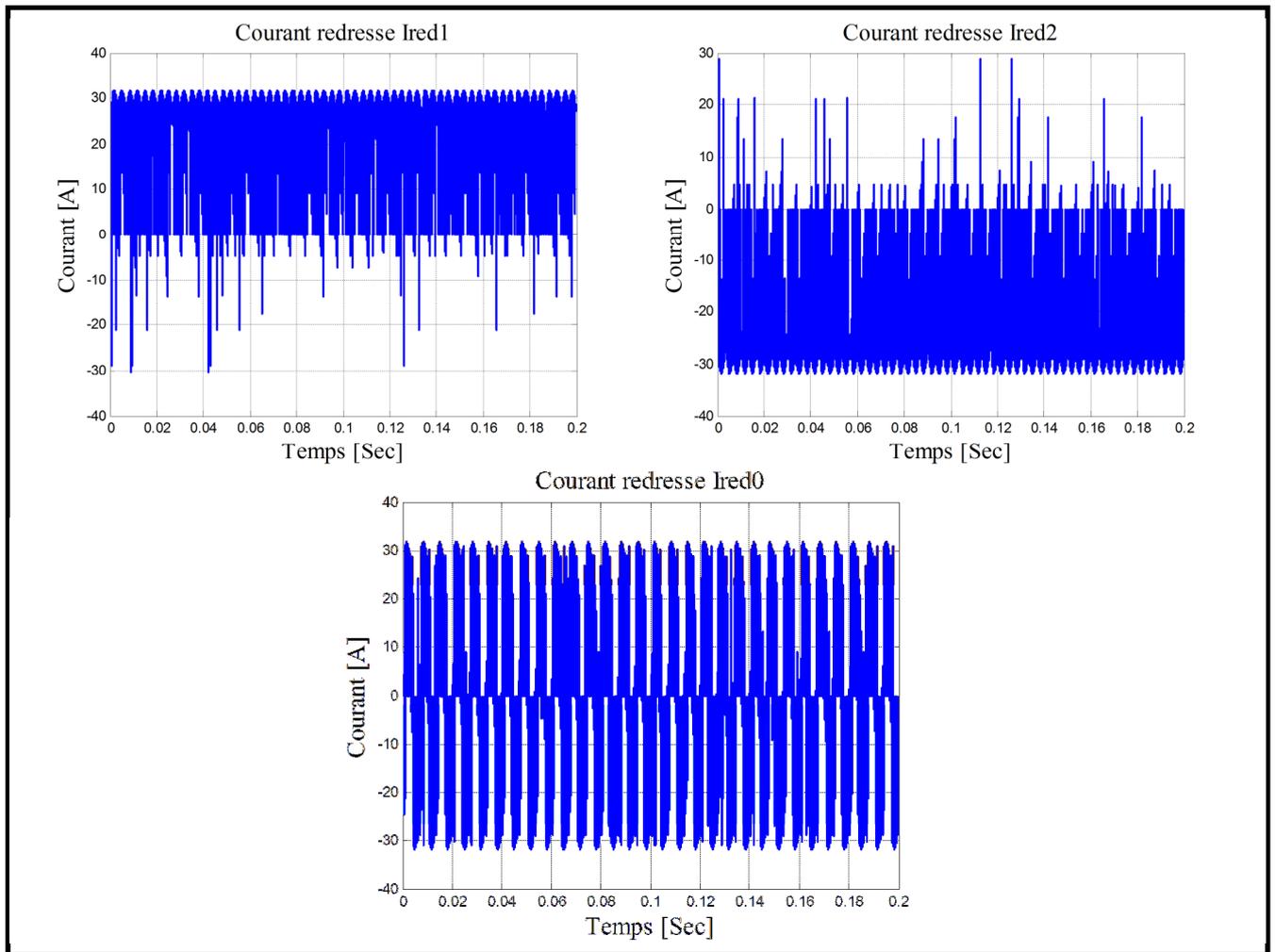


Figure V.14 : Les courants de sortie du redresseur triphasé à trois niveaux à structure NPC.

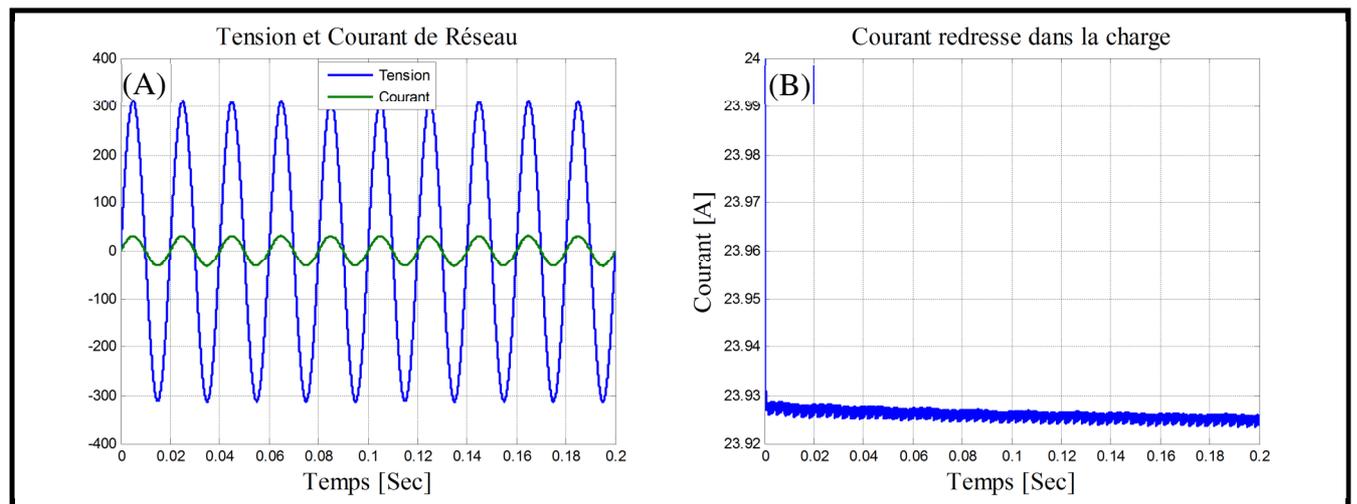


Figure V.15.A : La tension du réseau V_{res} et le courant d'une phase i_{res} .

Figure V.15.B : Le courant redressé i_{red} dans la charge résistive.

D'après la figure (V.12) on constate clairement que le courant du réseau triphasé alimentant le redresseur suit sa référence avec succès.

La figure (V.13) montre que les tensions U_{C1} et U_{C2} sont très proches. Elles atteignent leur valeur qui assure l'équilibre des puissances en un temps qui est plus court pour le cas où la capacité est de faible valeur. La différence de tension ($U_{C1} - U_{C2}$) oscille autour des valeurs très petites par rapport à celles de U_{C1} et U_{C2} . Cette différence est plus importante dans le cas d'une capacité de faible valeur [29].

Selon la figure (V.14) on observe que le courant i_{red1} présente une allure opposée à celle de i_{red2} . Ceci est nécessaire pour que le courant i_{red0} ait une valeur moyenne nulle. Comme on peut le constater, le courant i_{red0} a une valeur moyenne pratiquement nulle. Ceci présente la chose la plus désirée à cette alimentation pour assurer l'équilibre du pont capacitif.

En observant la figure (V.15.A), on constate que la tension du réseau V_{res} est en phase avec le courant i_{res} .

Concernant la figure (V.15.B) on remarque que l'allure du courant de la charge a une même trajectoire à celle de tension continu redresse figure (V.13), mais il suffit de multiplier la valeur de courant de charge avec la valeur de la résistance de charge pour voir cette valeur de tension continu redressée.

V.4 Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons défini les différentes configurations possibles d'un bras de l'onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC, pour pouvoir modéliser son fonctionnement. Cette modélisation nous montre que l'onduleur est équivalent à deux onduleurs à deux niveaux mis en série.

Ensuite nous avons défini une commande complémentaire optimale afin de rendre le fonctionnement de l'onduleur totalement commandable. Enfin pour commander cet onduleur, nous avons utilisé la commande par la stratégie triangulaire sinusoïdale à deux porteuses bipolaires en dents de scie. Cette dernière permet d'élargir la zone de réglage, ainsi que l'amélioration du taux d'harmoniques.

Dans la seconde partie, avant d'étudier la stratégie triangulaire sinusoïdale à deux porteuses bipolaires du redresseur à trois niveaux, nous avons modélisé ce dernier ainsi que le réseau électrique dans le repère ABC.

Enfin pour analyser les performances de cette stratégie, nous avons simulé ce redresseur associé à une charge résistive qui a donné des résultats satisfaisants.

Dans le chapitre qui suit, nous allons étudier la cascade (turbine- MADA-redresseur-onduleur) connectée au réseau locale.

CHAPITRE IV

Cascade Turbine-MADA- Onduleur-Redresseur

VI.1. INTRODUCTION

Après avoir étudié toutes les parties constituant un système de conversion d'énergie éolienne et synthétiser le système de commande de chaque partie séparément, nous allons, dans ce chapitre, étudier les performances de l'association de toutes ces parties. En effet, La partie mécanique, modélisée est contrôlée dans la chapitre II, sera attachée à la machine asynchrone en double alimentation étudiée dans les chapitres III, IV et les convertisseurs statiques (onduleur-redresseur à MLI) étudiées dans le chapitre V pour constituer un système éolien à vitesse variable. Des résultats de simulations seront présentés pour discuter l'efficacité de ce nouveau système.

VI.2. Structure de la cascade

Dans cette partie de notre chapitre, on étudie le comportement dynamique de l'aérogénérateur à base de la machine doublement alimentée (MADA) connectée au réseau. Le stator de la MADA est directement relié au réseau, par contre son rotor est connecté à ce dernier via une cascade (Redresseur, Filtre, Onduleur). Ce changeur de fréquence indirect de la figure (VI.1). Permet à partir d'un réseau à fréquence et amplitude fixes d'avoir un système de tensions de sortie à fréquence et amplitude variables.

La structure générale de cette cascade est montrée dans la figure (VI.1). L'onduleur et redresseur sont commandés par la stratégie triangulaire sinusoïdale à deux porteuses en dent de scie [2] [29] [35].

