

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GENIE  
ELECTRIQUE

N° :249



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

FILIERE : GENIE ELECTRIQUE

OPTION : AUTOMATIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique

Par : DEHIRI redha

AICHAOUI Farouq

Intitulé

**Commande par mode glissant et flou d'une  
génératrice asynchrone à double alimentation  
(GADA) « Application à l'énergie éolienne »**

Soutenu devant le jury composé de:

Mr. KHATAB Khouthir

Université M'SILA

Président

M<sup>me</sup>. BELOUNIS Ouassila

Université M'SILA

Rapporteur

Mr. BOUKAHLAFA Abdelwahab

Université M'SILA

Examineur

Année universitaire : 2016 /2017

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



## **Dédicace**

**nos très chers parents...**

**tous les mots du monde**

**ne sauraient exprimer**

**l'immense amour que nous vous portons,**

**ni la profonde gratitude que nous vous témoignons**

**pour tous les efforts et les sacrifices que vous n'avez**

**jamais cessé de consentir pour notre instruction et notre**

**bien-être. En témoignage de notre respect et notre gratitude**

**Que Dieu tout puissant vous garde et vous procure santé,**

**bonheur et longue vie pour que vous demeuriez le flambeau**

**illuminant le chemin de la famille, À nos chers frères et sœurs.**

**À nos grandes familles... À tous ceux qui nous sont chers...**

**À tous ceux qui ont participé de près**

**ou de loin à la réalisation de ce thème**

**nous dédions ce modeste travail**

**Dehri Redha et Aichaoui Farouq**





## REMERCIEMENTS


Ce travail a été effectué au sein du  
Faculté de technologie, à l'université Mohamed Boudiaf

MS/LA

Après la louange d'Allah tout Omniscient, nos sincères  
Remerciements et nos meilleurs sentiments de gratitude vont à  
Madame Belounis Ouassila pour avoir accepté de diriger ce  
Thème, et pour ses contributions et son aide si précieuses quant  
à l'élaboration de ce travail.

Nous tenons à remercier et à exprimer nos reconnaissances et nos  
Gratitudes envers Monsieur Riyadh Rouabhi pour son énorme aide réalisant ce  
thème, aussi envers Monsieur le président et Messieurs les  
Membres du jury, pour l'honneur qu'ils nous ont fait en prenant  
part à ce jury et en nous permettant de soutenir ce thème.

Que tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à  
L'élaboration de ce travail, trouvent ici notre reconnaissance et  
Notre gratitude.



SOMMAIRE : .....	I
LISTE DES FIGURES: .....	V
LISTE DES TABLEAUX : .....	VII
LISTE DES SYMBOLES : .....	VIII
INTRODUCTION GENERALE : .....	1

**CHAPITRE I**  
**BASES DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE**

I.1 INTRODUCTION : .....	3
I.2 L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE ÉOLIENNE: .....	3
I.2.1 IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT : .....	3
I.2.2 CROISSANCE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE ÉOLIENNE : .....	5
I.2.3 VARIATIONS SAISONNIÈRES DE LA PRODUCTIVITÉ DES ÉOLIENNES : .....	5
I.2.4 LA RENTABILITÉ D'UNE ÉOLIENNE: .....	6
I.3 GÉNÉRALITÉS SUR L'ÉOLIENNE : .....	6
I.3.1 CAPTEURS À AXE VERTICAL : .....	6
I.3.2 CAPTEURS À AXE HORIZONTAL: .....	8
I.4 CARACTÉRISTIQUES TECHNOLOGIQUES DES ÉOLIENNES À AXE HORIZONTAL : .....	9
I.4.1 LA TOUR : .....	10
I.4.2 LE ROTOR : .....	11
I.4.3 LA NACELLE: .....	12
I.5 ÉTAT DE L'ART SUR LES GÉNÉRATRICES D'ÉOLIENNES À VITESSE VARIABLE : .....	12
I.5.1 SYSTÈME UTILISANT UNE GÉNÉRATRICE SYNCHRONE : .....	13
I.5.2 SYSTÈME UTILISANT UNE GÉNÉRATRICE ASYNCHRONE : .....	14
I.5.3 SYSTÈME UTILISANT LA GÉNÉRATRICE ASYNCHRONE À DOUBLE ALIMENTATION: .....	14
I-6 CONCLUSION: .....	16

**CHAPITRE II**  
**MODELISATION DE LA CHAÎNE ÉOLIENNE**

II.1 INTRODUCTION: .....	17
II.2 MODELISATION DE LA TURBINE ET DE SA COMMANDE: .....	18
II.2.1 MODELISATION DE LA TURBINE ÉOLIENNE: .....	18

II.2.1.1 SOURCE PRIMAIRE : LE VENT .....	18
II.2.1.2 CONVERSION AERODYNAMIQUE:.....	19
II.2.1.3 EQUATION DYNAMIQUE DE LA TURBINE:.....	21
II.2.2 TECHNIQUES DE COMMANDES DE LA TURBINE EOLIENNE: .....	23
II.2.2.1 CARACTERISTIQUE DE PUISSANCE : .....	23
II.2.2.2 COMMANDE POUR L'OPTIMISATION DE LA PUISSANCE: .....	24
II.2.2.2.1 TECHNIQUES D'EXTRACTION DU MAXIMUM DE LA PUISSANCE (MPPT):.....	24
II.2.2.2.2 COMMANDE INDIRECTE DE LA VITESSE: .....	24
II.2.2.3 COMMANDE POUR LA LIMITATION DE LA PUISSANCE: .....	26
I.2.3 RESULTATS DE SIMULATION : .....	26
II.3 MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTATION:.....	27
II.3.1 HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES: .....	27
II.3.2 EQUATIONS MATHEMATiques DE LA MADA DANS LE REPERE( <b>a, b, c</b> ):.....	28
II.3.2.1 EQUATIONS ELECTRIQUES : .....	28
II.3.2.2 EQUATIONS MAGNETIQUES:.....	29
II.3.2.3 EQUATION MECANIQUE :.....	29
II.3.3 TRANSFORMATION DE PARK : .....	30
II.3.4 EQUATIONS MATHEMATiques DE LA MADA DANS LE REPERE ( <b>d, q</b> ):.....	30
II.3.4.1 EQUATIONS ELECTRIQUES:.....	31
II.3.4.2 EQUATIONS MAGNETIQUES:.....	32
II.3.4.3 EQUATION DU COUPLE ELECTROMAGNETIQUE: .....	33
II.3.5 CHOIX DE REPERE DE REFERENCE DE PARK:.....	33
II.3.6 MODELE D'ETAT DE LA MADA:.....	34
II.3.7 RESULTATS DE SIMULATION NUMERIQUE DU SYSTEME: .....	34
II.3.7.1 FONCTIONNEMENT MOTEUR : .....	34
II.3.7.2 INTERPRETATION DES RESULTATS:.....	37
II.3.7.2.1 FONCTIONNEMENT GENERATEUR: .....	37
II.3.7.4 INTERPRETATION DES RESULTATS:.....	38
II.4 L'ONDULEUR A DEUX NIVEAUX:.....	38
II.4.1 MODELISATION DE L'ONDULEUR A MLI: .....	39
II.4.2 COMMANDE PAR MODULATION DE LARGEUR D'IMPULSION MLI: .....	41

II.4.3 RESULTATS DE SIMULATION :	42
II.4.4 INTERPRETATION DES RESULTATS :	43
II.5 CONCLUSION:	43

**CHAPITRE III COMMANDE VECTORIELLE, MODE GLISSANT  
ET LOGIQUE FLOU D'UN GADA**

III.1 INTRODUCTION .....	47
III.2 COMMANDE VECTORIELLE DES PUISSANCES ACTIVE ET REACTIVE .....	48
III.3 MODELE DE LA MADA A FLUX STATORIQUE ORIENTE.....	48
III.3.1 RELATIONS ENTRE LES COURANTS STATORIQUES ET ROTORIQUES.....	50
III.3.2 RELATIONS ENTRE LES PUISSANCES STATORIQUES ET COURANTS ROTORIQUES .....	50
III.3.3 RELATIONS ENTRE LES TENSIONS ET COURANTS ROTORIQUES.....	51
III.3.4 ETABLISSEMENT DES ANGLES NECESSAIRES AUX TRANSFORMATIONS .....	52
III.3.5 LES DIFFERENTES TECHNIQUES DE LA COMMANDE VECTORIELLE .....	52
III.4 GENERALITES SUR LA THEORIE DU CONTROLE PAR MODE DE GLISSEMENT .....	53
III.4.1 STRUCTURE PAR COMMUTATION AU NIVEAU DE L'ORGANE DE COMMANDE.....	54
III.4.2 STRUCTURE PAR COMMUTATION AU NIVEAU D'UNE CONTRE REACTION D'ETAT .....	54
III.4.3 STRUCTURE PAR COMMUTATION AU NIVEAU DE L'ORGANE DE COMMANDE AVEC AJOUT DE LA COMMANDE EQUIVALENTE .....	55
III.5 PRINCIPE DU CONTROLEUR A MODE GLISSANT .....	56
III.6 APPLICATIONS DE LA COMMANDE MODE GLISSANT A LA MADA.....	56
III.6.1 MODELE DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTATION GADA.....	56
III.6.2 CHOIX DES SURFACES DE GLISSEMENTS.....	57
III.6.3 CONDITIONS DE CONVERGENCES .....	57
III.6.4 LOI DE COMMANDE PAR MODE GLISSANT .....	58
III.7 COMMANDE PAR LA LOGIQUE FLOUE DES PUISSANCES ACTIVE ET REACTIVE.....	61
III.7.1 LA LOGIQUE FLOU .....	61
III.7.2 PRINCIPE DE LA LOGIQUE FLOUE.....	61
III.7.3 ELEMENT DE BASE DE LA LOGIQUE FLOUE .....	61
III.7.3.1 ENSEMBLE FLOUE .....	62
III.7.3.2 VARIABLES LINGUISTIQUES.....	62

III.7.3.3 FONCTIONS D'APPARTENANCE .....	63
III.7.3.4 UNIVERS DU DISCOURS.....	63
III.7.3.5 PROPRIETES DES ENSEMBLES FLOUS.....	63
III.7.3.6 OPERATEURS LOGIQUES FLOUS .....	64
III.7.4 STRUCTURE D'UNE COMMANDE A LOGIQUE FLOUE.....	65
III.7.4.1 PRINCIPE D'UN CONTROLEUR FLOU.....	66
III.7.5 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA COMMANDE FLOUE .....	68
III.7.6 APPLICATION DE LA LOGIQUE FLOU D'UN GADA .....	68
III.7.6.1 LES ETAPES DE CONCEPTION D'UN SYSTEME FLOU.....	69
III.7.6.2 STRUCTURE DE BASE D'UN CONTROLEUR FLOU DE COURANT.....	70
III.8 RESULTATS DE SIMULATION POUR LES TROIS COMMANDES VECTORIELLE ET MODE GLISSANT ET FLOU.....	72
III.8.1 RESULTATS DE SIMULATION NUMERIQUE DU SYSTEME POUR UNE VITESSE FIXE.....	72
III.8.2 INTERPRETATION DES RESULTATS .....	75
III.8.3 RESULTATS DE SIMULATION NUMERIQUE DU SYSTEME GLOBALE.....	75
III.8.4 INTERPRETATION DES RESULTATS .....	80
III.9 CONCLUSION: .....	81

**CHAPITRE IV**  
**ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES TECHNIQUES DE COMMANDE**

IV.1 INTRODUCTION.....	85
IV.2 COMPARAISON QUALITATIVE .....	85
IV.2.1 POUR UNE VITESSE FIXE .....	85
IV.2.2 POUR UNE VITESSE VARIABLE .....	88
IV.3 CONCLUSION: .....	92
CONCLUSION GENERALE : .....	93

BIBLIOGRAPHIE

ANNEX

## **LISTE DES FIGURES**

### **CHAPITRE I BASES DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE**

Figure. I.1. Effet des vents sur un corps creux.....	7
Figure. I.2. Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes [I.1]. .....	8
Figure. I.3. Composants d'une éolienne. ....	9
Figure. I.4. Pylône en treillis.....	10
Figure. I.5. Mât haubané.....	10
Figure. I.6. Eoliennes aval et amont. ....	12
Figure. I.7. Eolienne utilisant la gada. ....	15

### **CHAPITRE II MODELISATION DE LA CHAÎNE ÉOLIENNE**

Figure II-1 : Schéma synoptique du système de conversion d'énergie éolienne et sa commande.....	17
Figure II-2 : Schéma de la turbine éolienne.....	18
Figure II-3 : Profil du vent appliqué à la turbine. ....	19
Figure II-4 : Evolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse relative de la turbine et de l'angle d'orientation des pales .....	20
Figure II-5 : Modèle de la turbine.....	21
Figure II-6 : Modèle simplifié de la turbine.....	22
Figure II-7 : Schéma bloc du modèle de la turbine .....	23
Figure II-8 : caractéristique idéale d'une éolienne à vitesse variable.....	23
Figure II-9 : Commande indirecte de vitesse (Zone I).....	26
Figure II-10 : la puissance mécanique produite et la Vitesse mécanique .....	26
Figure II-11 : la vitesse spécifique et le Coefficient de puissance et ses zooms.....	27
Figure II-12 : Représentation de la Machine asynchrone à double alimentation. ....	28
Figure II-13 : Transformation des variables statoriques et rotoriques. ....	31
Figure II-14 : Vitesse et le couple électromagnétique .....	35
Figure II-15 : Composantes du flux statorique et leur résultante.....	35
Figure II-16 : Composantes du courant statorique.....	36

Figure II-17 : Composantes du courant rotorique .....	36
Figure II-18 : Les tensions d'alimentations au stator et au rotor. ....	37
Figure II-19 : Le couple électromagnétique et le flux.....	38
Figure II-20 : La puissance active et réactive statoriques. ....	38
Figure II-21 : Représentation d'un onduleur à deux niveaux. ....	39
Figure II-22 : Schéma d'un onduleur de tension triphasé. ....	40
Figure II-23 : Principe de fonctionnement de la technique MLI triangulosinusoidale à une porteuse. ....	41
Figure II-24 : tension continue.....	42
Figure II-25 : tension de bus continue. ....	42

### **CHAPITRE III**

#### **COMMANDE VECTORIELLE, MODE GLISSANT ET LOGIQUE FLOU D'UN GADA**

Figure III-1 : Principe de la commande vectorielle. ....	48
Figure III-2 : Calcul des angles de transformations. ....	52
Figure III-3 : Schéma bloc de la structure de commande directe par orientation du flux statorique. ....	53
Figure III-4 : Structure de régulation par commutation au niveau de l'organe de commande.....	54
Figure. III-5 : Structure de régulation par commutation au niveau d'une contre réaction d'état. ....	55
Figure III-6 : Structure de régulation par commutation au niveau de l'organe de commande avec ajout de la commande équivalente.....	55
Figure III-7 : Schéma bloc de la structure de commande par mode glissant. ....	60
Figure III-8 :Représentation floue de la variable Vitesse .....	62
Figure III-9 :Exemples de fonctions d'appartenance.....	63
Figure III-10: Support, hauteur et noyau d'un ensemble flou. ....	64
Figure III-11 : Schéma général d'un contrôleur flou. ....	66
Figure III-12 : Schéma bloc de la structure de commande flou. ....	69
Figure III-13 : Structure interne d'un régulateur flou. ....	70
Figure III-14: Les fonctions d'appartenances utilisées par le contrôle. ....	71
Figure III-15 : Puissance active statorique pour les trois commandes avec un zoom (A) Contrôle vectoriel, (B) Contrôle par mode glissant,(C) Contrôle par logique flou.....	73
Figure III-16 : Puissance réactive statorique pour les trois commandes avec un zoom.....	74
Figure III-17 : Schéma synoptique du système (convertisseur, GADA et turbine). ....	75

Figure III-18 : (A) - Profil du vent appliqué ; (B) - Vitesse mécanique ;(C)-Coefficient de puissance ; (D) - Vitesse spécifique ; (E)-Coefficient de puissance avec zoom ; (F)- Vitesse spécifique avec zoom.....	76
Figure III-19 : Puissances active et réactives statoriques pour les trois commandes avec un zoom. ....	77
Figure III-20 : Composantes du courant statoriques pour les trois commandes avec un zoom; (A)Contrôle vectoriel, (B) Contrôle par mode glissant,(C)-contrôle par logique flou .....	78
Figure III-21 : Composantes du courant rotoriques pour les trois commandes avec un zoom (A) Contrôle vectoriel, (B) Contrôle par mode glissant,(C)-contrôle par logique flou .....	79
Figure III-22 : Tension du bus continu .....	80

## **CHAPITRE IV**

### **ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES TECHNIQUES DE COMMANDE**

Figure IV-1 : Puissance active statorique pour les trois commandes ; (A) Contrôle vectoriel, (B) Contrôle par mode glissant, (C) contrôle par logique flou .....	86
Figure IV-2 : Puissance réactive statorique pour les trois commandes ;(A) Contrôle vectoriel, (B) Contrôle par mode glissant, (C) contrôle par logique flou .....	87
Figure IV-3 : Puissances active et réactive statoriques pour les trois commandes avec un zoom, (A) Contrôle vectoriel, (B) Contrôle par mode glissant. (C)-contrôle par logique flou .....	89
Figure IV-4 : Composantes du courant statorique pour les trois commandes avec un zoom.(A) Contrôle vectoriel, (B) Contrôle par mode glissant. (C)-contrôle par logique flou .....	90
Figure IV-5 : Composantes du courant rotorique pour les trois commandes avec un zoom ; (A) Contrôle vectoriel, (B) Contrôle par mode glissant. (C)-contrôle par logique flou .....	91

## **Liste des tableaux**

### **CHAPITRE I**

#### **BASES DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE**

Tableau I-1 : Avantages Et Inconvénients Des Generatrices Synchrones .....	14
Tableau I-2 : Avantages Et Inconvénients Des Generatrices Asynchrones .....	14
Tableau I-3 : Avantages Et Inconvénients Des Generatrices Asynchrones A Doublealimentation.....	15

### **CHAPITRE III COMMANDE VECTORIELLE, MODE GLISSANT**

#### **ET LOGIQUE FLOU D'UN GADA**

Tableau.III-1 : Méthode usuelles de l'inférence floue .....	68
Tableau. III-2 : Table des règles de décision pour le contrôleur des puissances.....	72

## Nomenclature

<i>MADA</i>	: Machine Asynchrone à Double Alimentation
<i>GADA</i>	: Générateur Asynchrone à Double Alimentation
<i>MAS</i>	: Machine Asynchrone
<i>MLI</i>	: modulation de largeur d'impulsion
<i>PWM</i>	: Pulse-width modulation
<i>f<sub>r</sub></i>	: Fréquence des grandeurs rotoriques
<i>f<sub>s</sub></i>	: Fréquence des grandeurs statoriques
<i>f<sub>e</sub></i>	: Fréquence de la porteuse
<i>a, b, c</i>	: Indices correspondants aux trois phases a, b, c
<i>max, min</i>	: Valeur maximale (minimale)
<i>SCSV</i>	: Système de commande à structure variable
<i>s, r</i>	: Indices du stator, du rotor
<i>d, q</i>	: Indices des composantes orthogonales directs et en quadrature
<i>R<sub>s</sub>, R<sub>r</sub></i>	: Résistances statorique et rotorique
<i>L<sub>s</sub>, L<sub>r</sub></i>	: Inductances propre statorique et rotorique
<i>σ</i>	: Coefficient de dispersion
<i>T<sub>r</sub>, T<sub>s</sub></i>	: Constantes de temps rotorique et statorique
<i>M<sub>sr</sub></i>	: Inductance mutuelle stator- rotor
<i>M<sub>rs</sub></i>	: Inductance mutuelle rotor - stator
<i>M<sub>s</sub></i>	: Inductance mutuelle entre les enroulements du stator
<i>M<sub>r</sub></i>	: Inductance mutuelle entre les enroulements du rotor
<i>φ<sub>s</sub>, φ<sub>r</sub></i>	: Respectivement flux statorique et rotorique
<i>φ<sub>sd</sub>, φ<sub>sq</sub></i>	: Les flux statoriques direct et en quadrature
<i>φ<sub>rd</sub>, φ<sub>rq</sub></i>	: Les flux rotoriques direct et en quadrature
<i>I<sub>s</sub>, I<sub>r</sub></i>	: Les courants de phase statorique et rotorique
<i>I<sub>sd</sub>, I<sub>sq</sub></i>	: Les courants statoriques directe et en quadrature dans le repère de PARK
<i>I<sub>rd</sub>, I<sub>rq</sub></i>	: Les courants rotoriques directe et en quadrature dans le repère de PARK
<i>V<sub>s</sub>, V<sub>r</sub></i>	: Tensions simples respectivement statorique et rotorique
<i>V<sub>sd</sub>, V<sub>sq</sub></i>	: Les tensions statoriques directe et en quadrature
<i>V<sub>rd</sub>, V<sub>rq</sub></i>	: Les tensions rotoriques directe et en quadrature
<i>θ<sub>s</sub>, θ<sub>r</sub></i>	: Angles électriques statorique et rotorique
<i>W<sub>s</sub>, W<sub>r</sub></i>	: Pulsations statorique et rotorique
<i>W<sub>m</sub></i>	: Pulsation mécanique
<i>P</i>	: Nombre de paires de poles
<i>g</i>	: Glissement
<i>P<sub>e</sub></i>	: Puissance d'entrée
<i>P<sub>Mec</sub></i>	: Puissance mécanique
<i>P<sub>s</sub></i>	: Puissance active statorique
<i>P<sub>r</sub></i>	: Puissance active rotorique
<i>Q<sub>s</sub></i>	: Puissance réactive statorique

$Q_r$	: Puissance réactive rotorique
$p$	: Operateur de LAPLACE
$c_{em}$	: Couple électromagnétique
$C_r$	: Couple résistant
$f_m$	: Coefficient de frottement visqueux
$J_m$	: Inertie de la machine
$P_s, Q_s$	: Puissances active et réactive statorique
$P_r, Q_r$	: Puissances active et réactive rotorique
$\rho$	: Masse volumique du vent
$f$	: Le coefficient des frottements visqueux totaux de l'éolienne
$V$	: La vitesse moyenne du vent
$J$	: L'inertie totale de l'éolienne
$G$	: Le rapport du multiplicateur de vitesse
$\lambda$	: La vitesse spécifique de la turbine
$\beta$	: L'angle de calage des pales
$\lambda_{opt}$	: La vitesse spécifique optimale de la turbine
$\Omega_T, \Omega_g$	: La vitesse de la turbine et la vitesse du générateur
$C_T, C_g$	: Le couple de la turbine et le couple électromagnétique
$C_{T_{opt}}$	: Le couple optimal de la turbine
$C_{g_{opt}}$	: Le couple optimal du générateur
$f_T, f_g$	: Les coefficients des frottements visqueux de la turbine et celui du générateur
$J_T, J_g$	: L'inertie de la turbine et celle du générateur
$P_T$	: La puissance convertie par la turbine
$R_T$	: Le rayon des pales de la turbine
$C_p(\lambda, \beta)$	: Le coefficient de puissance
$U_c$	: La tension du bus continu
$I_c$	: Le courant dans le condensateur du bus continu
$c$	: Le condensateur du bus continu
$PI$	: Proportionnel – Intégrale.
$k_p$	: Gain de l'action proportionnel du régulateur PI
$k_i$	: Gain de l'action intégrale du régulateur PI
$s$	: Surface de glissement
$v_1$	: Gain La surface de glissement de puissance active
$v_2$	: Gain La surface de glissement de puissance réactive
$y$	: Variable de sortie
$y_r$	: Trajectoire désirée
$t$	: Variable de temps
$e$	: Erreur de poursuite
$\dot{x}$	: La dérivée de la variable $x$ par rapport au temps
$x^{ref}$ ou $x_{ref}$	: La référence de la variable $x$
$\  \cdot \ $	: Une norme sur $\mathbf{R}^n$
$\mathbf{R}^n$	: Espace vectoriel de dimension n construit sur le corps des réels
$\mathbf{R}$	: Ensemble des nombres réels
$MPPT$	: Maximum Power Point Tracking



# ***INTRODUCTION GENERALE***



# INTRODUCTION GENERALE

---

**L**e vent sur terre, en mer et dans les airs ; la possibilité de le maîtriser et d'utiliser sa puissance à des fins de production fascine les hommes depuis des milliers d'années. L'homme apprend à maîtriser le vent dès 4000 avant J.-C. Les Chinois sont, à cette époque, les premiers à prendre la mer sur des radeaux de fortune.

L'histoire de personnes cherchant à voler comme les oiseaux et, au XV<sup>e</sup> Siècle, Léonard de Vinci tente la même expérience. C'est ensuite une montgolfière qui, la première, en 1783, Transporte l'homme dans les airs, tandis qu'en 1852 Henri Giffard conçoit le premier Dirigeable au monde. Le premier vol mondial à bord d'un avion à moteur se déroule aux États-Unis, en 1903. Deux frères, Orville et Wilbur Wright, réussissent à voler pendant 40 mètres avant d'atterrir en toute sécurité.

Les hommes utilisent donc depuis de nombreux siècles l'énergie éolienne, notamment pour faire avancer les bateaux, moulin le grain,... mais son utilisation pour produire de l'électricité est récente. En Europe, les premières éoliennes sont construites vers 1100 et utilisées pour pomper l'eau et moulin le blé. Plus tard, dans les années 1887-1888, l'américain Charles F. Brush construit la première éolienne, qui produit du courant pour 12 batteries, 350 lampes à filament, 2 lampes à arc à charbon et 3 moteurs. A la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, Poul la Cour conçoit plusieurs éoliennes expérimentales et mène des recherches en soufflerie. L'éolienne expérimentale de Poul la Cour existe toujours à Askov (Danemark). Puis, pendant la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle, les éoliennes sont progressivement confrontées à la concurrence croissante des centrales au charbon et du réseau électrique au niveau national. Cependant, en raison des pénuries de charbon et de pétrole pendant les deux guerres mondiales, la demande en énergie éolienne se maintient. C'est en 1957, que Johannes Juul crée la turbine Gedser, qui sert de modèle aux éoliennes modernes. L'éolienne Gedser se compose d'un générateur et de trois pales à pivot. En 1980, l'état de Californie décide que d'ici l'an 2000, 10% de son alimentation énergétique proviendra de l'énergie éolienne. Les problèmes environnementaux posés par les sources d'énergie traditionnelles ont provoqué l'accélération du développement de cette industrie éolienne.

L'énergie éolienne est l'énergie du vent et plus spécifiquement, l'énergie directement tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur ad hoc comme une éolienne ou un moulin à vent.

L'énergie éolienne peut être utilisée de plusieurs manières soit par la conservation de l'énergie mécanique le vent est alors utilisé pour faire avancer un véhicule (Navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou

## INTRODUCTION GENERALE

---

pour faire tourner la meule d'un moulin. Soit par la transformation en force motrice (pompage de liquides, compression de fluides, etc.). Ou encore par la production d'énergie électrique ; l'éolienne est alors couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.

L'énergie éolienne présente de nombreux avantages. En effet, C'est une énergie Complètement propre, elle n'émet ni déchet ni gaz à effet de serre. Son fonctionnement ne pollue ni l'atmosphère ni le sol ni l'eau et, convertit en électricité une ressource abondante, gratuite et illimitée à l'échelle humaine.

Dans le présent travail nous voulons appliquer des commandes sur un système de production d'énergie éolienne, L'objectif est de faire une modélisation des différents composants du système éolien pour ensuite utiliser ces modèles pour élaborer un système de commande qui devait atteindre les objectifs suivants :

- Assurer un fonctionnement optimal de la chaîne éolienne.
- Assurer la protection des différents composants du système éolien face aux éventuelles surcharges.
- Améliorer les performances du système éolien pour faciliter son intégration dans les réseaux électriques.

## BIBLIOGRAPHIE

[1] M.E.H.Benbouzid et al., "The state of the art of generators for wind energy conversion systems," *Electromotion*, vol.14,n°4,pp.163-172,October-December2007.



## *CHAPITRE I*

# *BASES DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE*



## **I.1 INTRODUCTION :**

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique du vent, elle est en partie résultante de l'énergie solaire. En effet, les grands flux de circulation atmosphérique sont en grande partie provoqués par la différence de température entre l'équateur et les pôles. Du fait de cette différence de pression, un flot d'air s'établit entre ces régions. La rotation de la terre provoque également des circulations d'air. Des différences locales de pression et de températures vont quant à elle donner des circulations particulières comme les brises de mer, les tornades.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier des techniques de commande, de la génératrice, susceptibles d'optimiser la production d'une éolienne. Par optimisation, nous entendons à améliorer la qualité de l'énergie produite et le rendement énergétique ce qui aurait pour conséquence de rendre possible la fabrication d'aéroturbines plus légères améliorant de ce fait la productivité.

La ou les techniques de commande doivent donc tenir compte du comportement de l'éolienne dans son ensemble. Il est bien évident que les perturbations provenant du vent doivent également être considérées. Nous allons donc, dans ce premier chapitre, préciser le choix du type d'éolienne ce qui nous permettra de définir le cadre de ce travail; c'est-à-dire l'élaboration de commandes pour la turbine et pour la génératrice de l'éolienne.

Nous fixerons ensuite les objectifs de ces commandes et les différentes bases théoriques utilisées.

## **I.2 L'énergie électrique éolienne:**

L'intérêt actuel pour l'énergie éolienne provient du besoin d'élaborer des systèmes d'énergie propre durables auxquels on peut se fier à long terme. L'aérodynamique et l'ingénierie moderne ont permis d'améliorer les éoliennes. Maintenant, elles offrent une énergie fiable, rentable, non polluante pour les applications des particuliers, des communautés et pour les applications nationales.

### **I.2.1 Impact sur l'environnement :**

L'énergie éolienne est une énergie propre et renouvelable qui ne produit pas, de déchet. De plus, elle rembourse sa dette énergétique, c'est-à-dire l'énergie nécessaire à sa fabrication. Par contre, elle a un impact sur l'avifaune, le bruit et le paysage. L'éolien a quelques inconvénients

- L'impact visuel qui reste un thème subjectif. Selon les enquêtes réalisées en Europe, la perception d'une éolienne n'est pas négative et varie selon le type de paysage initial, de la disposition (la disposition en ligne est préférable), de la quantité, de la taille des machines, du

nombre de pales. Dans tous les cas une étude paysagère est indispensable lors du montage du projet.

- Le bruit d'une éolienne a une double source : la première, d'origine mécanique liée aux machines tournantes dans la nacelle (génératrice, etc.) et la seconde, d'origine aérodynamique, liée à la rotation des pales. Le bruit mécanique a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée. Les mesures montrent que le bruit d'une éolienne est très limité, Dans la plupart des cas, le bruit du vent couvre celui des éoliennes.
- L'impact sur les oiseaux. Les éoliennes peuvent avoir un effet négatif de deux façons :
  - ✓ Des collisions au niveau du mât, des pales, des câbles électriques,
  - ✓ Des perturbations des territoires de nidification et de séjour des oiseaux.

Il faut cependant noter que les dégâts provoqués par les éoliennes sont insignifiants comparés aux routes ou aux lignes à haute tension.

- **Avantages de l'éolien :**

- Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2% du sol est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et autres utilisations.
- Une énergie renouvelable: Contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- Une énergie sans risque: Contrairement à l'énergie nucléaire, elle ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée dévie.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.

C'est l'énergie la moins chère parmi toutes les autres énergies renouvelables

**I.2.2 Croissance de l'énergie électrique éolienne :**

L'exploitation de l'énergie éolienne pour produire de l'électricité a eu des hauts et des bas. Les causes de ces fluctuations sont diverses : guerres, crises d'autres types d'énergie, volonté de préserver l'environnement, évolution de la technologie, changement de politique énergétique etc. A la suite de la fabrication du premier aérogénérateur, les ingénieurs danois améliorèrent cette technologie pour faire face à la pénurie d'énergie électrique. Malgré certains succès technologiques obtenus à cette époque, l'intérêt pour l'exploitation de l'énergie éolienne à grande échelle déclina à la fin de la 2<sup>ème</sup> guerre mondiale.

C'est avec la crise pétrolière des années 70 que cet intérêt ressurgit. Les gouvernements occidentaux commencèrent à investir de l'argent pour notamment améliorer la technologie des aérogénérateurs, ce qui donna naissance aux aérogénérateurs modernes. Le premier marché véritablement significatif fut celui de la Californie, entre 1980 et 1986, où l'industrie de l'énergie éolienne put se développer. Ensuite les aides financières diminuèrent aux USA mais augmentèrent en Europe, ce qui permit un développement important de cette industrie dans des pays tels que l'Allemagne et le Danemark. Le marché mondial passa de 200 MW/an en 1990 à 5500 MW/an en 2001. Nous avons ainsi pu observer une évolution significative de la production électrique d'origine éolienne entre 1999 et 2003. Au cours de cette période, la production a doublé s'élevant à 40000 MW. Il est espéré qu'en 2020 la production électrique provenant de l'éolien atteigne 12% de la production mondiale d'électricité.

**I.2.3 Variations saisonnières de la productivité des éoliennes :**

Les vents d'hivers sont en général plus forts que ceux d'été. Contrairement au cycle de production de l'énergie solaire, le cycle de production d'énergie du vent correspond à la consommation électrique.

En effet, la consommation électrique est plus élevée l'hiver que l'été à cause du chauffage. Ainsi la combinaison du chauffage électrique avec l'énergie éolienne est d'autant plus efficace car le refroidissement d'une maison augmente avec le vent. Les installations éoliennes sur un vaste territoire sont favorables à une corrélation entre la consommation et la production éolienne comme le montrent des études sur le foisonnement éolien.

Cependant le chauffage par électricité n'est pas forcément à préconiser car une centrale électrique (au combustible) perd en moyenne 1.5 unités de chaleur pour chaque unité de chaleur utilisable par les clients.

### I.2.4 La rentabilité d'une éolienne:

Les facteurs suivants déterminent le coût de l'énergie éolienne :

- Le coût initial de l'éolienne et de son installation;
- Le taux d'intérêt à payer sur l'investissement;
- La quantité d'énergie produite;

Toute éolienne installée dans un endroit fortement exposé au vent produit de l'électricité moins coûteuse que la même éolienne installée dans un endroit moins venté. Par conséquent, il est important d'évaluer la vitesse du vent à l'endroit envisagé pour l'installation des éoliennes.

Dans les régions éloignées, la production d'électricité à l'aide de génératrices diesel est variable par conséquent, dans les endroits exposés à un bon vent, l'électricité produite est nettement rentable. Lorsque l'on compare le prix de détail de l'électricité payé par les consommateurs, les coûts de l'énergie éolienne sont presque concurrentiels. Cependant, sur les sites moins ventés le coût de l'énergie éolienne reste encore plus élevé que celui des sources classiques.

Pour pouvoir comparer les sources d'énergie entre elles, la notion de coût global social a été introduit (coûts de dépollution ou de retraitement, coûts de recherche et de développement, coûts stratégiques d'approvisionnement). En coût global, l'énergie éolienne est une des énergies les moins coûteuses.

## I.3 Généralités sur l'éolienne :

Il existe deux familles d'éoliennes : les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal.

### I.3.1 Capteurs à axe vertical :

Ce type d'éolienne peut utiliser deux principes : la traînée différentielle ou la variation cyclique d'incidence [I.2].

#### a- Rotor de SAVONIUS (*La traînée différentielle*) :

Le principe de mise en mouvement de ce type d'éolienne est identique à un anémomètre (Fig. I.1). Les forces exercées par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes, nous obtenons ainsi un couple moteur

**b- Rotor de DARRIEUS (La variation cyclique d'incidence) :**

Un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces d'intensités et de directions variables générant ainsi un couple moteur. Ce principe de fonctionnement a été breveté au début des années 1930 par le Français DARRIEUS. Les rotors peuvent être de forme cylindrique, tronconique, parabolique, etc.

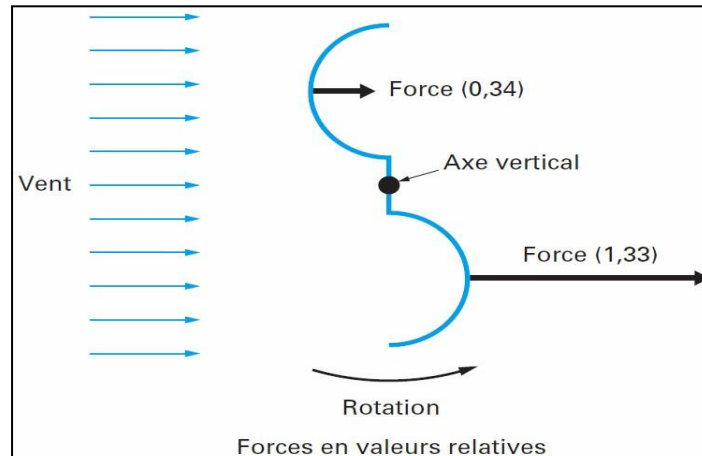


Fig. I.1. Effet des vents sur un corps creux.

