

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



Numéro de série:

Numéro d'inscription: D.ELT/3C/01/14

Thèse

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT en Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique

THEME

AMELIORATION DE LA COMMANDE D'UN SYSTEME EOLIEN A
BASE D'UNE MACHINE MADA UTILISANT LES TECHNIQUES
INTELLIGENTES

Présenté Par

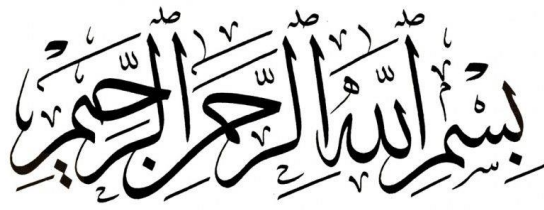
Said AZZOUZ

Soutenue le : 06/11/2019

Devant le Jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
SAIGAA Djamel	Professeur	Univ. de M'sila	Président
MESSALTI Sabir	Professeur	Univ. de M'sila	Encadreur
BENYETTOU Loutfi	MCA	Univ. de M'sila	Examineur
GHEMARI Zine	MCA	Univ. de M'sila	Examineur
MEDDAD Mounir	MCA	Univ. de BBA	Examineur
SAOUDI kamel	MCA	Univ. de Bouira	Examineur

Année Universitaire : 2019/2020



Dédicaces

Je dédie ce travail :

- A la mémoire de ma mère,*
- A mon cher père,*
- A mes chers frères et sœurs,*
- A toute ma famille,*
- A ma chère femme,*
- A ma chère petite fille « Chahad »*
- A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité.*

*Je ne peux pas clore mes dédicaces, sans rendre un grand hommage au **Pr. MESSALTI Sabir** pour m'avoir tout simplement donné une grande partie de l'énergie nécessaire pour conclure ce travail.*

Remerciements

Cette thèse a été effectuée au sein du laboratoire LGEM (Laboratoire de Génie Electrique M'sila) de l'Université Mohamed BOUDIAF de M'SILA.

Je tiens d'abord à remercier Monsieur **Pr. MESSALTI Sabir** Professeur à l'université de M'sila, d'avoir accepté de diriger mon travail. Je le remercie également pour ses qualités humaines et ses conseils précieux durant toutes les phases du travail.

Je tiens à remercier Monsieur **Pr. SAIGAA Djamel** Professeur à l'université de M'sila, pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury.

Il m'est agréable de pouvoir exprimer mes remerciements aux Monsieur **BENYETTOU Louffi** Maître de Conférences à l'université de M'sila pour son aide, ses encouragements et l'honneur qu'il nous fait en acceptant de participer à ce jury.

Un grand merci à Monsieur **GHEMARI Zine** Maître de Conférences à l'université de M'sila d'avoir accepté d'examiner ce travail et de faire partie du jury.

Que Monsieur **MEDDAD Mounir** Maître de Conférences à l'université de B.B.A, trouve ici l'expression de mes plus vifs remerciements pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Je tiens également à remercier Monsieur **SAOUDI kamel** Maître de Conférences à l'université de Bouira pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant d'examiner ce travail.

Je ne peux oublier de remercier Monsieur **Pr. HARRAG Abdelghani**, Professeur à l'Université Ferhat Abbas-Setif, pour sa disponibilité, sa serviabilité et son aide précieuse. Travailler avec lui est un grand plaisir.

Je suis très reconnaissant envers Monsieur **ZEMMIT Abderrahim** Maître de Conférences à l'université de M'sila, pour sa sympathie, ses qualités humaines et ses conseils.

Je remercie de tout mon cœur toute ma famille, qui depuis de si longues années, m'ont encouragé et soutenu dans la poursuite de mes études.

Enfin, je tiens à exprimer ma reconnaissance à mes collègues, mes amis, et toute personne ayant aidé, de près ou de loin, directement ou indirectement, à l'aboutissement de ce travail.