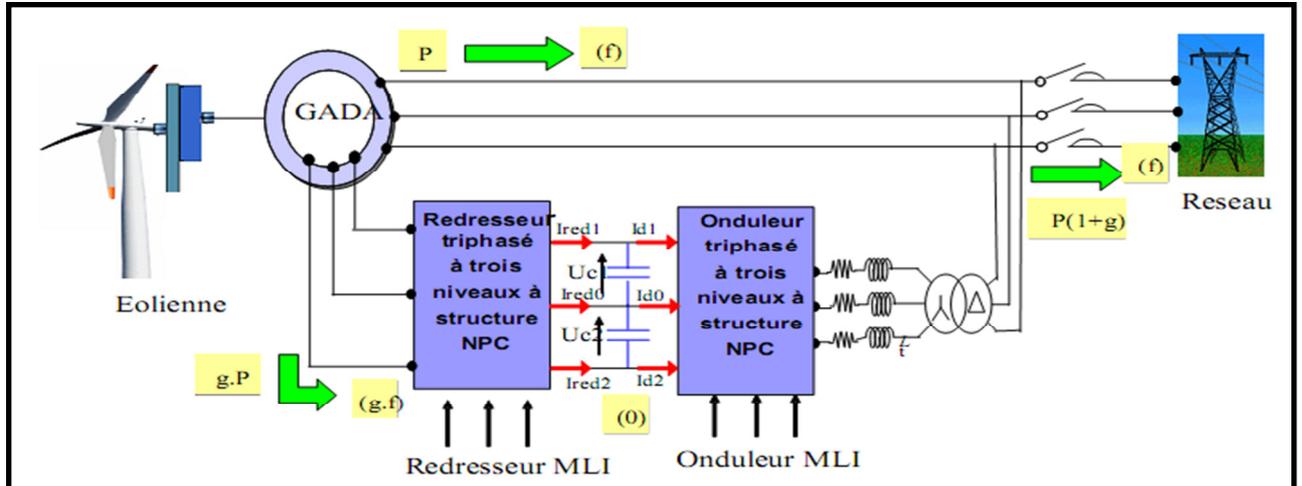


Figure VI.1: Cascade d'une turbine, d'un redresseur de courant - onduleur de tension triphasé à trois niveaux alimentant la MADA.

VI.3. Modélisation du filtre intermédiaire de la cascade

La structure du filtre intermédiaire et son graphe informationnel sont présentés par la figure (VI.2). Le modèle du filtre est défini par le système suivant:

$$\begin{cases} U_{C1} = \frac{1}{C_1} \int (I_{red1} - I_{d1}) dt \\ U_{C2} = \frac{1}{C_2} \int (I_{red2} - I_{d2}) dt \end{cases} \quad \begin{cases} C_1 \cdot \frac{dU_{C1}}{dt} = I_{red1} - I_{d1} = R_1 \\ C_2 \cdot \frac{dU_{C2}}{dt} = I_{red2} - I_{d2} = R_2 \end{cases} \quad (VI.1)$$

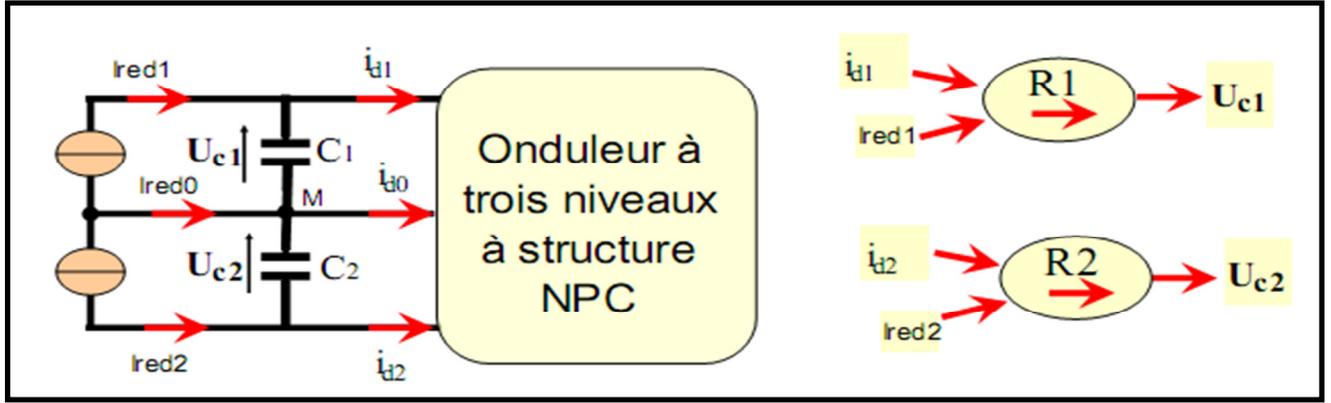


Figure VI.2: Filtrage intermédiaire de la cascade redresseur de courant triphasé à trois niveaux- onduleur triphasé à trois niveaux et son graphe informationnel.

D'après l'équation (VI.1), on constate qu'on peut minimiser la différence entre les tensions U_{C1} et U_{C2} en agissant sur les valeurs des capacités C_1 et C_2 . Le système qui est présenté par l'équation (VI.1) peut être interprété par le graphe informationnel de la figure (VI.2). Les relations R_1 et R_2 de ce graphe sont respectivement la première et la deuxième équation du système (VI.1). D'après la figure (VI.2) on observe deux blocs apparemment indépendants, qui peuvent être commandés respectivement par i_{red1} et i_{red2} . Cependant, on doit noter que les deux courants i_{red1} et i_{red2} sont contrôlés par le même courant du réseau [29] [33].

$$i_{d0} - i_{red0} = C \left(\frac{dU_{C1} - dU_{C2}}{dt} \right) \quad (VI.2)$$

Avec : $C_1 = C_2 = C$

Cette dernière relation montre également afin d'avoir un potentiel du point milieu M plus stable (valeur moyenne nulle de la différence $(U_{C1} - U_{C2})$), il faut avoir une valeur moyenne du courant i_{d0} nulle.

VI.4 Commande de la MADA alimentée par deux convertisseurs

Nous avons effectué des simulations de commande en puissances active et réactive rotoriques dont le stator est relié directement au réseau et dont le rotor est relié au réseau par l'intermédiaire d'une cascade redresseur et onduleur triphasé à trois niveaux. Le redresseur et l'onduleur sont commandés par la stratégie triangulaire sinusoïdale. La machine est commandée toujours par la technique de la commande vectorielle maintenant $\Phi_{rq} = 0$ [2].

La valeur efficace du courant de référence I_{eff} qu'on doit imposer se déduit par l'application du principe de la conservation de la puissance en négligeant les pertes joules comme suit:

$$3 \cdot V_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos \varphi = P_r \Rightarrow I_{eff} = \frac{P_r}{3 \cdot V_{eff} \cdot \cos \varphi} \quad (VI.3)$$

$$\text{Avec : } \cos \varphi = \frac{P_r}{\sqrt{P_r^2 + Q_r^2}} \quad (VI.4)$$

VI.5. Résultats de simulation

Des résultats de simulation très encourageants sur les performances de la chaîne éolienne qui ont été simulés sous l'environnement Matlab/Simulink représentés sur les figures ci-dessous.

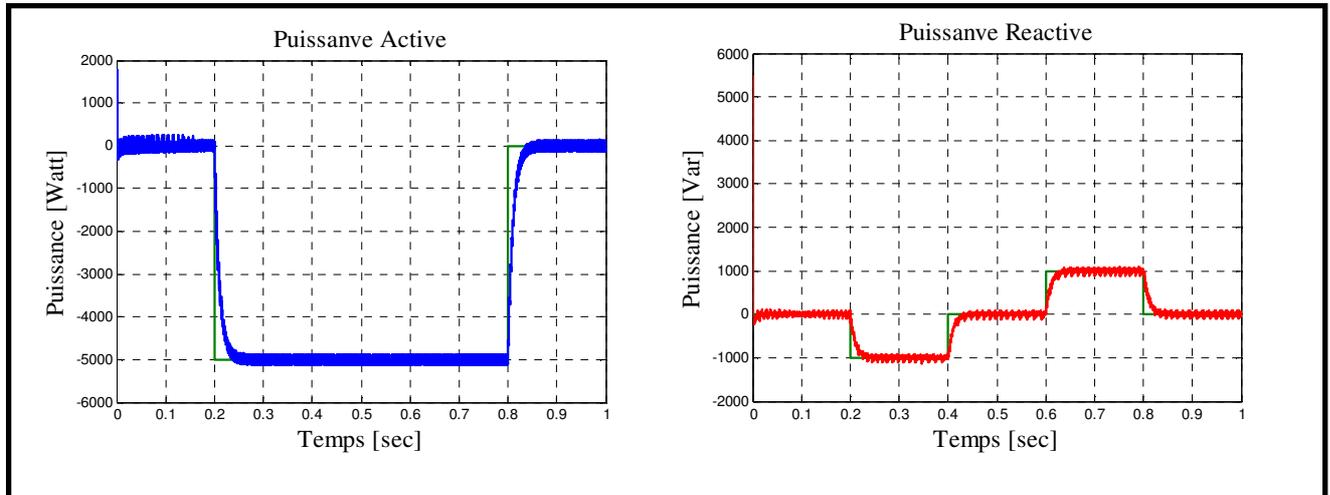


Figure VI.3 : Représentation des puissances (active, réactive) et leurs références.

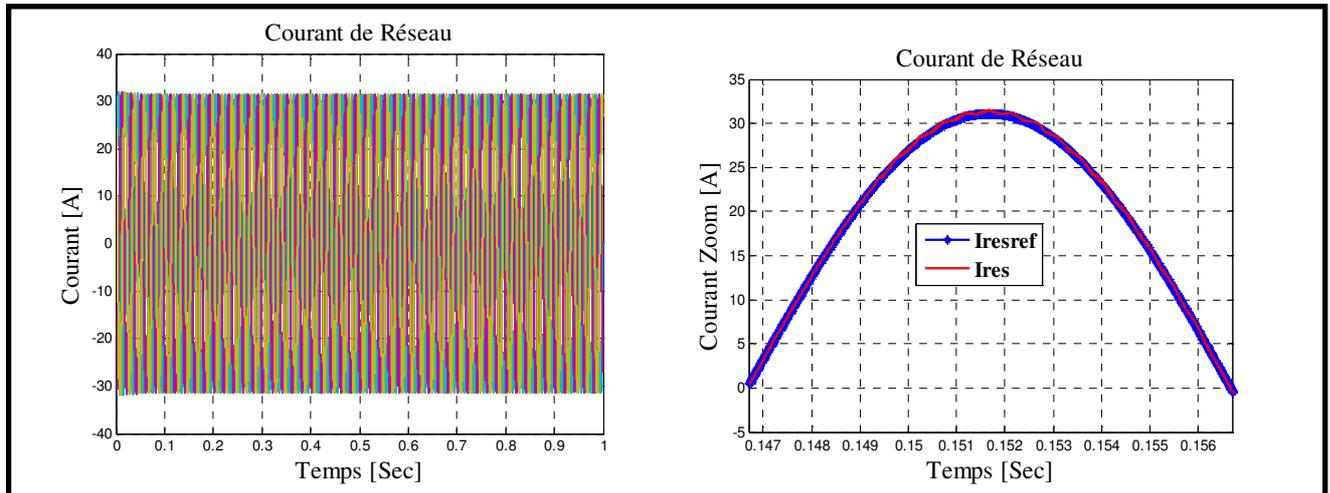


Figure VI.4 : Le courant du réseau et sa référence.