- **Avantages et inconvénient des machines à axe vertical :**

Les avantages théoriques d'une éolienne à axe vertical sont les suivants :

- Permet de placer la génératrice, le multiplicateur, etc à terre (il n'y pas besoin de munir la machine d'une tour);
- Un mécanisme d'orientation n'est pas nécessaire pour orienter le rotor dans la direction du vent.

Les principaux inconvénients sont les suivants :

- Les vents sont plus faibles à proximité de la surface du sol ;
- L'efficacité globale des éoliennes à axe vertical n'est pas satisfaisante ;
- L'éolienne ne démarre pas automatiquement. Ceci ne constitue cependant 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 ;
- Pour faire tenir l'éolienne, on utilise souvent des haubans ce qui est peu pratique dans des zones agricoles exploitées.

–

### I.3.2 Capteurs à axe horizontal:

Il existe deux familles d'éoliennes à axe horizontal : les éoliennes à marche lente et les éoliennes à marche rapide (Fig. I.2).

#### a- Les éoliennes à marche lente.

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. De nombreuses éoliennes de ce type ont été construites aux Etats Unis dès 1870. Leur rendement est faible car leur vitesse en bout de pale est limitée (Fig. I.2).

#### b- Les éoliennes à marche rapide.

Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation [I.3]. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs MW. Leur coefficient de puissance atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement en dessous d'une vitesse de vent de 3 m/sec. Les machines uni et bipales ont l'avantage de peser moins, mais elles produisent plus de fluctuations mécaniques et ont un rendement énergétique un peu plus faible. Elles sont visuellement moins esthétiques. Ceci explique pourquoi 80% des fabricants optent pour des aérogénérateurs tripales.

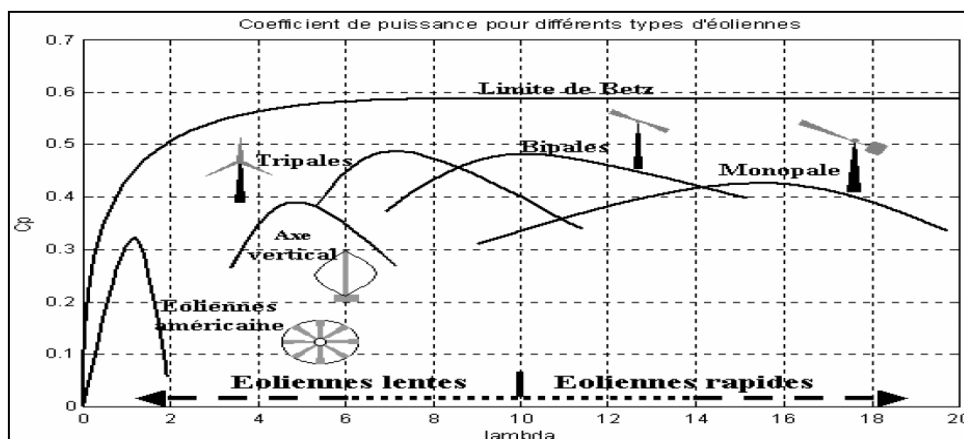


Fig. I.2. Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes [I.1].

« Dans ce mémoire, nous n'étudierons que les éoliennes à marche rapide ».

## I.4 Caractéristiques technologique des éoliennes à axe horizontal :

Une éolienne à axe horizontal est composée de trois éléments essentiels (Fig. I.3) :

- La tour ou le mât.
- Le rotor.
- La nacelle: Son rôle est d'abriter les composants transformant l'énergie mécanique en énergie électrique notamment le générateur.

Dans la suite de ce paragraphe nous présenterons les différents composants d'une éolienne.

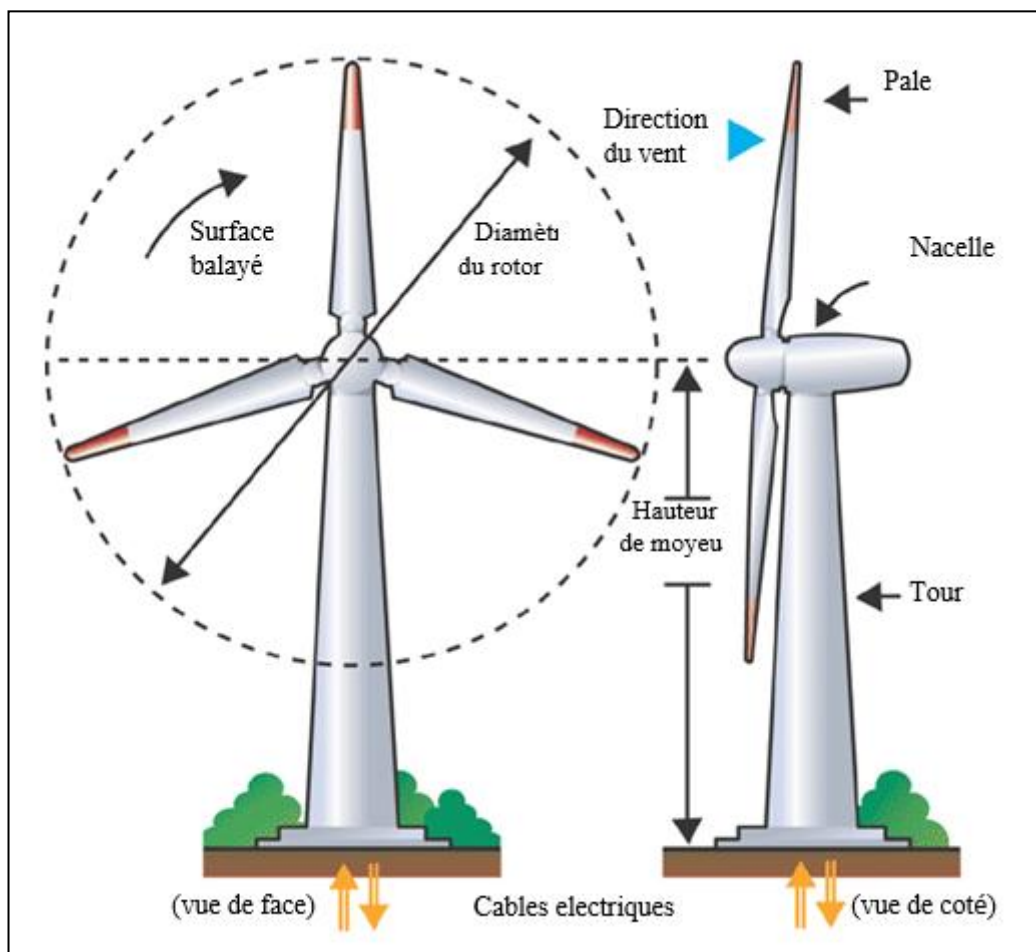


Fig. I.3. Composants d'une éolienne.

### I.4.1 La tour :

Il supporte l'ensemble rotor plus nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi pour placer le rotor à une hauteur suffisante, afin d'empêcher que la puissance transmise par le vent sur le rotor, soit perturbée par la configuration du sol. Le mât peut être réalisé en acier ou en béton armé. Ces mâts peuvent être autoporteurs et auto résistants ou haubanés. Actuellement les mâts en caisson, souvent en acier et fortement ancrés au sol, sont très répandus pour les éoliennes.

#### *a- Autoporteur:*

La conception des mâts autoporteurs doit être correctement calculée d'une part pour résister, par vents forts, au moment dû à la traîne en tête du support ; et d'autre part, pour que les fréquences propres soient bien découplées des fréquences d'excitations dues à l'aérogénérateur. L'ancrage au sol est important et nécessite des fondations.

#### *b- Treillis:*

Le pylône en treillis métallique est une construction plus légère et moins coûteuse pour une même résistance. Cependant il génère plus de perturbations aérodynamiques et a un impact visuel plus important (Fig. I.4).

#### *c- Mât haubané:*

Pour les petites éoliennes, le mât haubané est très peu coûteux mais a une emprise au sol importante (Fig. I.5).



Fig. I.4. Pylône en treillis



Fig. I.5. Mât haubané.

### I.4.2 Le rotor :

Le rotor transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le rotor est constitué des pales et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu. Sur certaines machines une installation hydraulique permet de réguler le fonctionnement du mécanisme (pas des pales variables, freinage du rotor). L'énergie captée par l'éolienne est en fonction de la surface balayée par l'hélice et la vitesse du vent.

**a- Rotor en aval ou en amont du vent :** On peut distinguer deux types d'éolienne à axe horizontal, les capteurs éoliens dont l'hélice est en amont par rapport au vent et ceux dont l'hélice est en aval. Dans le cas des éoliens *avals*, la tour provoque un phénomène de *masque*. À chaque révolution, la pale perçoit une perturbation aérodynamique qui se traduit donc par un moindre rendement et des sollicitations alternées préjudiciables en termes de durée de vie.

**b- Les pales :** Les pales ont de l'influence sur la durée de vie et le rendement de l'éolienne. Les pales sont caractérisées par les éléments suivants : la longueur, la largeur, le profil, les matériaux, et le nombre.

**c- La longueur :** Longueur est fonction de la puissance désirée, elle déterminera aussi la fréquence de rotation maximum. En effet, pour limiter les contraintes en bout de pales dues à la force centrifuge (le travail en fatigue et les risques), l'hélice ne doit pas dépasser une certaine vitesse en particulier lorsque les pales sont longues.

**d- Largeur :** Plus les pales sont larges, meilleur est le couple de démarrage. Cependant pour obtenir des vitesses de rotation rapides, les pales fines et légères sont préconisées. Le choix de la largeur résulte donc d'un compromis entre ces deux aspects.

**e- Les profils :** Les profils ont profités des études pour l'aviation ; leurs caractéristiques sont déterminées en soufflerie. Les pales des éoliennes de faible puissance ne sont pas vrillées. Par contre les éoliennes de forte puissance ont la forme d'une hélice.

**f- Les matériaux :** La légèreté, le prix, la résistance à la fatigue mécanique, à la corrosion et à l'érosion sont pris en compte dans le choix du matériau constituant les pales.

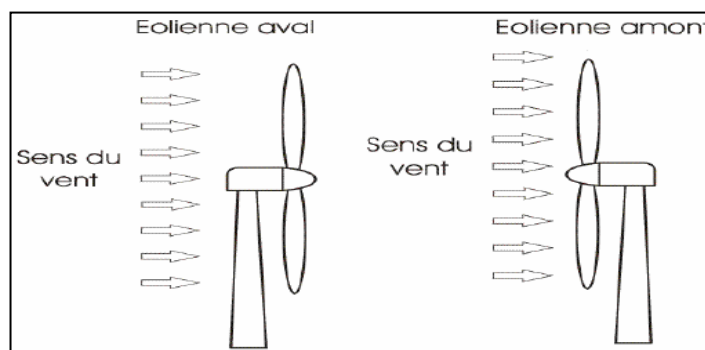


Fig. I.6. Eoliennes aval et amont.

### I.4.3 La nacelle:

- a- **La génératrice:** Elle convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Différents types de génératrices peuvent être rencontrés.
- b- **Un ordinateur:** Il permet de gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/sec), de commander le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de la nacelle face au vent. Enfin, IL permet de diagnostiquer les éventuelles pannes.
- c- **Le moyeu:** La plus part du temps, c'est une pièce d'acier moulé. Le moyeu reçoit les pales sur des brides normalisées et se monte sur l'arbre lent d'entrée du multiplicateur. Il est souvent protégé par une coupe en polyester forme d'obus (spinner). Cette forme aérodynamique est donnée pour des raisons esthétiques plus que fonctionnelles. Le multiplicateur est souvent muni d'un dispositif de refroidissement.
- d- **Le dispositif d'orientation de la nacelle:** IL permet la rotation de la nacelle à l'extrémité supérieure de la tour, autour de l'axe vertical. Généralement, ce sont des moteurs électriques, par l'intermédiaire d'une couronne dentée, qui assurent l'orientation. Le dispositif d'orientation comprend un compteur de tours afin de ne pas tordre les câbles qui acheminent l'électricité.

### I.5 Etat de l'art sur les génératrices d'éoliennes à vitesse variable :

Trois types de génératrice peuvent être utilisés dans les éoliennes à vitesse variable : la génératrice synchrone, la génératrice asynchrone et la génératrice asynchrone à double alimentation.

### I.5.1 Système utilisant une génératrice synchrone :

#### a- Exploitation dans l'éolien:

Le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Autrement dit, si la génératrice est connectée au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement un sous-multiple de la pulsation des courants statoriques. L'adaptation de cette machine à un système éolien pose des problèmes pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau lors des phases de connexion. Pour ces raisons, on place systématiquement une interface électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation [I.5], [I.6].

L'utilisation de génératrices synchrones dans les applications éoliennes à grande puissance est récente. Deux types de génératrices sont utilisés, à bobinage inducteur ou à aimants permanents. Les génératrices synchrones à aimants permanents étaient, jusqu'ici, très peu utilisées principalement pour les raisons suivantes :

- Prix relativement élevé des aimants (constitués de terres rares);
- Démagnétisation progressive découlant de l'utilisation de ces aimants en présence de champs magnétiques intenses régnant dans le générateur.

Pour une puissance désirée, on a le choix entre une petite génératrice (à faible nombre de pôles) tournant à grande vitesse, ou une génératrice de grande dimension (présentant un grand nombre de pôles) mais tournant plus lentement.

#### b- Avantages et inconvénients :

Le Tableau I.1 résume les principaux avantages et inconvénients des génératrices synchrones.

Tableau I.1. Avantages et inconvénients des génératrices synchrones.

Avantages	Inconvénients
Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens.	Machine spécifique
Absence de boîte de vitesse.	Prix de l'électronique de puissance dimensionnée au moins à 100% de la puissance nominale
Fonctionnement a vitesse variable sur toute la plage de vitesse.	Grand diamètre de la machine.

**I.5.2 Système utilisant une génératrice asynchrone :**

**a- Exploitation dans l'éolien :**

L'éolienne dans cette configuration entraîne une génératrice asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance situé sur le circuit statorique. Contrairement à une éolienne à vitesse fixe, les tensions et les fréquences à la sortie de la génératrice ne sont plus imposées par le réseau, ce qui permet de réguler la vitesse de l'éolienne. La commande de l'onduleur permet de garder constante la tension du bus continu [I.7].

**b- Avantages et inconvénients:**

Le Tableau I.2 résume les principaux avantages et inconvénients des génératrices asynchrones.

Tableau I.2. Avantages et inconvénients des génératrices asynchrones.

Avantage	Inconvénient
Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens.	Electronique de puissance dimensionnée au moins à 100% de la puissance nominale.

**I.5.3 Système utilisant la génératrice asynchrone à double alimentation:**

**a- Principe de la machine asynchrone à double alimentation:**

Dans cette configuration le stator de la machine asynchrone est connecté directement au réseau et le convertisseur de puissance se trouve sur le circuit rotoriques La commande du redresseur permet de

contrôler le fonctionnement de la génératrice en imposant la tension des enroulements rotoriques. La commande de l'onduleur permet de maintenir la tension du bus constante.

**b- Avantages et inconvénients**

Cette configuration a l'avantage de réaliser des économies sur les convertisseurs de puissance car la puissance transitée par le circuit rotoriques est faible par rapport à la puissance statorique dans la configuration classique. Le Tableau I.3 résume les principaux avantages et inconvénients de l'utilisation de cette génératrice.

Tableau I.3. Avantages et inconvénients des génératrices asynchrones à double alimentation.

Avantages	Inconvénients
Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens;	Maintenance du multiplicateur;
Electronique de puissance dimensionnée à 30% de la puissance nominale;	Commande complexe;
Fonctionnement à vitesse variable ( $\pm 30\%$ de la vitesse nominale).	Oscillations mécaniques.

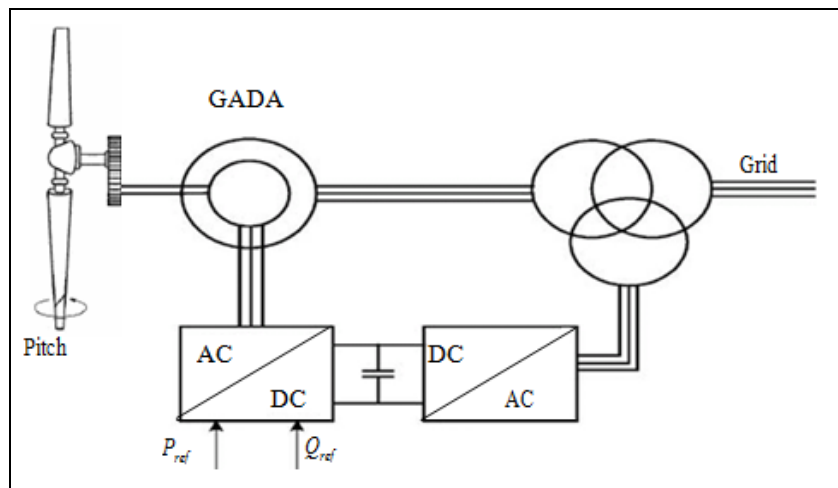


fig.I.7. Eolienne utilisant la GADA.

## I.6 CONCLUSION

Dans ce chapitre. On a présenté brièvement l'énergie éolienne, nous avons évoqué un bref historique du développement de l'utilisation de l'énergie éolienne depuis l'antiquité

Ensuite On a cité les différents types des génératrices et on a exposés leurs composants leurs avantages et inconvénients

Ce premier chapitre nous a ainsi permis d'expliquer le choix du type d'aérogénérateur étudié c'est-à-dire à axe horizontal connecté au réseau, à vitesse variable. La génératrice la plus approprié pour ce type de système, est la machine asynchrone à double alimentation. La MADA offre plusieurs avantages, dont un très bon rendement énergétique, une bonne robustesse ainsi qu'une facilité d'exploitation et de commande. Grâce à ces avantages, la MADA a suscité beaucoup de curiosité de la part des chercheurs qui ont essayé de développer des stratégies pour exploiter au mieux les points forts de cette machine. C'est pour cette raison que le prochain chapitre est consacré à la modélisation de cette machine avec un système de conversion d'énergie éolienne.

## BIBLIOGRAPHIE

- [L.1] P.Leconte et al., Eoliennes, Fiche BM4640, Septembre 2009 ::
- [L.2] M.E.H. Benbouzid al., "The state of the art of generators for wind energy conversion systems" in Proceedings of the ICEM'06, Chania (Greece), September 2006.
- [L.3] [www.windpower.org](http://www.windpower.org).
- [L.4] B. Raison et al., "L'énergie électrique éolienne, Partie I : Présentation générale et approche probabilistique" Revue Internationale de Génie Electrique, vol. 5/3-4, pp. 405-484, 2002.
- [L.5] A.S. Neris et al., "A variable speed wind energy conversion scheme for connection to weak AC systems," IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 14, n°1, pp. 122-127, March 1999.
- [L.6] N. Abu-Tabak, "Stabilité dynamique des systèmes électriques multi machines : modélisation, commande, observation et simulation", Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2008.
- [L.7] ROUABHI Riyadh «Étude et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation Application : Energie éolienne» Mémoire de Magister en Electrotechnique, UNIVERSITE FERHAT ABBAS —SETIF, 2012.



## ***CHAPITRE II***

# ***MODELISATION DE LA CHAINE EOLIENNE***



II.1 INTRODUCTION:

Dans ce chapitre, nous allons appliquer la modélisation des différents composants de la chaîne de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable, commençant par la machine asynchrone à double alimentation qui est reliée par une turbine à calage variable et guidé par le rotor utilisant deux convertisseurs de puissance, qui est le système le plus utilisé dans la conversion d'énergie éolienne vu ses avantages sachant que:

- La turbine éolienne et sa commande pour maximiser et limiter le capteur de la puissance pendant les faibles et fortes vitesses du vent.
- la machine asynchrone à double alimentation (MADA) qui a un stator directement connecté au réseau, et un rotor alimenté par un onduleur permettant l'application des commandes qui contrôlent les puissances générées par le stator.
- l'alimentation de l'onduleur qui semble une solution efficace pour l'amélioration du facteur de puissance côté réseau et le réglage de bus continu.

Pour ce faire, nous allons décrire les modèles mathématiques de chaque élément du système, (Figure II-1).

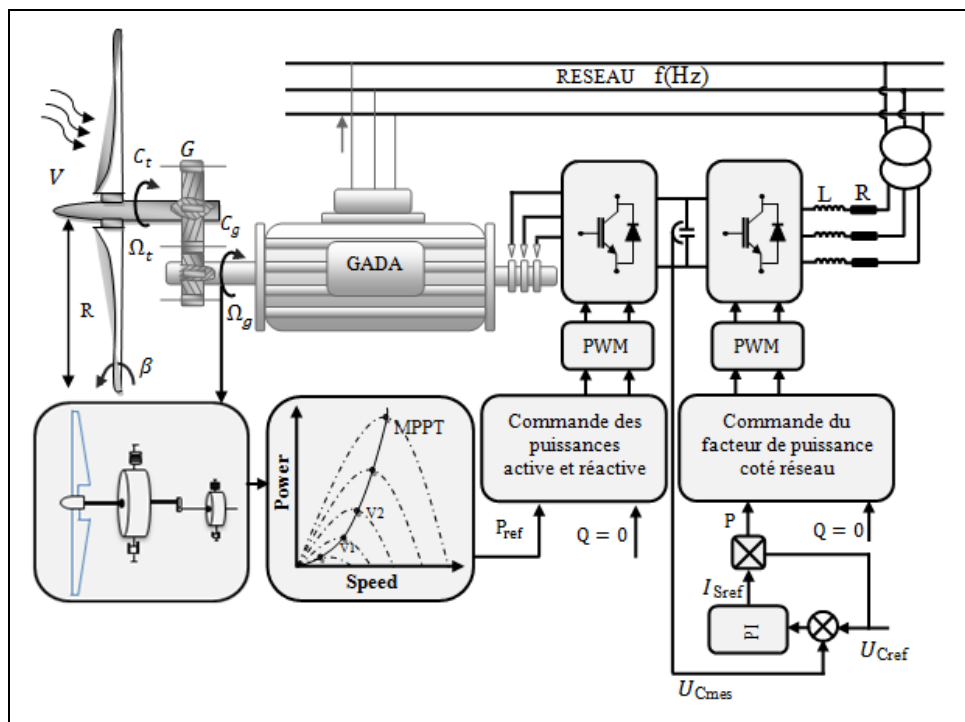


Figure II-1 : Schéma synoptique du système de conversion d'énergie éolienne et sa commande.

## II.2 Modélisation de la turbine et de sa commande:

Il faut qu'on utilise une modélisation précise et exigeante, et des techniques de commandes pour différentes vitesses du vent, pour assurer une bon cordination entre les caractéristiques du couple et de la vitesse de la turbine et de la génératrice, et pour améliorer l'efficacité de conversion.

### II.2.1 Modélisation de la turbine éolienne:

La turbine fonctionne comme un transformateur d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Elle contient trois pales identiques de longueur  $R_T$  fixées à un arbre d'entraînement relié à un multiplicateur de vitesse ayant un rapport de transformation  $G$ . Ce dernier controler l'arbre de la génératrice (Figure II-2) [II 1].

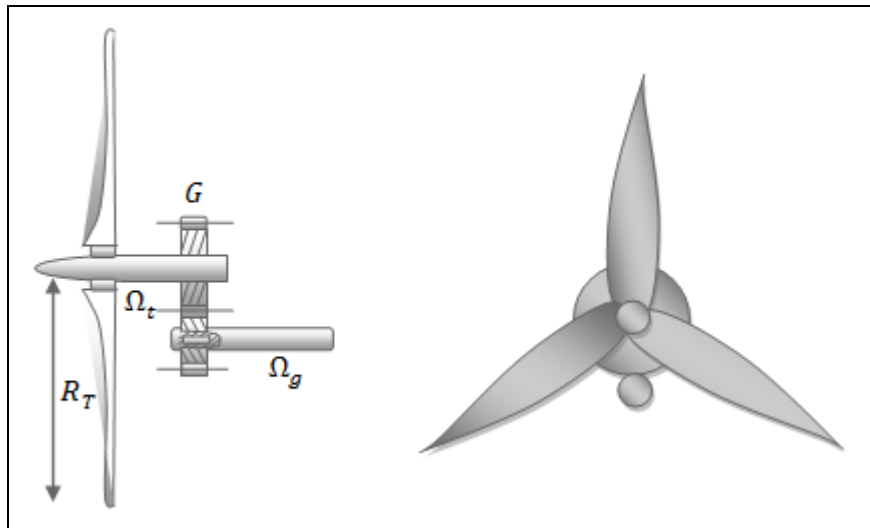


Figure II-2: Schéma de la turbine éolienne.

#### II.2.1.1 Source primaire: le vent

L'énergie cinétique du vent est l'élément de base du système de conversion d'énergie éolienne. Le vent est un champ de propagation d'air avec des directions différentes et une vitesse variable. Son propagation au niveau de la turbine éolienne engendre des forces sur les surfaces de ses pales, qui génèrent un mouvement rotatif du dispositif.

On a deux composants de vitesses ; l'une  $V(t)$  varie en perturbation en fonction de temps et l'autre  $V$  varie lentement, ces deux composants nous donne La vitesse du vent en un point de l'espace  $V_0(t)$ , Son expression est donnée par la formule (II. 1)[II 1] :

$$V_0(t) = V + V(t) \quad (\text{II.1})$$

La composante  $V$  représente trois catégories de vitesse du vent :

$V = 6 \text{ m/s}$  Pour une faible vitesse du vent ;

$V = 12 \text{ m/s}$  Pour une vitesse moyenne du vent ;

$V = 18 \text{ m/s}$  Pour une forte vitesse du vent.

L'autre composante  $V(t)$  qui varie en fluctuations est décrite par l'expression (II.2):

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_{t_0 - \frac{\Delta t}{2}}^{t_0 + \frac{\Delta t}{2}} v(t)^2 dt} \quad (\text{II.2})$$

$\sigma_v$  : Le coefficient de dispersion du vent.

Nous allons utiliser un profil du vent avec une faible vitesse moyenne  $V = 8 \text{ m/s}$ . Sa variation en fonction du temps est représentée par la figure (II-3).

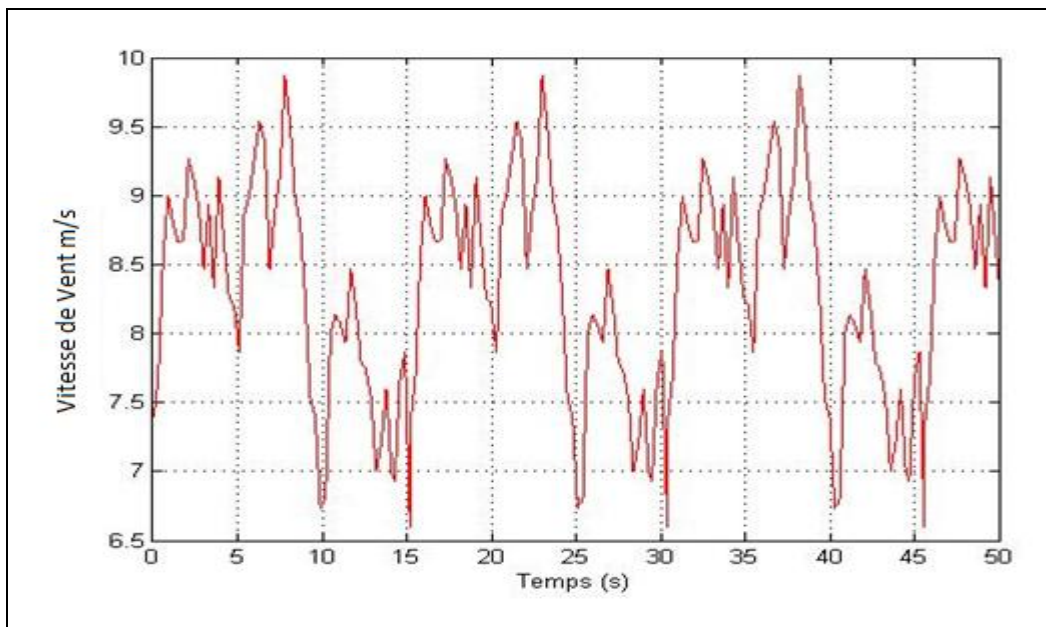


Figure II-3: Profil du vent appliqué à la turbine.

### II.2.1.2 Conversion aérodynamique:

Supposant que la vitesse  $V$  du vent qui traverse une surface  $S$  est constante. La puissance aérodynamique  $P_{aér}$  est donnée par l'expression (II.3) :

$$P_{aér} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (\text{II.3})$$

$\rho$  Représente la densité de l'air  $1.22 \text{ kg/m}^3$  dans une température de  $15^\circ\text{C}$ .

La puissance  $P_T$  de la turbine selon la théorie de Betz est [II 2]:

$$P_T = C_p(\lambda, \beta) \cdot P_{mt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_T^2 \cdot V^3 \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad (II.4)$$

$C_p(\lambda, \beta)$  Le rendement aérodynamique de la turbine ou bien le coefficient de puissance, un coefficient spécifique à chaque éolienne qui dépend de l'angle d'orientation des pales  $\beta$ , et de la vitesse spécifique  $\lambda$ .

$R_T$  Le rayon des pales de la turbine.

Le coefficient de puissance de la turbine dont nous allons utiliser est donné par l'expression(II.5):

$$C_p(\lambda, \beta) = (0,5 - 0,0167 \cdot (\beta - 2)) \cdot \sin \left[ \frac{\pi \cdot (\lambda + 0,1)}{18,5 - 0,3 \cdot (\beta - 2)} \right] - 0,00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \quad (II.5)$$

La variation de coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$  pour différentes valeurs de l'angle d'orientation des pales  $\beta$  est tracé dans la (Figure II-4), cette représentation permet d'avoir le point maximum de ce coefficient ( $C_p = 0.5$ ) qui correspond aux valeurs optimales  $\lambda = 9.2$  et  $\beta = 2$ . Avec ces valeurs, la turbine fonctionnera avec un rendement maximum et fournira ainsi une puissance mécanique optimale [II 1, II 3].

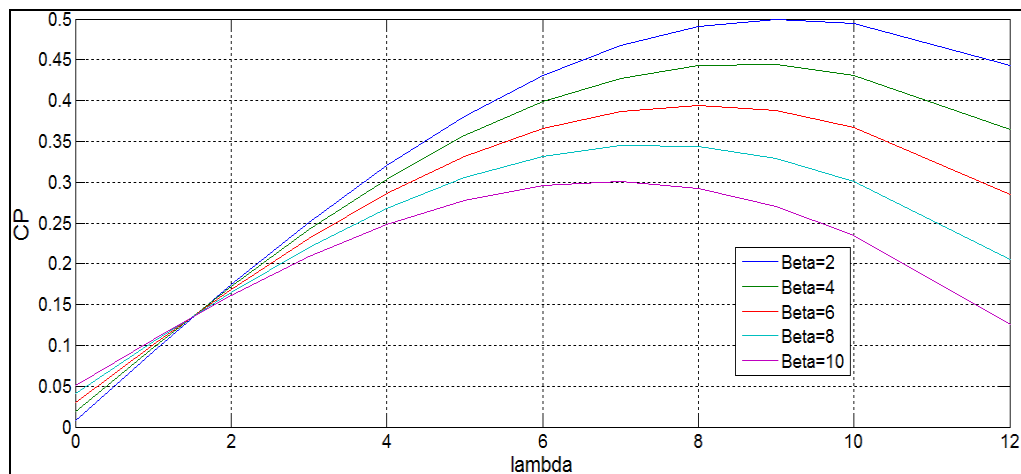


Figure II-4 : Evolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse relative de la turbine et de l'angle d'orientation des pales

Pour atteindre ce point de fonctionnement on va appliquer une commande ultérieurement.

Pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne, on utilise la vitesse réduite (spécifique)  $\lambda$  qui est le rapport de la vitesse linéaire au bout de la pale de la turbine ramenée à la vitesse du vent pour exprimer la vitesse de fonctionnement d'une éolienne :

$$\lambda = \frac{\Omega_T \cdot R_T}{V} \tag{II.6}$$

On détermine le couple de la turbine connaissant la vitesse de la turbine, comme suivant :

$$C_T = \frac{P_T}{\Omega_T} = \left( \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_T^2 \cdot V^3 \cdot C_p(\lambda, \beta) \right) \cdot \left( \frac{R_T}{V \cdot \lambda} \right) \tag{II.7}$$

$$C_T = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R_T^3 \cdot V^2}{\lambda} \cdot C_p(\lambda, \beta) \tag{II.8}$$

Le gain de multiplicateur qui sert à adapter la vitesse entre la turbine et la génératrice, est modélisé mathématiquement par les équations suivantes:

$$G = \frac{C_T}{C_{Mec}} \tag{II.9}, \quad \text{et} \quad G = \frac{\Omega_g}{\Omega_T} \tag{II.10}$$

**II.2.1.3 Equation dynamique de la turbine:**

Les pales reliées au moyeu couplé à l'arbre lent qu'est relié à son tour à un adaptateur. Cet adaptateur multiplie la vitesse de rotation de l'arbre lent est relié a un arbre rapide ce dernier est relié à la génératrice constituent le train de transmission de la puissance captée par le rotor éolien [II 4, II 5].

Le modèle équivalent de cette chaîne qui contient trois parties:

- La grande masse du rotor de la turbine éolienne qui représente **90%** du moment d'inertie global.
- La masse du multiplicateur qui représente **2 à 4%** du moment d'inertie global.
- La masse de générateur qui représente **6 à 8%** du moment d'inertie global.

Le modèle est représenté par la Figure II.5.

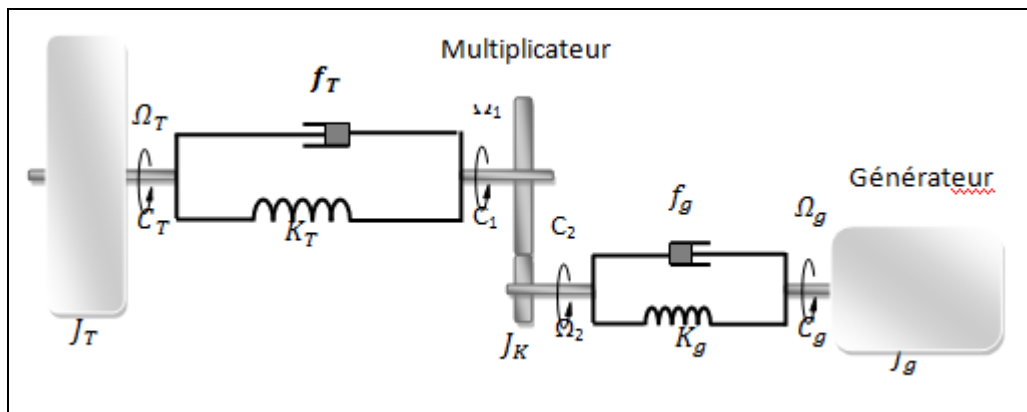


Figure II-5: Modèle de la turbine.

Des hypothèses simplificatrices [II 6]:

- les trois pales de longueur  $R_T$  chacune, attachée au moyeu sont supposées identiques et ont une seule masse d'une inertie  $J_T$ .
- L'inertie du multiplicateur de vitesse est négligeable devant celles du rotor de la turbine et de la génératrice, ce qui nous permet de la considérer comme un gain de vitesse égal à  $G$  ou un gain de couple égal à  $1/G$ .

- les arbres de transmissions lent et rapide sont parfaitement rigides.

Ces hypothèses nous permettent de représenter le modèle à deux masses simplifiées comme suit :

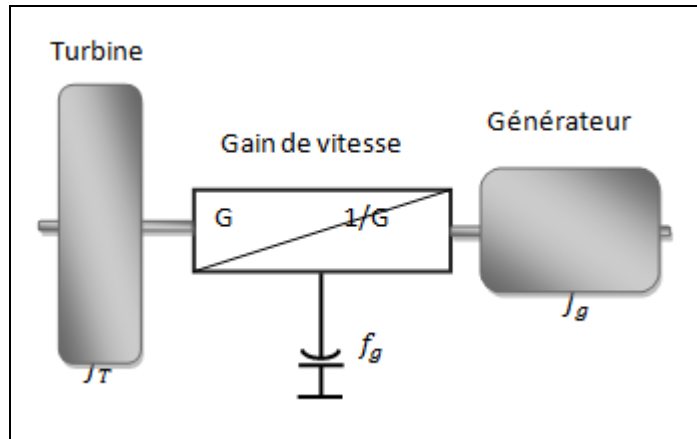


Figure II-6: Modèle simplifié de la turbine.

Les équations mathématiques des paramètres physiques de ce modèle simplifié sont :

$$C_{Mec} - C_g = \left( \frac{J_T}{G^2} + J_g \right) \cdot \frac{d\Omega_g}{dt} + \left( \frac{f_T}{G^2} + f_g \right) \cdot \Omega_g \quad (II. 11)$$

$$\frac{C_T}{G} - C_g = \left( \frac{J_T}{G^2} + J_g \right) \cdot \frac{d\Omega_g}{dt} + \left( \frac{f_T}{G^2} + f_g \right) \cdot \Omega_g \quad (II. 12)$$

Ou

$C_g, C_T, C_{Mec}$ , Sont respectivement : le couple électromagnétique généré par la génératrice, le couple de la turbine, le couple mécanique issu du multiplicateur,

$J_g, J_T$  - L'inertie de générateur et celle de la turbine ;

$f_g, f_T$  - Les coefficients des frottements visqueux respectivement de la génératrice et de la turbine ;

$G$  - Le rapport du multiplicateur de vitesse ;

$\Omega_g$  - La vitesse de rotation de la génératrice (axe rapide).