Said AZZOUZ

Liste des publications

Les travaux de recherches consignés par la présente thèse ont été concrétisés par plusieurs publications et communication internationales dont :

Publications Internationales :

1. **Said Azzouz.** Sabir Messalti. and Abdelghani Harrag. "A Novel hybrid MPPT controller using (P&O)-neural networks for variable speed wind turbine based on DFIG." *Modelling, Measurement and Control A*, 9.1 (2019): 23-29.
2. **Said Azzouz.** Sabir Messalti. and Abdelghani Harrag. " Innovative PID-GA MPPT Controller for Extraction of Maximum Power From Variable Wind Turbine." *Przeglad Elektrotechniczny* 16.5 (2019): 115-120.
3. **Said Azzouz.** Sabir Messalti. " Control of active and reactive power of DFIG by artificial neural networks." *Journal of engineering and applied science* 11.10 (2016): 2269–2273.
4. **Said Azzouz.** Sabir Messalti. " Novel fuzzy logic based sensorless maximum power point tracking strategy for WECS driven DFIG." (2019) papier accepté (lettre d'acceptation), Manuscript reference: 5768.

Conférences Internationales :

1. **Said Azzouz.** Sabir Messalti. and Abderrahim Zemmit. " Comparative study of control strategies for the double fed induction generator." *Second International Conference on Electrical Engineering, Biskra, Algeria ICEEB* (2018).
2. **Said Azzouz.** Sabir Messalti. and Abdelghani Harrag. " Novel fuzzy logic FLC MPPT controller driving Wind Energy Conversion Systems Based on DFIG controlled by artificial neural network." *The Seventh International Conference on Control Engineering & Information Technology, Tetouan, Morocco October* (2019): 1-6.
3. Sabir Messalti. **Said Azzouz.** "Artificial neural networks controller for power system voltage improvement." *IREC 2015 The Sixth International Renewable Energy Congress. IEEE , Tunisia* (2015): 1-6.
4. Abderrahim Zemmit. **Said Azzouz.** and Messalti Sabir. "Direct Torque Control-Fuzzy Logic Controller (DTC-FLC) of Doubly Fed Induction Machine (DFIM)." *Second International Conference on Electrical Engineering, Biskra, Algeria* (2018): 194-204.
5. Meryem Benakcha. Leila Benalia. and **Said Azzouz.** "Robust control of a dual stator induction generator used in wind power generation." *International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD). IEEE , Tunisia* (2017): 174-179.

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I

Généralités sur les systèmes éoliens

I.1 Introduction.....	6
I.2 Principe de l'énergie éolienne.....	6
I.3 Les différents types d'éoliennes.....	7
I.3.1 Les éoliennes à axe vertical.....	7
I.3.1.1 Aérogénérateurs à rotor de Darrieus.....	8
I.3.1.2 Aérogénérateurs à rotor de Savonius.....	8
I.3.1.3 Avantages et inconvénients des aérogénérateurs à axe vertical.....	8
I.3.2 Aérogénérateurs à axe horizontal.....	9
I.3.2.1 Les éoliennes à rotation lentes.....	9
I.3.2.2 Les éoliennes à rotation rapides.....	9
I.3.2.3 Avantages et inconvénients des aérogénérateurs à axe horizontal.....	10
I.4 Principaux composants d'une éolienne.....	10
I.5. Taille des éoliennes à axe horizontal.....	12
I.6 Classification des turbines éoliennes (suivant la taille).....	13
I.7 Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique.....	14
I.7.1 Le vent.....	14
I.7.1.1 Les forces de pression (Le grand responsable de phénomène).....	14
I.7.1.2 La force de coriolis.....	14
I.7.1.3 Les forces de frottements.....	14
I.7.2 Vitesse du vent.....	15
I.7.3 La conversion electromécanique.....	15
I.7.3.1 Les éoliennes à vitesse fixe.....	15
I.7.3.2 Les éoliennes à vitesse variables.....	16
I.7.4 Loi de Betz.....	18
I.8 Etat de l'art sur la machine asynchrone à double alimentation.....	19
I.5 Régimes de fonctionnement de la MADA.....	20
I.9 Fonctionnement à quatre quadrants de la MADA.....	21
I.10 Etude de la puissance pour la MADA.....	21
I.11 Convertisseurs de puissance associés à la MADA.....	22
I.12 Avantages et inconvénients de la MADA.....	25
I.13 Conclusion.....	27