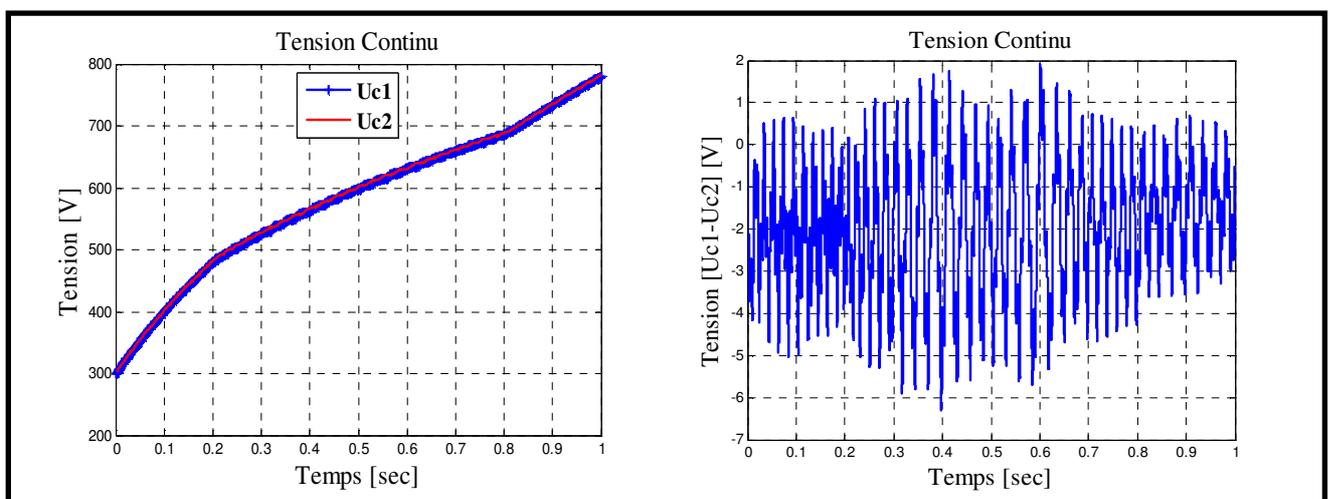


Figure VI.5 : Les tensions redressées U_{C1} , U_{C2} et la différence ΔU_C .

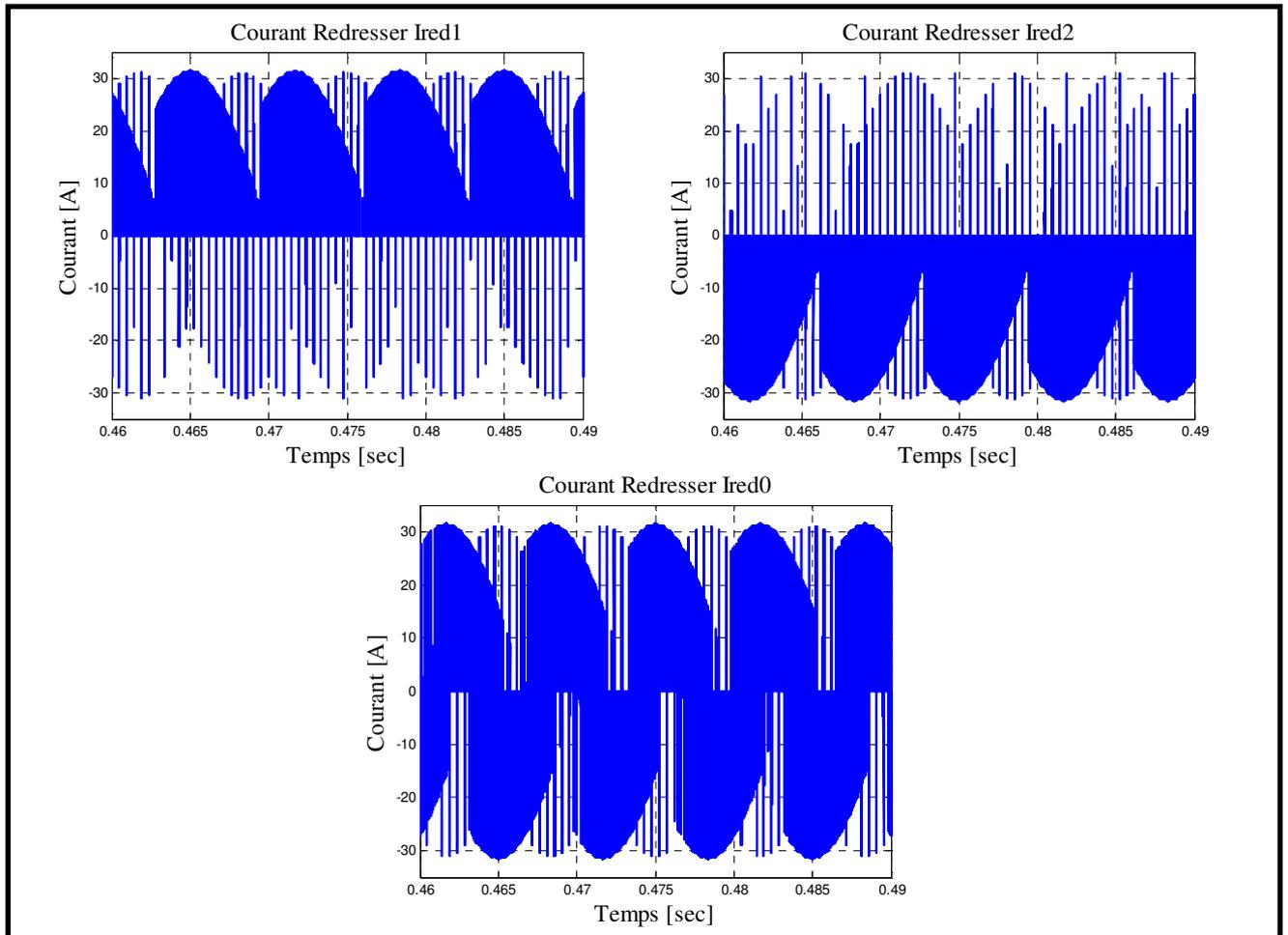


Figure VI.6 : Les courants de sortie du redresseur triphasé à trois niveaux à structure NPC.

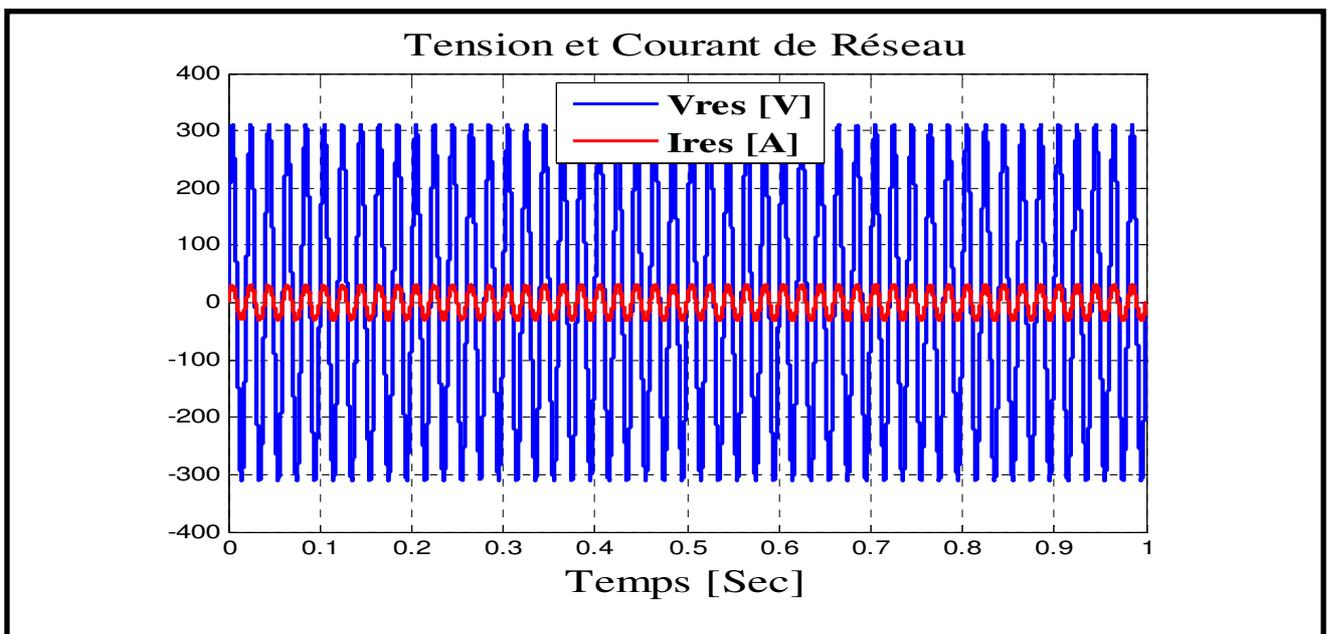


Figure VI.7 : La tension du réseau V_{res} et le courant d'une phase i_{res} .

Dans cette partie, nous présentons le travail portant la modélisation d'une chaîne de conversion éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation est constituée d'un redresseur contrôlé par la technique de MLI et un bus continu ; l'ensemble est relié au réseau via un onduleur à MLI et un filtre. La modélisation globale de la chaîne de conversion éolienne ainsi que le dispositif de commande associé sont développés sous forme d'un modèle continu équivalent et qui prend en compte les composantes utiles des courants et des tensions au niveau de la machine, du bus continu et du réseau.

D'après ces résultats on constate que :

Les figures présentées dans cette section démontrent que notre système présente une dynamique satisfaisante et acceptable.

La figure (VI.3), représente les résultats de simulation obtenus de la cascade étudiée avec une application d'un échelon de référence dans l'intervalle de temps de [0.2s, 0.8s] pour la puissance active et les intervalles de temps de {[0.2s, 0.4s] et [0.6s, 0.8s]} pour la puissance réactive. Ces résultats montrent clairement que la dynamique de la puissance active ou réactive réagit rapidement et sans dépassement. Les échelons sont correctement suivis et il n'y a plus d'erreur sur les puissances. On peut constater aussi que la MADA peut fonctionner comme un compensateur de l'énergie réactive qui fournit ou absorber cette énergie avec un réseau.

On voit dans la figure (VI.4) que les courants du réseau restent toujours sinusoïdaux et suivent bien leurs références. Ils sont en phase avec la tension de réseau présenté dans la figure (VI.7).

La figure (VI.6), nous permet de relever que les courants I_{red1} et I_{red2} ont la même forme mais inversés l'un par rapport à l'autre. Le courant I_{red0} a une valeur moyenne nulle.

On voit aussi d'après les résultats de la figure (VI.5) que la tension continue subit une forte augmentation surtout lors de l'application de l'échelon de puissance. On remarque aussi qu'on a une légère différence entre les deux tensions continues (U_{C1} et U_{C2}). On peut conclure que le redresseur à MLI n'assure pas que ($U_{C1} \approx U_{C2}$). Donc le problème de déséquilibre de point milieu reste sans solution.

Pour résoudre le problème d'instabilité des tensions (U_{C1} et U_{C2}), on va introduire le pont de Clamping ainsi que l'asservissement de la tension de sortie du redresseur comme solution.

VI.6. Modélisation et Commande du pont Clamping

Afin de stabiliser les tensions d'entrée de l'onduleur, on doit minimiser la différence entre elles. Pour cela, on va proposer un pont d'équilibrage dit Pont de Clamping qui se compose d'un transistor et d'une résistance R_p en série, placés parallèlement aux bornes de chaque capacité du filtre intermédiaire de la cascade utilisée, comme l'indique la figure (VI.8). Les interrupteurs du pont sont commandés par un algorithme qui assure la stabilité des tensions d'entrée de l'onduleur à une valeur de référence fixée

à 400V. Chaque transistor est commandé de telle façon que l'égalité des différentes tensions soit conservée [2].