On pose :

$$\frac{J_T}{G^2} + J_g = J \quad \frac{f_T}{G^2} + f_g = f$$

L'équation (II. 12) devient :

$$\frac{C_T}{G} - C_g = J \cdot \frac{d\Omega_g}{dt} + f \cdot \Omega_g \quad (II. 13)$$

Ainsi, nous pouvons établir le schéma bloc de la turbine, figure (II-7).

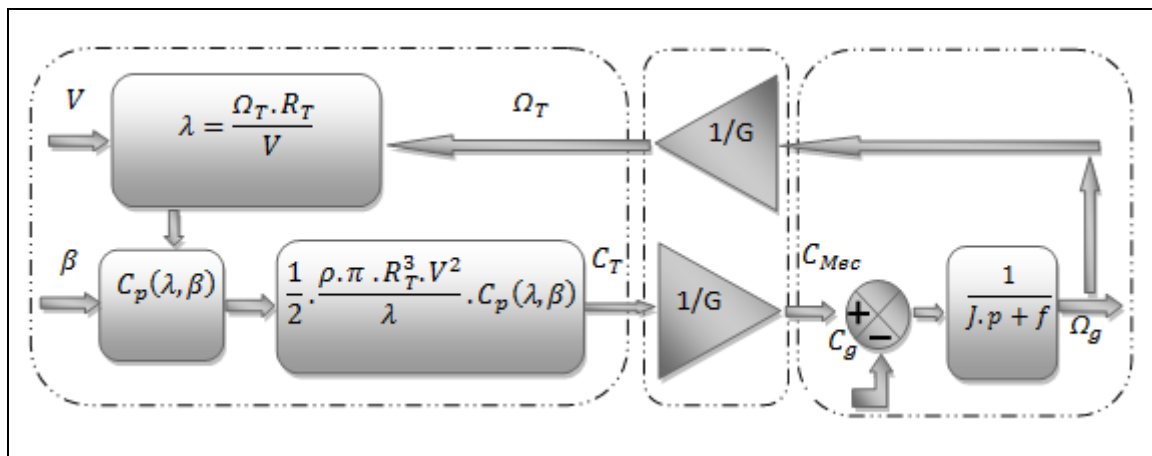


Figure II-7: Schéma bloc du modèle de la turbine.

### II.2.2 Techniques de commandes de la turbine éolienne:

Deux techniques de commandes seront appliquées:

- \*L'une pour maximiser la puissance captée lorsque la vitesse du vent est inférieure à celle nécessaire pour atteindre la puissance nominale de la turbine.
- \*l'autre pour limiter la puissance produite à une valeur égale à la puissance nominale lors des fortes vitesses du vent.

#### II.2.2.1 Caractéristique de puissance:

Dans la production d'énergie éolienne, chaque turbine est généralement caractérisée par une courbe qui trace la puissance convertie en fonction de la vitesse, et qui représente les différentes zones de fonctionnement pour répondre aux exigences de la commande.

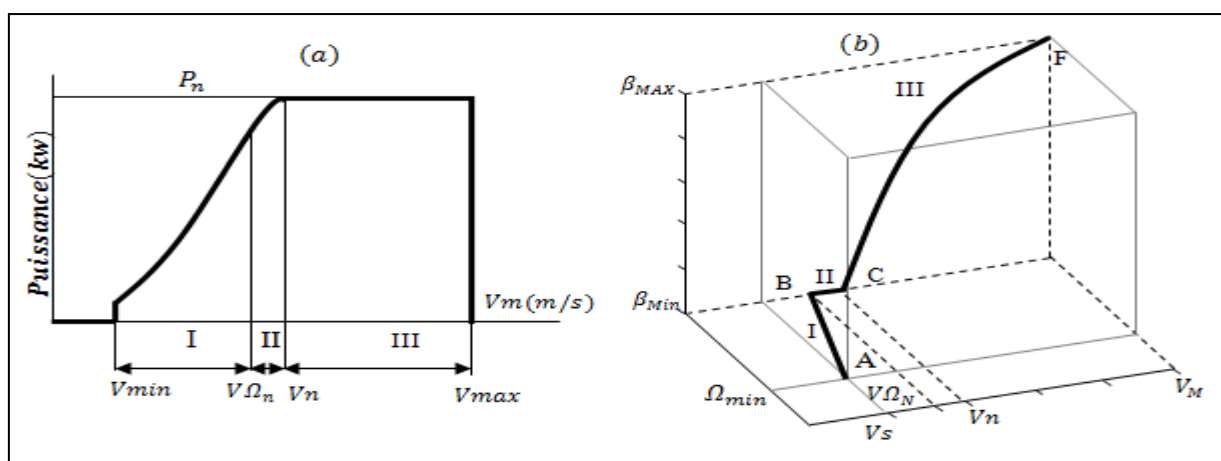


Figure II-8 : caractéristique idéale d'une éolienne à vitesse variable.  
 (a). dans le plan  $(V, P)$ .      (b). dans le plan  $(V, \Omega, \beta)$ .

Dans notre cas, la turbine est caractérisée par la courbe de la figure (II-8) qui représente trois zones de fonctionnements pour trois vitesses différentes exigeant des commandes distinctes [II 7, II 8, II 9, II 10].

- **Zone I:** la vitesse du vent est faible. La puissance disponible dans cette zone est inférieure à la puissance nominale de la turbine. L'objectif dans cette zone est d'extraire le maximum de puissance du vent en appliquant les techniques de commandes nommées techniques d'extraction de maximum de puissance.
- **Zone II:** la zone de transition entre la zone de charge partiel et la zone de charge nominale. Dans cette zone, la vitesse de rotation est maintenue constante pour des raisons mécaniques (contraintes des pales) et acoustiques (bruits générés), qui ne nécessite pas de commande.
- **Zone III:** correspond aux fortes vitesses du vent. L'objectif dans cette zone est de limiter et maintenir la vitesse de la turbine à une vitesse qui assure une puissance égale à la puissance nominale de l'éolienne afin d'éviter les surcharges. La commande exigée est réalisée par action sur l'angle de calage des pales (Pitch Control).

### II.2.2.2 Commande pour l'optimisation de la puissance:

On va utiliser une technique appelée technique *MPPT* (Maximum Power Point Tracking). Le but de la commande est de maximiser l'énergie captée du vent pour extraire le maximum de puissance. Pour cela, les deux variables: la vitesse spécifique  $\lambda$  et angle de calage  $\beta$  doivent être maintenues à leurs valeurs optimales  $\lambda_{opt}$  et  $\beta_{opt}$  pour que garantir un coefficient de puissance maximale ( $C_{pmax}$ ).

#### II.2.2.2.1 Techniques d'extraction du maximum de la puissance (MPPT):

Cette méthode de contrôle de la puissance est très fiable, robuste et simple à implanter. Elle consiste à apprécier et à garder la vitesse de la turbine à une certaine valeur qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. Il existe deux façons pour appliquer cette technique selon le genre de la vitesse de référence qu'elle soit mesurée ou estimée.

Parmi les commandes utilisées, la commande en rapport de vitesse ainsi que la commande en puissance dites méthodes directes, ont besoin d'une vitesse de référence mesurée qui est un inconvénient puisque il est difficile d'avoir une mesure exacte et instantanée du vent. Par contre, la commande de vitesse de référence estimée dite méthode indirecte qu'on va appliquer dans notre cas est une méthode adéquate qui n'exige pas une mesure exacte, mais une simple estimation [II 6, II 11, II 12].

#### II.2.2.2.2 Commande indirecte de la vitesse:

Généralement on mesure la vitesse de vent par un anémomètre monté sur la nacelle. Cette méthode est peu précise car elle donne la vitesse du vent dans un seul point de l'espace sachant que le diamètre de la surface balayée par les pales est grand, ce qui donne une mesure inexacte de la vitesse

qui cause une diminution de la puissance captée. C'est pourquoi, la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse et une estimation de cette dernière est souvent utilisée pour contourner ce problème [II 13, II 6, II 14, II 15].

L'équation de la vitesse spécifique nous donne la vitesse du vent:

$$V = \frac{\Omega_T \cdot R_T}{\lambda_{opt}} \quad (\text{II. 14})$$

$\lambda_{opt}$  : La vitesse spécifique optimale.

Le couple optimal est:

$$C_{Topt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_T^3 \cdot V^2 \frac{C_p(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}} \quad (\text{II. 15})$$

En remplaçant la vitesse du vent dans l'équation(II. 15), le couple optimal devient:

$$C_{Topt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_T^5 \cdot \frac{C_p(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}^3} \cdot \Omega_T^2 \quad (\text{II. 16})$$

On constate que le couple aérodynamique optimal est proportionnel au carré de la vitesse du rotor:

$$C_{Topt} = k_{opt} \cdot \Omega_T^2 \quad (\text{II. 17})$$

Tel que :

$$k_{opt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_T^5 \cdot \frac{C_p(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}^3} \quad (\text{II. 18})$$

En régime permanent, l'équation mécanique s'écrit sous la forme:

$$\frac{C_T}{G} - C_g - f \cdot \Omega_g = 0 \quad (\text{II. 19})$$

En remplaçant (II. 17) dans l'équation(II. 19), l'équation mécanique devient:

$$\frac{k_{opt}}{G} \cdot \Omega_T^2 - f \cdot \Omega_g - C_g = 0 \quad (\text{II. 20})$$

Avec :  $\Omega_g = G \cdot \Omega_T$

Si le couple électromagnétique  $C_g$  est commandé pour suivre le couple optimal, l'éolienne demeure autour de sa courbe de rendement optimal, le couple devient un couple optimal  $C_{gopt}$ .

$$C_{gopt} = \frac{k_{opt}}{G^3} \cdot \Omega_g^2 - f \cdot \Omega_g \quad (\text{II. 21})$$

Ce couple qui doit être imposé à la génératrice pour assurer le fonctionnement optimale de l'éolienne. Le schéma bloc de la commande est donné par la figure ci-dessous [II 16, II 17, II 18].

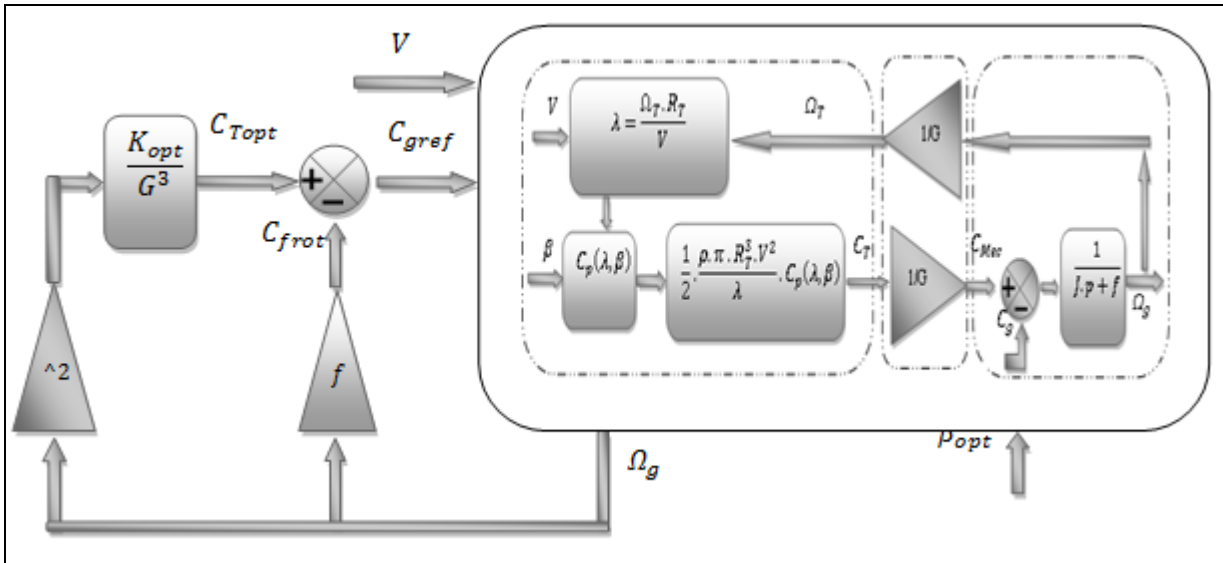


Figure II-9: Commande indirecte de vitesse (Zone I).

**II.2.2.3 Commande pour la limitation de la puissance:**

La commande appliquée dans cette zone est pour objectif de limiter la puissance extraite de la génératrice à sa valeur nominale. Pour cela, il faut:

- Un système à décrochage aérodynamique qui consiste à concevoir la forme des pales de manière à augmenter les pertes de portance au-delà d'une certaine vitesse de vent. Ce système est utilisé dans les éoliennes à vitesse fixe de petites puissances.

**II.2.3 Résultats de simulation :**

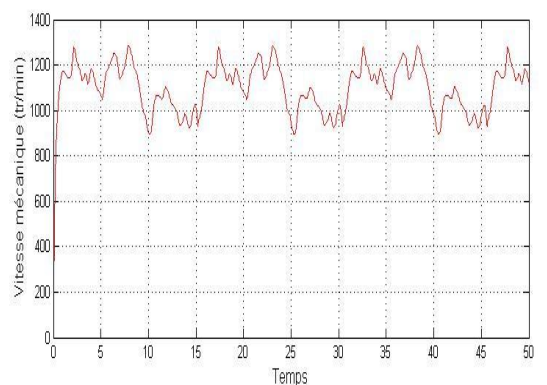
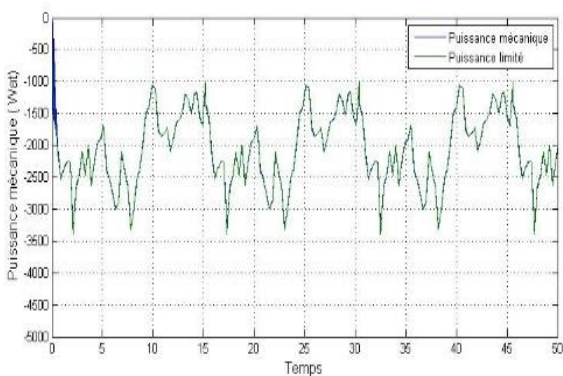


Figure II-10 : La puissance mécanique produite et la vitesse mécanique.

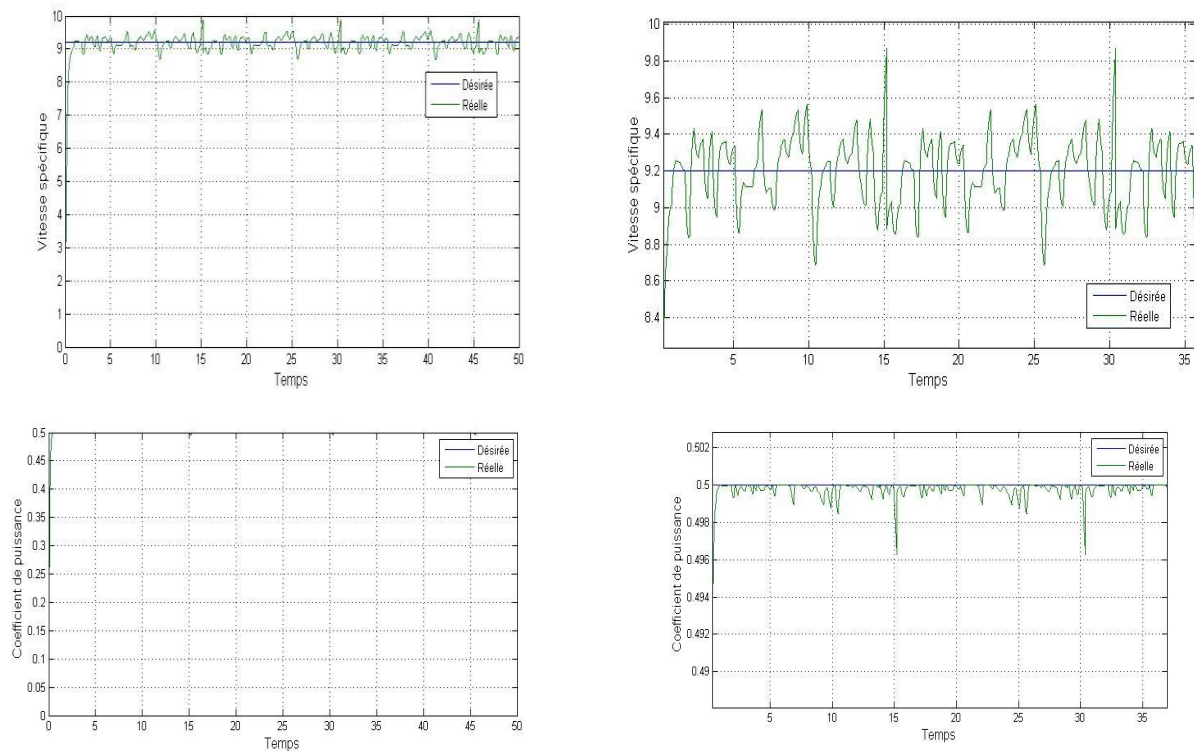


Figure II-11 : La vitesse spécifique et le coefficient de puissance et ses zooms.

On peut vérifier la fiabilité de la commande, On remarque que la vitesse spécifique suit la référence optimale imposée, et le coefficient de puissance suit le coefficient de puissance maximum souhaité.

### II.3 Modélisation de la machine asynchrone double alimentation:

Comme toutes les autres machines, la machine asynchrone à double alimentation (MADA) est une machine réversible qui peut fonctionner en mode génératrice (GADA). En cas où on inverse le couple en injectant un couple moteur au lieu d'un couple résistant au niveau de son arbre, elle garde toujours son propre modèle. En prenant en compte les hypothèses simplificatrices citées en suite, on peut exprimer le modèle de cette machine

#### II.3.1 Hypothèses simplificatrices:

Il est très difficile de modéliser la MADA vu sa structure et sa géométrie complexes, d'où la nécessité d'adopter certaines hypothèses qui permettent d'obtenir un modèle simple et le plus proche possible de la réalité. Ces hypothèses sont les suivantes [II 23, II 24]:

- La densité de courant est uniforme dans la section des conducteurs élémentaires, l'effet de peau et l'effet des encoches sont négligeables.
- Le circuit magnétique n'est pas saturé, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaires des courants. Les pertes par hystérésis et les courants de Foucault sont négligés.

- Les résistances et les coefficients d'inductances propres sont constants et les enroulements ne dépendent pas de la température. Les coefficients d'inductances mutuelles sont en fonction de la position de leurs axes magnétiques.
- La géométrie de la machine est symétrique, et l'épaisseur de l'entrefer est uniforme.
- Les forces magnétomotrices créées par le stator ou le rotor ont une répartition sinusoïdale.

**II.3.2 EQUATIONS MATHÉMATIQUES DE LA MADA DANS LE REPERE (a, b, c):**

La machine asynchrone à double alimentation est une machine classique dont le rotor est accessible et identique au stator. [II 25, II 24, II 26, II 27].

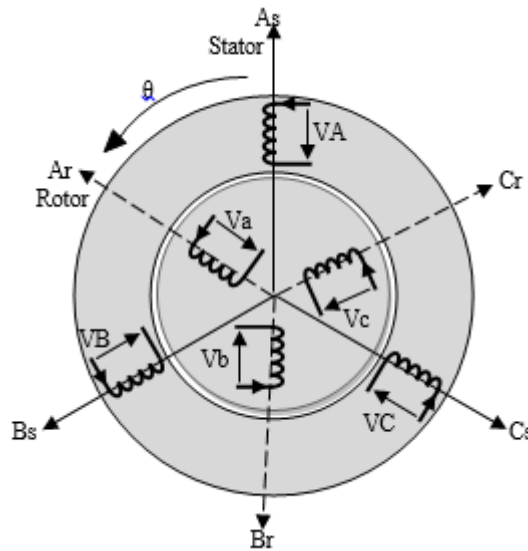


Figure II-12 : Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.

**II.3.2.1 Equations électriques :**

Les équations des tensions électriques qui régissent la MADA sont [II 28]:

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] \end{cases} \quad (II. 22)$$

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}; \quad [I_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}; \quad [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix}; \quad [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

$$[V_r] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}; \quad [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}; \quad [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix}; \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Où  $R_s$  et  $R_r$  Sont respectivement les résistances des enroulements statoriques et rotoriques.

$V_s, V_r$  -Les tensions simples statoriques et rotoriques.

$I_s, I_r$  -Les courants de phase statoriques et rotoriques.

$\varphi_s, \varphi_r$  - Les flux respectivement statoriques et rotoriques.

**II.3.2.2 Equations magnétiques:**

Les équations des flux magnétiques qui régissent la MADA sont:

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \\ [\varphi_r] = [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s] \end{cases} \quad (II. 23)$$

Avec :

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

$L_{ss}, L_{rr}$  Sont respectivement les inductances propres des phases statoriques et rotoriques.

$M_s, M_r$  - Les inductances mutuelles entre les phases statoriques et rotoriques.

$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T$  - La matrice des inductances mutuelles ou matrice de couplage stator-rotor

Qui est donnée par la formule(II. 24):

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M_{max} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (II. 24)$$

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

En remplaçant (II.23) dans (II.22), on obtient le système d'équations ci-dessous:

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [[L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r]] \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [[L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s]] \end{cases} \quad (II. 25)$$

**II.3.2.3 Equation mécanique :**

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

$$C_{em} = C_r + f_r \cdot \Omega + J \cdot \frac{d\Omega}{d\theta} \quad (II. 26)$$

Avec :

- $C_{em}$  - le couple électromagnétique de la machine;

- $C_r$  - le couple résistant ;
- $f_r$  - le coefficient de frottement visqueux de la MADA;
- $\Omega$  - la vitesse de rotation de l'axe de la MADA;
- $J$  - L'inertie des parties tournantes.

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

$$C_{em} = p \cdot [I_s]^t \frac{d}{d\theta} [[M_{sr}] \cdot [I_r]] \quad (\text{II.27})$$

Où  $p$  - Le nombre de paires de pôles de la MADA.

Les équations différentielles (II.25), (II.26) et (II.27) représentent le modèle de la MADA dans le repère  $(a, b, c)$ .

### II.3.3 Transformation de Park :

La transformation de Park est un outil mathématique qui permet la simplification des équations des machines électriques triphasées. Elle permet de passer d'un système triphasé alternatif (repère  $(a, b, c)$ ) à un système biphasé (repère  $(d, q)$ ), et obtenir un système d'équation à coefficients constants [II 23, II 29, II 26, II 27].

La matrice de transformation de Park  $P(\theta)$  est définie comme suit :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

$[P(\theta)]$  Permet la conservation des puissances lors du passage du système triphasé au système biphasé.  $\theta$  - L'angle entre le repère du système triphasé à transformer et le repère de Park.

### II.3.4 Equations mathématiques de la MADA dans le repère $(d, q)$ :

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

$$[x_{dq0}] = [P(\theta)] \cdot [x_{abc}] \Rightarrow [x_{abc}] = [P(\theta)]^{-1} \cdot [x_{dq0}]$$

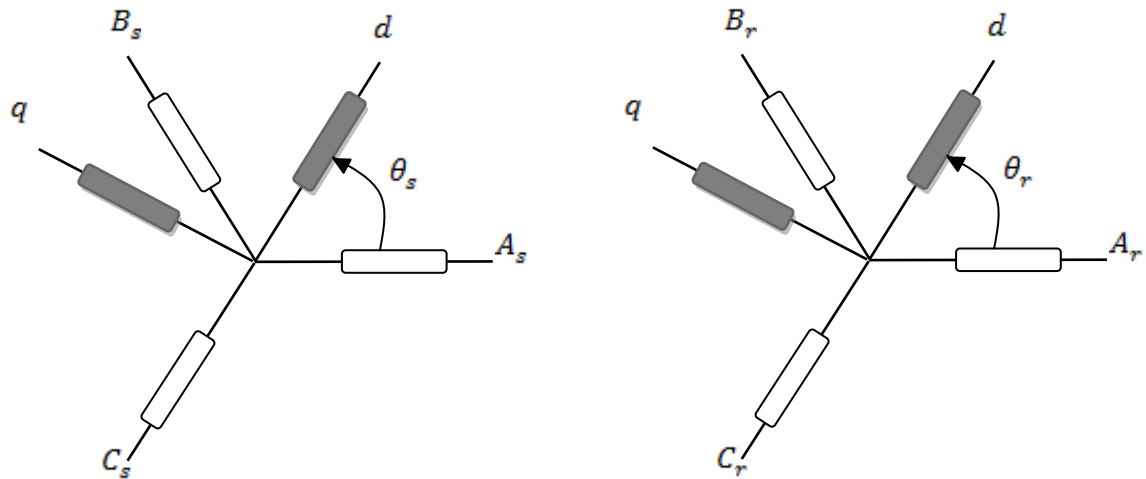


Figure II-13 : Transformation des variables statoriques et rotoriques.

La transformation de Park appliquée aux équations statoriques nous donne:

$$\begin{aligned} [V_{s_{dq0}}] &= [P(\theta_s)] \cdot [V_{s_{abc}}] \Rightarrow [V_{s_{abc}}] = [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [V_{s_{dq0}}] \\ [I_{s_{dq0}}] &= [P(\theta_s)] \cdot [I_{s_{abc}}] \Rightarrow [I_{s_{abc}}] = [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [I_{s_{dq0}}] \\ [\varphi_{s_{dq0}}] &= [P(\theta_s)] \cdot [\varphi_{s_{abc}}] \Rightarrow [\varphi_{s_{abc}}] = [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [\varphi_{s_{dq0}}] \end{aligned}$$

La transformation de Park appliquée aux équations rotoriques nous donne :

$$\begin{aligned} [V_{r_{dq0}}] &= [P(\theta_r)] \cdot [V_{r_{abc}}] \Rightarrow [V_{r_{abc}}] = [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [V_{r_{dq0}}] \\ [I_{r_{dq0}}] &= [P(\theta_r)] \cdot [I_{r_{abc}}] \Rightarrow [I_{r_{abc}}] = [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [I_{r_{dq0}}] \\ [\varphi_{r_{dq0}}] &= [P(\theta_r)] \cdot [\varphi_{r_{abc}}] \Rightarrow [\varphi_{r_{abc}}] = [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [\varphi_{r_{dq0}}] \end{aligned}$$

#### II.3.4.1 Equations électriques:

En appliquant la transformation de Park dans l'équation (II.22), on obtient :

$$\begin{cases} [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [V_{s_{dq0}}] = [R_s] \cdot [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [I_{s_{dq0}}] + \frac{d}{dt} [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [\varphi_{s_{dq0}}] \\ [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [V_{r_{dq0}}] = [R_r] \cdot [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [I_{r_{dq0}}] + \frac{d}{dt} [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [\varphi_{r_{dq0}}] \end{cases} \quad (II. 29)$$

$$\begin{cases} [V_{s_{dq0}}] = [R_s] \cdot [I_{s_{dq0}}] + [P(\theta_s)] \cdot \frac{d}{dt} [[P(\theta_s)]^{-1}] \cdot [\varphi_{s_{dq0}}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{s_{dq0}}] \\ [V_{r_{dq0}}] = [R_r] \cdot [I_{r_{dq0}}] + [P(\theta_r)] \cdot \frac{d}{dt} [[P(\theta_r)]^{-1}] \cdot [\varphi_{r_{dq0}}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{r_{dq0}}] \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

Avec :

$$[P(\theta_s)] \cdot \frac{d}{dt} [[P(\theta_s)]^{-1}] = \frac{d\theta_s}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad [P(\theta_r)] \cdot \frac{d}{dt} [[P(\theta_r)]^{-1}] = \frac{d\theta_r}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Par conséquent, on peut écrire [II 30, II 14, II 31, II 31, II 32]:

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - w_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + w_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - w_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + w_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

$V_{sd}, V_{sq}, V_{rd}$  et  $V_{rq}$ : Sont respectivement les tensions directe et en quadrature statoriques et rotoriques;

$I_{sd}, I_{sq}, I_{rd}$  et  $I_{rq}$ : Sont respectivement les courants directs et en quadratures statoriques et rotoriques;

$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}, \varphi_{rd}$  et  $\varphi_{rq}$ : Sont respectivement les flux statoriques et rotoriques directs et en quadratures du système ;

$w_s, w_r$ : Sont les pulsations statorique et rotorique;

$\theta_s, \theta_r$ : Sont les angles électriques que forment les axes du stator et du rotor avec l'axe direct du référentiel biphasé de Park.

#### II.3.4.2 Equations magnétiques:

De la même manière, les équations des flux sont données par :

$$\begin{cases} [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [\varphi_{s_{dq0}}] = [L_{ss}] \cdot [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [I_{s_{dq0}}] + [M_{sr}] \cdot [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [I_{r_{dq0}}] \\ [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [\varphi_{r_{dq0}}] = [L_{rr}] \cdot [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [I_{r_{dq0}}] + [M_{rs}] \cdot [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [I_{s_{dq0}}] \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

Donc, on peut écrire:

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

Avec :

- $L_r, L_s$ : Les inductances cycliques statoriques et rotoriques de la machine ;
- $M$ : L'inductance mutuelle.

### II.3.4.3 Equation du couple électromagnétique:

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

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (I_{rd} \varphi_{sq} - I_{rq} \varphi_{sd}) \quad (\text{II.34})$$

Avec  $p$  - Le nombre de paires de pôles de la MADA.

Les puissances active et réactive statoriques sont :

$$\begin{cases} P = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

### II.3.5 Choix de repère de référence de Park :

Le choix d'un repère de référence dépend essentiellement du but de la modélisation et de la compatibilité des composantes du système étudié. Il existe trois repères biphasés de références [II 33, II 34]:

- ✓ le repère fixe au stator appelé référentiel stationnaire où :  $\frac{d\theta_s}{dt} = 0$  ;  $\frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -\omega$  Ce repère de référence est le mieux adapté pour les grandeurs instantanées. Il est utilisé pour l'étude des variations importantes de la vitesse de rotation de la machine.
- ✓ le repère fixe au rotor appelé référentiel tournant où:  $\frac{d\theta_r}{dt} = 0$  ;  $\frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta}{dt} = \omega$ . Ce repère de référence est adapté pour les problèmes des régimes transitoires où la vitesse de rotation est considérée comme constante.
- ✓ le repère fixe au champ tournant appelé référentiel tournant à la vitesse de pulsation synchrone où:  $\frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s = \omega_r + \omega$ . Dans ce repère, les composantes relatives de la machine sont

constantes, ce qui justifie sa large utilisation dans le domaine de la commande des machines asynchrones.

Vu les avantages que représente ce dernier repère de référence, il sera retenu dans notre étude.

### II.3.6 Modèle d'état de la MADA:

Le système d'équations de tensions de la machine peut être écrit sous la forme matricielle comme suit [II 16, II 17, II 18].

$$[\dot{X}] = [A].[X] + [B].[U] \quad (II.36)$$

$$\text{avec : } [X] = [\varphi_{sd} \quad \varphi_{sq} \quad i_{rd} \quad i_{rq}]^t; \quad [U] = [v_{sd} \quad v_{sq} \quad v_{rd} \quad v_{rq}]^t;$$

$$[A] = \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_s} & & w_s & \frac{M}{T_s} & 0 \\ & & \frac{-1}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} \\ \alpha & & -\beta(w_s - w_r) & -\delta & w_r \\ \beta(w_s - w_r) & & \alpha & -w_r & -\delta \end{bmatrix}; \quad [B] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{-M}{\sigma L_r L_s} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} & 0 \\ 0 & \frac{-M}{\sigma L_r L_s} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} \end{bmatrix}$$

$\alpha, \beta$  et  $\delta$  sont des constantes définies comme suit :

$$\alpha = \frac{M}{\sigma T_s L_s L_r}; \quad \beta = \frac{M}{\sigma L_s L_r}; \quad \delta = \frac{1}{\sigma} \left( \frac{1}{T_r} + \frac{M^2}{T_s L_r L_s} \right).$$

Pour faciliter la simulation, on décompose la matrice [A] comme suit :

$$[A] = [A_1] + w_s \cdot [A_2] + w_r \cdot [A_3] \quad (II.37)$$

Telle que :

$$[A_1] = \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} & 0 \\ 0 & \frac{-1}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} \\ \alpha & 0 & -\delta & 0 \\ 0 & \alpha & 0 & -\delta \end{bmatrix}, [A_2] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\beta & 0 & 0 \\ \beta & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, [A_3] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta & 0 & 1 \\ -\beta & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix},$$

### II.3.7 Résultats de simulation numérique du système:

La simulation de la machine asynchrone à double alimentation d'une puissance de 4 KW pour les deux modes de fonctionnement moteur et générateur a été exécutée à l'aide du logiciel MATLAB. Son modèle est basé sur les équations obtenues au moyen de la transformation de Park, (repère biphasé (d, q) lié au champ tournant). Les résultats de simulation sont représentés sur les figures ci-dessous.

#### II.3.7.1 Fonctionnement moteur:

Les figures II-14 et II-15 montrent les caractéristiques de la vitesse, du couple et des composantes du flux statorique. Le rotor de la machine est en court-circuit.

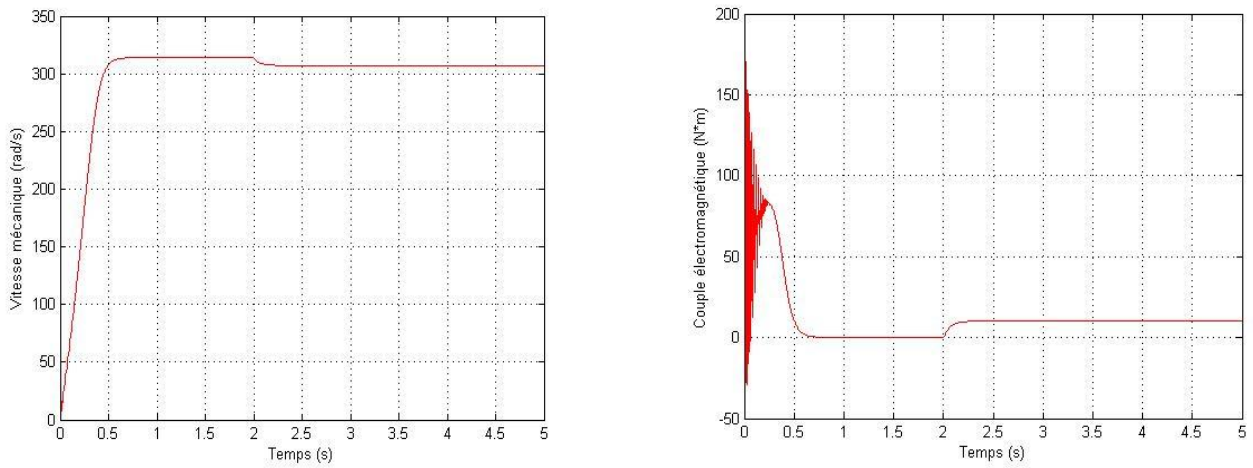


Figure II-14: Vitesse et le couple électromagnétique

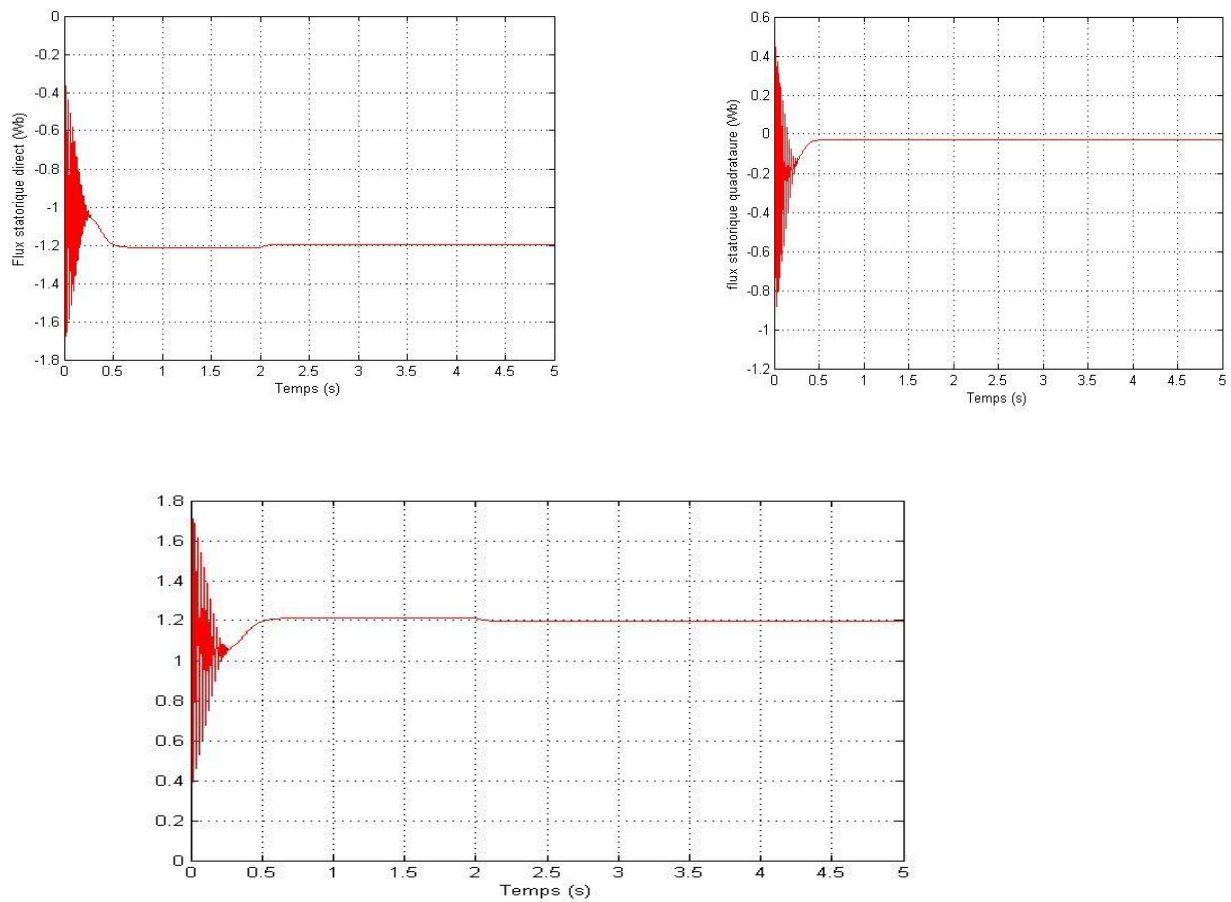


Figure II-15: Composantes du flux statorique et leur résultante.