Chapitre II

Modélisation du système éolien à vitesse variable basé sur une MADA

II.1 Introduction.....	29
II.2 Modélisation de la turbine éolienne.....	30

II.2.1	Modèle du multiplicateur de vitesse.....	31
II.2.2	Modélisation de l'arbre de la turbine	31
II.3	Modèle mathématique de la MADA.....	32
II.3.1	Hypothèses simplificatrices.....	33
II.3.2	Les équations électriques de la machine.....	34
II.3.3	Les équations magnétiques	35
II.3.4	Transformation de Park.....	35
II.3.4.1	Application de la transformation de Park à la MADA.....	36
II.3.5	Equations électriques et Magnétiques Suivant L'axe (u,v).....	37
II.3.5.1	Choix du référentiel	37
II.3.5.1.a	Référentiel fixé par rapport au stator (α, β)	38
II.3.5.1.b	Référentiel fixé par rapport au rotor (x, y)	38
II.3.5.1.c	Référentiel fixé par rapport au champ tournant (d, q)	38
II.3.6	Modélisation de la MADA en fonctionnement générateur	40
II.3.7	Résultats de simulation.....	41
II.3.7.1	Interprétation des résultats.....	44
II.4	Modèles du convertisseur de puissance.....	44
II.4.1	Modélisation de l'onduleur de tension.....	45
II.4.2	Commande par Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI)	47
II.4.3	Modélisation du filtre	49
II.5	Conclusion.....	50

Chapitre III

Commande Vectorielle de la MADA

III.1	Introduction.....	52
III.2	Méthodes de recherche du point maximum de puissance.....	52
III.2.1	Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation.....	54
III.2.2	Contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation.....	55
III.3	Commande vectorielle de la MADA.....	57
III.3.1	Procède d'orientation du flux	57
III.3.2	Commande vectorielle par orientation du flux statorique.....	57
III.4	Contrôle indépendant des puissances.....	58
III.4.1	Modèle de la MADA a flux statorique orienté.....	58
III.4.2	Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques.....	60
III.4.3	Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques.....	61
III.5	Méthodes de la commande vectorielle.....	63
III.5.1	Commande vectorielle directe (CVD).....	64
III.5.2	Commande vectorielle indirecte (CVI).....	64
III.5.2.1	La commande indirecte en boucle ouverte.....	65
III.5.2.2	Commande indirecte en boucle fermé.....	65

III.6 Résultats de simulation.....	67
III.7 Test robustesse.....	74
III.8 Interprétation des résultats.....	76
III.9 Conclusion.....	76

Chapitre IV

Commande robuste du MADA par mode glissant

IV.1 Introduction.....	79
IV.2 Principe de la commande par mode de glissement des systèmes à structure variable.....	79
IV.3 Théorie de la commande par mode de glissement.....	80
IV.4 Généralités sur la Théorie du Contrôle par Mode Glissant.....	81
IV.4.1 Structure par commutation au niveau de l'organe de commande.....	81
IV.4.2 Structure par commutation au niveau d'une contre réaction d'état.....	81
IV.4.3 Structure par commutation au niveau de l'organe de commande, avec ajout de la commande equivalente.....	82
IV.5 Conception de l'algorithme de commande par le mode glissant.....	83
IV.5.1 Choix des surfaces de glissement.....	83
IV.5.2 Conditions d'existence et de convergence du régime glissant.....	83
IV.5.2.1 Approche directe.....	84
IV.5.2.2 La fonction de Lyapunov.....	84
IV.5.3 Détermination de la loi de commande.....	84
IV.6 Minimisation du phénomène du broutement (chattering).....	87
IV.6.1 Proposition de slotine.....	87
IV.6.2 proposition de harshima.....	88
IV.7 Application de la commande par le mode glissant au contrôle des puissances active et réactive du MADA.....	89
IV.7.1 Contrôle de la puissance active statorique.....	89
IV.7.2 Contrôle de la puissance réactive statorique.....	90
IV.8 Résultats de simulation à vitesse constante.....	92
IV.9 Interprétation des résultats.....	94
IV.10 Conclusion.....	94

Chapitre V

Commande d'un système éolien par les réseaux de neurones artificiels

V.1 Introduction.....	97
V.2 Bref historique.....	97
V.3 Domaines d'application des réseaux de neurones.....	99
V.3.1 Traitement du signal.....	99
V.3.2 Classification des signaux.....	99
V.3.3 Identification des processus.....	99
V.3.4 Reconnaissance des formes.....	99
V.3.5 L'application au diagnostic.....	100