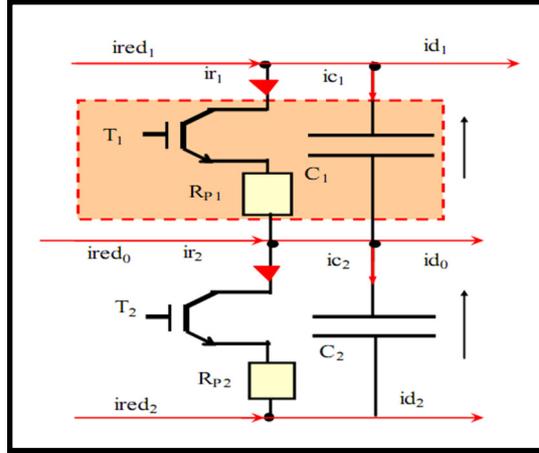


Figure VI.8 : Structure du pont de Clamping avec filtre intermédiaire.

Dans ce cas, le modèle mathématique du filtre intermédiaire avec le pont clamping pour chaque cascade étudiée est défini comme suit [2] [3].

$$\begin{cases} U_{C1} = \frac{1}{C_1} \int (I_{red1} - I_{r1} - I_{d1}) dt \\ U_{C2} = \frac{1}{C_2} \int (-I_{red2} - I_{r2} + I_{d2}) dt \end{cases} \quad (VI.5)$$

Avec:

$$I_{ri} = T_i \cdot \frac{U_{Ci}}{R_{Pi}} \quad \text{Avec } i = \{1, 2\} \quad (VI.6)$$

IV.6.1 Algorithme de commande du pont de Clamping

L'algorithme de commande utilisé pour conserver une tension constante égale à la tension de référence aux bornes de chaque condensateur est le suivant [2]:

$$\begin{cases} (U_{Ci} - U_{ref}) = \epsilon_i \\ \text{Si } \epsilon_i > 0 \text{ Then } T_i = 1 \Rightarrow I_{ri} = T_i \cdot \frac{U_{Ci}}{R_{Pi}} \\ \text{Si NON } T_i = 0 \Rightarrow I_{ri} = 0 \end{cases} \quad (VI.7)$$

VI.7. Régulation de la tension de sortie du redresseur de courant triphasé à trois niveaux

La modélisation de cette boucle est basée sur le principe de la conservation de la puissance instantanée avec l'hypothèse d'un redresseur sans pertes. Cette boucle impose la valeur efficace du courant de référence du réseau [2] [3].

Puissance d'entrée:

$$P_r = \sum_{K=1}^3 \left(V_{resK} \cdot i_{resK} - R_{res} \cdot i_{resK}^2 - \frac{L_{res}}{2} \frac{di_{resK}^2}{dt} \right) \quad (VI.8)$$

Puissance de sortie:

$$P_s = U_{C1} \cdot (i_{C1} + i_{Ch1}) + U_{C2} \cdot (i_{C2} + i_{Ch2}) = U_{red1} \cdot I_{red1} - U_{red2} \cdot I_{red2} \quad (VI.9)$$

On supposera par la suite que: $U_{C1} = U_{C2} = U_C$ et $C_1 = C_2 = C$.

Définissons les grandeurs i_C , i_{Ch} et U_C :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_C = \frac{i_{C1} + i_{C2}}{2} \\ i_{Ch} = \frac{i_{d1ond} - i_{d2ond}}{2} \\ U_C = U_{Cmoy} = \frac{U_{C1} + U_{C2}}{2} \\ i_{red} = i_C + i_{Ch} \end{array} \right. \quad (VI.10)$$

En utilisant le principe de la conservation de la puissance et en négligeant les pertes joules dans la résistance R_{res} , on peut écrire:

$$\sum_{K=1}^3 (V_{resK} \cdot i_{resK}) = \sum_{K=1}^3 \frac{L_{res}}{2} \frac{di_{resK}^2}{dt} + 2 \cdot U_C \cdot (i_C + i_{Ch}) \quad (VI.11)$$

En supposant les courants du réseau sinusoïdaux et en phase avec leurs tensions i_{resK} correspondantes, on peut écrire alors:

$$3 \cdot V_{eff} \cdot I_{eff} = 2 \cdot U_C \cdot (i_C + i_{Ch}) \quad (VI.12)$$

Le schéma bloc de l'asservissement de la tension est donné par la figure (VI.9) [2].

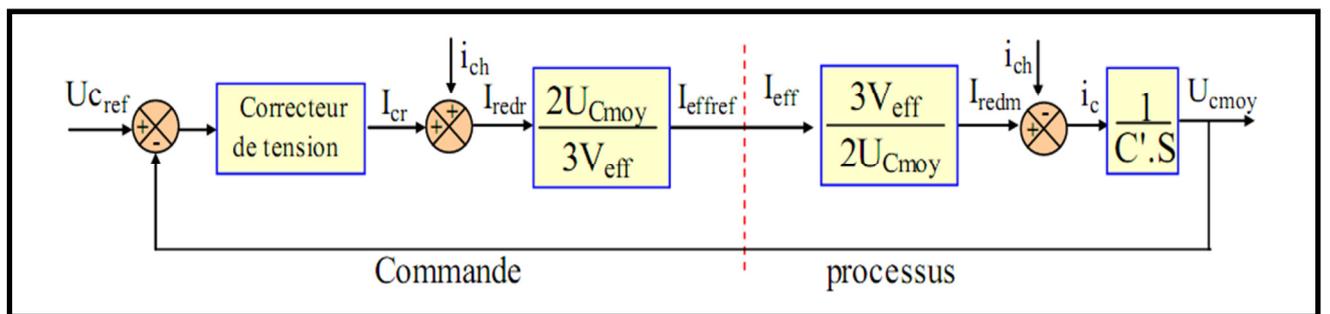


Figure VI.9 : Algorithme d'asservissement de la tension de sortie U_C du redresseur de courant triphasé à trois niveaux.

La fonction de transfert en boucle ouverte de régulation de tension s'écrit:

$$G_C(s) = \frac{U_C}{i_{eff}} = \frac{1}{C \cdot S} \quad (VI.13)$$

Le déséquilibre des tensions (U_{C1} et U_{C2}) d'entrée de l'onduleur à trois niveaux cause le problème de flottement du potentiel du point milieu M. Aussi, pour avoir un fonctionnement parfait de l'onduleur à

trois niveaux, ces deux tensions d'entrée doivent être constantes et égales. Pour atteindre cet objectif, on se propose dans ce qui va suivre d'étudier l'asservissement de ces deux tensions (U_{C1} et U_{C2}) par l'intermédiaire du redresseur de courant triphasé à trois niveaux. La régulation sera de type cascade on utilise pour cela un régulateur classique de type IP qui permet d'obtenir une fonction de transfert en boucle fermée qui ne contient pas le zéro [3].

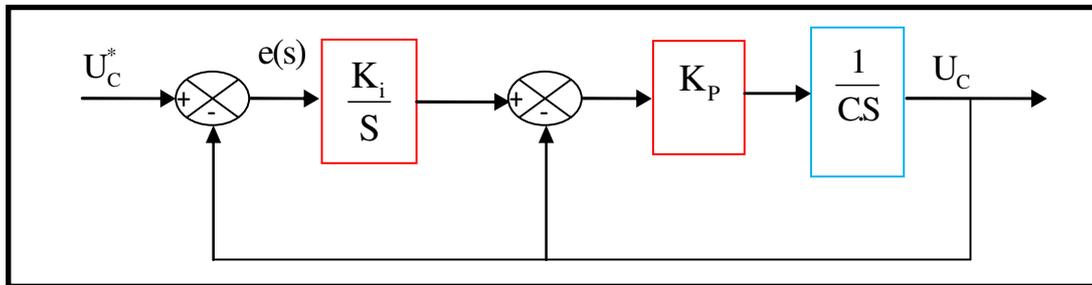


Figure VI.10 : Boucle de tension continue.

VI.8. Simulation de la cascade avec (pont de Clamping + l'asservissement de la tension U_C)

Dans cette dernière partie de notre étude sur la cascade éolienne constituée de (redresseur à trois niveaux-pont de Clamping-onduleur à trois niveaux-MADA-turbine), nous avons appliqué un algorithme d'asservissement sur les tensions (U_{C1} et U_{C2}) dont le but est de stabiliser ces dernières pour assurer l'équilibre du point milieu M.

La simulation de cette commande a été faite en imposant les puissances actives et réactives de référence (P_{ref} , Q_{ref}).

Nous avons appliqué tout au long de ce chapitre une référence de la puissance active ($P_{ref} = -5000$ W) dans l'intervalle de temps de [0.2s, 0.8s] et une référence de la puissance réactive ($Q_{ref} = [-1000; 1000]$ Var) dans l'intervalle de temps de {[0.2s, 0.4s] et [0.6s, 0.8s]}

D'après les figures présentées ci-dessous. On constate clairement dans la figure (VI.11) que les puissances actives et réactives suivent leurs références avec succès et sans dépassement.

Concernant l'évolution de la tension continue présentée dans la figure (VI.12), on remarque que les deux tensions continues (U_{C1} et U_{C2}) suivent bien leur référence et on constate aussi que la différence entre les deux tensions est pratiquement nulle après un régime transitoire de 0.1s qui signifie une meilleure stabilité du point milieu.

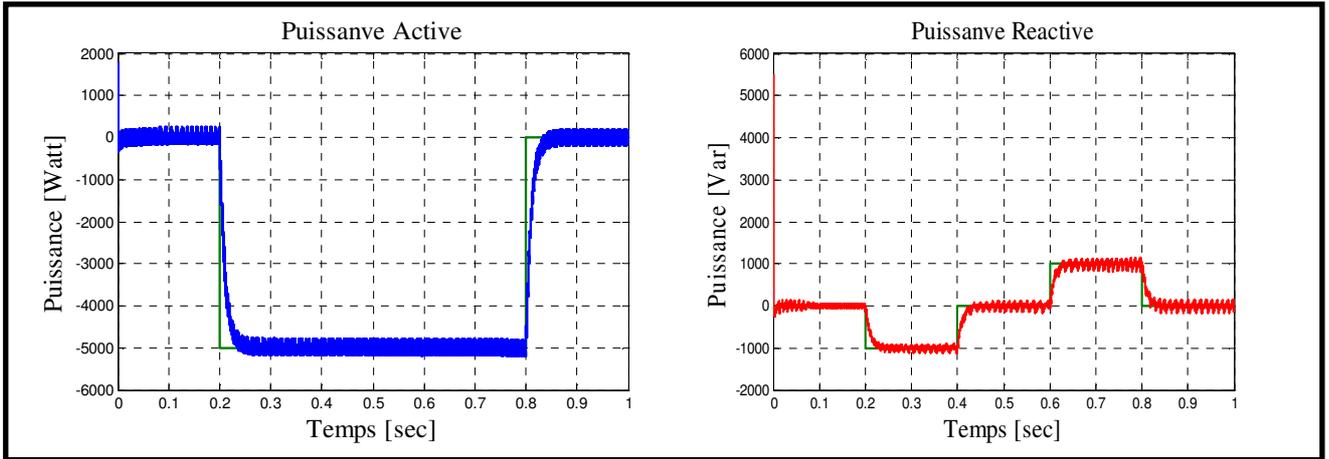


Figure VI.11 : Représentation des puissances (active, réactive) et leurs références.