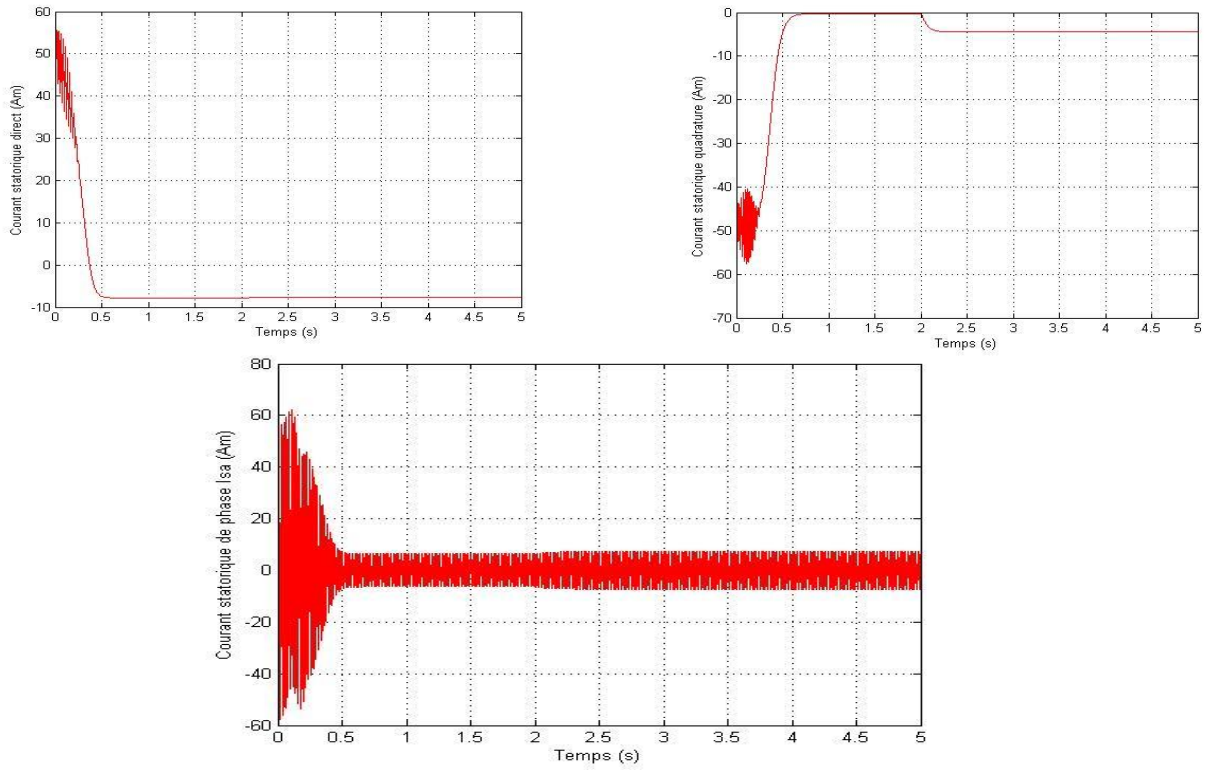


Figure II-16: Composantes du courant statorique.

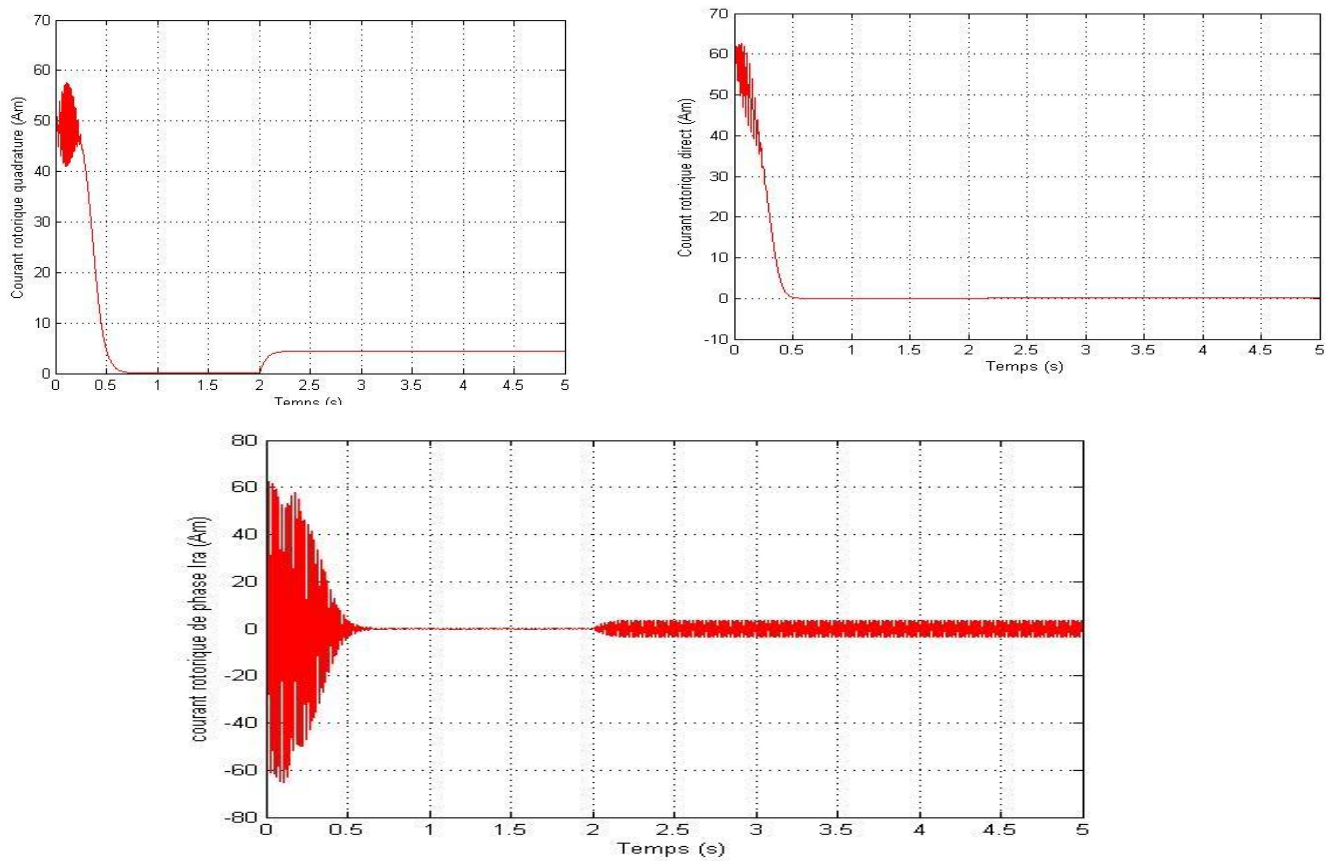


Figure II-17 : Composantes du courant rotorique

### II.3.7.2 Interprétation des résultats:

Au début, on a simulé par un démarrage à vide de la machine. On remarque que le régime transitoire est oscillatoire pour toutes les grandeurs de la machine. Dès que la machine atteint son régime permanent, Les fréquences des courants rotoriques deviennent presque nulles, (Figure II.17). En plus sa vitesse de rotation se rapproche de la vitesse du synchronisme (un très faible glissement), (Figure II.14). De plus, le couple électromagnétique et les courants rotoriques se stabilisent à des valeurs proches de zéro a cause de frottements visqueux.

L'application d'un couple résistant se traduit par des augmentations du couple électromagnétique, d'amplitudes des courants statoriques et rotoriques et une diminution de la vitesse de rotation à cause du glissement qui devient plus important. La machine fonctionne alors en moteur hypo synchrone.

#### II.3.7.2.1 Fonctionnement générateur:

Le rotor est alimenté par une source triphasée **12V** de fréquence égale à la fréquence de rotation.

Le stator est alimenté par une source triphasée de **220V** de fréquence **50Hz**.

La machine est entraînée à une vitesse fixe égale à **1425 tr/min**.

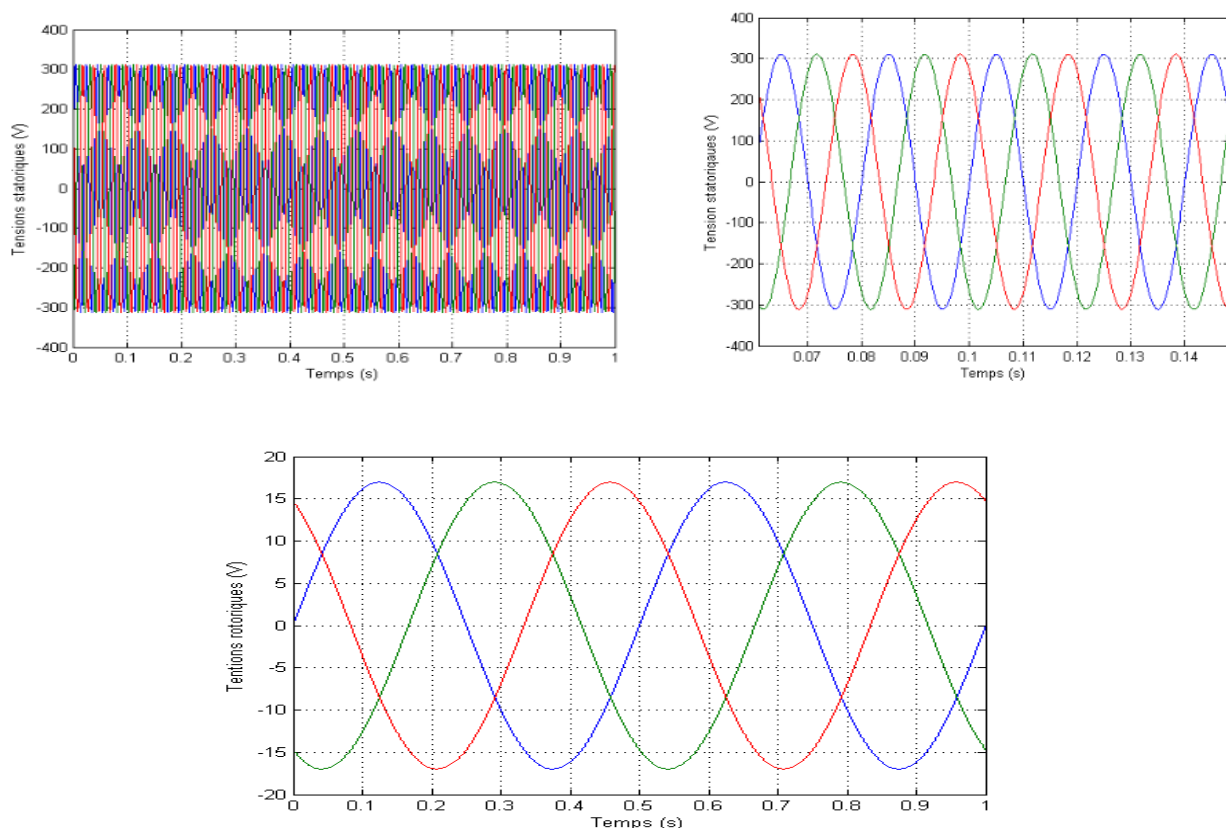


Figure II-18 : Les tensions d'alimentations au stator et au rotor.

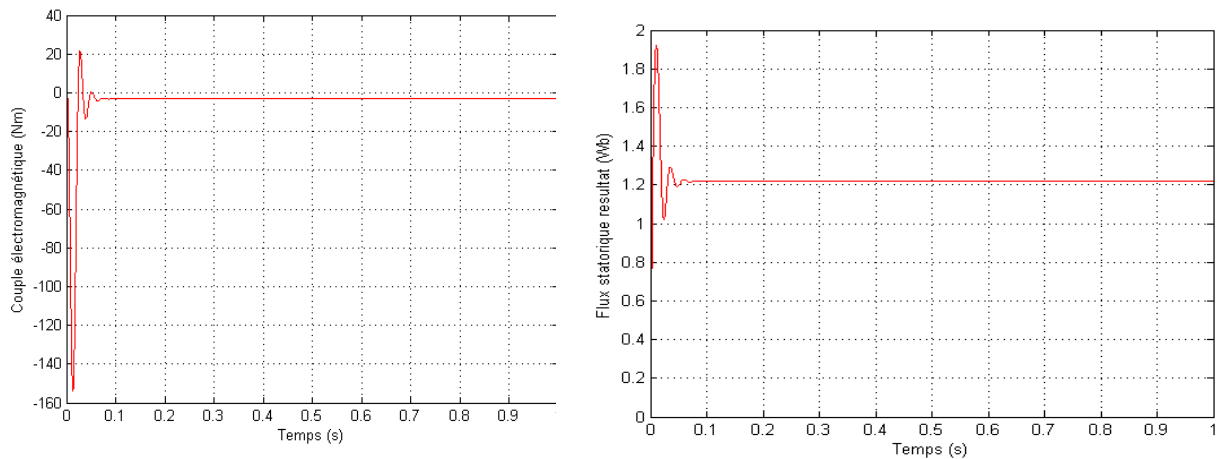


Figure II-19 : Le couple électromagnétique et le flux.

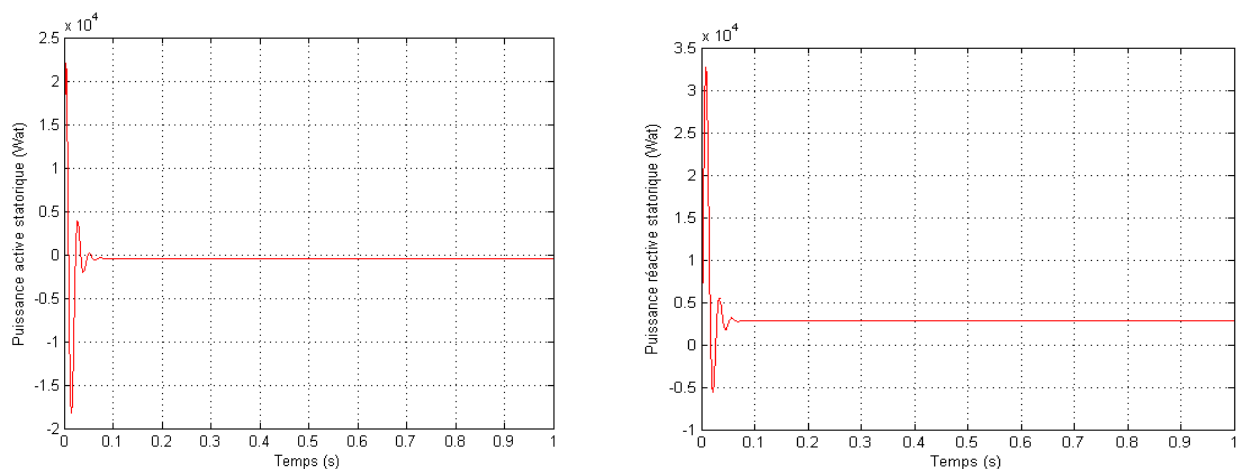


Figure II-20 : La puissance active et réactive statoriques.

#### II.3.7.4 Interprétation des résultats:

On remarque que pendant le régime dynamique, le couple électromagnétique est négatif et atteint au démarrage une valeur maximale *de*  $-150N.m$ . On constate ainsi l'importance des courants statoriques et rotoriques pendant le démarrage. Après un temps égal aux environs *de*  $0,05s$ , ces courants se stabilisent et prennent leurs formes sinusoïdales avec une fréquence de  $50Hz$ .

### II.4 L'onduleur à deux niveaux:

L'alimentation de la MADA nécessite l'utilisation d'un convertisseur statique pour l'entraîner à vitesse variable. Les onduleurs sont des convertisseurs statiques qui transforment une puissance électrique d'une forme continue en une puissance en forme alternative. La tension de sortie d'un onduleur a une forme d'onde périodique qui n'est pas sinusoïdale, mais qui peut être très proche de la

forme d'onde souhaitée avec une fréquence désirée. L'étude comprenait une alimentation parfaitement constante de l'onduleur, et donc l'incidence du rotor sur le réseau n'était pas traitée.

Dans cette partie, nous allons traiter l'alimentation continue de l'onduleur de tension. Ceci comprendra son maintien à la valeur désirée et la limitation des harmoniques injectées au réseau, le rotor de la MADA est alimenté par un onduleur de tension à deux niveaux équipé avec des dispositifs semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. Les six interrupteurs électroniques représentés, et que nous supposons parfaits, peuvent être des transistors (Bipolaires, MOSFET, IGBT) associés à des diodes en tête bêche, ou encore des thyristors équipés de circuit d'extinction en plus du dispositif d'amorçage [II 29].

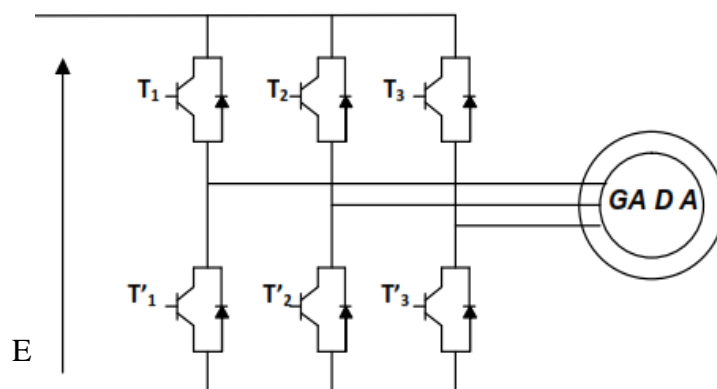


Figure II-21: Représentation d'un onduleur à deux niveaux.

#### II.4.1 Modélisation de l'onduleur à MLI:

L'onduleur de tension est un convertisseur qui permet d'obtenir une tension alternative de fréquence et valeur efficace fixe ou réglable à partir d'une source de tension continue et il est constitué de cellule de commutation généralement à transistor ou thyristor pour les grandes puissances. Pour sa commande, on utilise la commande par Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI). La structure à trois bras est présentée sur la figure II-22.

Pour assurer la continuité des courants alternatifs  $i_{sa}$ ,  $i_{sb}$ ,  $i_{sc}$  les interrupteurs ( $T_1$  et  $T'_1$ ), ( $T_2$  et  $T'_2$ ) et ( $T_3$  et  $T'_3$ ) doivent être contrôlés de manière complémentaire. Les tensions de sortie de l'onduleur  $V_{Ao}$ ,  $V_{Bo}$  et  $V_{Co}$  sont, par commodité, référencées par rapport à un point milieu d'un pont diviseur fictif d'entrée 'o'. Pour qu'elles soient identiques à  $1/3$  période près, il faut commander chaque interrupteur d'un demi-pont avec un retard de  $1/3$  période sur le précédent.

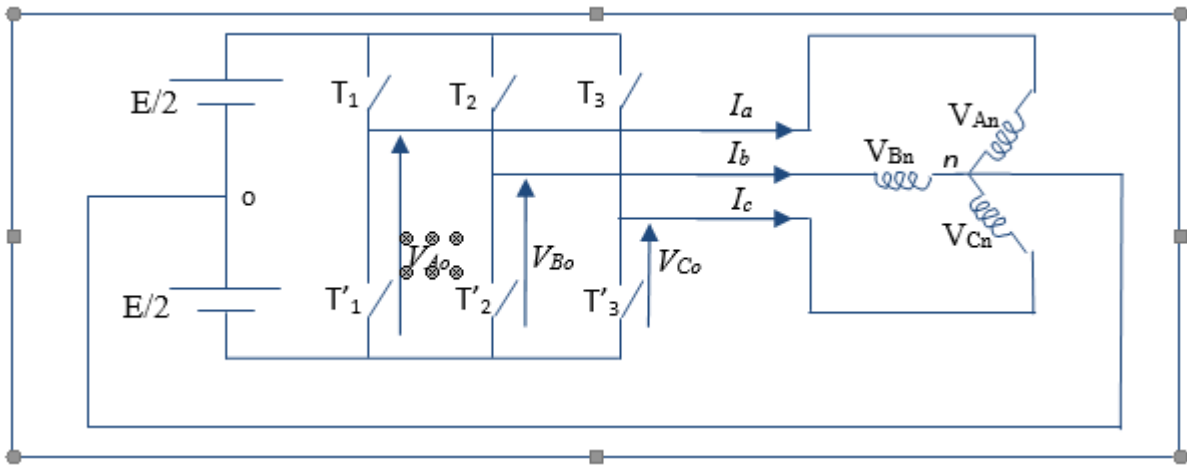


Figure II-22 : Schéma d'un onduleur de tension triphasé.

L'onduleur est alimenté par une source de tension continue constante d'amplitude E, on déduit aisément les expressions des tensions composés :

$$\begin{cases} V_{AB} = V_{Ao} - V_{Bo} \\ V_{BC} = V_{Bo} - V_{Co} \\ V_{CA} = V_{Co} - V_{Ao} \end{cases} \quad (II.38)$$

Les tensions simples des phases de la charge issues des tensions composées ont une somme nulle:

$$\begin{cases} V_{An} = \left(\frac{1}{3}\right) \cdot [U_{AB} - U_{CA}] \\ V_{Bn} = \left(\frac{1}{3}\right) \cdot [U_{BC} - U_{AB}] \\ V_{Cn} = \left(\frac{1}{3}\right) \cdot [U_{BC} - U_{AB}] \end{cases} \quad (II.39)$$

La matrice de connexion [T] de l'onduleur s'écrit :

$$[T] = \begin{bmatrix} T_1 & T'_1 \\ T_2 & T'_2 \\ T_3 & T'_3 \end{bmatrix} \quad (II.40)$$

Les tensions imposées de chaque bras de l'onduleur sont définies par :

$$\begin{bmatrix} V_{Ao} \\ V_{Bo} \\ V_{Co} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 & T'_1 \\ T_2 & T'_2 \\ T_3 & T'_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E \\ E \\ 0 \end{bmatrix} \quad (II.41)$$

En remplaçant les trois tensions composés  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$  et  $V_{CA}$  de l'équation (II.16) dans l'équation (II.17) on trouve :

$$\begin{cases} V_{An} = \frac{2}{3} \cdot V_{Ao} - \frac{1}{3} \cdot V_{Bo} - \frac{1}{3} V_{Co} \\ V_{Bn} = -\frac{1}{3} \cdot V_{Ao} + \frac{2}{3} \cdot V_{Bo} - \frac{1}{3} V_{Co} \\ V_{Cn} = -\frac{1}{3} \cdot V_{Ao} - \frac{1}{3} \cdot V_{Bo} + \frac{2}{3} V_{Co} \end{cases} \quad (II.42)$$

Peut être réécrite comme suit:

$$\begin{bmatrix} V_{An} \\ V_{Bn} \\ V_{Cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{Ao} \\ V_{Bo} \\ V_{Co} \end{bmatrix} \tag{II.43}$$

**II.4.2 Commande par modulation de largeur d’impulsion MLI:**

Le principe de la stratégie à modulation de largeur d’impulsions triangule sinusoïdale consiste à utiliser les intersections d’une onde de référence ou modulante avec une porteuse triangulaire. Ces deux signaux sont comparés. Le résultat de la comparaison sert à commander l’ouverture et la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance. Deux paramètres caractérisent cette stratégie:

- L’indice de modulation ‘m’ qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de la porteuse  $f_p$  sur la fréquence de la tension de référence  $f$ :

$$\implies m = \frac{f_p}{f} \quad f_p = m * f \tag{II.44}$$

- Taux de modulation ‘r’ qui est le rapport de l’amplitude de la tension de référence ( $V_{ref}$ ) et celle de la porteuse ( $U_p$ ) :

$$r = \frac{V_{ref}}{U_p} \tag{II.45}$$

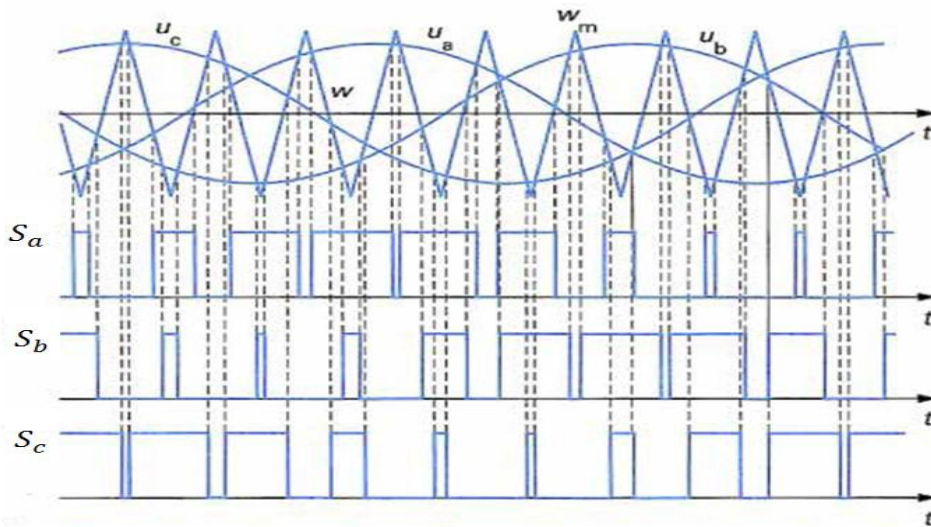


Figure II-23 : Principe de fonctionnement de la technique MLI triangulosinusoidale à une

### II.4.3 résultats de simulation:

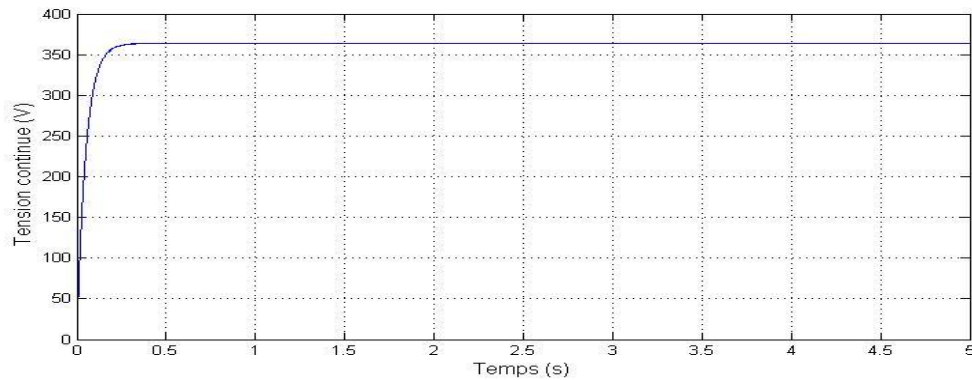


Figure II-24: tension continue.

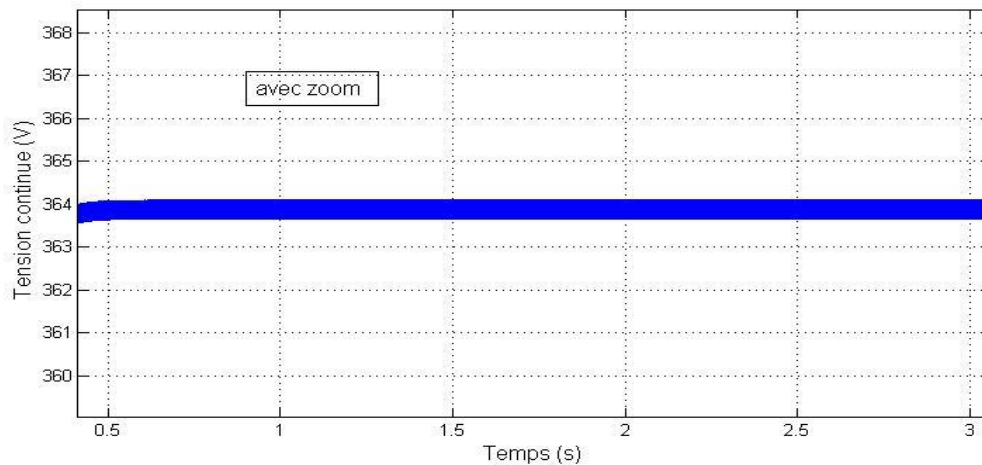


Figure II-25: tension de bus continu.

### II.4.4 Interprétation des résultats:

Les résultats de simulation montre que toutes les grandeurs et similaires à ceux trouvés avec une alimentation continu parfait, Un bon suivi de consigne pour les puissances actives et réactives statorique est constaté.

Il est clair que la tension continue suit l'allure de la tension de référence imposée II-24 II-25

Les courants du réseau suivent parfaitement leurs références. La tension à la sortie d'onduleur côté réseau est à deux niveaux ou son amplitude dépend de la valeur de la tension du bus continu qui est 364V. On constate que la tension d'entrée de l'onduleur à deux niveaux (E) atteint sa référence.

## II.5 Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons fait la modélisation de la turbine éolienne sa commande la MPPT indirecte pour maximiser le capteur de puissance pendant les faibles vitesses du vent et on a parlé de l'autre commande le "pitch control" pour limiter et nominaliser la puissance convertie pendant les fortes vitesses de vent.

En suit nous avons développé le modèle mathématique de la MADA dans un référentiel de PARK en vue d'étudier le comportement de cette machine dans les deux régimes (le régime permanent et transitoire).

Enfin, on est passé à la modélisation de l'alimentation de l'onduleur qui est un redresseur triphasé, ainsi qu'à sa commande afin de contrôler par la suite le bus continu et le maintenir à une valeur constante dans le but d'améliorer le facteur de puissance du côté réseau.

Les simulations de la MADA nous ont permis de mieux comprendre le fonctionnement de la machine asynchrone en mode génératrice.

Les modèles de la chaîne de conversion ont été simulés par le logiciel MATLAB. Les résultats de simulation obtenus sont similaires aux résultats précédent qui sont déjà publiés.

**BIBLIOGRAPHIE**

- [II 1] S. EL AIMANI, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension ». Thèse de doctorat, École Centrale De Lille 2004.
- [II 2] S. Abdeddaim, A. Betka, S. Drid, M. Becherif, « Implementation of MRAC controller of a DFIG based variable speed grid connected wind turbine ». *Energy Convers Manage.* 79 (2014), pp. 281–288.
- [II 3] A. Ourici, « Double flux orientation control for a doubly fed induction machine ». *Electrical Power and Energy Systems* 43 (2012) 617–620.
- [II 4] L. Louze, « Production décentralisée de l'énergie électrique: Modélisation et contrôle d'une génératrice asynchrone auto excitée ». Thèse de doctorat D'université mentouri - Constantine. 08/07/2010.
- [II 5] Endusa Billy Muhando, Member, IEEE, Tomonobu Senjyu, Senior Member, IEEE, « LQG Design for Megawatt-Class WECS With the DFIG Based on Functional Models' Fidelity Prerequisites ». *IEEE transactions on énergie conversion*, vol. 24, no. 4, December 2009.
- [II 6] B. Boukhezzar, H. Siguerdidjane, M. M. Hand, « Nonlinear control of variable-speed wind turbines for generator torque limiting and power optimization ». *Journal of Solar Energy Engineering*. Vol. 128, pp 516-530, ASME 2006.
- [II 7] V. Galdi, A. Piccolo, P. Siano \*, « Exploiting maximum energy from variable speed wind power generation systems by using an adaptive Takagi–Sugeno–Kang fuzzy model ». *Energy Conversion and Management*, vol: 50 (2009), PP. 413–421.
- [II 8] A. Abdelli, « Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive ». L'institut national polytechnique de Toulouse, 2007.
- [II 9] F.D. Bianchi, H. De Battista, R.J. Mantz, « Wind turbine control Systems, principles, modelling and Gain Scheduling Design ». Springer 2007.
- [II 10] V. Rogez, « Modélisation simplifiée de sources de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux. Application à l'intégration d'une production éolienne dans un réseau de distribution insulaire ». Thèse de Doctorat, Université D'Artois 2004.
- [II 11] N. Laverdure, « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires ». Thèse doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble 2005.
- [II 12] I. Munteanu, A. I. Bratcu, N.A Cutululis, E. Ceangă, « Optimal control of wind energy systems ». Springer 2008
- [II 13] S. Chekkal, N. Aouzellag Lahaçani, D. Aouzellag, K. Ghedamsi, « Fuzzy logic control strategy of wind generator based on the dual-stator induction generator ». *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 54, 2014, pp. 166-175.

- [II 14] S. Abdeddaim, A. Betka, « Optimal tracking and robust power control of the DFIG wind turbine ». *Int J Electr Power Energy Syst* 2013; 49(01), pp.: 234–242.
- [II 15] M. G. Molina, P. E. Mercado, « A new control strategy of variable speed win turbine generator for three-phase grid-connected applications ». *Power Systems Conference and Exposition*, vol.2, pp 759 – 764, IEEE 2008.
- [II 16] R. Rouabhi, R. Abdessemed, A. Chouder, A. Djerioui, « Hybrid Backstepping Control of a Doubly Fed Wind Energy Induction Generator ». *The Mediterranean Journal of Measurement and Control*, Vol: 11, N: 1, January 2015, pp. 367-376.
- [II 17] R. Rouabhi, , R. Abdessemed, A. Chouder, A. Djerioui, « Power Quality Enhancement of Grid Connected Doubly-Fed Induction Generator Using Sliding Mode Control ». *International Review of Electrical Engineering*, Vol: 10, N: 2, March-April 2015, pp. 266-276.
- [II 18] R. Rouabhi, A. Djerioui, « Control of the power generated by variable speed wind turbine driving a doubly fed induction generator ». *Journal of Electrical Engineering*, Vol: 14 /2014-Edition: 3, pp. 1-7.
- [II 19] N. Khezami, « Commande multimodèle optimale des éoliennes: Application à la participation des éoliennes au réglage de la fréquence ». Thèse de Doctorat, l'école centrale de Lille 2011.
- [II 20] Y. EL TOUS, « Pitch angle control of variable speed wind turbine ». *American J. of Engineering and Applied Sciences* 1 (2), pp 118-120, 2008.
- [II 21] S. Mokrane, « Modélisation et commande d'un aérogénérateur à machine asynchrone à double alimentation en vue de simulation des problèmes de cogénération ». Mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie, Université du Québec en Abitibi-Témiscaminque, Aout 2014.
- [II 22] N. Abu-tabak, « Stabilité dynamique des systèmes électriques multimachines: modélisation, commande, observation et simulation ». Thèse de Doctorat, École Centrale de Lyon 2008.
- [II 23] F. Boumaraf, « Commande D'un Aérogénérateur- Apport Des Techniques de L'intelligence Artificielle ». Thèse doctorat, Université de Batna, Alger, Le 24 Juin 2014.
- [II 24] D.Kairous, « Modélisation, Simulation et Commande d'un Système Éolien à Machine Asynchrone à Double Alimentation ». Thèse doctorat, l'Université d'Oran, Algérie 2013.
- [II 25] A. Dendouga, « Contrôle des puissances active et réactive de la machine à double alimentation (DFIM) ». Thèse doctorat, Université de Batna, Alger, Le 10/02/2010.
- [II 26] S. Hamecha, « Etude et commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à aimants Permanents». Thèse doctorat, Université de Tizi-Ouzou, Alger, Le 13 Juin 2013.