V.3.6 L'application au contrôle.....	100
V.3.7 Application militaires	100
V.3.8 La planification.....	100
V.4 Neurone biologique.....	100
V.4.1 Modèle de neurone biologique.....	100
V.4.2 Structure de neurone	101
V.4.2.1 Le corps cellulaire	101
V.4.2.2 Les dendrites.....	101
V.4.2.3 L'axone.....	101
V.4.2.4 Les synapses.....	102
V.5 Fonctionnement des neurones	102
V.6. Réseau de neurone artificiel.....	102
V.6.1 Modélisation.....	103
V.6.1.1 Nature des entrées.....	104
V.6.1.2 Fonction d'entrée totale	104
V.6.1.3 Fonction d'activation	105
V.6.1.4 Fonction de sortie	106
V.6.2 Propriétés des réseaux de neurones	106
V.6.2.1 L'approximation universelle.....	106
V.6.2.2 Le parallélisme.....	106
V.6.2.3 La capacité d'adaptation.....	106
V.6.2.4 La résistance aux pane.....	106
V.6.2.5 La capacité de généralisation.....	106
V.6.2.6 Structure de connexion.....	107
V.7 Topologie des réseaux de neurones	107
V.7.1. Les réseaux statiques ou réseau à couche (Fed forward).....	107
V.7.2. Les réseaux dynamiques ou entièrement connectés ou récurrents (Fed back network).....	108
V.7.3 Réseaux de neurones a architecture évolutive.....	109
V.8 Apprentissage des réseaux de neurones	109
V.8.1 Apprentissage supervisé	109
V.8.2 Apprentissage non supervisé	110
V.8.3 Apprentissage hybride.....	110
V.8.4 Apprentissage par renforcement (semi-supervisé) :.....	110
V.9 Algorithme de retro propagation.....	110
V.10 Les étapes d'algorithme de rétro propagation.....	111
V.11 Application des réseaux de neurones	112
➤ L'extraction de maximum de puissance par les réseaux de neurones	112
➤ Contrôle des puissances par les réseaux de neurones.....	113
V.12 Résultats de simulation.....	114
V.13 Interprétation des résultats.....	119
V.14 Contrôleur RNA-MPPT selon la méthode P&O.....	120
V.15 Conclusion	122

Chapitre VI

Utilisation des algorithmes génétiques pour extraire de la puissance maximale d'un système éolien à base d'une MADA

VI.1 Introduction.....	124
VI.2 Présentation et principes des algorithmes génétiques:.....	125
VI.3 Fonctionnement des Algorithmes Génétiques:.....	125
VI.4 Description détaillé des algorithmes génétiques.....	127
VI.4.1 Population initiale	127
VI.4.2 Codage des chromosomes	127
VI.4.2.1 Le codage binaire.....	127
VI.4.2.2 Codage réel.....	128
VI.4.3 Fonction d'adaptation évaluation	128
VI.4.4 Opérateurs d'un AG.....	129
VI.4.4.1 Sélection	129
VI.4.4.1.a Sélection par la roulette.....	129
VI.4.4.1.b Sélection par ordonnancement.....	130
VI.4.4.1.c Sélection par tournoi	131
VI.4.4.1.d Sélection uniforme	131
VI.4.4.2 Reproduction (Croisement ou Crossover).....	131
VI.4.4.2.a Croisement à un point de coupure (ou discret).....	132
VI.4.4.2.b.Croisement à deux points.....	132
VI.4.4.2.c Croisement multiple (multipoints)	133
VI.4.4.2.d Croisement arithmétique (barycentrique)	134
VI.4.4.2.e Croisement uniforme (continu)	134
VI.4.5 Mutation	135
VI.5 Influence des paramètres d'un AG.....	137
VI.5.1 Taille de la population	137
VI.5.2 Probabilité des opérateurs génétiques	138
VI.5.2.1 Probabilité de croisement	138
VI.5.2.2 Probabilité de mutation.....	138
VI.5.3 Critère d'arrêt	138
VI.6 Applications de technique MPPT-GA pour l'optimisation de système éolienne.....	138
VI.6.1 Optimisation du régulateur PI par les Algorithme Génétiques	139
VI.8 Résultats de simulation	140
VI.9 Interprétation des résultats.....	144
VI.10 Conclusion.....	144
Conclusion générale.....	146
Résumé.....	148
Annexes.....	150
Bibliographiques.....	154