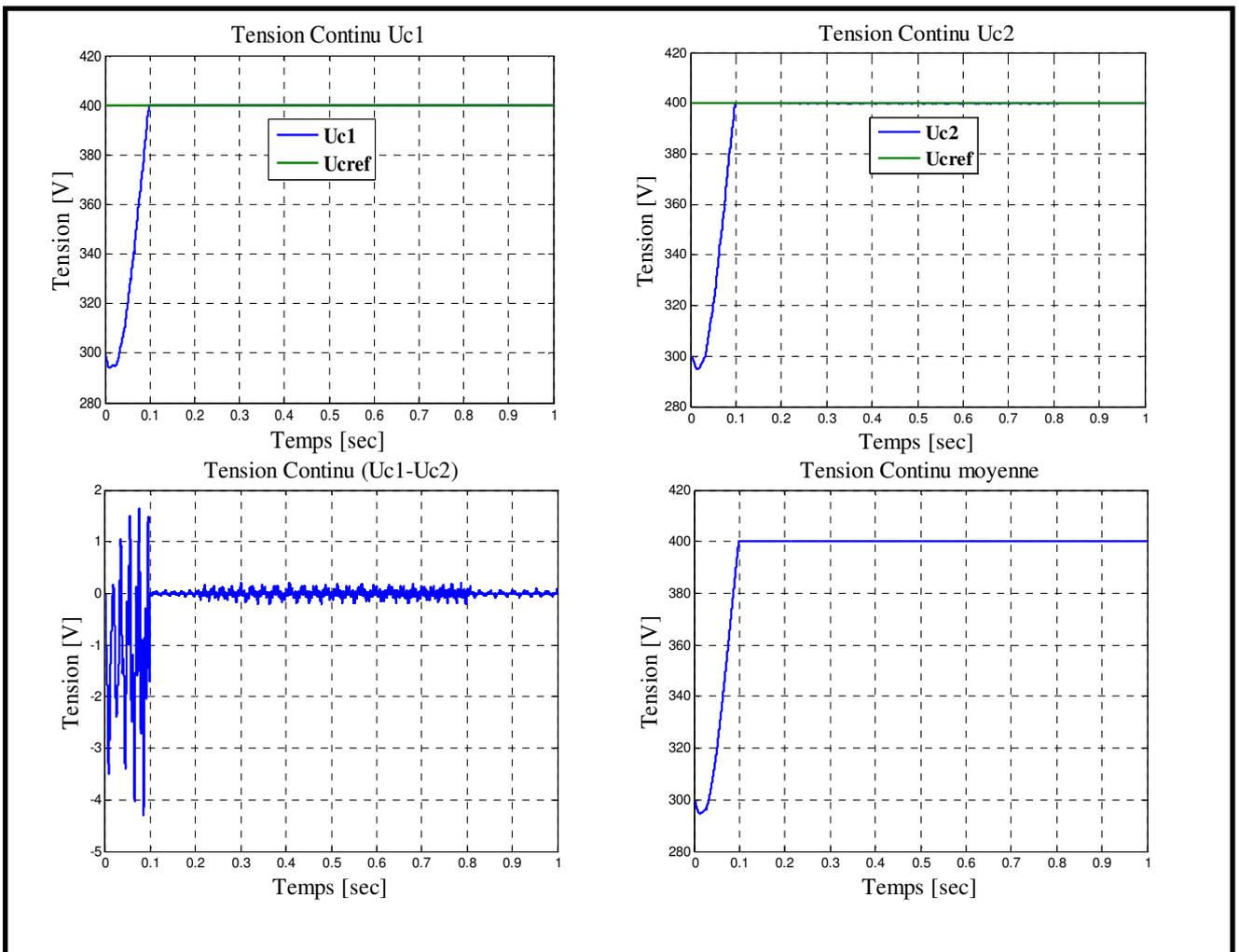


Figure VI.12 : Représentation de la tension continue.

VI.9.Conclusion

Dans ce dernier chapitre, on a étudié la modélisation d'une chaîne de conversion éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation constituée d'un redresseur contrôlé par la technique de MLI, et un bus continu ; l'ensemble est relié au réseau via un onduleur à MLI, et un filtre.

Après les résultats de simulation présentée auparavant dans la première partie de ce chapitre. On a constaté que la chaîne éolienne a fonctionné avec succès est présente des résultats satisfaisantes pour notre étude, mais nous avons remarqué qu'il existait un problème de déséquilibre de point milieu M c'est-à-dire qu'il existe une légère différence entre les deux tensions continues (U_{C1} et U_{C2}) à l'entrée d'onduleur.

Dans la seconde partie de ce chapitre, nous avons essayé de résoudre le problème d'instabilité des tensions (U_{C1} et U_{C2}) par une introduction de pont de Clamping dans la chaîne éolienne ainsi nous avons appliqué un algorithme d'asservissement sur les tensions (U_{C1} et U_{C2}) dont le but est de stabiliser ces derniers pour assurer l'équilibre du point milieu M.

Enfin pour analyser les performances de cet algorithme d'asservissement, nous avons simulé notre cascade éolienne constituée de (redresseur à trois niveaux-pont de Clamping-onduleur à trois niveaux-MADA-turbine) qui a donné des résultats satisfaisants.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude d'un système global de la production d'électricité à partir d'énergie éolienne. Celle-ci a été suivie d'une commande adaptée en vue d'atteindre les meilleures performances.

Dans le contexte des énergies renouvelables un état d'art de l'énergie éolien est présenté dans le premier chapitre. La production de l'énergie éolienne est de plus en plus importante et alors de nouvelles constructions apparaissent. Cette évolution dynamique est surtout visible dans le domaine du grand éolien grâce au développement des nouvelles technologies dans le champ de matériaux de construction et de l'électronique de puissance.

Notre travail s'est déroulé selon les étapes suivantes :

L'étude aérodynamique donnant les bases théoriques justifiant le rôle de la MADA par son fonctionnement à la vitesse variable.

L'établissement d'une stratégie de commande afin d'imposer des références de puissance actives et réactives, de permettre un fonctionnement à vitesse variable.

Plusieurs modes de contrôle ont été donc établis en vue de les comparer et d'en retenir le meilleur. Ainsi, trois structures de commande ont été réalisées, desquelles nous avons choisi la structure indirecte en boucle fermée de par sa robustesse et sa capacité à limiter les courants rotoriques donc à protéger le bobinage de la machine.

L'établissement de la cascade alimentant le rotor à partir du réseau. Celle-ci est composée d'un onduleur, d'un bus continu et d'un redresseur. Grâce à une commande adaptée nous avons pu imposer une référence sur la tension du bus continu.

La synthèse des travaux afin de mieux cerner le projet. Cette étape s'est intéressée à l'optimisation du rendement de la MADA dans un système éolien (MPPT). Un type de commandes a été élaboré. Il repose sur utilisation de la vitesse du vent pour commander la MADA.

Nous avons pu noter alors, que la MADA fonctionnait d'une façon efficace dans les conditions auxquelles nous l'avons soumise. Cela prouve la viabilité de son application dans un système éolien.

Grâce à la commande en puissance active et réactive de la MADA, celle-ci devient un outil intéressant pour le gestionnaire du réseau. L'opérateur système est ainsi doté d'un dispositif qui lui est utile car ces puissances peuvent être positives ou négatives.

A travers cette étude nous obtenons non seulement un moyen de production de l'énergie avec un

rendement optimal, mais aussi un outil améliorant et contribuant à la qualité d'énergie du réseau.

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

- ❖ Etablissement d'un modèle de la MADA prenant en compte la résistance de phase statorique et la saturation magnétique.
- ❖ Utilisation d'un algorithme de maximisation de la puissance captée par différentes techniques : Logique floue, réseau de neurones.
- ❖ L'intégration de la MADA dans un parc éolien avec stockage inertielle.
- ❖ L'étude des perturbations de la production de l'énergie éolienne vis à vis des déséquilibres du réseau.
- ❖ Etudier un système hybride basé sur l'énergie solaire l'énergie éolienne afin de les intégrer dans un réseau électrique.

ANNEXES

ANNEXE A:

1) Paramètres de la MADA sont:

- ❖ Puissance nominale: $P_n = 7.5\text{KW}$;
- ❖ Tension d'alimentation: $V_{\text{eff}} = 220\text{V} / 380\text{V}$;
- ❖ Fréquence d'alimentation: $f = 50\text{Hz}$;
- ❖ Nombre de paires de pôles: $P = 2$;
- ❖ Résistance d'une phase statorique: $R_s = 0,455\Omega$;
- ❖ Résistance d'une phase rotorique: $R_r = 0,62\Omega$;
- ❖ Inductance d'une phase statorique: $L_s = 0,084\text{H}$;
- ❖ Inductance d'une phase rotorique: $L_r = 0,081\text{H}$;
- ❖ Inductance Mutuelle: $M_{sr} = 0,078\text{H}$;
- ❖ Moment d'inertie du rotor: $J_g = 0,3125\text{Kg.m}^2$;
- ❖ Coefficient de frottement: $F_g = 6,73.10^{-3}\text{N.m.s}^{-1}$.

2) Paramètres de la turbine éolienne utilisée :

- ❖ Puissance nominale: $P_n = 10\text{KW}$;
- ❖ Nombre de pale: $P = 3$;
- ❖ Diamètre d'une pale : $R = 3\text{m}$;
- ❖ Gain du multiplicateur : $G = 5.4$;
- ❖ Moment d'inertie de la turbine: $J_{\text{Turbine}} = 0,042\text{Kg.m}^2$;
- ❖ Coefficient de viscosité: $F_{\text{Turbine}} = 0,017\text{N.m.s}^{-1}$.

ANNEXE B: Dimensionnement du régulateur de la vitesse (MPPT)

Le calcul des régulateurs est basé sur la dynamique en boucle fermée à l'aide du principe de compensation des pôles. La boucle de régulation de la vitesse est présentée par le schéma bloc de la figure (B.1).

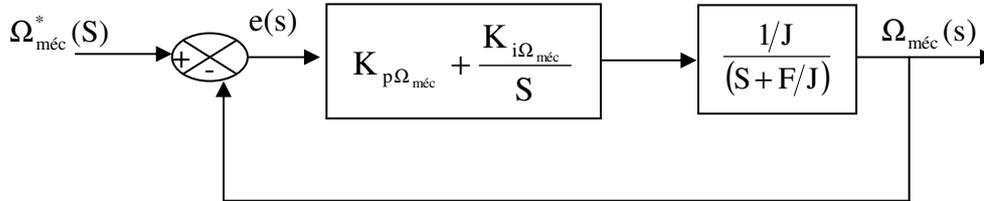


Figure B.1 : Schéma fonctionnel de régulation de la vitesse.