- [II 27] F. KENDOULI, « Centrale éolienne et qualité de énergies électrique ». Thèse doctorat, À l'Université Mentouri de Constantine 2012.
- [II 28] Y. Soufi <sup>a,\*</sup>, T. Bahi <sup>b</sup>, S. Lekhchine <sup>b</sup>, D. Dib <sup>a</sup>, « Performance analysis of DFIM fed by matrix converter and multi level inverter ». Energy Convers Manage. 72 (2013) 187–193.
- [II 29] R. ROUABHI, «Etude et commande d'une machine asynchrone à double alimentation application énergie éolienne», Mémoire De Magister, Université Ferhat Abbas Sétif ,2012.
- [II 30] K. Belmokhtar, M.L. Doumbia , K. Agbossou, « Novel fuzzy logic based sensorless maximum power point tracking strategy for wind turbine systems driven DFIG (doubly-fed induction generator) ». Energy, Vol. 76, 2012, pp. 679-693.
- [II 31] K. Ouari , T. Rekioua <sup>a,\*</sup>, M.Ouhrouche <sup>b</sup>, « Real time simulation of nonlinear generalized predictive Control for wind energy conversion system with nonlinear observer ». ISA Transactions, Vol. 53, 2014, pp.76-84
- [II 32] O. Bouhali, « Contribution des convertisseurs multi niveaux au raccordement d'origine éolienne sur un réseau électrique ». Thèse doctorat, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger 2008.
- [II 33] Y. Mihoub, « Commande floue adaptative de la machine asynchrone ». Thèse Doctorat, Université Mohamed Boudiaf d'Oran, 08 février 2012.
- [II 34] O. e-Mun, « Dynamic simulation of electric machinery using matlab/Simulink ». Printice hall, 1998.



## ***CHAPITRE III***

# ***COMMANDE VECTORIELLE, MODE GLISSANT ET LOGIQUE FLOUE D'UNE GADA***



## III.1 INTRODUCTION :

En ce qui concerne les commandes des machines électriques, les travaux de recherches orientent de plus en plus vers l'application des techniques de commande modernes. Ces techniques évoluent d'une façon vertigineuse avec l'évolution des calculateurs numériques et de l'électronique de puissance, donc nous proposons trois commandes, La commande vectorielle, la commande par mode glissant à base de gains et la commande par logique flou.

Ces trois commandes permettent de contrôler indépendamment les puissances active et réactive de la génératrice asynchrone double alimentation avec orientation du repère ( $d-q$ ) suivant le flux statorique.

La commande par mode glissant est l'une des techniques de commande non linéaire qui est caractérisée par sa robustesse et son efficacité. Elle consiste à commuter à l'aide des fonctions discontinues la structure du système dynamique de manière que le vecteur d'état suive une trajectoire  $S(x)=0$  dans l'espace [III 1].

Il s'agit d'une Commande à Structure Variable (CSV) qui dans la bibliographie du génie électrique porte le nom de commande par mode de glissement.

Les commandes CSV sont réputées pour être des commandes robustes vis à vis des variations paramétriques et peu gourmandes en temps de calcul [III 2].

La commande par mode glissant a connu un grand succès ces dernières années, Cela est dû à la simplicité de mise en œuvre et la robustesse par rapport aux incertitudes du système et des perturbations externes entachant le processus [III 3].

La logique floue suscite actuellement un intérêt général de la part des chercheurs, des ingénieurs et des industriels, et plus généralement de la part de tous ceux qui éprouvent le besoin de formaliser des méthodes empiriques, de généraliser des modes de raisonnement naturel, d'automatiser la prise de décision dans leur domaine et de construire des systèmes artificiels effectuant les tâches habituellement prises en charge par les humains.

### III.2 Commande vectorielle des puissances active et réactive :

Cette commande est l'une des méthodes utilisées pour optimiser la qualité d'énergie produite et injectée au réseau. Dans cette technique, nous proposons un algorithme de commande basé sur l'orientation du flux statorique de la machine qui met en évidence les relations entre les grandeurs des puissances statoriques et les tensions rotoriques générées par l'onduleur. Ces relations permettent l'action sur les signaux rotoriques afin de contrôler indépendamment l'échange des puissances active et réactive générées au stator de la machine.

Le principe de cette commande est similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée ; à savoir le contrôle indépendamment des puissances active et réactive générées au stator de la machine. La puissance active dépend uniquement du courant rotorique  $I_{rq}$ , et la puissance réactive dépend uniquement du courant  $I_{rd}$  (figure III.1) [III 4, III 5, III 6].

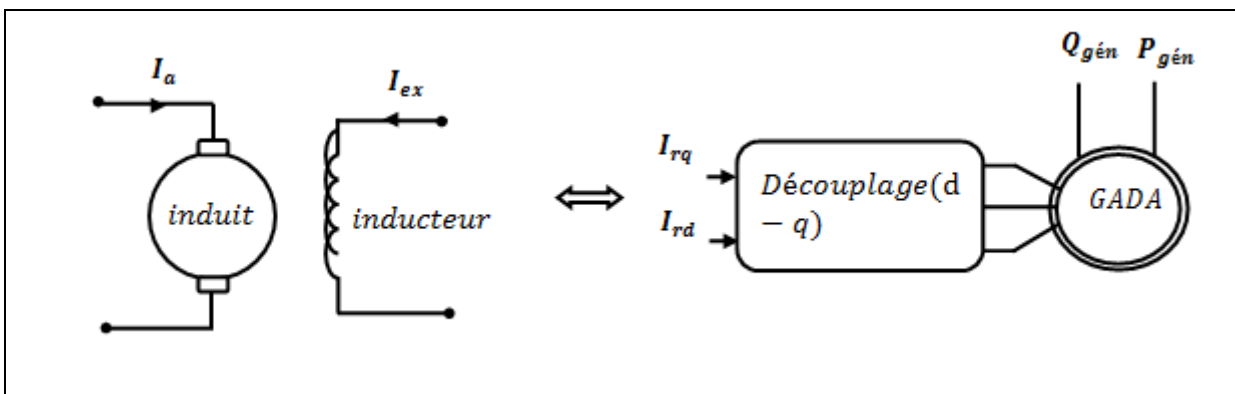


Figure III-1 : Principe de la commande vectorielle.

### III.3 Modèle de la MADA à flux statorique orienté :

Dans cette commande, la machine est conçue de telle façon à ce que le flux statorique dans le repère de Park suivant l'axe  $q$  soit nul. Ce choix est justifié par le fait que la machine est souvent couplée à un réseau de tension et de fréquence constante [III 7, III8, III9, III10, III11].

Rappelons le système d'équations différentielles (II.31) décrivant la machine asynchrone dans un repère lié au champ tournant qui est donné par :

## CHAPITRE III COMMANDE VECTORIELLE, MODE GLISSANT ET LOGIQUE FLOU D'UNE GADA

---

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

Avec un flux statorique direct constant  $\varphi_{sd} = \varphi_s$ .

Et un flux statorique en quadrature orienté  $\varphi_{sq} = 0$ .

Ces équations peuvent être simplifiées comme suit :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \omega_s \varphi_s \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III. 2})$$

Si on néglige la résistance  $R_s$ , qui est une hypothèse souvent acceptée pour les machines de grande puissance utilisée dans la production d'énergie éolienne, les équations des tensions de la machine se réduisent à la forme suivante [III 9, III 10, III 12] :

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \cdot \varphi_s \\ V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III. 3})$$

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

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = \varphi_s = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ 0 = L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (\text{III. 4})$$

### III.3.1 Relations entre le courant statoriques et rotoriques:

A partir des équations des composantes directes et en quadrature du flux statorique, les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques seront :

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{rd} \\ I_{sq} = -\frac{M}{L_s} I_{rq} \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

### III.3.2 Relations entre les puissances statoriques et courants rotoriques:

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

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

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

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

En remplaçant les courants statoriques directs et en quadratures par leurs expressions dans les équations des puissances active et réactive, on trouve :

$$\begin{cases} P_s = -\frac{V_s \cdot M}{L_s} \cdot I_{rq} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s \cdot L_s} - \frac{V_s \cdot M}{L_s} \cdot I_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

Il ressort de l'expression (III.8) que le contrôle des puissances active et réactive au stator est découplé. En effet, avec une inductance magnétisante constante et un réseau électrique puissant, la puissance active sera directement proportionnelle au courant rotorique d'axe  $q$  et la puissance réactive proportionnelle au courant rotorique d'axe  $d$  à une constante près  $\frac{V_s^2}{\omega_s \cdot L_s}$  imposée par le réseau.

### III.3.3 Relations entre les tensions et courants rotoriques:

A partir du système d'équation (III. 5), les expressions des flux rotoriques peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{rd} + \frac{V_s \cdot M}{\omega_s \cdot L_s} \\ \varphi_{rq} = \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{rd} \end{cases} \quad (III. 9)$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{rd}}{dt} - g \cdot \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{rq}}{dt} + g \cdot \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{rd} + g \cdot \frac{V_s \cdot M}{L_s} \end{cases} \quad (III. 10)$$

En régime permanent, les dérivées des courants rotoriques biphasés s'annulent, ce qui nous permet d'écrire :

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

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

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

$V_{rd}$  et  $V_{rq}$  sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus

Avec :

$\left( \frac{V_s \cdot M}{L_s} \right)$ : Le terme de couplage entre les deux axes

$g \cdot \left(\frac{M^2}{L_s}\right)$ : Représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation.

### III.3.4 Etablissement des angles nécessaires aux transformations :

Pour déterminer l'angle de transformation de Park pour les grandeurs statoriques, une méthode simple consiste à appliquer la matrice de Concordia aux tensions statoriques pour extraire la phase  $\theta_s$  que forme le vecteur de tension avec l'axe de la première phase du stator.

Afin d'aligner le flux statorique avec l'axe  $d$ , nous retranchons  $\frac{\pi}{2}$  de cet angle. Cette méthode est fiable si les tensions statoriques ont des fréquences stables avec peu de fluctuations pour pouvoir effectuer une mesure précise.

Le rotor forme un angle  $\theta_m$  avec la phase A du stator, l'angle  $\theta_r$  nécessaire aux transformations des grandeurs rotoriques sera donc :  $\theta_r = \theta_{sn} - \theta_m$  [III 13].

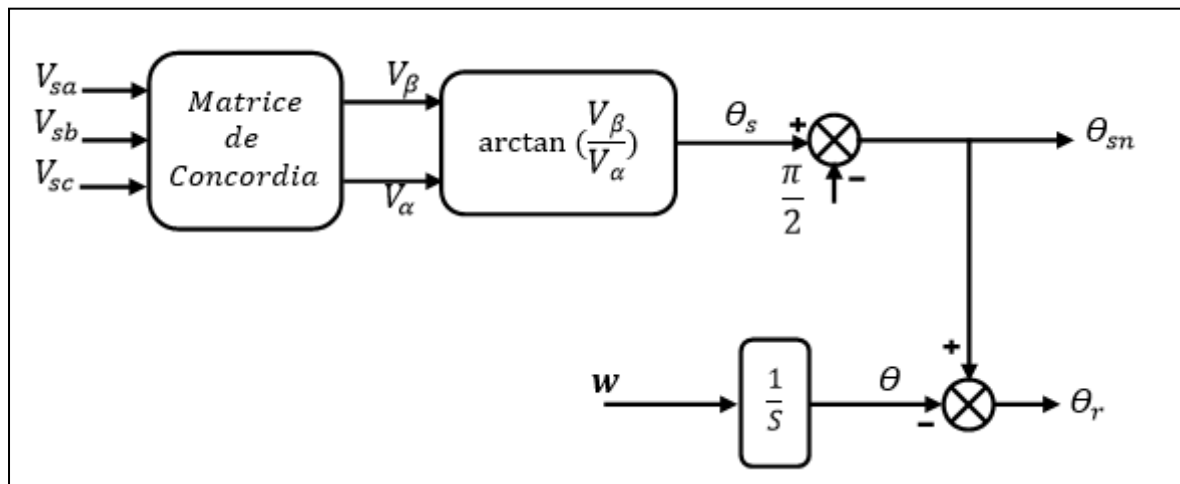


Figure III-2 : Calcul des angles de transformations

### III.3.5 Les différentes techniques de la commande vectorielle :

On a deux types directe et indirect :

*a- Commande indirecte :*

Cette technique est basée sur deux structures : l'une utilise une boucle régulant le courant, alors que l'autre est basée sur la première en lui ajoutant une boucle régulant les puissances.

## CHAPITRE III COMMANDE VECTORIELLE, MODE GLISSANT ET LOGIQUE FLOU D'UNE GADA

### b- Commande indirecte sans boucle de puissance :

Cette commande ne consiste pas à réguler directement les puissances comme la commande précédente, mais elle est basée sur la régulation indirecte des courants rotoriques mesurés qui seront asservis avec les courants de références déjà déterminés par les puissances statoriques de références imposés à la machine [III 14, III 13].

$$\begin{cases} I_{rq}^{ref} = -\frac{L_s}{V_s \cdot M} \cdot P_s^{ref} \\ I_{rd}^{ref} = \frac{V_s}{\omega_s \cdot M} - \frac{L_s}{V_s \cdot M} \cdot Q_s^{ref} \end{cases} \quad (III. 13)$$

Les régulateurs de cette structure sont calculés de la même façon que pour la commande directe, Ils sont identiques pour chaque axe. Nous obtenons ainsi la structure de commande présentée sur la figure ci-dessous.

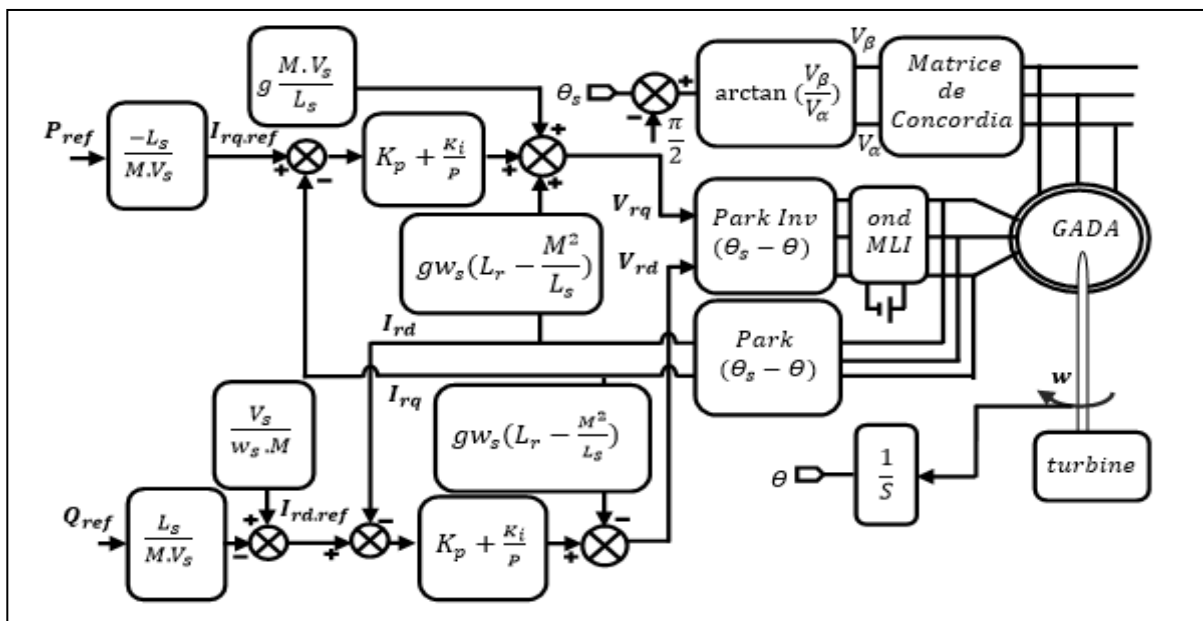


Figure III-3 : Schéma bloc de la structure de commande indirecte par orientation du flux statorique.

### III.4 Généralités sur la théorie du contrôle par mode de glissement

En utilisant [III 15], [III 3] la commande par mode de glissement dans les systèmes à structure variable on peut trouver trois configurations de base pour la synthèse des différentes commandes.

## CHAPITRE III COMMANDE VECTORIELLE, MODE GLISSANT ET LOGIQUE FLOU D'UNE GADA

La première correspond à la structure la plus simple où la commutation a lieu au niveau de l'organe de commande lui-même. On l'appelle a, structure par commutation au niveau de l'organe de commande. La deuxième structure fait la commutation au niveau d'une contre réaction d'état.

Et en fin, la dernière structure est une structure par commutation au niveau de l'organe de commande, avec ajout de la commande équivalente.

### III.4.1 Structure par commutation au niveau de l'organe de commande :

Sur la figure (III-4) on voit le schéma d'une structure par commutation au niveau de l'organe de commande, Cette structure de commande est la plus classique et la plus usitée Elle correspond au fonctionnement tout ou rien des interrupteur de puissance associés dans une grande majorité d'application aux variations de vitesse .Elle a été utilisé pour la commande de moteur pas à pas.

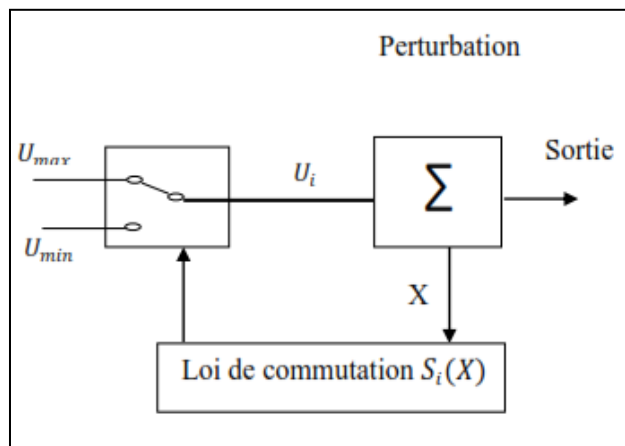


Figure III-4 : Structure de régulation par commutation au niveau de l'organe de commande.

### II.4.2 Structure par commutation au niveau d'une contre réaction d'état :

Les schémas de cette structure dans la figure (III-5), c'est la structure la moins exigeante au niveau de la sollicitation de la commande.

Elle à été appliqué dans la commande de moteur sa courant continu et à aimants permanents, ainsi que dans la commande de machines à induction.

Un ouvrage a été consacré à ce type de commande. Elle s'appuie sur la commande par contre réaction d'état classique où le réglage de la dynamique du système est réalisé par les gains de réglage.

## CHAPITRE III COMMANDE VECTORIELLE, MODE GLISSANT ET LOGIQUE FLOU D'UNE GADA

La non linéarité provient de la commutation entre les gains donc on crée une commutation au niveau de la dynamique du système.

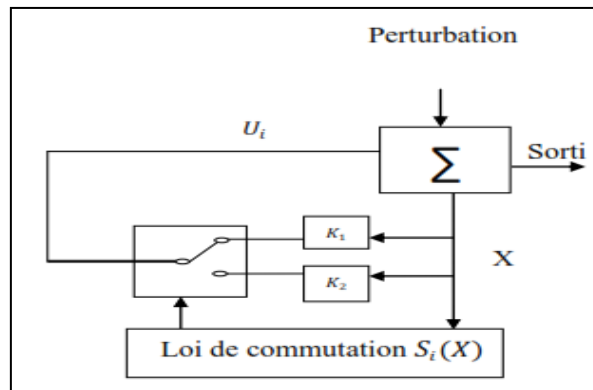


Figure. III-5 : Structure de régulation par commutation au niveau d'une contre réaction d'état.

### III.4.3 Structure par commutation au niveau de l'organe de commande avec ajout de la commande équivalente :

Cette structure, présente un réel avantage. Elle permet de repositionner l'état futur du système grâce à la commande équivalente qui n'est rien d'autre que la valeur désirée du système en régime permanent.

L'organe de commande est beaucoup moins sollicité, mais est plus dépendant des variations paramétriques du fait de l'expression de cette commande équivalente :

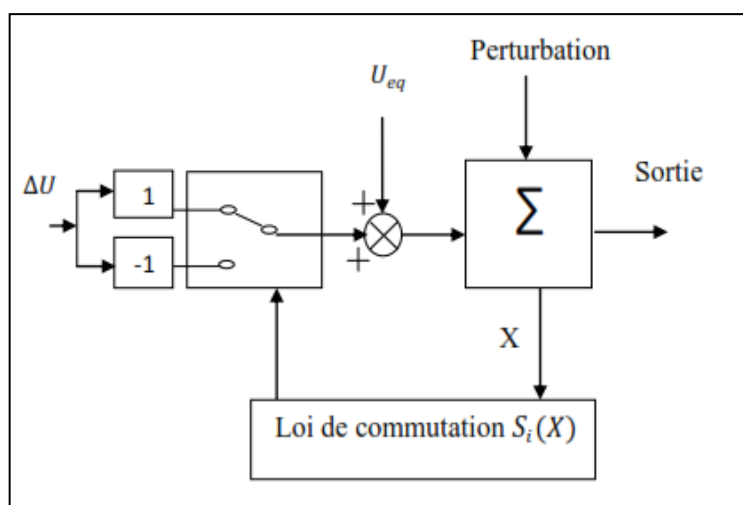


Figure III-6 : Structure de régulation par commutation au niveau de l'organe de commande avec ajout de la commande équivalente.

### **III.5 Principe du contrôleur à mode glissant :**

Elle est une classe de la commande à structure variable elle est efficace et robustes pour les systèmes linéaires et non linéaires.

La tâche principale de la commande par mode glissant, est de fournir une surface de commutation, selon des lois d'existence, de convergence et des stabilités. La surface de commutation peut être atteinte par la trajectoire d'état grâce aux changements appropriés de la structure du système commandé.

Le but de la commande par mode glissant est que la trajectoire d'état soit attiré vers une surface de glissement défini  $S$  (Sliding Surface) et glisse autour d'elle.

Une fois la surface de glissement est atteinte, la dynamique du système reste insensible aux variations des paramètres du processus, et aux perturbations externes.

### **III.6 Applications de la commande mode glissant à la MADA:**

Cette commande est appliquée au système de conversion d'énergie éolienne à base d'une génératrice asynchrone à double alimentation est une commande robuste qui résout beaucoup de problèmes liés aux incertitudes et aux variations du système à régler. L'objectif de ce travail est d'appliquer cette commande pour contrôler indépendamment des puissances active et réactive générées par la machine asynchrone à flux orienté. Les résultats de simulations numériques obtenus montrent l'intérêt croissant d'une telle commande dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne

#### **II.6.1 Modèle de la génératrice asynchrone double alimentation GADA:**

Le modèle utilisé est le modèle à flux statorique orienté présenté précédemment dont les grandeurs électriques sont toutes exprimées dans un repère fixe lié au stator au repère  $(d, q)$ . Le modèle d'état:

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \cdot \varphi_s \\ V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III. 14})$$

**A- RELATIONS ENTRE PUISSANCES STATORIQUES ET COURANTS ROTORIQUES:**

$$\begin{cases} P_s^{ref} = - \frac{V_s \cdot M}{L_s} \cdot I_{rq}^{ref} \\ Q_s^{ref} = \frac{V_s^2}{\omega_s \cdot L_s} - \frac{V_s \cdot M}{L_s} \cdot I_{rd}^{ref} \end{cases} \quad (III. 15)$$

$$\begin{cases} I_{rq}^{ref} = - \frac{L_s}{V_s \cdot M} \cdot P_s^{ref} \\ I_{rd}^{ref} = \frac{V_s}{\omega_s \cdot M} - \frac{L_s}{V_s \cdot M} \cdot Q_s^{ref} \end{cases} \quad (III. 16)$$

**B- EQUATIONS DES DERIVEES DE COURANTS ROTORIQUES :**

$$\begin{cases} \frac{dI_{rd}}{dt} = (V_{rd} - R_r \cdot I_{rd} + g \cdot \omega_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rq}) \cdot \frac{1}{L_r \sigma} \\ \frac{dI_{rq}}{dt} = (V_{rq} - R_r \cdot I_{rq} - g \cdot \omega_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rd} - g \cdot \omega_s \cdot \frac{M \cdot V_s}{\omega_s \cdot L_s}) \cdot \frac{1}{L_r \sigma} \end{cases} \quad (III. 17)$$

**III.6.2 Choix des surfaces de glissements :**

La puissance active sera directement proportionnelle au courant rotorique d'axe **q**, et la puissance réactive proportionnelle au courant rotorique d'axe **d**. Pour contrôler la puissance, on prend  $r = 1$ .

Les expressions de la surface de contrôle des puissances active et réactive sont :

$$s(P) = (I_{rq}^{ref} - I_{rq}) \quad (III. 18)$$

$$s(Q) = (I_{rd}^{ref} - I_{rd}) \quad (III. 19)$$

**III.6.3 CONDITIONS DE CONVERGENCES :**

Pour assurer la convergence des variables choisies vers leurs valeurs de référence, il faut que les deux surfaces de glissement soient nulles.

$$\begin{cases} s(P) = 0 \\ s(Q) = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{d}{dt} (I_{rq}^{ref} - I_{rq}) = 0 \\ \frac{d}{dt} (I_{rd}^{ref} - I_{rd}) = 0 \end{cases} \quad (III. 20)$$

Dès que les conditions de convergences sont satisfaites, les puissances active et réactive tendent exponentiellement vers leurs valeurs de références, et pour suivre ces valeurs, il suffit de rendre la surface de glissement attractive et invariante.

Le mode glissant est réalisé à condition que la relation d'attractivité de LYAPONOV soit inférieure à zéro ; c'est à dire  $s(X) \cdot \dot{s}(X) \leq 0$

### III.6.4 LOI DE COMMANDE PAR MODE GLISSANT :

L'algorithme de commande est défini par les relations :

$$V_{rq} = V_{rq-Equi} + V_{rq-attr} \quad (III. 21)$$

$$V_{rd} = V_{rd-Equi} + V_{rd-attr} \quad (III. 22)$$

avec :  $V_{rq}, V_{rd}$  : Les tensions de commandes ;

$V_{rq-Equi}, V_{rd-Equi}$  : Les tensions de commandes équivalentes ;

$V_{rq-attr}, V_{rd-attr}$  : Les tensions de commandes de commutations.

❖ **CONTROLE DE LA PUISSANCE ACTIVE:**

Pour contrôler la puissance active, on prend  $r = 1$ . L'expression de la surface de glissement devient :

$$s(P) = (I_{rq}^{ref} - I_{rq}) \quad (III. 23)$$

Sa dérivée est :

$$\dot{s}(P) = (\dot{I}_{rq}^{ref} - \dot{I}_{rq}) \quad (III. 24)$$

En remplaçant les dérivées des courants et des courants de références  $\dot{I}_{rq}^{ref}$  et  $\dot{I}_{rq}$  par leurs expressions données par les équations (III. 16) et (III. 17), on obtient :

$$\dot{s}(P) = \left( -\frac{L_s}{M \cdot V_s} \cdot \dot{p}_s^{ref} - \frac{1}{L_r \sigma} \cdot \left( V_{rq} - R_r \cdot I_{rq} - g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rd} - g \cdot \frac{M \cdot V_s}{L_s} \right) \right) \quad (III. 25)$$

$$\dot{s}(P) = \left( -\frac{L_s}{M \cdot V_s} \cdot \dot{p}_s^{ref} - \frac{1}{L_r \sigma} \cdot V_{rq} - \frac{1}{L_r \sigma} \cdot \left( -R_r \cdot I_{rq} - g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rd} - g \cdot \frac{M \cdot V_s}{L_s} \right) \right) \quad (III. 26)$$

$$\dot{s}(P) = -v_1 \operatorname{sgn}(s(P)) \quad (\text{III. 27})$$

$$-\frac{L_s}{M \cdot V_s} \dot{p}_s^{ref} - \frac{1}{L_r \sigma} V_{rq} - \frac{1}{L_r \sigma} \left( -R_r \cdot I_{rq} - g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rd} - g \frac{M \cdot V_s}{L_s} \right) = -v_1 \cdot \operatorname{sgn}(s(P)) \quad (\text{III. 28})$$

$$V_{rq} = -\frac{L_s \cdot L_r \sigma}{M \cdot V_s} \cdot \dot{p}_s^{ref} - \left( -R_r \cdot I_{rq} - g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rd} - g \cdot \frac{M \cdot V_s}{L_s} \right) + L_r \cdot \sigma \cdot v_1 \cdot \operatorname{sgn}(s(P)) \quad (\text{III. 29})$$

$$V_{rq} = -\frac{L_s \cdot L_r \sigma}{M \cdot V_s} \cdot \dot{p}_s^{ref} + R_r \cdot I_{rq} + g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rd} + g \cdot \frac{M \cdot V_s}{L_s} + L_r \cdot \sigma \cdot v_1 \cdot \operatorname{sgn}(s(P)) \quad (\text{III. 30})$$

$$\begin{cases} V_{rq-Equi} = -\frac{L_s \cdot L_r \sigma}{M \cdot V_s} \cdot \dot{p}_s^{ref} + R_r \cdot I_{rq} + g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rd} + g \cdot \frac{M \cdot V_s}{L_s} \\ V_{rq-attr} = L_r \cdot \sigma \cdot v_1 \cdot \operatorname{sgn}(s(P)) \end{cases} \quad (\text{III. 31})$$

❖ **CONTROLE DE LA PUISSANCE REACTIVE:**

De la même manière que précédemment, pour contrôler la puissance réactive on prend  $r = 1$ . L'expression de la surface de glissement devient :

$$s(Q) = (I_{rd}^{ref} - I_{rd}) \quad (\text{III. 32})$$

Sa dérivée est:

$$\dot{s}(Q) = (\dot{i}_{rd}^{ref} - \dot{i}_{rd}) \quad (\text{III. 33})$$

En remplaçant les dérivées des courants et des courants de références  $\dot{i}_{rd}^{ref}$  &  $\dot{i}_{rd}$  par leurs expressions données par les équations (III. 32) et (III. 33), on obtient :

$$\dot{s}(Q) = \left( \left( \frac{V_s}{w_s \cdot M} - \frac{L_s}{V_s \cdot M} \cdot \dot{Q}_s^{ref} \right) - \frac{1}{L_r \sigma} (V_{rd} - R_r \cdot I_{rd} + g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rq}) \right) \quad (\text{III. 34})$$

$$\dot{s}(Q) = \left( \left( \frac{V_s}{w_s \cdot M} - \frac{L_s}{V_s \cdot M} \cdot \dot{Q}_s^{ref} \right) - \frac{1}{L_r \sigma} V_{rd} - \frac{1}{L_r \sigma} (-R_r \cdot I_{rd} + g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rq}) \right) \quad (\text{III. 35})$$

$$\dot{s}(Q) = -v_2 \cdot \operatorname{sgn}(s(Q)) \quad (\text{III. 36})$$

$$\left( \frac{V_s}{w_s \cdot M} - \frac{L_s}{V_s \cdot M} \dot{Q}_s^{ref} \right) - \frac{1}{L_r \sigma} V_{rd} - \frac{1}{L_r \sigma} (-R_r \cdot I_{rd} + g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rq}) = -v_2 \cdot \text{sgn}(s(Q)) \quad (\text{III. 37})$$

$$V_{rd} = L_r \sigma \left( \frac{V_s}{w_s \cdot M} - \frac{L_s}{V_s \cdot M} \dot{Q}_s^{ref} \right) - (-R_r \cdot I_{rd} + g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rq}) + L_r \cdot \sigma \cdot v_2 \cdot \text{sgn}(s(Q)) \quad (\text{III. 38})$$

$$V_{rd} = L_r \sigma \left( \frac{V_s}{w_s \cdot M} - \frac{L_s}{V_s \cdot M} \dot{Q}_s^{ref} \right) + R_r \cdot I_{rd} - g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rq} + L_r \cdot \sigma \cdot v_2 \cdot \text{sgn}(s(Q)) \quad (\text{III. 39})$$

$$\begin{cases} V_{rd-Equi} = L_r \sigma \left( \frac{V_s}{w_s \cdot M} - \frac{L_s}{V_s \cdot M} \dot{Q}_s^{ref} \right) + R_r \cdot I_{rd} - g \cdot w_s \cdot L_r \cdot \sigma \cdot I_{rq} \\ V_{rd-attr} = L_r \cdot \sigma \cdot v_2 \cdot \text{sgn}(s(Q)) \end{cases} \quad (\text{III. 40})$$

Les équations (III. 31), (III. 40) permettent d'établir un schéma bloc de commande par mode glissant appliqué à une génératrice asynchrone double alimentation, figure (III-7).

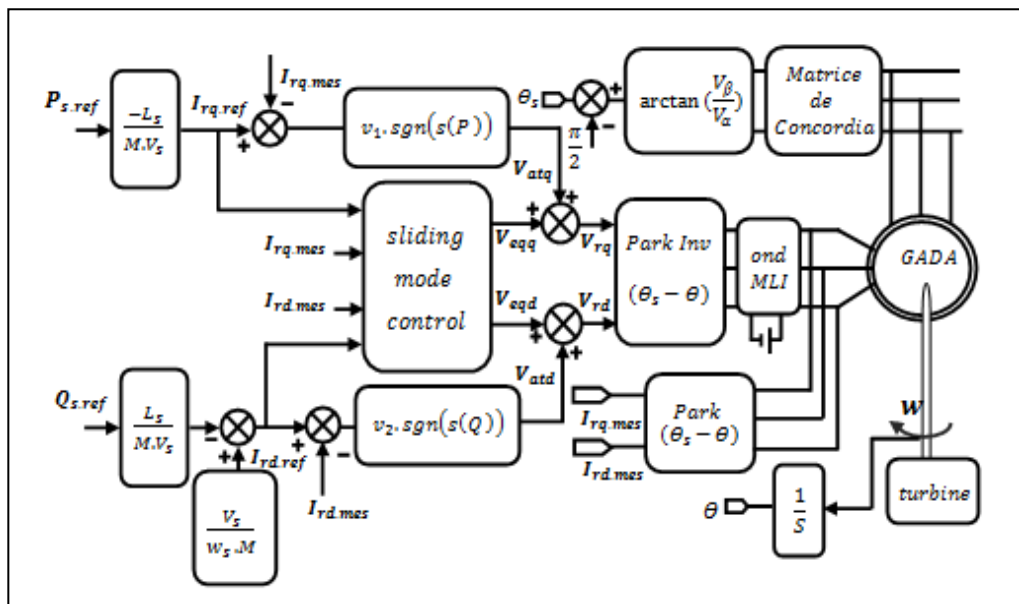


Figure III-7 : Schéma bloc de la structure de commande par mode glissant.

## **III.7 COMMANDE PAR LA LOGIQUE FLOUE DES PUISSANCES ACTIVE ET REACTIVE :**

### **III.7.1 LA LOGIQUE FLOU :**

La logique floue est une technique pour le traitement de connaissances imprécises basées, sur des termes linguistiques ; elle donne les moyens de convertir une commande linguistique basée sur le raisonnement humain, en une commande automatique, permettant ainsi la commande des systèmes complexes dont les informations sont exprimées d'une façon vague et mal définie.

Dans le domaine du génie électrique, la commande à logique floue a fait l'objet de plusieurs travaux : dans la commande des convertisseurs statiques et dans la commande des machines électriques, dans la navigation de robots mobiles. Toutes ces applications ont démontré qu'un régulateur à logique floue est plus robuste qu'un régulateur conventionnel, [III 16].

Les performances que la commande floue peut apporter par comparaison avec les commandes classiques, sont essentiellement dues à la méthode de conception de ces régulateurs. En effet, ces derniers ne nécessitent pas la connaissance des modèles mathématiques du système. Par contre ils ont besoin d'un ensemble de règles basées essentiellement sur les connaissances d'un opérateur qualifié manipulant le système.

Afin de pouvoir appliquer la technique de la logique floue à la commande d'une machine électrique en vitesse nous allons intéresser de plus près à cette technique.

Dans ce contexte, on se limitera aux propriétés essentielles de la commande par logique floue qui n'utilise qu'une petite partie de toutes les règles existantes de la théorie de la logique floue.

### **III.7.2 PRINCIPE DE LA LOGIQUE FLOUE :**

La commande floue a pour but de traiter des problèmes de commande de processus à partir uniquement de connaissances de comportement que les spécialistes du procédé doivent formuler sous forme linguistique (floue) [III 17].

### **III.7.3 ELEMENT DE BASE DE LA LOGIQUE FLOUE :**

Dans cette section, nous présentons les notions de base de la logique floue. Nous aborderons uniquement les points les plus importants pour la compréhension d'un raisonnement flou.

# CHAPITRE III COMMANDE VECTORIELLE, MODE GLISSANT ET LOGIQUE FLOU D'UNE GADA

## III.7.3.1 ENSEMBLE FLOUE :

La théorie des ensembles flous est une théorie mathématique dont l'objectif principal est la modélisation des notions vagues et incertaines du langage naturel. Elle évite les inadéquations de la théorie des ensembles classiques quant au traitement de ce genre de connaissances. La fonction d'appartenance d'un ensemble classique  $A$  est définie par [III 17].

Par contre dans la théorie des ensembles flous, un élément peut plus ou moins appartenir à un ensemble, le degré d'appartenance d'un élément à un ensemble flou peut prendre n'importe quelle valeur comprise dans l'intervalle  $[0,1]$ .

## III.7.3.2 VARIABLES LINGUISTIQUES :

La notion de variable linguistique permet de modéliser les connaissances imprécises ou vagues sur une variable dont la valeur précise est inconnue. Une variable linguistique, ou variable floue, est donc une variable dont les valeurs appartiennent à des ensembles flous pouvant représenter des mots du langage naturel. Ainsi une variable floue peut prendre simultanément plusieurs valeurs linguistiques.