Le régulateur PI est donné par la relation suivante :

$$R_{pi}(S) = \frac{K_{p\Omega_{méc}}}{S} \left(S + \frac{K_{i\Omega_{méc}}}{K_{p\Omega_{méc}}} \right) \quad (B.1)$$

Par compensation :

$$\frac{F}{J} = \frac{K_{i\Omega_{méc}}}{K_{p\Omega_{méc}}} \quad (B.2)$$

La fonction de transfert en boucle fermée est la suivante :

$$\frac{\Omega_{méc}}{\Omega_{méc}^*} = \frac{1}{\frac{J}{K_{p\Omega_{méc}}} S + 1} \quad (B.3)$$

Le système du premier ordre sa fonction de transfert s'écrit :

$$\frac{\Omega_{méc}}{\Omega_{méc}^*} = \frac{K}{1 + \tau.S} \quad (B.4)$$

$$\tau = \frac{J}{K_{p\Omega_{méc}}} \quad (B.5)$$

Le régulateur de la vitesse $\Omega_{méc}$, est :

$$K_{p\Omega_{méc}} = \frac{J}{\tau} \quad (B.6)$$

$$K_{i\Omega_{méc}} = \frac{F}{\tau} \quad (B.7)$$

ANNEXE C: Dimensionnement du régulateur

1) Commande directe

La figure (C.1) montre une partie de notre système bouclé et corrigé par un régulateur (PI) dont la fonction de transfert est de la forme $K_{P(P_{mes}, Q_{mes})} + \frac{K_{i(P_{mes}, Q_{mes})}}{S}$. La détermination des paramètres $K_{P(P_{mes}, Q_{mes})}$ et $K_{i(P_{mes}, Q_{mes})}$ du régulateur fait intervenir des méthodes classiques de calcul des régulateurs continus. La synthèse de ces régulateurs est détaillée dans cette partie.

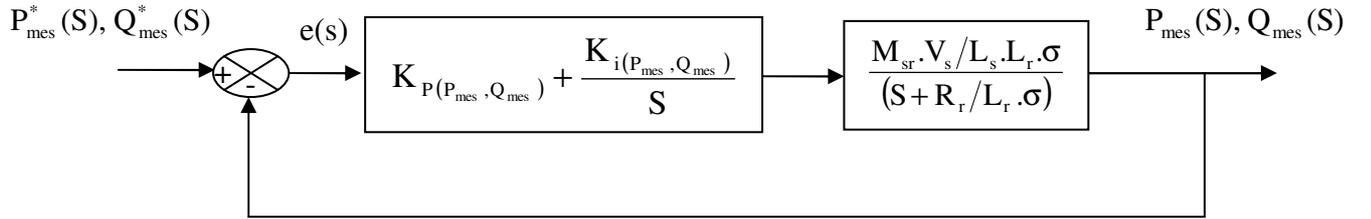


Figure C.1 : Système régulé par un PI.

Le régulateur PI est donné par la relation suivante :

$$R_{pi}(S) = \frac{K_{P(P_{mes}, Q_{mes})}}{S} \left(S + \frac{K_{i(P_{mes}, Q_{mes})}}{K_{P(P_{mes}, Q_{mes})}} \right) \quad (C.1)$$

Par compensation :

$$\frac{R_r}{L_r \cdot \sigma} = \frac{K_{i(P_{mes}, Q_{mes})}}{K_{P(P_{mes}, Q_{mes})}} \quad (C.2)$$

La fonction de transfert en boucle fermée est la suivante :

$$\frac{P_{mes}(S), Q_{mes}(S)}{P_{mes}^*(S), Q_{mes}^*(S)} = \frac{1}{\frac{L_s \cdot L_r \cdot \sigma}{K_{P(P_{mes}, Q_{mes})} \cdot M_{sr} \cdot V_s} S + 1} \quad (C.3)$$

Le système du premier ordre sa fonction de transfert s'écrit :

$$\frac{P_{mes}(S), Q_{mes}(S)}{P_{mes}^*(S), Q_{mes}^*(S)} = \frac{K}{1 + \tau \cdot S} \quad (C.4)$$

$$\tau = \frac{L_s \cdot L_r \cdot \sigma}{K_{P(P_{mes}, Q_{mes})} \cdot M_{sr} \cdot V_s} \quad (C.5)$$

Le régulateur de la puissance active et réactive est :

$$K_{P(P_{mes}, Q_{mes})} = \frac{L_s \cdot L_r \cdot \sigma}{\tau \cdot M_{sr} \cdot V_s} \quad (C.6)$$

$$K_{i(P_{mes}, Q_{mes})} = \frac{L_s \cdot R_r}{\tau \cdot M_{sr} \cdot V_s} \quad (C.7)$$

2) Commande indirecte

2.a) Commande sans boucle de puissance

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

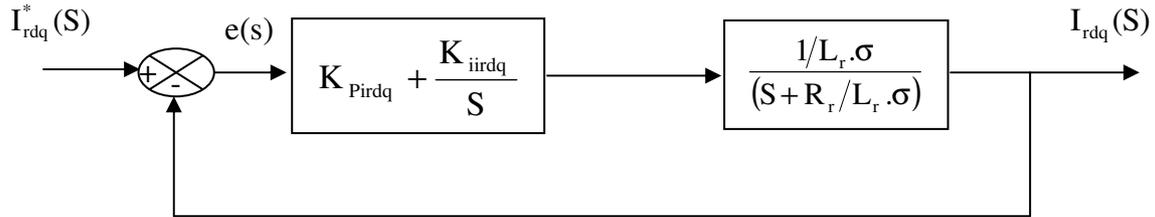


Figure C.2 : Système régulé par un PI pour la commande indirecte sans boucle de puissance.

Le régulateur PI est donné par la relation suivante :

$$R_{pi}(S) = \frac{K_{Pirdq}}{S} \left(S + \frac{K_{iirdq}}{K_{Pirdq}} \right) \quad (C.8)$$

Par compensation :

$$\frac{R_r}{L_r \cdot \sigma} = \frac{K_{iirdq}}{K_{Pirdq}} \quad (C.9)$$

La fonction de transfert en boucle fermée est la suivante :

$$\frac{I_{rdq}(S)}{I_{rdq}^*(S)} = \frac{1}{\frac{L_r \cdot \sigma}{K_{Pirdq}} S + 1} \quad (C.10)$$

Le système du premier ordre sa fonction de transfert s'écrit :

$$\frac{I_{rdq}(S)}{I_{rdq}^*(S)} = \frac{K}{1 + \tau_1 \cdot S} \quad (C.11)$$

$$\tau_1 = \frac{L_r \cdot \sigma}{K_{Pirdq}} \quad (C.12)$$

Le régulateur du courant rotorique dans les deux axes est :

$$K_{Pirdq} = \frac{L_r \cdot \sigma}{\tau_1} \quad (C.12)$$

$$K_{iirdq} = \frac{R_r}{\tau_1} \quad (C.13)$$

2.b) Commande avec boucle de puissance

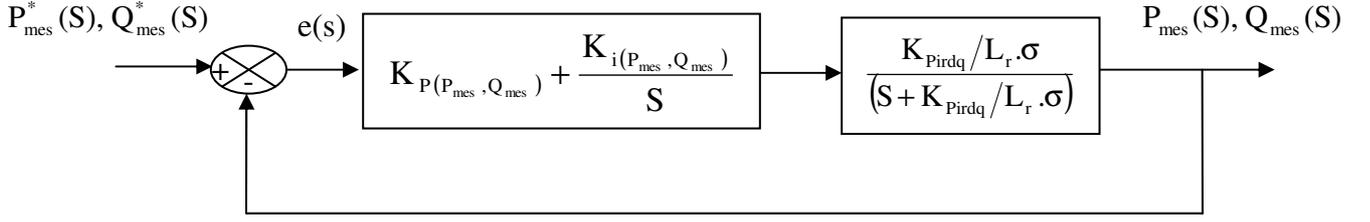


Figure C.2 : Système régulé par un PI pour la commande indirecte sans boucle de puissance.

Le régulateur PI est donné par la relation suivante :

$$R_{pi}(S) = \frac{K_{P(P_{mes}, Q_{mes})}}{S} \left(S + \frac{K_{i(P_{mes}, Q_{mes})}}{K_{P(P_{mes}, Q_{mes})}} \right) \quad (C.14)$$

Par compensation :

$$\frac{K_{Pirdq}}{L_r \cdot \sigma} = \frac{K_{i(P_{mes}, Q_{mes})}}{K_{P(P_{mes}, Q_{mes})}} \quad (C.15)$$

La fonction de transfert en boucle fermée est la suivante :

$$\frac{P_{mes}(S), Q_{mes}(S)}{P_{mes}^*(S), Q_{mes}^*(S)} = \frac{1}{\frac{L_r \cdot \sigma}{K_{P(P_{mes}, Q_{mes})} \cdot K_{Pirdq}} S + 1} \quad (C.16)$$

Le système du premier ordre sa fonction de transfert s'écrit :

$$\frac{P_{mes}(S), Q_{mes}(S)}{P_{mes}^*(S), Q_{mes}^*(S)} = \frac{K}{1 + \tau_2 \cdot S} \quad (C.17)$$

$$\tau_2 = \frac{L_r \cdot \sigma}{K_{P(P_{mes}, Q_{mes})} \cdot K_{Pirdq}} \quad (C.18)$$

Le régulateur de la puissance active et réactive est :

$$K_{P(P_{mes}, Q_{mes})} = \frac{L_r \cdot \sigma}{\tau_2 \cdot K_{Pirdq}} \quad (C.19)$$

$$K_{i(P_{mes}, Q_{mes})} = \frac{1}{\tau_2} \quad (C.20)$$

Avec:

$$\tau_2 \succ \tau_1 \quad (C.21)$$

MADA : Machine Asynchrone à Double Alimentation.
 EWEA: European Wind Energy Association.
 V_1 : Vitesse du vent en amont.
 V_2 : Vitesse du vent en aval.
 V : Vitesse du vent traversant le rotor.
 ρ : Densité de l'air.
 S : Surface balayée par les pales de l'éolienne.
 m : Masse d'air traversant l'hélice par seconde.
 R : Longueur de la pale.
 P_m : La puissance extraite du vent par l'éolienne.
 P_v : La puissance du vent non perturbé.
 C_p : Coefficient de puissance de la turbine.
 $C_{p\max}$: Coefficient de puissance correspondant à l'extraction maximale de puissance.
 λ : Vitesse spécifique.
 λ_{opt} : Ratio de vitesse optimal.
 β : Angle de calage des pales de l'éolienne.
 $C_{\text{aéro}}$: Couple aérodynamique de la turbine.
 C_{mec} : Couple mécanique total
 C_{em} : Couple électromagnétique de la génératrice.
 C_g : Couple mécanique sur l'arbre de la génératrice.
 C_{vis} : Couple des frottements visqueux.
 f : Coefficient des frottements visqueux.
 f_g : Coefficient des frottements visqueux de la génératrice.
 f_{Turbine} : Coefficient des frottements visqueux de la turbine.
 \vec{F}_{ax} : Poussée axiale.
 \vec{F}_{res} : Force résultante produite par l'action du vent sur une pale.
 \vec{F}_{rot} : Poussée en direction de la rotation.
 V_N : Vitesse nominale du vent.
 V_{res} : Vitesse résultante.
 V_{rot} : Composante du vent due à la rotation de l'hélice.
 G : Rapport du multiplicateur.
 J : Inertie totale sur l'arbre.
 J_g : Inertie de la génératrice.
 J_{Turbine} : Inertie de la turbine.
 Ω_{turbine} : Vitesse de rotation de la turbine (avant le multiplicateur).
 Ω_{mec} : Vitesse de rotation du générateur (après le multiplicateur).
 $P_{\text{aéro}}$: Puissance aérodynamique de la turbine.
 g : Glissement.
 N_r et N_s : Sont respectivement le nombre de spires des bobinages rotorique et statorique.
 ω_s et ω_{mec} : Sont respectivement les pulsations de synchronisme et mécanique de la machine.
 P_s : Représente la puissance statorique.
 P_r : La puissance rotorique.
 P_m : La puissance mécanique.
 IGBT ou GTO : Transistors commandables à l'ouverture et à la fermeture.
 MLI : Modulation par largeur d'impulsion.
 a_s, b_s, c_s : Phases du stator.