Par exemple la variable « Taille » peut appartenir aux ensembles flous " Petit, Moyen, Grand ". La variable linguistique peut être représentée par un triplet  $(x, T(x), U)$ , dans lequel  $x$  est le nom de la variable linguistique,  $T(x)$  l'ensemble des noms des valeurs linguistiques de  $x$  et  $U$  l'ensemble de référence (univers de discours). Par exemple :  $x = \text{Vitesse}$  est une variable linguistique, son ensemble de valeurs peut être :

$T(\text{Vitesse}) = [\text{Faible}, \text{Moyenne}, \text{Elevée}, \dots]$  où chaque terme dans  $T(\text{Vitesse})$  est caractérisé par un ensemble flou dans un univers de discours  $U = [0, 100]$ .

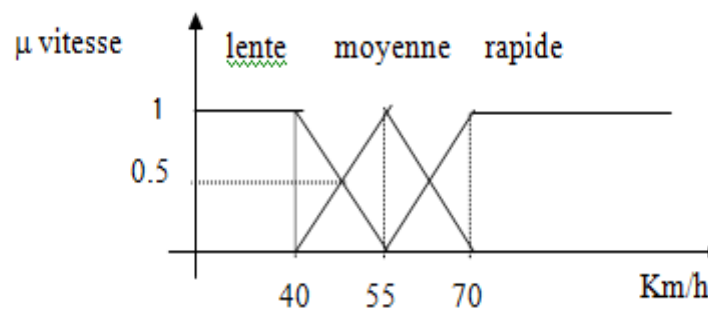


Figure III-8 Représentation floue de la variable Vitesse.

### III.7.3.3 FONCTIONS D'APPARTENANCE :

On attribue à chaque valeur de la variable linguistique des fonctions d'appartenance  $\mu$ , dont la valeur varie entre 0 et 1, en tenant compte de la classification en un certain nombre d'ensembles flous le plus souvent, on utilise pour les fonctions d'appartenance de forme trapézoïdales ou triangulaires, rectangulaires ou de type singleton. Il s'agit des formes les plus simples (figure III-9), [III 17].

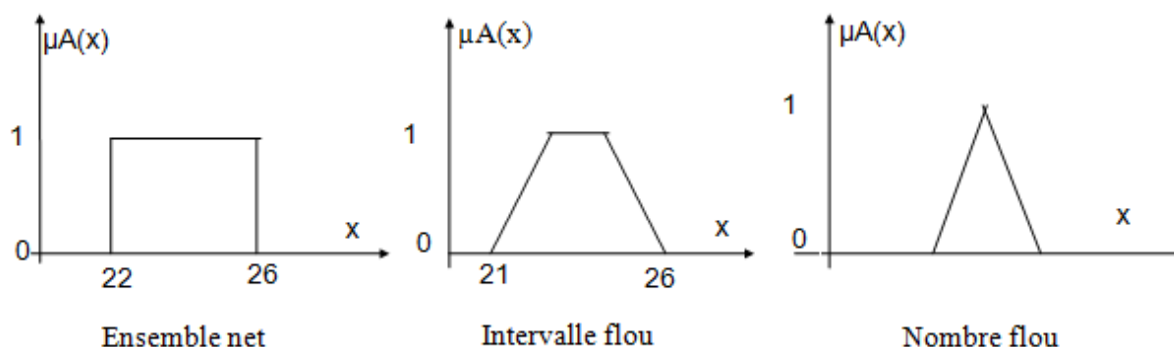


Figure III-9 Exemples de fonctions d'appartenance.

### III.7.3.4 UNIVERS DU DISCOURS :

Un des premiers pas dans la conception d'une application floue est de définir, L'ensemble de référence ou univers de discours pour chaque variable linguistique. L'univers de discours est l'ensemble de référentiel qui contient tous les éléments qui sont en relation avec le contexte donné la notion d'univers de discours se conçoit aisément : reprenons le concept de température : l'utilisateur pourra décrire la variable "température" par un certain nombre de mots: par exemple "chaud", "froid", "tiède", ou "très chaud", "assez chaud", "tiède", "assez froid", "très froid". Pour chacun de ces prédicats, on pourra donner une fonction d'appartenance. L'univers de discours d'une variable couvre l'ensemble des valeurs prises par cette variable [III 17].

### III.7.3.5 PROPRIETES DES ENSEMBLES FLOUS : [III17]

- **ÉGALITE** : Deux ensembles flous A et B de  $u$  sont égaux si leurs fonctions d'appartenance, prennent la même valeur pour tout élément de  $u$  :
- **INCLUSION** : Un ensemble flou A est inclus dans un ensemble flou B si toutes ses valeurs de fonction d'appartenance sont inférieures à celles de B sur tout le domaine  $u$ .

## CHAPITRE III COMMANDE VECTORIELLE, MODE GLISSANT ET LOGIQUE FLOU D'UNE GADA

- **SUPPORT** : Le support est défini comme l'ensemble des valeurs du domaine  $u$  pour les quelles la fonction d'appartenance n'est pas nulle.

$$S(A) = \{x \in X / \mu_A(x) \neq 0\} \quad (III. 41)$$

- **HAUTEUR** : La hauteur d'un ensemble flou  $A$  est la valeur max de la fonction d'appartenance sur le domaine  $u$ . Elle est noté par:

$$H(A) = \max(\mu_A(x) / x \in X) \quad (III. 42)$$

- **Noyau** : Le noyau d'un ensemble flou  $A$  est l'ensemble qui contient tous les éléments qui appartiennent sûr et certain à  $A$  (leurs degrés d'appartenance sont égaux à 1).

$$N(A) = \left\{x \in \frac{X}{\mu_A(x) = 1}\right\} \quad (II. 43)$$

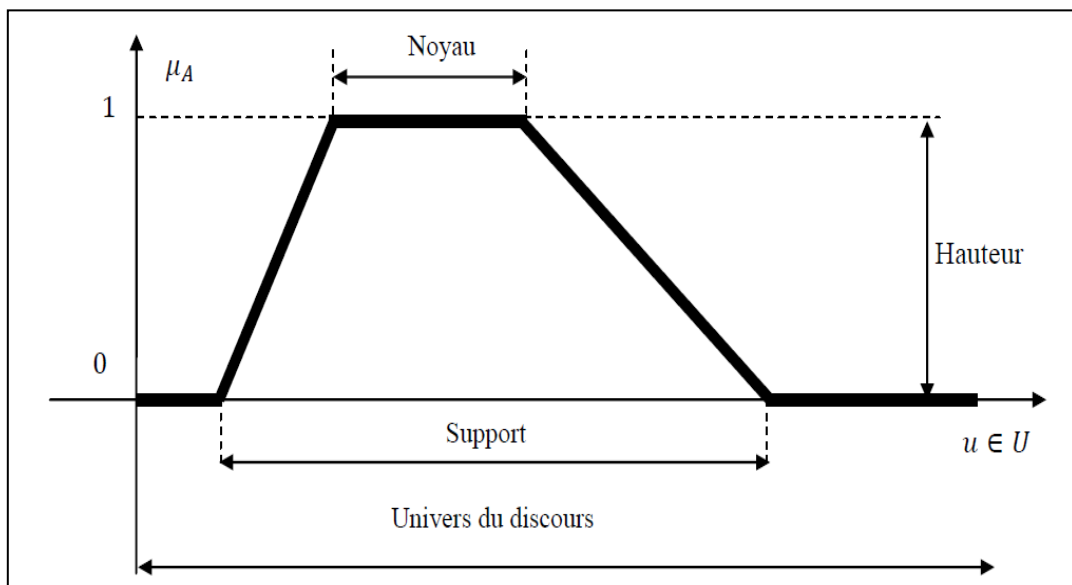


Figure III-10 : Support, hauteur et noyau d'un ensemble flou.

### III.7.3.6 Opérateurs logiques flous :

La théorie mathématique sur les ensembles flous définit de nombreux opérateurs sur ces ensembles et sur les fonctions d'appartenances. Soit  $A$  et  $B$  deux ensembles flous définis dans l'univers de discours  $X$  par les fonctions d'appartenances  $\mu_A(x)$  et  $\mu_B(x)$  respectivement [III 18, III 19].

## CHAPITRE III COMMANDE VECTORIELLE, MODE GLISSANT ET LOGIQUE FLOU D'UNE GADA

---

### ➤ INTERSECTION FLOUE (ET) :

L'intersection de deux ensembles flous  $A$  et  $B$  est un ensemble flou  $(A \cap B)$  de fonction d'appartenance «produit» :

$$\forall x \in X: \mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) * \mu_B(x) \quad (\text{III. 44})$$

Le degré de vérité (degré d'appartenance) de la proposition «  $A$  et  $B$  » est le minimum des degrés d'appartenance de  $A$  et de  $B$ :

$$\mu_A(x) * \mu_B(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (\text{III. 45})$$

$$\mu_A(x) * \mu_B(x) = \mu_A(x) \times \mu_B(x) \quad (\text{III. 46})$$

### ➤ UNION FLOUE (OU) :

L'union de deux ensembles flous  $A$  et  $B$  est un ensemble flou  $(A \cup B)$  de fonction d'appartenance «somme» :

$$\forall x \in X: \mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \dot{+} \mu_B(x) \quad (\text{III. 47})$$

Le degré de vérité (degré d'appartenance) de la proposition «  $A$  ou  $B$  » est le maximum des degrés d'appartenances de  $A$  et de  $B$ :

$$\mu_A(x) \dot{+} \mu_B(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (\text{III. 48})$$

### ➤ EGALITE FLOUE : deux ensembles flous $A$ et $B$ sont égaux ( $A = B$ ) si et seulement si

$$\forall x \in X: \mu_A(x) = \mu_B(x) \quad (\text{III. 49})$$

### ➤ SOUS-ENSEMBLE FLOU : $A$ est un sous ensemble de $B$ ( $A \subseteq B$ ) si et seulement si :

$$\forall x \in X: \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad (\text{III. 50})$$

### ➤ COMPLEMENTATION FLOUE (NON) :

Le complément  $\bar{A}$  de l'ensemble flou  $A$  est défini par la fonction d'appartenance :

$$\forall x \in X: \mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (\text{III.51})$$

## III.7.4 STRUCTURE D'UNE COMMANDE A LOGIQUE FLOUE :

Dans cette partie nous nous intéressons à l'application de la logique floue dans les systèmes de commande et aux méthodes de conception des contrôleurs flous. Nous appliquons la logique floue au contrôle des puissances actives et réactives statoriques de la génératrice asynchrone à double alimentation.

Les caractéristiques de chacun des blocs constituant la structure générale d'un régulateur flou sont présentés : [III 16]

- ✓ Fuzzification
- ✓ Inférence
- ✓ Défuzzification.

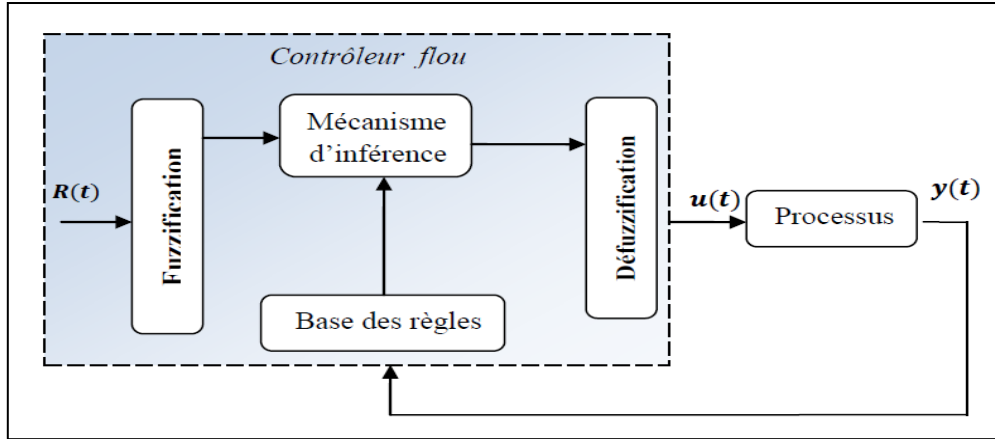


Figure III-11 : Schéma général d'un contrôleur flou.

### III.7.4.1 Principe d'un contrôleur flou:

Un contrôleur flou ne diffère pas tellement d'un contrôleur traditionnel. On retrouve à chaque fois un bloc de traitement, un bloc d'entrée (quantification, calculs préalables...) et un bloc de sortie (pour la détermination de la commande  $u$  à partir de l'incrément du par exemple) [III 16].

Deux blocs supplémentaires apparaissent dans le cas d'un contrôleur flou : un bloc de fuzzification et un bloc de défuzzification. Le bloc de fuzzification constitue l'interface entre le monde physique et celui des sous-ensembles d'inférence (*inférence engine*) et une base de règles (*rules base*). Le rôle de ce dernier bloc sera d'échafauder le raisonnement.

Le bloc de fuzzification convertira les valeurs d'entrées en sous-ensembles flous. Le moteur d'inférence activera les règles dont les prémisses seront vérifiées. Chaque règle activée donnera lieu à un sous-ensemble de sortie. Il restera au bloc de défuzzification à agréger ceux-ci et en extraire une action précise et réalisable au niveau de la commande.

#### ➤ FUZZIFICATION :

La fuzzification est l'opération qui consiste à affecter pour chaque entrée physique, un degré d'appartenance à chaque sous-ensemble flou. En d'autres termes c'est l'opération qui permet le passage du numérique (grandeurs physiques) au symbolique (variables floues) [III 17]. La définition des fonctions d'appartenance pour les différentes variables d'entrée se fait après le passage des grandeurs

## CHAPITRE III COMMANDE VECTORIELLE, MODE GLISSANT ET LOGIQUE FLOU D'UNE GADA

---

physiques (grandeurs déterminées) en variables linguistiques (grandeurs ou variables floues) qui peuvent être traitées par les inférences. En général, on introduit pour un variable linguistique trois, cinq ou sept ensembles flous représentés par des fonctions d'appartenance. Le choix du nombre d'ensembles dépend de la résolution et de l'intervention du réglage désirée [III 17].

### ➤ **BASE DES REGLES :**

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...ALOR». D'une manière générale, on peut exprimer la *ième* règle floue [III 16].

### ➤ **MECANISME D'INFERENCE FLOU :**

L'inférence floue est le processus de formulation de la relation entre les entrées et les sorties par logique floue. Cette relation offre une base avec laquelle la décision est prise par le système flou. L'inférence floue fait appel alors aux concepts expliqués dans les sections

Précédentes, à savoir : fonctions d'appartenance, les opérateurs flous et les règles floues [III 16]. 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 [III 16].

Le tableau suivant résume la façon utilisée par ces trois méthodes d'inférence pour représenter les trois opérateurs de la logique floue «*ET*, *OU*, et *ALORS*».

## CHAPITRE III COMMANDE VECTORIELLE, MODE GLISSANT ET LOGIQUE FLOU D'UNE GADA

Tableau.III-1 : Méthode usuelles de l'inférence floue.

Opérateurs flous Méthodes d'inférence	Et	Ou	Alors
Max - Min	Minimum	Maximum	Minimum
Max - Produit	Minimum	Maximum	Produit
Somme - Produit	Produit	Moyenne	Produit

➤ **DEFUZZIFICATION :** [III 17]

Elle consiste à:

- Transformer les valeurs de la sortie comprît dans l'univers du discours en valeurs réelles comprissent dans le domaine de variation.
- Extraire de la sortie de vérité la valeur numérique de la sortie.

On distingue trois méthode différente : celle de maximum, celle de la moyenne de maxima et celle du centre de gravité.

### III.7.5 Avantages et inconvénients de la commande floue [III 17] :

➤ **AVANTAGE :**

- La théorie est simple et s'applique à des systèmes complexes.
- Pas de modèles mathématiques requis du procédé à asservir.
- Robustesse de la commande floue vis à vis des incertitudes.
- Possibilités de commande auto-adaptative aux variations du procédé.

➤ **INCONVENIENTS :**

- Technique de réglage essentiellement empirique.
- Performances dépendent de l'expertise.
- Il n'existe pas de théorie générale qui caractérise rigoureusement la stabilité, la robustesse (Difficultés de certification dans le transport, espace...).

### III.7.6 APPLICATION DE LA LOGIQUE FLOU D'UN GADA:

Nous allons présenter la commande vectorielle (commande en puissance). Dans cette partie nous allons procéder au remplacement du régulateur classique de puissance active par un régulateur flou et nous allons procéder au remplacement du régulateur classique de puissance réactive par un régulateur flou. Il faut défini un ensemble de stratégie de contrôle basé sur l'erreur entre une consigne

## CHAPITRE III COMMANDE VECTORIELLE, MODE GLISSANT ET LOGIQUE FLOU D'UNE GADA

prédéterminer et la sortie réelle du processus qui est, dans ce cas, l'erreur de la puissance active et la variation de cette erreur, et l'erreur de la puissance réactive et la variation de cette erreur.

### III.7.6.1 LES ETAPES DE CONCEPTION D'UN SYSTEME FLOU :

#### A) DEFINITION DES VARIABLE DE SYSTEME :

La première étape dans la conception d'un système flou est la définition du système en terme de variables d'entrées et de sorties.

#### B) CHOIX DES PARTITION FLOUE :

Les variables du système sont connues, on associe à chacune d'entre elle un ensemble de termes caractérisés par des fonctions d'appartenances définies sur le même univers de discours. Le choix de la partition floue consiste à déterminer le nombre de termes qui doit exister dans cet ensemble [III 16].

#### C) CHOIX DES FONCTIONS D'APPARTENANCES :

Les fonctions d'appartenances triangulaires et trapézoïdales, ce choix est dû à la simplicité de mise en œuvre [II 17].

➤ Pour la boucle de courant, les variables d'entrées sont :

L'erreur de courant:

$$e_I = I_{rq}^{ref} - I_{rq} \quad (III. 52)$$

La variation de l'erreur de courant :

$$\Delta e_I = e_I(k) - e_I(k - 1) \quad (III. 53)$$

Le schéma bloc de la commande avec les régulateurs flous est illustré par la figure ci-dessous :

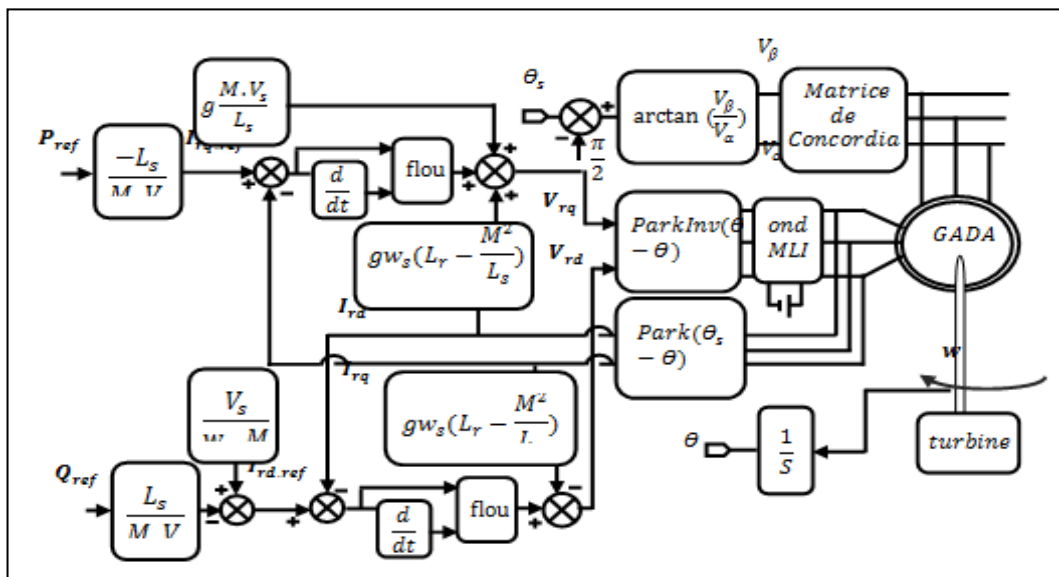


Figure III-12 : Schéma bloc de la structure de commande flou.

**III.7.6.2 STRUCTURE DE BASE D'UN CONTROLEUR FLOU DE COURANT :**

La majorité des contrôleurs flous pour les systèmes mono variables simples se composent des entrées du contrôleur flou qui sont généralement l'erreur (la différence entre la consigne et la sortie du processus) et sa variation (traduction de la dynamique de système). La majorité des contrôleurs développés utilisent le schéma simple proposé par Mamdani, comme le montre la figure suivante :

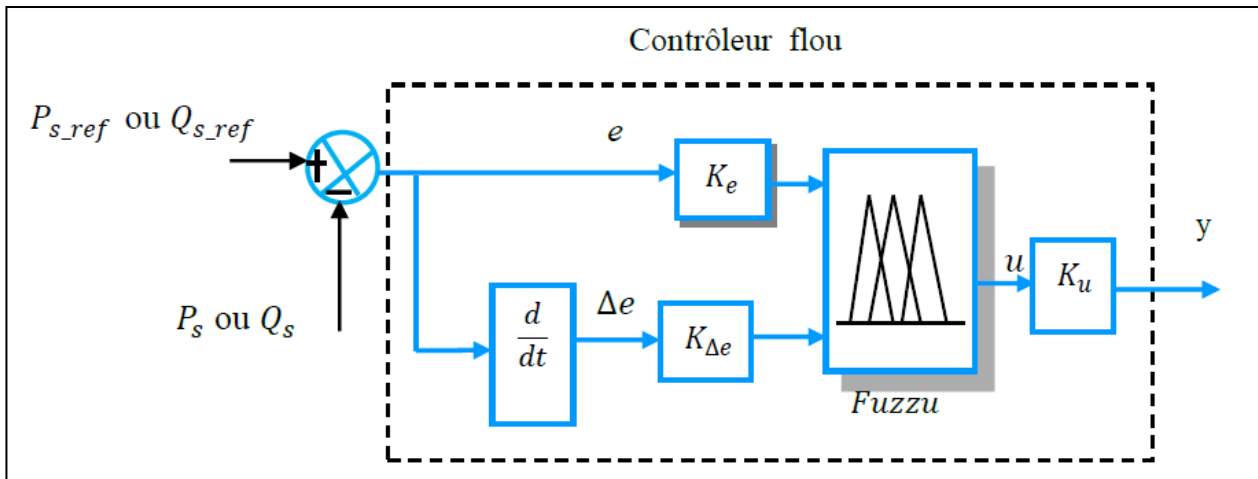


Figure III-13 : Structure interne d'un régulateur flou.

D'après le schéma ci-dessus, le système de régulation floue (contrôleur flou) se compose essentiellement :

- D'un bloc de calcul de la variation de l'erreur au cours du temps.
- Des facteurs d'échelle ( $k_e, k_{\Delta e}, et k_{du}$ ): qui sont des gains de normalisation et dénormalisation. Le choix adéquat de ces derniers permet de garantir la stabilité et l'amélioration des performances dynamiques et statiques ciblées du système à régler ; de plus, les gains d'entrées ( $k_e, k_{\Delta e}$ ) réduisent les grandeurs physiques d'entrées dans une plage de variation appelée univers de discours.
- D'un bloc de fuzzification de l'erreur et de sa variation. Pour le choix de la forme des fonctions d'appartenances, nous avons opté pour les formes triangulaire et trapézoïdale comme indiquée sur les figures (IV-8). Le choix des variables linguistiques sont représentées par : Négatif grand noté **NG** ; Moyen Négatif noté **NM** ; Négatif petit noté **NP** ; Environ de zéro noté **EZ** ; Positif petit noté **PP** ; Positif Moyen noté **PM** ; Positif grand noté **PG**.

## CHAPITRE III COMMANDE VECTORIELLE, MODE GLISSANT ET LOGIQUE FLOU D'UNE GADA

- D'un bloc de défuzzification de la variation de la commande. Les sorties du mécanisme d'inférence qui sont des variables floues doivent être reconverties en des grandeurs réelles de sorties pour que le système puisse les utiliser. Dans cette étape, une valeur réelle de la variable de sortie est obtenue en employant la méthode du centre de gravité :

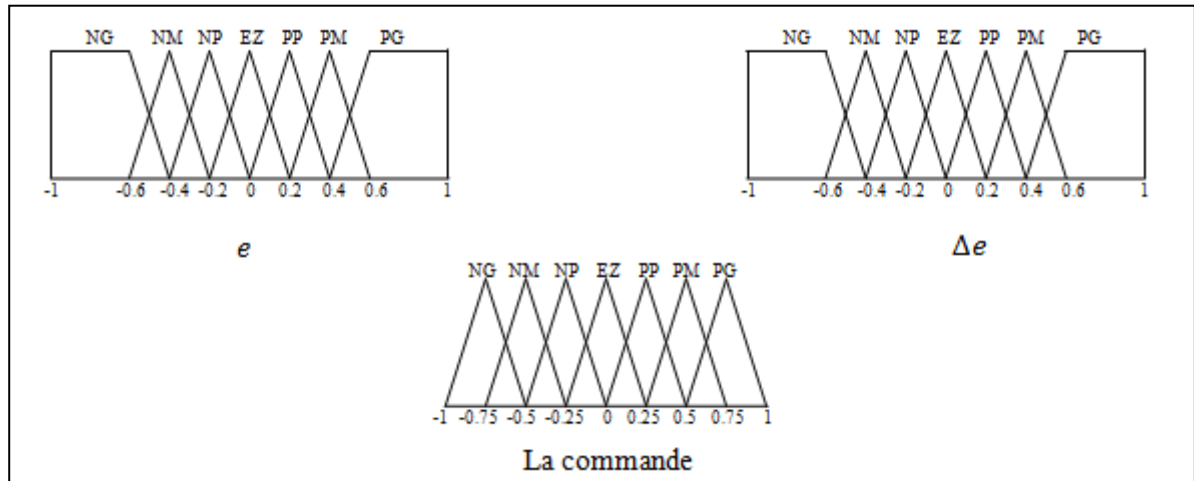


Figure III-14 : Les fonctions d'appartenances utilisées par le contrôle.

- Les règles d'inférences permettant de déterminer la variable de sortie pour le réglage des courants regroupés dans la table ci-dessous. La méthode d'inférence utilisée est la méthode « min-max » de Mamdani :
- Opérateur ET : formation du minimum,
  - Opérateur OU : formation du maximum.
  - Implication ALORS : formation du minimum,
  - Agrégation : formation du maximum.

## CHAPITRE III COMMANDE VECTORIELLE, MODE GLISSANT ET LOGIQUE FLOU D'UNE GADA

Tableau. III-2 : Table des règles de décision pour le contrôleur des puissances. [I.7]

La commande		Erreur						
		NG	NM	NP	EZ	PP	PM	PG
Dérivée de l'erreur	NG	NG	NG	NG	NG	EZ	EZ	EZ
	NM	NG	NG	NM	NM	EZ	EZ	EZ
	NP	NG	NG	NP	NP	PP	PP	PM
	EZ	NG	NM	NP	EZ	PP	PM	PG
	PP	NM	NP	NP	PP	PP	PG	PG
	PM	EZ	EZ	EZ	PM	PM	PG	PG
	PG	EZ	EZ	EZ	PG	PG	PG	PG

- D'un bloc intégrateur utilisé pour intégrer la variation de la commande numérique résultante et de son application au système que nous voulons commander.

### III.8 RESULTATS DE SIMULATION POUR LES TROIS COMMANDES VECTORIELLE ET MODE GLISSANT :

Pour contrôler la chaîne de conversion d'énergie éolienne basée sur la MADA, et tester les différents algorithmes pour la commande du reste des éléments de cette chaîne, on a choisi pour la commande indirecte sans boucle de puissance comme commande vectorielle et la comparer avec la commande par mode glissant et la commande par logique flou pour des vitesses fixe et variable.

#### III.8.1 RESULTATS DE SIMULATION NUMERIQUE DU SYSTEME POUR UNE VITESSE FIXE :

Les résultats d'application des commandes vectorielle, mode glissant et par logique flou des puissances active et réactive statorique appliquée à la MADA :

Les conditions :

## CHAPITRE III COMMANDE VECTORIELLE, MODE GLISSANT ET LOGIQUE FLOU D'UNE GADA

- ❖ Machine connectée au réseau ;
- ❖ Machine entraînée à une vitesse fixe 1425 tr/min,
- ❖ Entre les instants  $t = 1s$  et  $t = 3s$  : échelon négatif pour la puissance active ( $P_{sref}$  passe de 0 à  $-3000W$ );
- ❖ entre les instant  $s t = 2s$  et  $t = 4s$  : échelon positif pour la puissance réactive( $Q_{sref}$  passe de 0 à 1000 VAR).

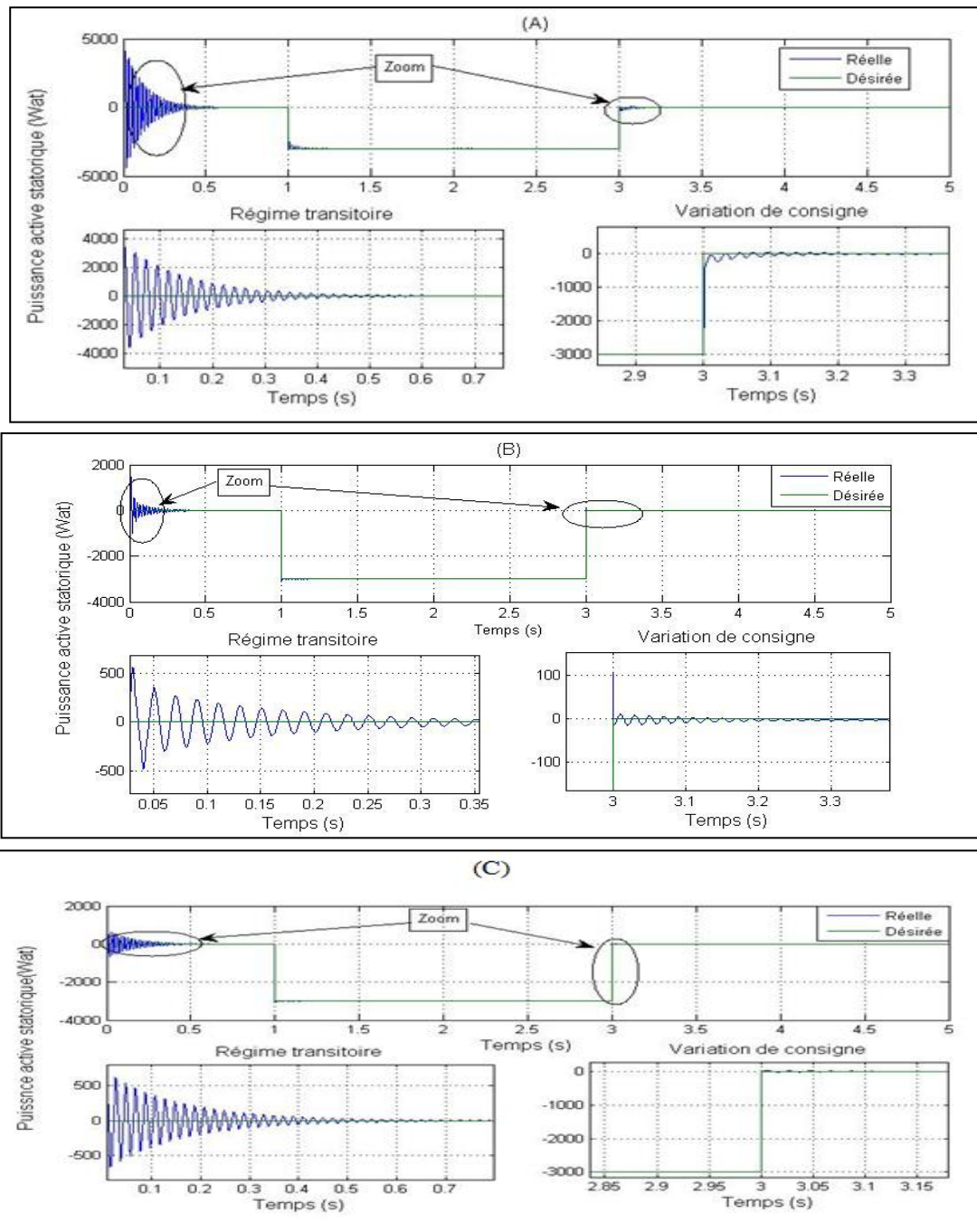


Figure III-15 : Puissance active statorique pour les trois commandes avec un zoom (A) Contrôle vectoriel, (B) Contrôle par mode glissant,(C) Contrôle par logique flou.

# CHAPITRE III COMMANDE VECTORIELLE, MODE GLISSANT ET LOGIQUE FLOU D'UNE GADA

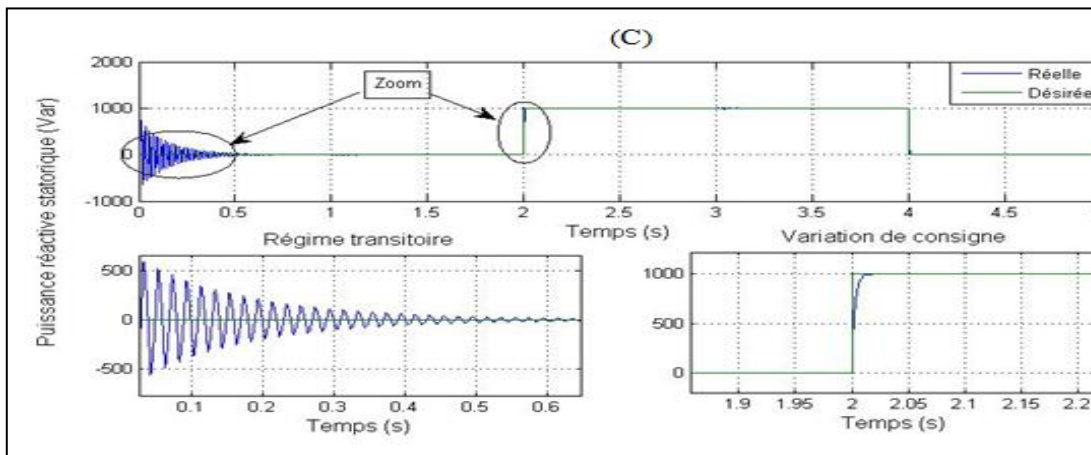
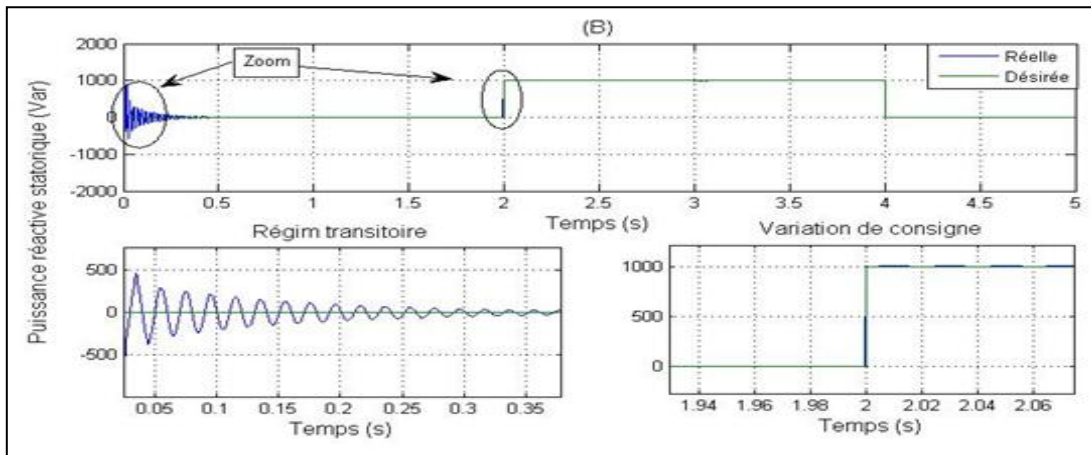
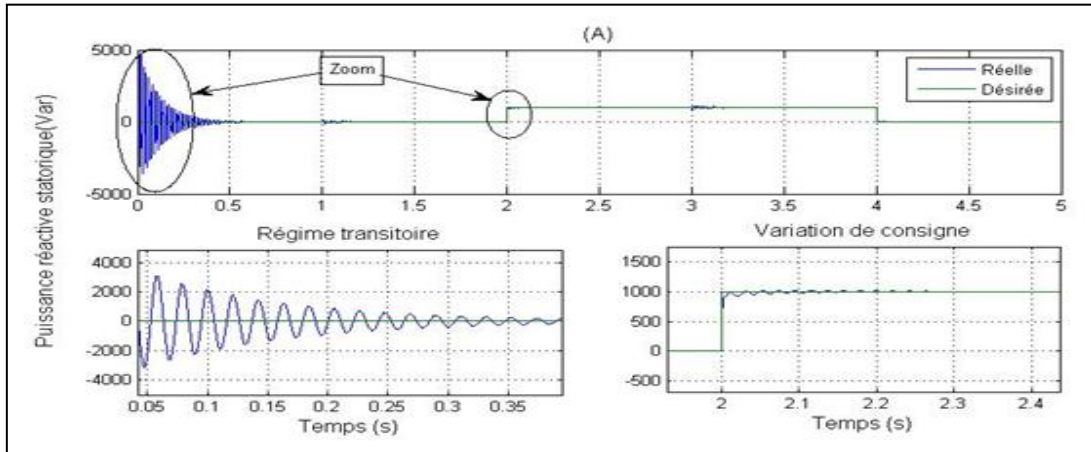


Figure III-16 : Puissance réactive statorique pour les trois commandes avec un zoom.

(A) Contrôle vectoriel, (B) Contrôle par mode glissant, (C) contrôle par logique flou.

## III.8.2 Interprétation des résultats :

Ce que nous remarquons dans les courbes III-15 et III-16 est que les trois commandes vectorielle, mode glissant et par logique flou ont achevé nos objectifs ou les puissances active et réactive (statorique) suivent leurs valeurs désirés. D'après ces résultat on constate que la commande par mode glissant à une meilleur régulation tel que précision et stabilité au niveau des puissances statorique son constate aussi que la commande par logique flou a une meilleur régulation tel que temps de réponse et dépassement au niveau des puissances statoriques.

On constate aussi que la commande par mode glissant a une performance mieux que la commande vectorielle dans l'amplitude des oscillations , la rapidité de temps de réponse et l'erreur entre les valeurs de consignes et celle mesurées est minimal.

## III.8.3 Résultats de simulation numérique du système globale :

La MADA est contrôlée par une commande "MPPT", qui est une commande indirecte pour maximiser la puissance captée pendant les faibles vitesses du vent.

La consigne de la puissance active statorique est déterminée à partir de la puissance de la turbine, et la puissance réactive statorique est maintenue nulle pour garder le facteur de puissance unitaire du côté stator de la MADA.

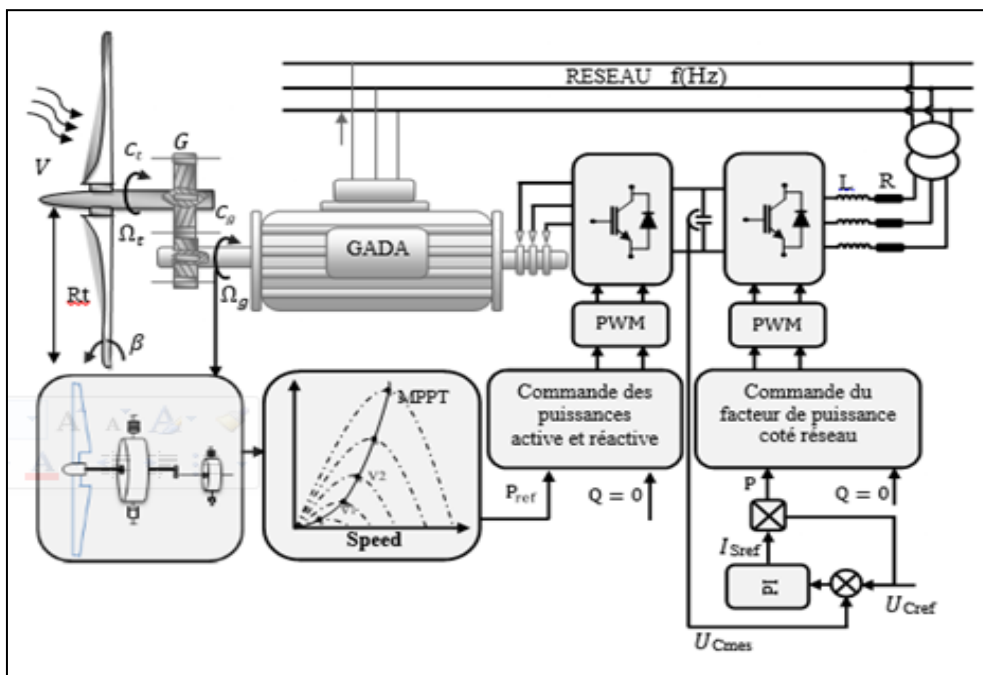


Figure III-17 : Schéma synoptique du système (convertisseur, GADA et turbine).

# CHAPITRE III COMMANDE VECTORIELLE, MODE GLISSANT ET LOGIQUE FLOU D'UNE GADA

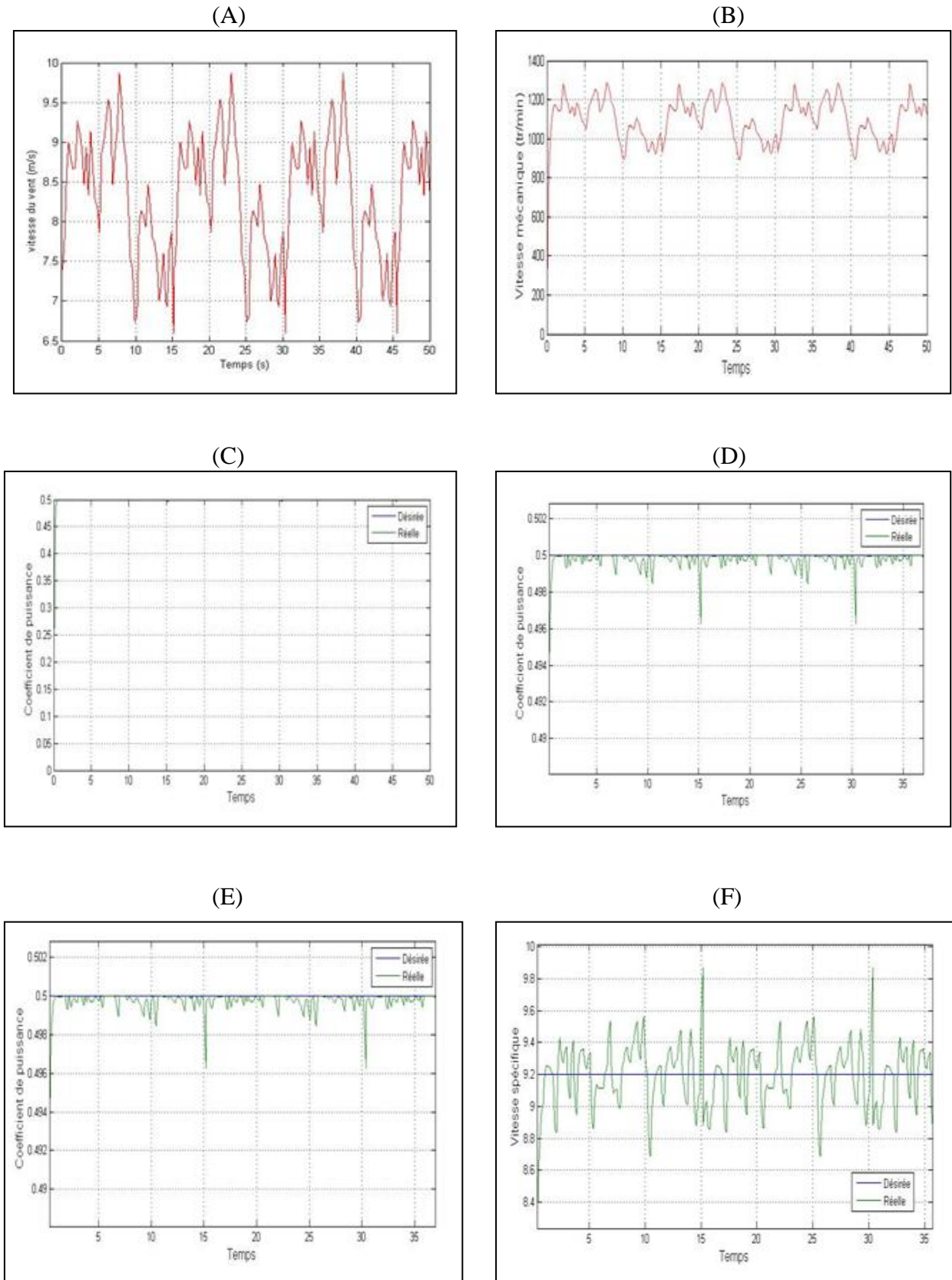


Figure III-18 : (A) - Profil du vent appliqué ; (B) - Vitesse mécanique ;(C)-Coefficient de puissance ; (D) - Vitesse spécifique ; (E)-Coefficient de puissance avec zoom ; (F)- Vitesse spécifique avec zoom

# CHAPITRE III COMMANDE VECTORIELLE, MODE GLISSANT ET LOGIQUE FLOU D'UNE GADA

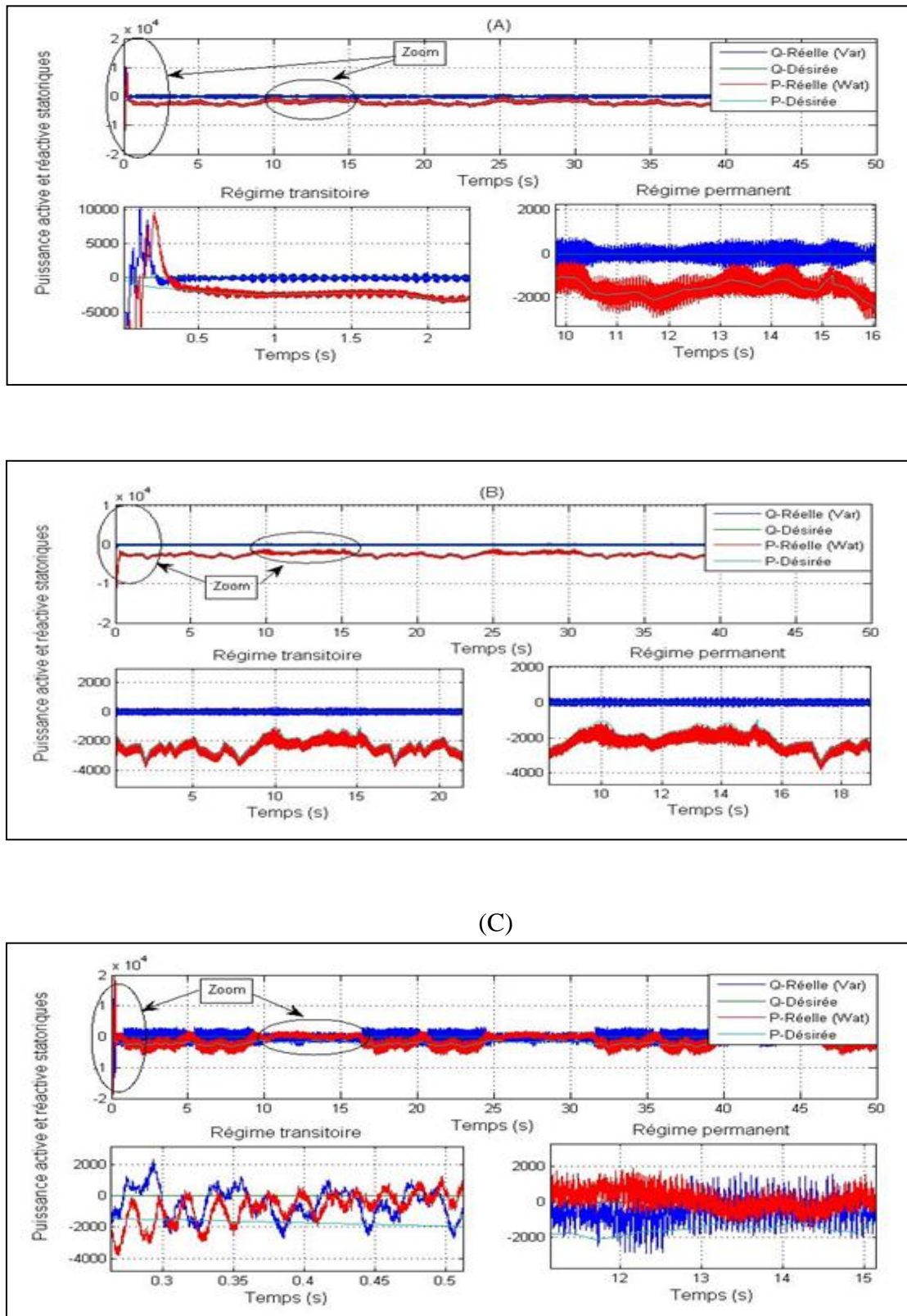


Figure III-19 : Puissances active et réactive statoriques pour les trois commandes avec un zoom.

(A) Contrôle vectoriel, (B) Contrôle par mode glissant, (C)-contrôle par logique flou.

# CHAPITRE III COMMANDE VECTORIELLE, MODE GLISSANT ET LOGIQUE FLOU D'UNE GADA

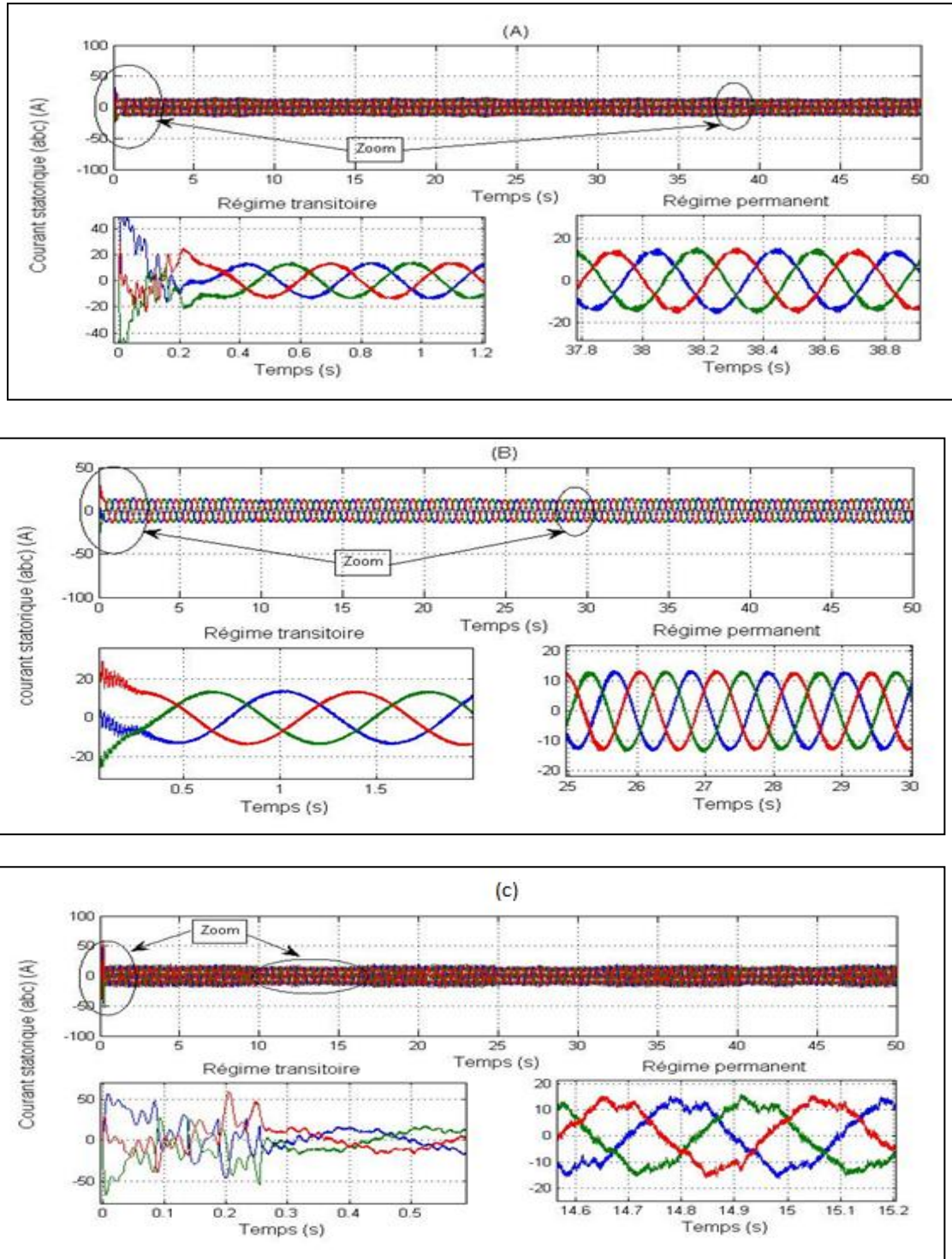


Figure III-20 : Composantes du courant statoriques pour les trois commandes avec un zoom; (A) Contrôle vectoriel, (B) Contrôle par mode glissant, (C)-contrôle par logique flou

# CHAPITRE III COMMANDE VECTORIELLE, MODE GLISSANT ET LOGIQUE FLOU D'UNE GADA

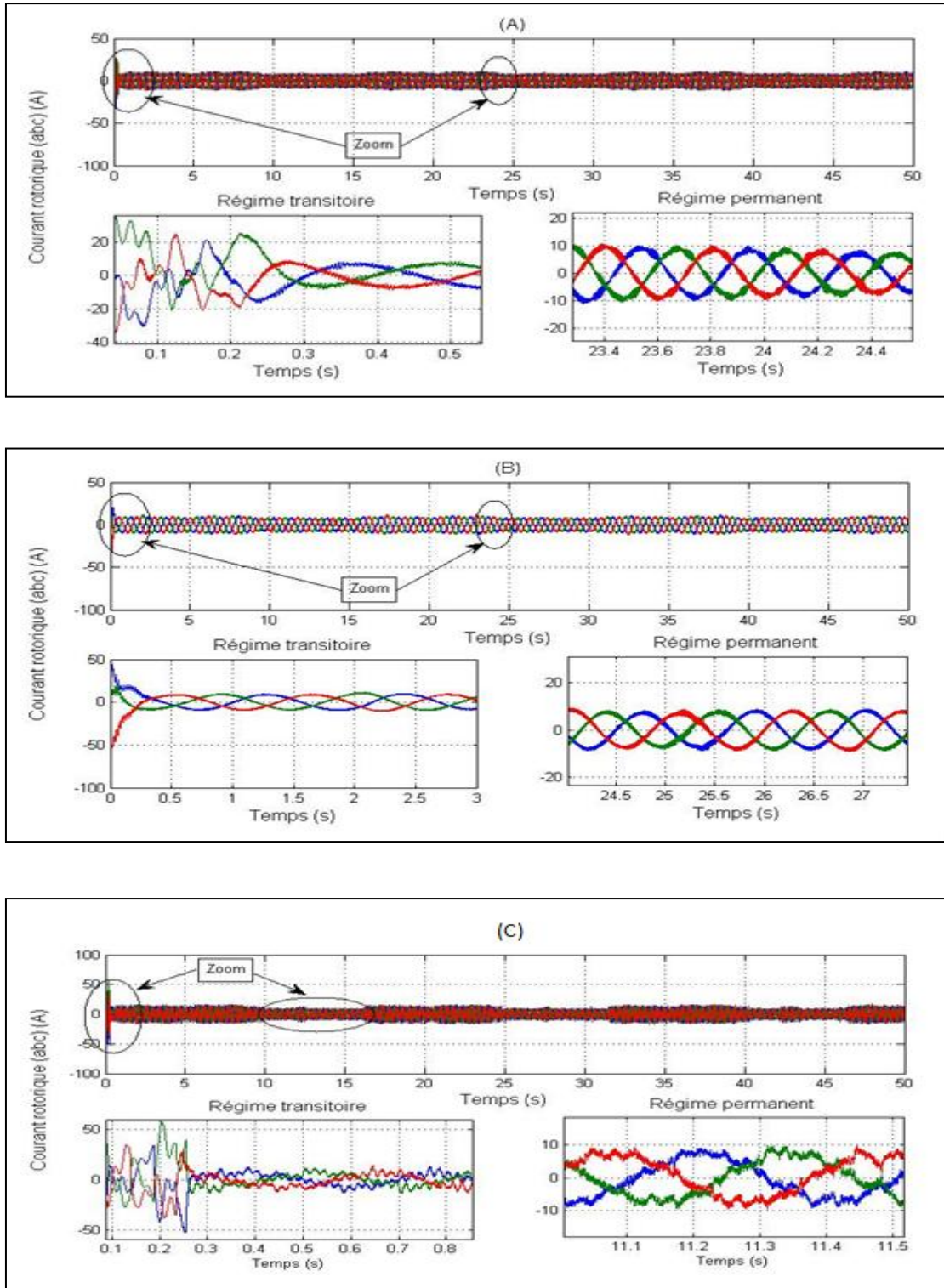


Figure III-21 : Composantes du courant rotoriques pour les trois commandes avec un zoom (A) Contrôle vectoriel, (B) Contrôle par mode glissant, (C)-contrôle par logique flou

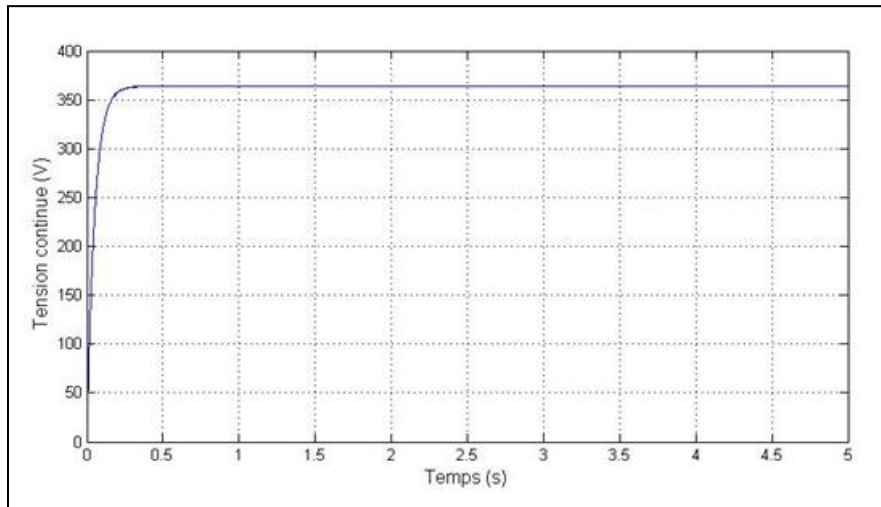


Figure III-22 : Tension du bus continu

### III.8.4 Interprétation des résultats :

On constate dans la figure III-18 que l'allure de la vitesse mécanique générée par la turbine est semblable à celle du profil du vent appliqué à la turbine, il est clair aussi que quel coefficient de puissance  $C_p$  suit la valeur de coefficient de la puissance maximale souhaitée, idem pour la vitesse spécifique  $\lambda$  suit la valeur optimale de référence imposée.

On remarque que les allures des puissances actives et réactive statoriques générées par la machine suivent bien les allures de références dans les trois types de commande sur la figure III.19 ; notant que la commande par logique flou est plus efficace que la commande par mode glissant et celle de vectorielle.

On voit dans les figures III-20 et III-21 quels courants statoriques et rotoriques suivent bien les allures de références dans les trois types de commande.

### III.9 CONCLUSION :

Dans ce chapitre, on a appliqué trois techniques de commande différentes pour contrôler indépendamment les puissances active et réactive générées par la MADA dans un système de production d'énergie éolienne couplé au réseau ont été établies, utilisant commandes on a agit sur les tensions rotoriques pour contrôler les puissances générées aux bornes du stator de la MADA.

D'abord on a commencé par la commande vectorielle et l'applique sur ce système en utilisant un régulateur proportionnel intégral.

afin que simplifier le modèle de la machine et découpler la régulation des puissances générées on a choisi l'orientation du flux statorique, puis on a cité les types de commande vectorielle qui sont les plus utilisés pour contrôler les puissances active et réactive générées, la commande indirecte sans boucle de puissance est une parmi les meilleurs, on a choisi cette méthode grâce sa simplicité de mise en œuvre, ainsi que la possibilité du contrôle et de limitation des courants, Les résultats de simulation obtenus sont plus que désirable.

En suit on a parlé de la commande par mode glissant cette commande est appliqué a flux orienté pour réduire le phénomène de chatring.

En fin on a exposé la commande par logique flou ensuite on a fait l'application sur la commande de le générateur asynchrone à double alimentation à flux statorique orienté, afin de régler la puissance active et réactive.

Les résultats obtenus de la simulation prouve l'efficacité de ces trois commandes sachant que les résultats de commande par logique flou sont mieux que celles de la commande par mode glissant et celles de la commande vectorielle.

### BIBLIOGRAPHIE

- [III 1] Y.Elbia , " Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à DoubleAlimentation et à Flux Orienté ", MémoiredeMagister en GénieElectrique Université de Batna, 2009.
- [III 2] H.Amimeur , "Contribution à la Commande d'une Machine Asynchrone DoubleEtoile par Mode de Glissement “,Mémoire demagister, Université deBatna , 2008
- [III 3] M.Adjoudj, "Commande Par Mode Glissant d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation Montée dans une Eolienne", Revue«Nature &Technologie»n° 02/Janvier2010.
- [III 4] M. Loucif, A. Boumediene and A. Mechernene, « Backstepping Control of Double Fed Induction Generator Driven by Wind Turbine ». Proceedings of the 3rd International Conference on Systems and Control, Algiers, Algeria, October 29-31, 2013IEEE.
- [III 5] Le-peng Song, Hui Li, « Simulation for Strategy of Maximal Wind Energy Capture of Doubly Fed Induction Generators ». 2010 Sixth International Conference on Natural Computation (ICNC 2010) IEEE.
- [III 6] H.T. Jadhav, Ranjit Roy, « A comprehensive review on the grid integration of doubly fed induction generator». Int J Electr Power Energy Syst, Vol. 49, No. 1, july 2013, pp. 8–18.
- [III 7] Ahmed M. Kassem, Khaled M. Hasaneen , Ali M. Yousef , « Dynamic modeling and robust power control of DFIG driven by wind turbine at infinite grid ». Electrical Power and Energy System 44 (2013).pp: 375–382.
- [III 8] F. Hachicha, L. Krichen, « Performance Analysis Of A Wind Energy Conversion System Based On A DFIG». 8th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices. 2011 IEEE.
- [III 9] K. Ouari <sup>a</sup>, T. Rekioua <sup>a,\*</sup>, M.Ouhrouche <sup>b</sup>, « Real time simulation of nonlinear generalized predictive control for wind energy conversion system with nonlinear observer ». ISA Transactions,Vol. 53, 2014, pp.76-84.
- [III 10] N. Taib, B. Metidji, T. Rekioua, « Performance and efficiency control enhancement of wind power generation system based on DFIG using three-level sparse matrix converter ». Electrical Power and Energy Systems, Vol. 53, 2013, pp. 287-296.
- [III 11] S. Abdeddaim, A. Betka, « Optimal tracking and robust power control of the DFIG wind turbine ». Int J Electr Power Energy Syst 2013; 49(01), pp.: 234–242.
- [III 12] K. Ghedamsi, E.M. Berkouk, « Control of wind generator associated to a flywheel energy storage system». Renewable Energy, Vol 33, Issue 9, Elsevier (2008), pp 2145-2156.

## **CHAPITRE III COMMANDE VECTORIELLE, MODE GLISSANT ET LOGIQUE FLOU D'UNE GADA**

---

[III 13] F. Poitiers, « Etude et commande des génératrices asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne : machine asynchrone à cage autonome et machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau ». Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de Nantes. 12/2003.

[III 14] A. Boyette, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne ». Thèse doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 2006.

[III 15] P.EtienneVidal," Commande Non-Linéaire d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation ", Thèse Doctoratde l'institut national polytechnique ,2004.

[III 16] S. ZEGHLACHE ” Commande non linéaire d'un appareil à vol vertical” Thèse Doctorat, Université Mohamed Boudiaf M'sila, 2014

[III 17] F.Z. TRIA, «Contribution à la commande d'un système éolien basé sur une MADA Par différentes techniques ». Mémoire de Magister en Génie Electrique Université d'El- oued 2013

[III 18] S. Mokeddem, « Contrôle Flou des Processus Biotechnologiques à Base D'Algorithmes Génétiques ». Thèse Doctorat, Universite ferhat abbas de setif, 11 juillet 2010.

[III 19] H. Ouakka,«Contribution à l'Identification et la Commande Floue d'une Classe de Systèmes Non Linéaires». Université Side Mohamed Ben Abdullah. Le 27/06/2009



## ***CHAPITRE IV***

# ***ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES TECHNIQUES DE COMMANDE***



## IV.1 INTRODUCTION

Pour connaître la meilleure commande, une étude comparative entre les différentes techniques est obligatoire notant que cette étude a été reprise dans les mêmes conditions.

## IV.2 COMPARAISON QUALITATIVE:

La comparaison sera réalisé a partir des résultats de simulation précédents. Nous allons fait une comparaison qualitative cette comparaison basant sur les variations de consignes des puissances active et réactive, soit aléatoire avec la variation de vitesse du vent, soit comme des échelons alors que la machine est entraînée à vitesse fixe.

### IV.2.1 Pour une vitesse fixe:

Les consignes des puissances active et réactive proposées sont données sous formes d'échelons alors que la machine est entraînée à vitesse fixe. Cet essai est réalisé dans les mêmes conditions :

- Machine entraînée à une vitesse fixe  $1425 \text{ tr/min}$ .
- Introduction d'un échelon de puissance active de  $P_{sref} = -3000W$  entre les instants  $t = 1s$  et  $t = 3s$ .
- Introduction d'un échelon positif de puissance réactive  $Q_{sref} = 1000 VAR$  entre les instants  $t = 2s$  et  $t = 4s$ .
- la période d'échantillonnage et le temps de simulation sont fixes.

# CHAPITRE IV ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES TECHNIQUES DE COMMANDE

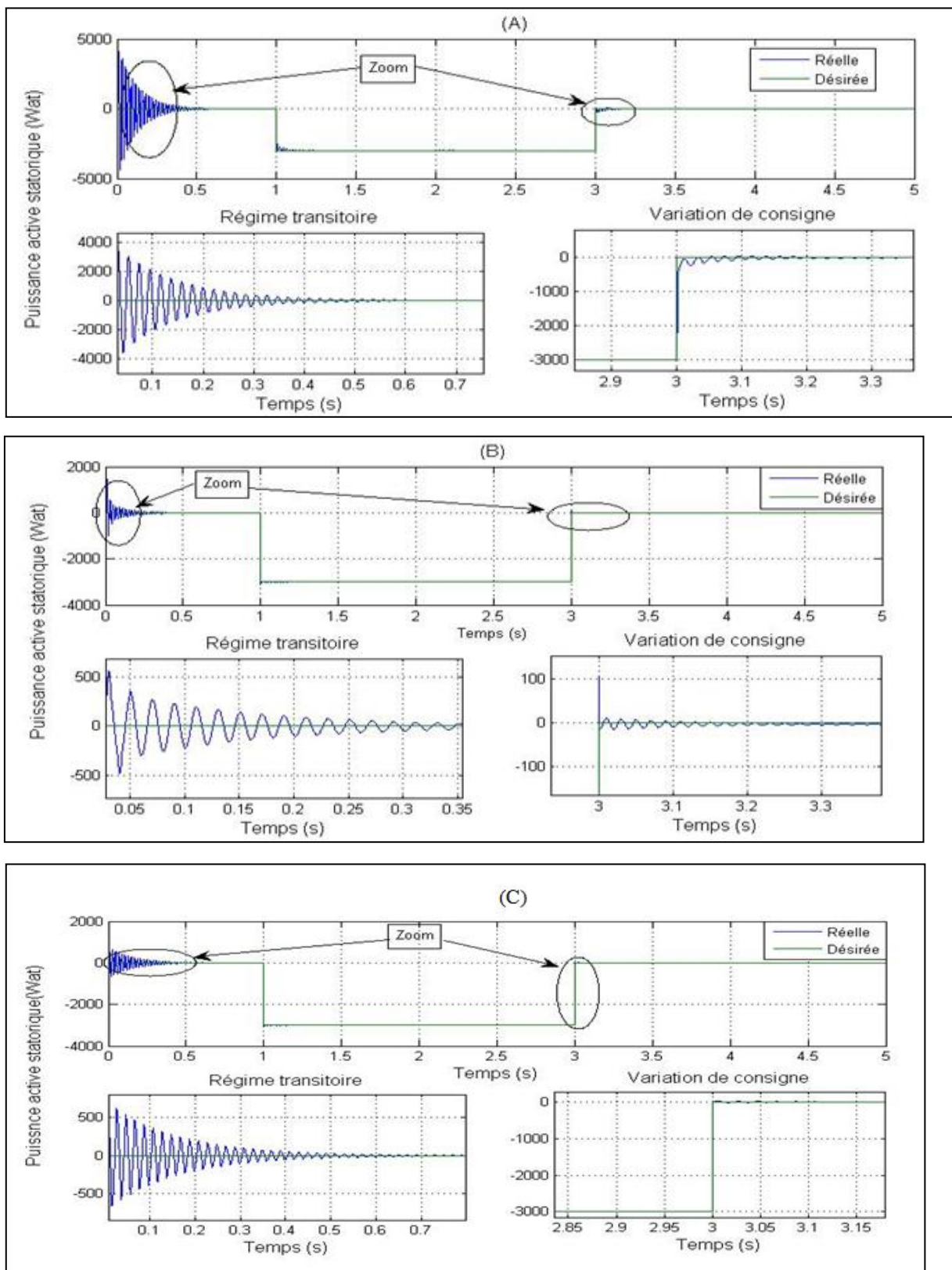


Figure IV-1 : Puissance active statorique pour les trois commandes ; (A) Contrôle vectoriel, (B) Contrôle par mode glissant, (C) contrôle par logique flou.

# CHAPITRE IV ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES TECHNIQUES DE COMMANDE

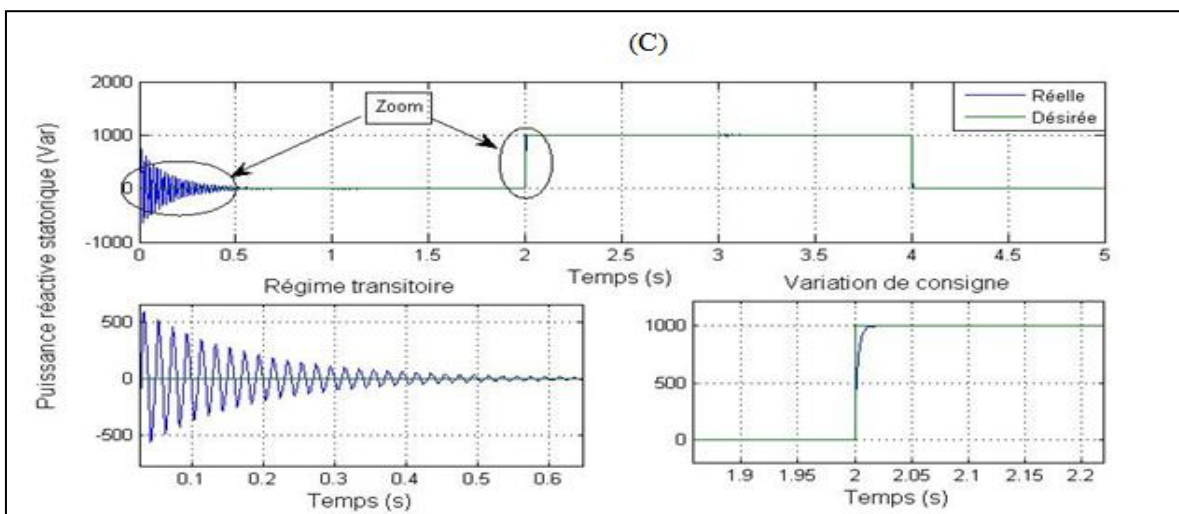
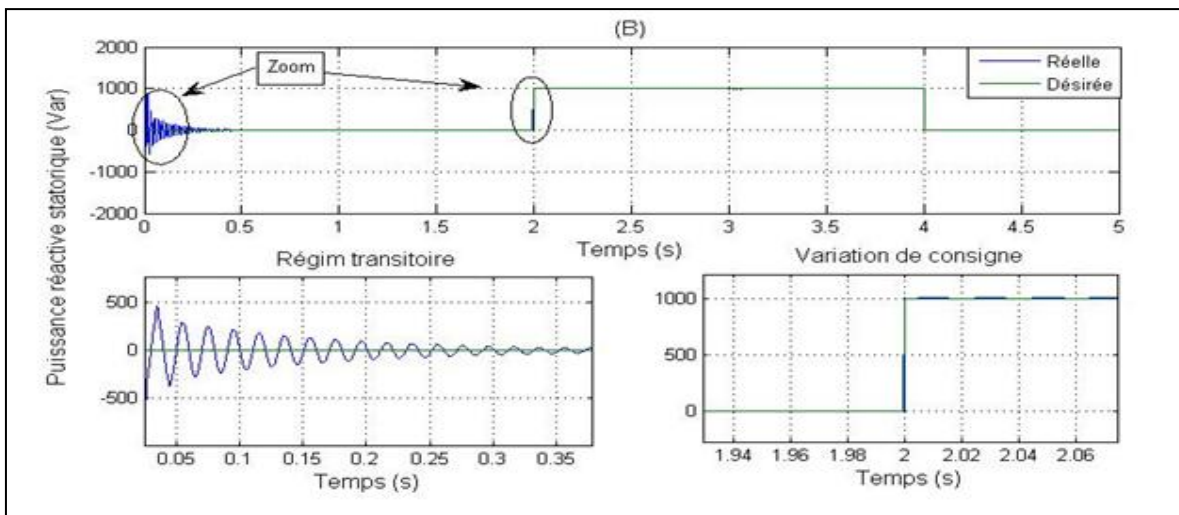
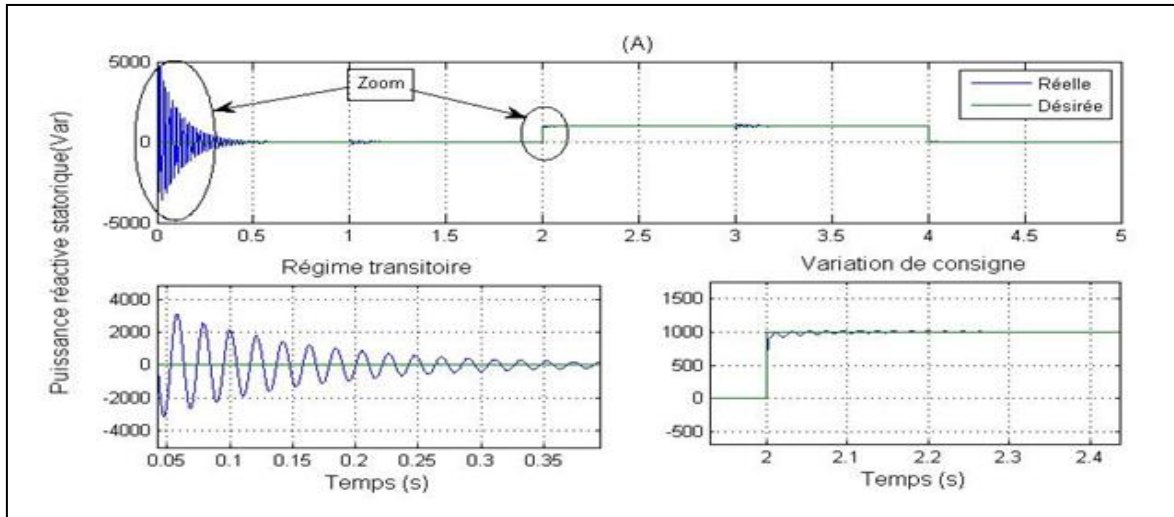


Figure IV-2 : Puissance réactive statorique pour les trois commandes ;(A) Contrôle vectoriel, (B) Contrôle par mode glissant, (C) contrôle par logique flou

## CHAPITRE IV ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES TECHNIQUES DE COMMANDE

---

On peut faire une comparaison entre les différentes techniques de commande comme nous voyons dans les figures, l'évolution des résultats de simulation pour des variations des puissances générées avec une vitesse constante.