- a_r, b_r, c_r : Phases du rotor.
 v_{sa}, v_{sb}, v_{sc} : Les tensions simples triphasées au stator.
 i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} : Les courants statoriques.
 $\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}$: Les flux propres au stator.
 v_{ra}, v_{rb}, v_{rc} : Les tensions simples triphasées au rotor.
 i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} : Les courants rotoriques.
 $\Phi_{ra}, \Phi_{rb}, \Phi_{rc}$: Les flux propres au rotor.
 R_s : La résistance des enroulements statoriques.
 R_r : La résistance des enroulements rotoriques.
 L_s : L'inductance propre d'une phase statorique.
 M_s : L'inductance mutuelle entre deux phases statoriques.
 L_r : L'inductance propre d'une phase rotorique ;
 M_r : L'inductance mutuelle entre deux phases rotorique.
 M_{sr} : L'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.
 $P(\theta)$: La transformation de Park
 θ_s : L'angle de la transformation de Park des grandeurs statoriques.
 θ_r : L'angle de la transformation de Park des grandeurs rotoriques.
 $d; q$: Axes correspondant au référentiel lié au repère de Park (direct, quadrature).
 i_{dqo} : Courants dans le repère Park.
 V_{dqo} : Tensions dans le repère Park.
 Φ_{dqo} : Flux dans le repère Park.
 P_E : La puissance électrique instantanée.
 P_j : Puissance dissipée en pertes joule.
 P_{ech} : Puissance représentant les échanges d'énergie électromagnétiques avec les sources.
 $P_{méc}$: Puissance mécanique.
 C_r : Couple résistant.
 ω : Vitesse de rotation.
 P : Puissance active.
 Q : Puissance réactive.
 K_p : Gain proportionnel du régulateur PI (proportionnel - intégral).
 K_i : Gain intégral du régulateur PI (proportionnel - intégral).
 $\mu_A(x), \mu_B(x)$ et $\mu_C(x)$: Fonctions d'appartenance.
 p : Nombre de pair de pole.
 (V, U, T_v) : Variable linguistique.
 UD : Univers de discours.
 $R(t)$: est le signal de référence.
 $u(t)$: est le signal de commande.
 $y(t)$: est la sortie du système à commander.
 RLF : Régulateur par logique floue.
 m : Le nombre total des règles.
 $F_1^{(i)}, F_2^{(i)}, \dots, F_n^{(i)}$: Sont les ensembles flous des entrées (x_1, x_2, \dots, x_n) .
 $G_j^{(i)}$: L'ensemble flou correspondant à la sortie y_j .
 e : Erreur.
 Δe : La variation de l'erreur.

K_e , $K_{\Delta e}$ et $K_{\Delta u}$: Sont des facteurs d'échelle ou de normalisation.

NG : Négatif Grand.

NM : Négatif Moyen.

NP : Négatif Petit.

EZ : Environ Zéro.

PP : Positif Grand.

PM : Positif Moyen.

PG : Positif Grand.

NPC : Neutral Point Clamping.

C1, C2 : Capacités du filtre intermédiaire de l'onduleur à trois niveaux

E : . La tension totale du bus continu.

O : Origine des potentiels.

K : Nombre de bras.

V_K : Différence de potentiel entre le bras K et le point fictif O .

V_A , V_B , V_C : Les tensions alternatives simples à la sortie de l'onduleur.

i_1 , i_2 , i_3 : Les courants à la sortie de l'onduleur.

k : Indice d'un bras de l'onduleur.

T_{ks} : Interrupteur de transistor T_{ks} du bras k .

B_{ks} : Ordre de commande de base d'un interrupteur d'un bras k de l'onduleur.

F_{ks} : Fonction de connexion.

F_{km}^b : Fonction de connexion d'un demi-bras.

M : Point milieu fictif de l'onduleur.

V_{AM} , V_{BM} et V_{CM} : Tensions entre chaque bras de l'onduleur et le point milieu de l'alimentation continue de l'onduleur.

V_{NM} : Tension entre le point neutre de la charge et le point milieu de l'alimentation continue de l'onduleur.

U_{c1} , U_{c2} : Tensions d'entrée de l'onduleur.

i_{d1} , i_{d2} et i_{d0} : Courants d'entrée de l'onduleur à trois niveaux.

V_p : Tension de référence de la porteuse.

f_p : Fréquence de porteuse.

V_r : Tension sinusoïdale de référence.

f : Fréquence de référence.

m : Indice de modulation.

r : Taux de modulation ou coefficient de réglage de tension.

V_{refk} : Tensions de référence.

U_{p1} , U_{p2} : Tensions des deux porteuses.

i_{red1} , i_{red2} et i_{red0} : Courants de sortie du redresseur.

V_{Max} : Tension Maximale.

V_{resK} : Tension de la phase $i \in \{1, 2, 3\}$ du réseau triphasé.

i_{resK} : Courant de la phase $i \in \{1, 2, 3\}$ du réseau triphasé.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Salma El Aimani, "Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension". Thèse de doctorat, Soutenu le 06/12/2004. Ecole centrale de Lille « Université des Sciences et Technologie de Lille, France ».
- [2] Kezerli Rouchdi, "Alimentation et Commande d'une MADA connectée au réseau local, en utilisant les convertisseurs multi niveaux". Thèse de Magister, N°d'ordre : 23 /2009-M/EL. Université des sciences et de la technologie « Houari Boumediene » Faculté d'électronique et d'informatique. Algérie.
- [3] Rachid Azaizia, "Etude et commande d'une machine asynchrone à double alimentation alimentée par un convertisseur multi niveaux". Thèse de Magister, Soutenu en 2008. Université M'Hamed Bougara « Faculté des hydrocarbures et de la chimie de Boumerdes ». Algérie.
- [4] Vincent Courtecuisse, "Supervision d'une centrale multi sources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique". Thèse de doctorat, Soutenu le 20/11/2008. L'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Spécialité « Génie électrique » de Lille, France.
- [5] Adam Mirecki, "Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance". Thèse de doctorat, 05/04/2005. Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique Industrielle (L.E.E.I), Unité Mixte de Recherche n° 5828 d'Ecole Nationale Supérieure d'Electrotechnique, d'Informatique, d'Hydraulique et des Télécommunications (ENSEEIH) de l'Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT) et du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS). France.
- [6] Metatla Samir, "Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA". Thèse de Magister. Promotion 2009. École nationale supérieure polytechnique d'Alger « Département de Génie Électrique » Laboratoire de Recherche en Électrotechnique. Algérie.
- [7] Hamzaoui Ihssen, "Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur ". Thèse de Magister. Soutenu le 20/01/2008. École nationale supérieure polytechnique d'Alger « Département de Génie Électrique » Laboratoire de Recherche en Électrotechnique. Algérie.
- [8] Frédéric Poitiers, "Etude 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, Soutenu le 19/12/2003. Université de Nantes. Ecole doctorale. « Sciences et technologies de l'information et des matériaux ». France.
- [9] Khetache Laid, "Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique double alimentée". Thèse de Magister. Soutenu en 2007. Faculté des sciences de l'ingénieur « Université de Batna » Algérie.

- [10] Naouel Hamdi, "Modélisation et commande des génératrices éoliennes ". Thèse de Magister. Soutenu le 24/01/2008. Faculté des sciences de l'ingénieur « Université Mentouri de Constantine » Algérie.
- [11] Florin Iov, Anca Daniela Hansen, Poul Sørensen, Frede Blaabjerg, "Wind Turbine Blockset in Matlab/Simulink « General Overview and Description of the Models »". Aalborg University. March 2004.
- [12] Armand Boyette, "Contrôle-commande d'un générateur asynchrones à double alimentation avec système de stockage pour la production d'éolienne". Thèse de doctorat, Soutenu le 11/12/2006. Université d'Henri Poincaré, Nancy I. Ecole doctorale. « Faculté des sciences et technique». France.
- [13] Sejir Khojet EL Khil, "Commande Vectorielle d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA)". Thèse de doctorat, Soutenu le 04/12/2006. L'institut national polytechnique de Toulouse & de l'école nationale d'ingénieurs de Tunis. Tunis.
- [14] Ludovic Leclercq, "Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes". Thèse de doctorat, Soutenu le 14/12/2004. Laboratoire d'électrotechnique et d'électronique de puissance de Lille. France.
- [15] Hammoudi Mohamed El Amine, "Etude de l'influence de l'éolienne sur le réseau de distribution ". Thèse d'ingénieur, Promotion 2010. Université des Sciences et de la Technologie « Houari Boumedienne » Faculté d'Electronique et d'Informatique « Département d'Electrotechnique ».Algérie.
- [16] Ferrai Ahmed, "Dimensionnement des infrastructures utilisant diverses sources énergétiques renouvelables potentielles pour l'alimentation électrique d'un village ". Thèse de Magister. Année universitaire 2007/2008. École nationale supérieure polytechnique d'Alger « Département d'électronique ». Algérie.
- [17] Farid Merrahi, "Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne)". Thèse de Magister. Soutenu le 30/06/2007. École nationale supérieure polytechnique d'Alger « Département d'électronique » Laboratoire de commande des processus. Algérie.
- [18] Ling Peng, "Reconfiguration du dispositif de commande d'une éolienne en cas de creux de tension ". Thèse de doctorat, Soutenu le 17/06/2010. Ecole centrale de Lille. France.
- [19] Alexandre Teninge, "Participation aux services système de parcs éoliens mixtes : application en milieu insulaire ". Thèse de doctorat, Soutenu le 04/12/2009. Institut polytechnique de Grenoble. Laboratoire de Génie Électrique de Grenoble. France.