Selon des résultats de simulation les puissances active et réactive suivent bien leurs nouvelles références dans les trois types de commandes néanmoins, le dépassement et les oscillations des grandeurs réglées, le temps de réponse, la convergence exponentielle des erreurs pour le régime transitoire et le changement des consignes sont différents.

Il est clair que les meilleurs résultats pour les grandeurs précédentes sont les valeurs obtenues lors de l'application de la commande par logique floue, donc nous pouvons dire que c'est la commande la plus performante et la plus efficace par rapport aux autres commandes.

### IV.2.2 Pour une vitesse variable:

Généralement, la machine est couplée directement au réseau par le stator et pilotée par les grandeurs rotoriques, et entraînée par une turbine à calage variable des pales. La puissance de la turbine détermine la consigne de la puissance active statorique, alors que la puissance réactive statorique est maintenue nulle pour garder le facteur de puissance unitaire du côté stator de la MADA. Le temps durant lequel les mesures ont été effectuées est de 50s.

On constate qu'en régime transitoire les grandeurs réglées convergent vers leurs valeurs de références dans les trois types de commandes avec un temps de réponse et un dépassement différent par contre en régime permanent les perturbations induites par l'onduleur nous empêchent de distinguer la différence entre les commandes appliquées.

# CHAPITRE IV ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES TECHNIQUES DE COMMANDE

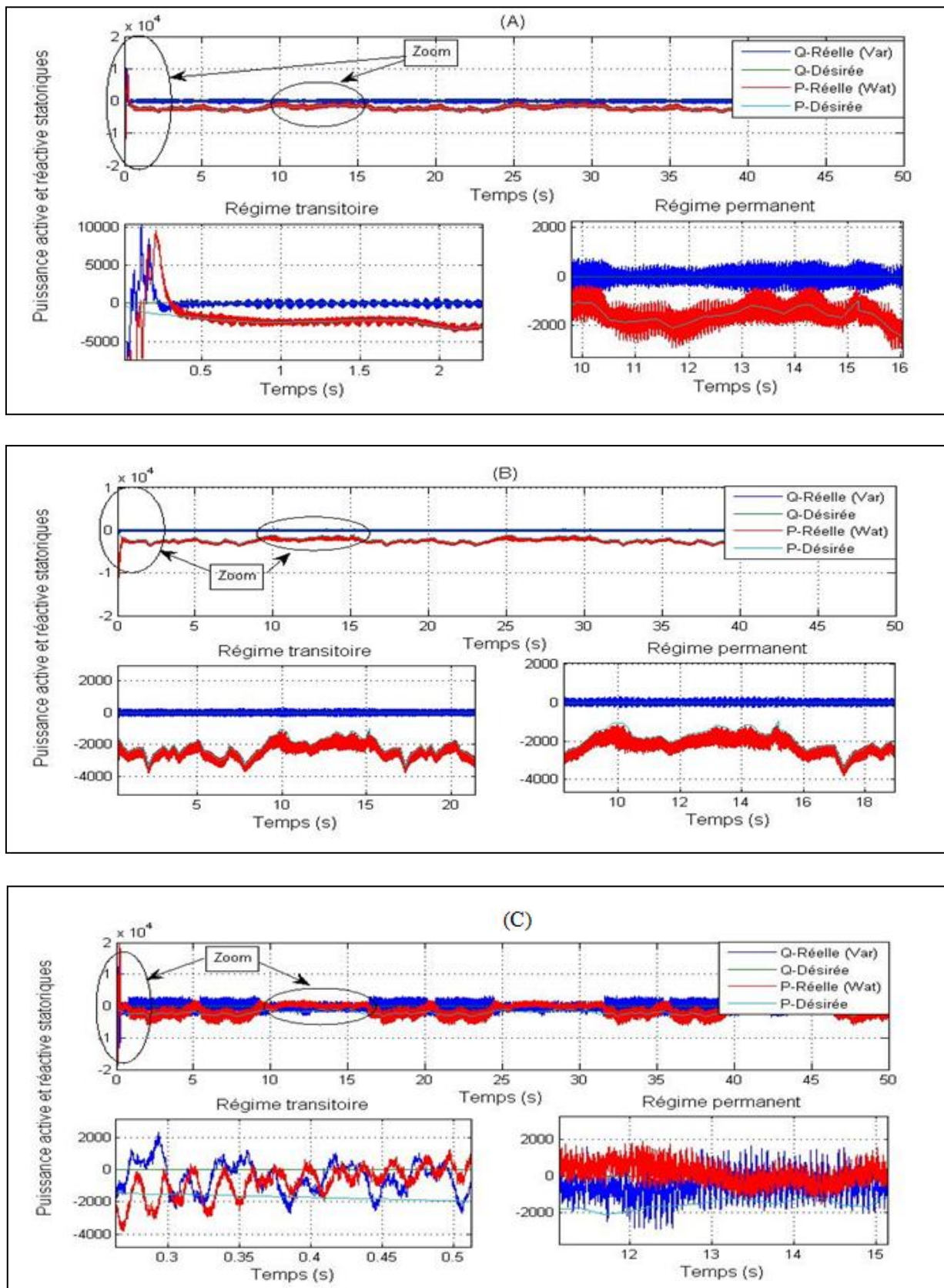


Figure IV-3 : Puissances active et réactive statoriques pour les trois commandes avec un zoom, (A) Contrôle vectoriel, (B) Contrôle par mode glissant. (C)-contrôle par logique floue

# CHAPITRE IV ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES TECHNIQUES DE COMMANDE

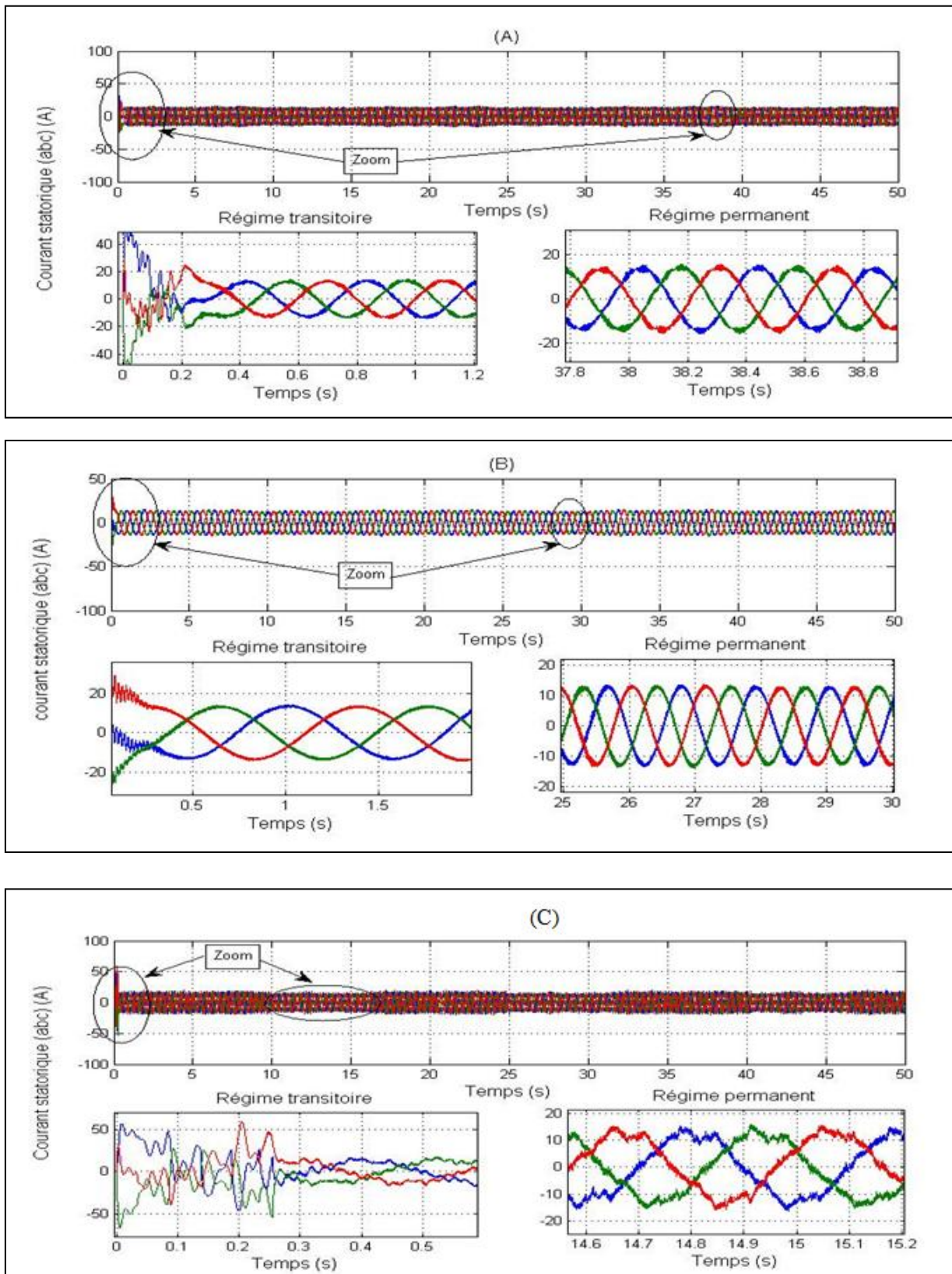


Figure IV-4 : Composantes du courant statorique pour les trois commandes avec un zoom.(A) Contrôle vectoriel, (B) Contrôle par mode glissant. (C)-contrôle par logique flou

# CHAPITRE IV ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES TECHNIQUES DE COMMANDE

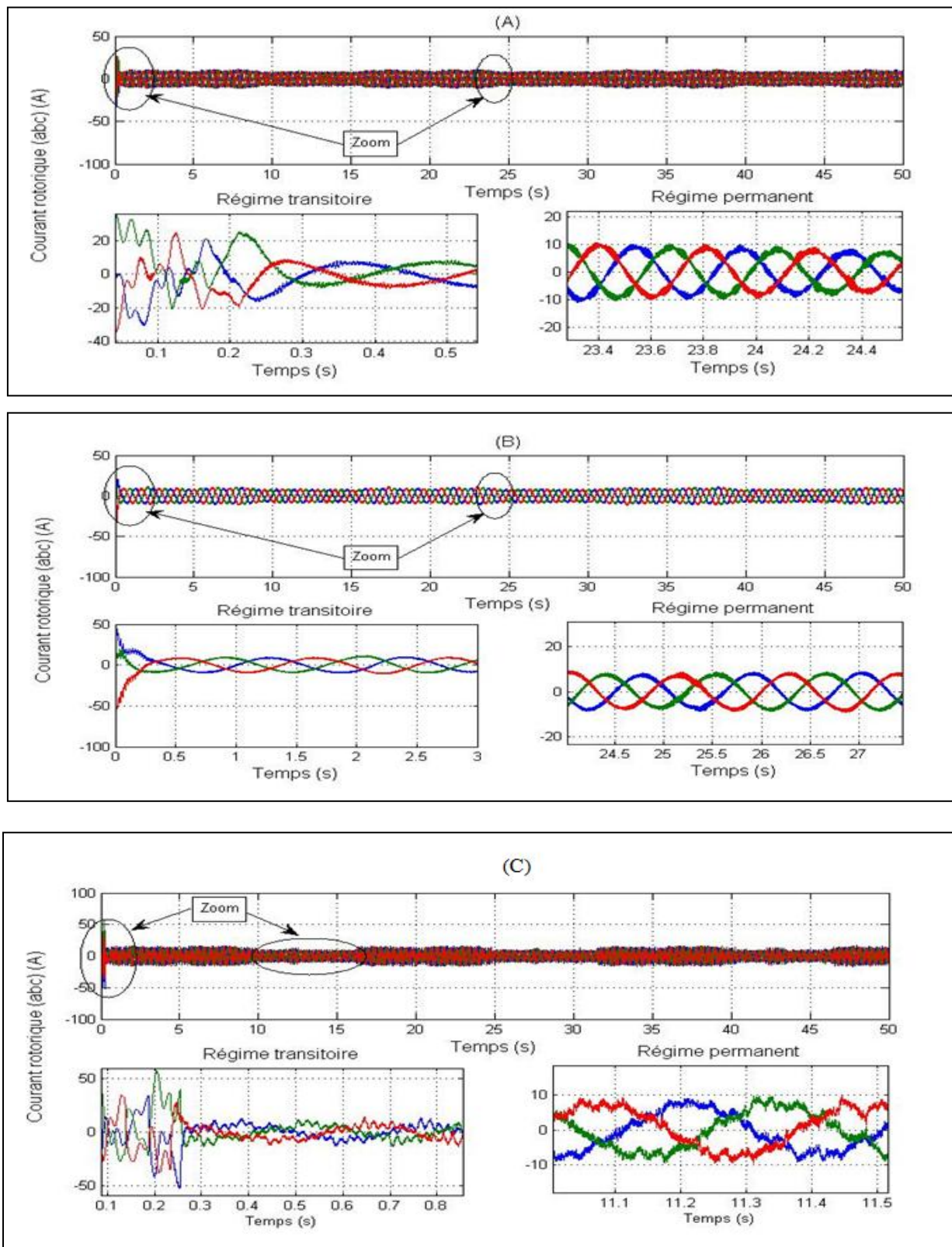


Figure IV-5 : Composantes du courant rotorique pour les trois commandes avec un zoom ; (A) Contrôle vectoriel, (B) Contrôle par mode glissant. (C)-contrôle par logique flou

### IV.3 CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude comparative entre toutes les commandes appliquées sur le système. Se basant sur la comparaison qualitative Les résultats de simulation obtenus montrent que la commande par logique flou est la commande la plus efficace et la plus performante dans le système de conversion d'énergie éolienne



# ***CONCLUSION GENERALE***



## CONCLUSION GENERALE

---

**L**e travail ici présenté avait pour principal objectif de contrôler les puissances de la chaîne de conversion aéro-électrique à base d'une machine asynchrone à double alimentation.

En premier lieu, on a fait un rappel sur l'énergie éolienne et les systèmes utilisés pour produire cette énergie le principe de conversion a caractéristique aérodynamique,

Dans le deuxième chapitre, une modélisation des différents composants de ce système a été menée. Ces modèles ont été utilisés pour l'élaboration de plusieurs techniques de commandes pour assurer un contrôle précis et continu des puissances statoriques générées tout en garantissant une performance rapide, stable, sans des erreurs pour atteindre un rendement et une qualité élevé du système. On a appliqué trois techniques de commandes qui ont été détaillées dans le troisième chapitre pour contrôler indépendamment l'échange des puissances statoriques produites vers le réseau, on a commencé par la commande vectorielle puis la commande par mode glissant enfin la commande par logique flou.

Dans le troisième chapitre et afin de mieux commander la puissance active et réactive statorique de l'aérogénérateur asynchrone à double alimentation, on a appliqué la technique de la commande vectorielle à la GADA ensuite, l'approche de la commande par mode glissant a été présentée et appliquée avec succès, enfin la commande par logique floue a été appliquée, cette commande nous a donné de bons résultats (temps de réponse, dépassement) de la puissance statorique.

Dans le quatrième chapitre on a fait une étude comparative qualitative entre les différentes techniques de commande et on a constaté que les résultats de simulation obtenus par la technique de commande par la logique floue sont les meilleures.

### Perspectives

Le thème est loin d'être parfaitement achever, Plusieurs axes de recherche peuvent être choisis comme suite du présent travail & développés dans le futur :

Entres autres on peut citer :

- ✓ Modifier l'architecture physique – mec & ele : Choisir un autre type de turbine, de machine (MSAP....), convertisseurs statiques (matriciel, multi .....
- ✓ Modifier l'architecture de la commande : choisir un autre type de régulateurs et commande, (chaos, backstepping les réseaux de neurones....)

## CONCLUSION GENERALE

---

- ✓ L'impact de l'intégration des systèmes éoliens dans les RE (load flow, stabilité, amélioration de EE (réactives et harmoniques).
- ✓ L'étude et l'application d'autres convertisseurs de niveaux supérieurs pour la minimisation des harmoniques renvoyés au réseau.
- ✓ L'établissement d'un modèle de la DFIG plus réaliste prenant en compte la saturation magnétique.
- ✓ Enfin, l'étude des perturbations de la production d'énergie éolienne vis-à-vis les déséquilibres du réseau électrique.



# ***BIBLIOGRAPHIE***



# BIBLIOGRAPHIE

---

## BIBLIOGRAPHIE

[1] M.E.H.Benbouzid et al., "The state of the art of generators for wind energy conversion systems," *Electromotion*, vol.14, n°4, pp.163-172, October-December 2007.

## CHAPITRE I

[I.1] P.Leconte et al., *Eoliennes*, Fiche BM4640, Septembre 2009 ::

[I.2] M.E.H. Benbouzid et al., "The state of the art of generators for wind energy conversion systems" in *Proceedings of the ICEM'06*, Chania (Greece), September 2006.

[I.3] [www.windpower.org](http://www.windpower.org).

[I.4] B. Raison et al., "L'énergie électrique éolienne, Partie I : Présentation générale et approche probabilistique" *Revue Internationale de Génie Electrique*, vol. 5/3-4, pp. 405-484, 2002.

[I.5] A.S. Neris et al., "A variable speed wind energy conversion scheme for connection to weak AC systems," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 14, n°1, pp. 122-127, March 1999.

[I.6] N. Abu-Tabak, "Stabilité dynamique des systèmes électriques multi machines: modélisation, commande, observation et simulation", Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2008.

[I.7] ROUABHI Riyadh «Étude et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation Application: Energie éolienne» Mémoire de Magister en Electrotechnique, UNIVERSITE FERHAT ABBAS —SETIF, 2012.

## CHAPITRE II

[II 1] S. EL AIMANI, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension ». Thèse de doctorat, École Centrale De Lille 2004.

[II 2] S.Abeddaim, A.Betka, S Drid, M Becherif, « Implementation of MRAC controller of a DFIG based variable speed grid connected wind turbine ». *Energy Convers Manage.* 79 (2014), pp. 281–288.

[II 3] A.Ourici, « Double flux orientation control for a doubly fed induction machine ». *Electrical Power and Energy Systems* 43 (2012) 617–620.

[II 4] L. Louze, « Production décentralisée de l'énergie électrique: Modélisation et contrôle d'une génératrice asynchrone auto excitée ». Thèse de doctorat D'université mentouri - Constantine. 08/07/2010.

[II 5] Endusa Billy Muhando, Member, IEEE, Tomonobu Senjyu, Senior Member, IEEE, « LQG Design for Megawatt-Class WECS With the DFIG Based on Functional Models' Fidelity Prerequisites ». *IEEE transactions on energy conversion*, vol. 24, no. 4, December 2009.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [II 6] B. Boukhezzar, H. Siguerdidjane, M. M. Hand, « Nonlinear control of variable-speed wind turbines for generator torque limiting and power optimization ». *Journal of Solar Energy Engineering*. Vol. 128, pp 516-530, ASME 2006.
- [II 7] V. Galdi, A. Piccolo, P. Siano \*, « Exploiting maximum energy from variable speed wind power generation systems by using an adaptive Takagi–Sugeno–Kang fuzzy model ». *Energy Conversion and Management*, vol: 50 (2009), PP. 413–421.
- [II 8] A. Abdelli, « Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive ». L'institut national polytechnique de Toulouse, 2007.
- [II 9] F.D. Bianchi, H. De Battista, R.J. Mantz, « Wind turbine control Systems, principles, modelling and Gain Scheduling Design ». Springer 2007.
- [II 10] V. Rogez, « Modélisation simplifiée de sources de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux. Application à l'intégration d'une production éolienne dans un réseau de distribution insulaire ». Thèse de Doctorat, Université D'Artois 2004.
- [II 11] N. Laverdure, « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires ». Thèse doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble 2005.
- [II 12] I. Munteanu, A. I. Bratcu, N.A Cutululis, E. Ceangă, « Optimal control of wind energy systems ». Springer 2008
- [II 13] S. Chekkal, N. Aouzellag Lahaçani, D. Aouzellag, K. Ghedamsi, « Fuzzy logic control strategy of wind generator based on the dual-stator induction generator ». *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 54, 2014, pp. 166-175.
- [II 14] S. Abdeddaim, A. Betka, « Optimal tracking and robust power control of the DFIG wind turbine ». *Int J Electr Power Energy Syst* 2013; 49(01), pp.: 234–242.
- [II 15] M. G. Molina, P. E. Mercado, « A new control strategy of variable speed win turbine generator for three-phase grid-connected applications ». *Power Systems Conference and Exposition*, vol.2, pp 759 – 764, IEEE 2008.
- [II 16] R. Rouabhi, R. Abdessemed, A. Chouder, A. Djerioui, « Hybrid Backstepping Control of a Doubly Fed Wind Energy Induction Generator ». *The Mediterranean Journal of Measurement and Control*, Vol: 11, N: 1, January 2015, pp. 367-376.
- [II 17] R. Rouabhi, , R. Abdessemed, A. Chouder, A. Djerioui, « Power Quality Enhancement of Grid Connected Doubly-Fed Induction Generator Using Sliding Mode Control ». *International Review of Electrical Engineering*, Vol: 10, N: 2, March-April 2015, pp. 266-276.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [II 18] R. Rouabhi, A. Djerioui, « Control of the power generated by variable speed wind turbine driving a doubly fed induction generator ». *Journal of Electrical Engineering*, Vol: 14 /2014-Edition:3, pp. 1-7.
- [II 19] N. Khezami, « Commande multimodèle optimale des éoliennes : Application à la participation des éoliennes au réglage de la fréquence ». Thèse de Doctorat, l'école centrale de Lille 2011.
- [II 20] Y. EL TOUS, « Pitch angle control of variable speed wind turbine ». *American J. of Engineering and Applied Sciences* 1 (2), pp 118-120, 2008.
- [II 21] S. Mokrane, « Modélisation et commande d'un aérogénérateur à machine asynchrone à double alimentation en vue de simulation des problèmes de cogénération ». Mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie, Université du Québec en Abitibi-Témiscaminque, Aout 2014.
- [II 22] N. Abu-tabak, « Stabilité dynamique des systèmes électriques multimachines: modélisation, commande, observation et simulation ». Thèse de Doctorat, École Centrale de Lyon 2008.
- [II 23] F. Boumaraf, « Commande D'un Aérogénérateur- Apport Des Techniques de L'intelligence Artificielle ». Thèse doctorat, Université de Batna, Alger, Le 24 Juin 2014.
- [II 24] D.Kairous, « Modélisation, Simulation et Commande d'un Système Éolien à Machine Asynchrone à Double Alimentation ». Thèse doctorat, l'Université d'Oran, Algérie 2013.
- [II 25] A. Dendouga, « Contrôle des puissances active et réactive de la machine à double alimentation (DFIM) ». Thèse doctorat, Université de Batna, Alger, Le 10/02/2010.
- [II 26] S. Hamecha, « Etude et commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à aimants Permanents ». Thèse doctorat, Université de Tizi-Ouzou, Alger, Le 13 Juin 2013.
- [II 27] F. KENDOULI, « Centrale éolienne et qualité de énergies électrique ». Thèse doctorat, À l'Université Mentouri de Constantine 2012.
- [II 28] Y. Soufi <sup>a,\*</sup>, T. Bahi <sup>b</sup>, S. Lekhchine <sup>b</sup>, D. Dib <sup>a</sup>, « Performance analysis of DFIM fed by matrix converter and multi level inverter ». *Energy Convers Manage.* 72 (2013) 187–193.
- [II 29] R. ROUABHI, «Etude et commande d'une machine asynchrone à double alimentation application énergie éolienne», Mémoire De Magister, Université Ferhat Abbas Sétif ,2012.
- [II 30] K. Belmokhtar, M.L. Doumbia , K. Agbossou, « Novel fuzzy logic based sensorless maximum power point tracking strategy for wind turbine systems driven DFIG (doubly-fed induction generator) ». *Energy*, Vol. 76, 2012, pp. 679-693.
- [II 31] K. Ouari , T. Rekioua <sup>a,\*</sup>, M.Ouhrouche <sup>b</sup>, « Real time simulation of nonlinear generalized predictive Control for wind energy conversion system with nonlinear observer ». *ISA Transactions*, Vol. 53, 2014, pp.76-84

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [II 32] O. Bouhali, « Contribution des convertisseurs multi niveaux au raccordement d'origine éolienne sur un réseau électrique ». Thèse doctorat, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger 2008.
- [II 33] Y. Mihoub, « Commande floue adaptative de la machine asynchrone ». Thèse Doctorat, Université Mohamed Boudiaf d'Oran, 08 février 2012.
- [II 34] O. e-Mun, « Dynamic simulation of electric machinery using matlab/Simulink ». Printice hall, 1998.

### CHAPITRE III

- [III 1] Y.Elbia , " Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à DoubleAlimentation et à Flux Orienté ", MémoiredeMagister en GénieElectrique Université de Batna, 2009.
- [III 2] H.Amimeur, "Contribution à la Commande d'une Machine Asynchrone DoubleEtoile par Mode de Glissement “, Mémoire demagister, Université de Batna , 2008
- [III 3] M.Adjoudj, "Commande Par Mode Glissant d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation Montée dans une Eolienne", Revue«Nature &Technologie»n° 02/Janvier2010.
- [III 4] M. Loucif, A. Boumediene and A. Mechernene, « Backstepping Control of Double Fed Induction Generator Driven by Wind Turbine ». Proceedings of the 3rd International Conference on Systems and Control, Algiers, Algeria, October 29-31, 2013IEEE.
- [III 5] Le-peng Song, Hui Li, « Simulation for Strategy of Maximal Wind Energy Capture of Doubly Fed Induction Generators ». 2010 Sixth International Conference on Natural Computation (ICNC 2010) IEEE.
- [III 6] H.T. Jadhav, Ranjit Roy, « A comprehensive review on the grid integration of doubly fed induction generator». Int J Electr Power Energy Syst, Vol. 49, No. 1, July 2013, pp. 8–18.
- [III 7] Ahmed M. Kassem, Khaled M. Hasaneen , Ali M. Yousef , « Dynamic modeling and robust power control of DFIG driven by wind turbine at infinite grid ». Electrical Power and Energy System 44 (2013).pp: 375–382.
- [III 8] F. Hachicha, L. Krichen, « Performance Analysis Of A Wind Energy Conversion System Based On A DFIG». 8th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices. 2011 IEEE.
- [III 9] K. Ouari <sup>a</sup>, T. Rekioua <sup>a,\*</sup>, M.Ouhrouche <sup>b</sup>, « Real time simulation of nonlinear generalized predictive control for wind energy conversion system with nonlinear observer ». ISA Transactions, Vol. 53, 2014, pp.76-84.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [III 10] N. Taib, B. Metidji, T. Rekioua, « Performance and efficiency control enhancement of wind power generation system based on DFIG using three-level sparse matrix converter ». *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 53, 2013, pp. 287-296.
- [III 11] S. Abdeddaim, A. Betka, « Optimal tracking and robust power control of the DFIG wind turbine ». *Int J Electr Power Energy Syst* 2013; 49(01), pp.: 234–242.
- [III 12] K. Ghedamsi, E.M. Berkouk, « Control of wind generator associated to a flywheel energy storage system». *Renewable Energy*, Vol 33, Issue 9, Elsevier (2008), pp 2145-2156.
- [III 13] F. Poitiers, « Etude et commande des génératrices asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne: machine asynchrone à cage autonome et machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau ». Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de Nantes. 12/2003.
- [III 14] A. Boyette, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne ». Thèse doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 2006.
- [III 15] P.EtienneVidal," Commande Non-Linéaire d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation ", Thèse Doctoratde l'institut national polytechnique, 2004.
- [III 16] S. ZEGHLACHE" Commande non linéaire d'un appareil à vol vertical" Thèse Doctorat, Université Mohamed Boudiaf M'sila, 2014
- [III 17] F.Z. TRIA, «Contribution à la commande d'un système éolien basé sur une MADA Par différentes techniques ». Mémoire de Magister en Génie Electrique Université d'El- oued 2013
- [III 18] S. Mokeddem, « Contrôle Flou des Processus Biotechnologiques à Base D'Algorithmes Génétiques ». Thèse Doctorat, Universite ferhat abbas de setif, 11 juillet 2010.
- [III 19] H. Ouakka, «Contribution à l'Identification et la Commande Floue d'une Classe de Systèmes Non Linéaires». Université Side Mohamed Ben Abdullah. Le 27/06/2009



# ***ANNEXES***



# ANNEXES

## Annexe A

### **PARAMETRE DE LA MADA**

Les paramètres de la machine asynchrone à double alimentation utilisé dans les simulations des chapitres II, III, IV qui sont résumés dans les tableaux suivant sont tirés de la thèse [I.7]

Paramètre	Valeur numérique
Puissance Nominale	$P_n = 4\text{KW.}$
Tension Simple Nominale	$v/U = 220/380\text{V} - 50\text{Hz}$
Vitesse de Rotation Nominale	$\Omega_n = 1425\text{tr/min}$
Courant Nominale	$i/I = 15/8.6\text{A}$
Résistance Statorique	$R_s = 1.2\Omega$
Résistance Rotorique	$R_r = 1.8\Omega$
Inductance Cyclique Statorique	$L_s = 0.1554\text{H}$
Inductance Cyclique Rotorique	$L_r = 0.1568\text{H}$
Inductance Mutuelle	$M = 0.15\text{H}$
Nombre de Paires de pôles	$P = 2$
Coefficient de Frottement	$f = 0.001\text{N.m.s/rd}$
Moment d'Inertie	$J = 0.2\text{Kg.m}^2$

### **PARAMETRE DE LA TURBINE EOLIENNE**

Les paramètres de la chaîne conversion aéro-électrique à base de la machine asynchrone à double alimentation utilisé dans les simulations du chapitre II et III sont résumés dans le tableau suivant :

Paramètre	Valeur numérique
Nombre de pale	$N_p = 3$
Diamètre d'une pale	$R_T = 3\text{m}$
Gain du multiplicateur de vitesse	$G = 5.4$
Inertie	$J = 315\text{Kg.m}^2$
Coefficient	$f = 0.0024\text{N.m.s/rd}$

### **PARAMETRES DU FILTRE**

Résistance du filtre	$R_f = 0.25\Omega$
Inductance du filtre	$0.005\text{H}$

### **Capacité du condensateur de lissage de la tension du bus continu:**

$$C = 4400\ \mu\text{F.}$$

Annexe B

**Dimensionnement du régulateur PI**

La figure (AN-1) montre un système en boucle fermée corrigé par un régulateur PI.

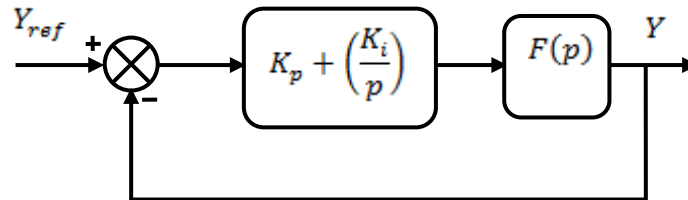


Figure AN-1: Schéma bloc d'un système réglé par un PI.

La forme du correcteur est la suivante:  $K_p + \left(\frac{K_i}{p}\right)$

Avec  $K_p$ : est le gain proportionnel du régulateur ;

$K_i$ : est le gain intégral du régulateur ;

Si on considère la fonction du transfert suivante:

$$F(p) = \left(\frac{K}{1 + \tau p}\right)$$

En boucle ouverte on aura la fonction de transfert suivante:

$$F_{BO}(p) = \left(\frac{K_p + \left(\frac{K_i}{p}\right)}{1 + \tau p}\right) = \left(\frac{K(K_p p + K_i)}{p \cdot (1 + \tau p)}\right) = KK_i \frac{1 + \left(\frac{K_p \cdot p}{K_i}\right)}{p \cdot (1 + \tau p)}$$

On prend  $\tau = \frac{K_p}{K_i}$

Alors  $F_{BO}(p) = \frac{K_i \cdot K}{p}$

En boucle fermée, la fonction de transfert s'écrit comme suit:

$$F_{BF}(p) = \left(\frac{K_i \cdot K}{K \cdot K_i + p}\right) = \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{K_i \cdot K} p}\right)$$

Pour attendre 95% de la consigne, le temps de repense  $t_r$  du système bouclé vaut:  $t_r = 3 \cdot \frac{1}{K_i \cdot K}$

Or  $K_i = \frac{K_p}{\tau}$  Alors  $t_r = 3 \cdot \frac{1}{K_p \cdot K}$

D'ou  $\begin{cases} K_p = 3 \cdot \frac{\tau}{t_r \cdot K} \\ K_i = \frac{3}{t_r \cdot K} \end{cases}$

## ملخص

في هذه المذكرة اقترحنا التحكم الانزلاقي والتحكم بالمنطق الغامض في نظام طاقة الرياح بالاعتماد على مولد لا تزامني ثنائي التغذية والهدف هو التحكم في الاستطاعة الناتجة عن النظام حيث إننا في البداية قدمنا دراسة وصفية للطاقة الهوائية والأنظمة المستخدمة في تحويل هذه الطاقة ثم وضعنا نمذجة لنظام تحويل طاقة الرياح وبعدها قدمنا أنواع تقنيات التحكم اللازمة للتحكم في الطاقة الفعالة والطاقة الإرتكاسية وفي الأخير وبالاعتماد على المحاكاة قمنا بإجراء دراسة مقارنة بين تقنيات التحكم المقترحة.

**كلمات مفتاحية:** ناعورة، آلة غير متزامنة ثنائية التغذية، التحكم الشعاعي الغير مباشر، التحكم الانزلاقي، التحكم الغامض، التحكم في الطاقة، سرعة متغيرة.

## Résumé

Dans ce travail une commande par mode glissant et mode flou a été proposé pour une génératrice asynchrone à double alimentation appliqué sur un système de conversion d'énergie de vent à vitesse variable, l'objectif est de contrôler d'une manière Independent la puissance active et réactive généré par la GADA, d'abord on a présenté l'état de l'art sur l'énergie éolienne et les systèmes de conversion utilisés, en suite nous avons fait la modélisation de la chaîne éolienne, puis on a présenté les différents techniques nécessaires pour contrôler la puissance active et réactive, en fin et se basant de simulation on a fait une étude comparative entre les technique proposés

**Mots clés :** Turbine, SPMP, Générateur d'induction doublement alimenté, contrôle vectoriel indirect, contrôle par mode glissant, controle par flou, commande de la puissance, vitesse variable

## Abstract

In this work a fuzzy mode and sliding mode control are proposed for a double-fed induction generator (DFIG), applied for a wind energy conversion system in variable speed. The objective is to independently control the active and reactive power generated by the DFIG, firstly we present the state of the art of wind energy and the used conversion systems, than we modeled the overall wind system, after that we presented the different necessary techniques of control the active and reactive power, finally and based on the simulation results we compared the different technique proposed.

**Index Terms:** turbine, MPPT, Doubly feed induction generator, indirect vector control, sliding mode control, fuzzy mode control, power control, variable speed.