- [20] Haritza Camblong, "Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable". Thèse de doctorat, Soutenu le 18/12/2003. Ecole nationale supérieure d'arts et matière. Centre de Bordeaux. France.
- [21] Elbia Youcef, "Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté ". Thèse de Magister. Soutenu le 15 / 06 /2009. Université El Hadj Lakhdar Batna « Faculté des sciences de l'ingénieur ». Département d'électrotechnique. Algérie.
- [22] Arnaud Davigne, "Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie". Thèse de doctorat, Soutenu le 11/12/2007. Laboratoire d'électrotechnique et d'électronique de puissance de Lille. France.
- [23] Paul-EtienneVidal, "Commande non linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation". Thèse de doctorat, Soutenu le 14/12/2004. L'Institut national polytechnique de Toulouse « Laboratoire d'électrotechnique et d'électronique Industrielle de l'ENSEEIHHT ». France.
- [24] Rafika Drareni , Zahra Ouahrani, "Commande d'un aérogénérateur à base d'une machine asynchrone à cage connectée au réseau à travers un convertisseur AC-DC-AC ". Thèse d'ingénieur, Promotion juin 2009. École nationale supérieure polytechnique « Département du Génie Electrique ». Algérie.
- [25] Akel Fethi, "Etude et réalisation d'un émulateur de turbine éolienne". Thèse de Magister. Soutenu le 10 / 03 /2009. Ecole militaire polytechnique. Algérie.
- [26] Dendouga Abdelhahim, "Contrôle des puissances active et réactive de la machine à double alimentation (DFIM)". Thèse de doctorat, Soutenu le 10/02/2010. Laboratoire d'électrotechnique de Batna. Algérie.
- [27] Moussa Siddo Abdoulaziz, Soumana Nouhou Ibrahim, "Etude du générateur asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne". Thèse d'ingénieur, Promotion 2007. École nationale supérieure polytechnique « Département du Génie Electrique ». Spécialité Electrotechnique. Algérie.
- [28] Saci Taraft, Djamila Rékioua et Djamal Aouzellag, "Commande en mode glissant de la MADA dans une éolienne à vitesse variable connectée au réseau ". Revue des Energies Renouvelables SMEE'10 Bou Ismaïl Tipaza (2010) 337 – 346
- [29] Abbas Mourad, Mechentel Mohamed, "Modélisation et Commande d'une MADA alimentée par une Cascade à Trois Niveaux application à l'Energie Eolienne ". Thèse d'ingénieur, Promotion 2006. École nationale supérieure polytechnique « Département du Génie Electrique ». Algérie.
- [30] Yacine Abderrahmane Bencherif., "Modélisation et commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation pour la production de l'énergie éolienne ". Thèse d'ingénieur, Promotion juin 2008. École nationale supérieure polytechnique « Département du Génie Electrique ». Algérie.

- [31] Feyrouz Messai, "Contribution à l'Etude d'une Génératrice à Réductance Variable". Thèse de Magister. Soutenu en 2009. Université Mentouri de Constantine « Faculté des Sciences de l'Ingénieur » Département d'Electrotechnique. Algérie.
- [32] Hakim Denoun, "Contribution à l'étude des redresseurs à MLI à facteur de puissance unitaire. Application à la conduite de la machine asynchrone". Thèse de Magister. Soutenu le 18 / 02 /2001. Ecole militaire polytechnique. Algérie.
- [33] Noui Samir, "Etude et Réalisation d'un Redresseur à MLI Commandé par DSP. Application à l'alimentation d'un Onduleur Á Trois Niveaux ". Thèse de Magister. Soutenu le 15 / 12 /2004. Ecole militaire polytechnique. Algérie.
- [34] Toual Belkacem, "Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable". Thèse de Magister, Soutenu le 17/10/2010. Université de Batna. « Faculté des Sciences de l'Ingénieur ». Département d'Electrotechnique. Algérie.
- [35] Djebbar Mohamed Salah, "Etude comparative des redresseurs cascades et multi niveaux à commande MLI". Thèse de Magister. Soutenu en 2005. Université Mentouri de Constantine « Faculté des Sciences de l'Ingénieur » Département d'Electrotechnique. Algérie.
- [36] Hamza Alloui, Salim Bouallaya, "Etude et réalisation d'un convertisseur AC / DC à MLI vectorielle commandé par DSP". Thèse d'ingénieur, Promotion 2004. Ecole militaire polytechnique. Algérie.
- [37] Cherfia Naïm, "Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens ". Thèse de Magister. Soutenu le 07/06/2010. Université Mentouri de Constantine « Faculté des Sciences de l'Ingénieur » Département d'Electrotechnique. Algérie.
- [38] Boumaraf Farid, "Commande Intelligente D'une Association Convertisseur Statique Machine Asynchrone à Double Alimentation". Thèse de Magister, Soutenu le 29/01/2009. Université de Batna. « Faculté des Sciences de l'Ingénieur ». Département d'Electrotechnique. Algérie.
- [39] Ameziane Sadek, "Implantation expérimentale de l'MPPT pour un système de générationhybride solaire-éolien ". Thèse de Magister, Soutenu le 01/07/2009. Université de Batna. « Faculté des Sciences de l'Ingénieur ». Département d'Electrotechnique. Algérie.
- [40] Akkari Nadia, "Contribution à l'amélioration de la robustesse de la commande d'une machine asynchrone a double alimentation". Thèse de Doctorat, Soutenu le 02/06/2010. Université de Batna. « Laboratoire d'Electrotechnique ». Algérie.
- [41] Herinandianina Joëlla Marie Annick, "Alimentation en énergie électrique d'un village : Conception, calcul et réalisation d'un groupe d'alimentation par un système hybride éolien / diésel". Thèse

- d'ingénieur, Promotion 2006. École supérieure polytechnique « Département de génie électrique ». Génie mécanique productique. Filière génie industriel.
- [42] Miloud Rezkallah, "Amélioration de la qualité d'énergie fournie au réseau autonome hybride éolien / diesel ". Thèse à l'obtention de la maîtrise, Soutenu le 03/05/2010. École de technologie supérieure. « Université du Québec ».
- [43] Zarour Laid, "Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien hors réseau ". Thèse de Doctorat. Soutenu le 10/07/2010. Université Mentouri de Constantine « Faculté des Sciences de l'Ingénieur » Département d'Electrotechnique. Algérie.
- [44] Redjem Radia, "Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne ". Thèse de Magister. Soutenu le 04/07/2009. Université Mentouri de Constantine « Faculté des Sciences de l'Ingénieur » Département d'Electrotechnique. Algérie.
- [45] A. Meroufel, Y. Djeriri, A. Massoum et A. Hammoumi, "Commande vectorielle par les réseaux de neurones artificiels de l'énergie d'une MADA intégrée à un système éolien ". Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°4 (2010) 669 – 682.
- [46] F. Kendouli, K. Nabti, K. Labed et H. Benalla , "Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation ". Revue des Energies Renouvelables Vol. 14 N°1 (2011) 109 – 120.
- [47] Dr Nachida Kasbadji Merzouk « Directrice de Recherche ». Chef de Division Energie Eolienne, "Quel avenir pour l'Énergie Éolienne en Algérie ?". bulletin_014_04. N°14 Décembre 2008.
- [48] L. Hamane, "Les ressources éoliennes de l'Algérie". Bulletin des Energies Renouvelables - N°3 Juin 2003.
- [49] <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>"Site Internet".
- [50] Hamid Amina et Djelfaoui Hayet., "Etude et commande d'une machine asynchrone à double alimentation alimentée par une source hybride (éolien-photovoltaïque) ". Thèse d'ingénieur, Promotion 2009. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene. «Faculté d'Electronique et d'Informatique ». Département d'Electrotechnique. Algérie.
- [51] Douadi Tarek, "Etude et Commande d'un Système Eolien à Base d'une Génératrice Asynchrone ". Thèse de Magister. Université de Batna. « Laboratoire d'Electrotechnique ». Algérie.
- [52] AmarMaafa, "Etude d'un générateur éolien base sur la cascade de deux machines asynchrones pilote par un convertisseur de fréquence". Thèse de Magister. Soutenu le 19 / 06 / 2011Université de Batna. « Laboratoire d'Electrotechnique ». Algérie.

الهدف من هذه الأطروحة هو دراسة السلوك الديناميكي لتوربينات الرياح التي تستند على ماكينة لا تزامنية ثنائية التغذية متصلة بالشبكة، يرتبط الجزء الثابت من هذا الجهاز مباشرة على الشبكة، بينما الدوار يرتبط مع هذا الأخير عبر تتالي (المقوم، المرشح، العاكس)، حيث تم وضع نموذج لعمل العاكس ذو ثلاث مراحل في بنية المستويات الثلاثة (NPC). التحكم في القدرة الفعالة و غير الفعالة من توربينات الرياح يتحقق من خلال تعديل قيم آلة الدوار. في المرحلة الأولى، نقدم نماذج من أجزاء مختلفة من توربينات الرياح. يتم تطبيق تقنية (MPPT) لاستخراج الطاقة القصوى. وتطرقنا أيضا الى توفير مبدأ التحكم المستقل في الاستطاعات الكهربائية Q، P، بتطبيق التحكم التقليدي (PI) وبعده التحكم (PI) غامض. ان أداء ومثانة التحكم يتم تحليله ومقارنته بواسطة برنامج المحاكاة المستندة Matlab/Simulink.

الكلمات الرئيسية: طاقة الرياح، ماكينة لا تزامنية ثنائية التغذية، التحكم الشعاعي، PI غامض.

Résumé

L'objectif de cette mémoire est l'étude de comportement dynamique de l'aérogénérateur à base de la machine asynchrone double alimentation connectée au réseau. Le stator de la machine est directement relié au réseau, par contre son rotor est connecté à ce dernier via une cascade (Redresseur, Filtre, Onduleur), où on a établi un modèle de fonctionnement de l'onduleur triphasé à trois niveaux à structure (NPC). Le contrôle de puissances active et réactive de l'éolienne est réalisé par le réglage des grandeurs rotoriques de la MADA. Dans un premier lieu, la modélisation des différentes parties de l'aérogénérateur est présentée. Pour maximiser la puissance captée, la technique d'extraction du maximum de puissance (MPPT) est appliquée. Dans un second lieu, le principe de contrôle indépendant de la puissance active et réactive est assuré dans la première étape par des régulateurs classiques (PI) et dans la deuxième étape par des régulateurs (PI) flou. Les performances et la robustesse sont analysées et comparées par simulation à base du logiciel Matlab/Simulink.

Mots clés: Eolienne, machine Asynchrone à Double Alimentation, Commande vectorielle, PI flou.

Abstract:

The purpose of this memory is the study of dynamic behavior of the wind turbine, based on the doubly fed induction machine connected to the network. The stator of the machine is directly connected to the network, while the rotor is connected to it via a cascade (Rectifier, Filter, Inverter), where it has established a working model of the three-phase inverter at three levels structure (NPC). Control of active and reactive power of the wind turbine is achieved by adjusting the rotor sizes of DFIG. In a First, the modeling of different parts of the wind turbine is presented. To maximize the power captured, the technique of extracting the maximum power point tracking (MPPT) is used. Secondly, the principle of independent control of active and reactive power is provided in the first stage by conventional controllers (PI) and the second step by regulators fuzzy PI. The performance and robustness are analyzed and compared by simulation-based software Matlab / Simulink.

Keywords: Wind, double-fed induction machine, vector control, fuzzy PI.