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	07
Figure I.2 Aérogénérateur à axe vertical.....	08
Figure I.3 éoliennes à axe horizontal.....	12
Figure I.4 Evolution de la taille des éoliennes avec la puissance fournie.....	13
Figure I.5 Eolienne à vitesse fixe à base de la machine asynchrone à cage.....	16
Figure I.6 Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA.....	16
Figure I.7 Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne.....	17
Figure I.8 Coefficient de puissance.....	18
Figure I.9 Coefficient de puissance pour les différents types d'aérogénérateurs.....	18
Figure I.9 Stator.....	19
Figure I.10 Rotor bobiné.....	19
Figure I.11 Coupe d'une machine asynchrone à rotor bobiné (standard).....	19
Figure I.12 Modes et régimes de fonctionnement de la MADA.....	21
Figure I.13 MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée.....	22
Figure I.14 MADA, structure Kramer.....	23
Figure I.15 Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.....	24
Figure I.16 Principe de fonctionnement du cycloconvertisseur.....	24
Figure I.17 structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.....	25

Chapitre II

Figure II.1 Système de conversion éolienne à base de la MADA.....	29
Figure II.3 Schéma bloc de la turbine éolienne.....	32
Figure II.4 Représentation de la MADA dans le système triphasé.....	34
Figure II.7 Position spatiale des différents référentiels.....	37
Figure II.8 Les composantes du courant statoriques de la MADA.....	41
Figure II.9 Les composantes du courant rotoriques de la MADA.....	42
Figure II.10 Les composantes du flux statoriques de la MADA.....	42
Figure II.11 Les composantes du flux rotoriques de la MADA.....	42
Figure II.12 Les puissances active, réactive et apparente statoriques de la MADA.....	42
Figure II.13 Les puissances active, réactive et apparente rotoriques de la MADA.....	43
Figure II.14 Les courants statoriques triphasées avec un zoom.....	43
Figure II.15 Les courants rotoriques triphasées avec un zoom.....	43
Figure II.16 Les tensions statoriques et rotoriques triphasées (a,b,c) de la MADA.....	44
Figure II.17 Onduleur de tension triphasé à deux niveaux.....	45
Figure II.18 Représentation d'un bras.....	46
Figure II.19 Principe et réponses de la commande MLI sinus-triangle.....	48
Figure II.20 Schéma synoptique.....	48
Figure II.21 Représentation du filtre RLC.....	49

Chapitre III

Figure III.1 Courbe typique de la puissance produite d'un aérogénérateur à vitesse variable.....	52
Figure III.2 Contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation.....	55
Figure III.3 Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation.....	56
Figure III.4 Illustration de l'orientation du flux statorique.....	58
Figure III.5 Bloc du F.O.C (field oriented control).....	61
Figure III.6 Schéma bloc du modèle simplifié de la MADA.....	63
Figure III.7 Schéma de principe de la commande directe de la MADA.....	64
Figure III.8 Schéma de la commande indirecte sans contrôle des puissances de la MADA.....	65
Figure III.9 Schéma de la commande indirecte avec contrôle de puissance de la MADA.....	66
Figure III.10 Schéma bloc de la commande vectorielle directe à flux statorique orienté de la MADA sous MATLAB/Simulink.....	66
Figure III.11 Puissance active statorique de la MADA par la commande vectorielle.....	68

Figure III.12 Puissance réactive statorique de la MADA par la commande vectorielle	69
Figure III.13 Profil du vent appliqué	70
Figure III.14 La puissance de la turbine (aérodynamique).....	70
Figure III.15 Le couple aérodynamique.....	70
Figure III.16 couple électromagnétique.....	71
Figure III.17 La vitesse du rotor (mécanique).....	71
Figure III.18 la vitesse de la turbine.....	71
Figure III.19 Evolution de la puissance active du turbine obtenue par PI, avec zoom.....	72
Figure III.20 Vitesse relative de l'éolienne.....	73
Figure III.21 coefficient de puissance de la turbine éolienne.....	73
Figure III.22 La puissance active statorique avec une variation de la résistance et l'inductance rotorique de +30% de sa valeur nominale.....	74
Figure III.23 La puissance réactive statorique avec une variation de résistance et l'inductance rotorique de +30% de sa valeur nominale	75

Chapitre IV

Figure IV.1 Structure de régulation par commutation au niveau de l'organe de commande.....	81
Figure IV.2 Structure de régulation par commutation au niveau de la contre-réaction d'état.....	82
Figure IV.3 Structure de régulation par ajout de la commande équivalente.....	83
Figure IV.5 Interprétation de $U_{\text{éq}}$	85
Figure IV.7 La trajectoire dans le plan de phase.....	86
Figure IV.8 fonction de saturation SAT -un seuil- (Commande adoucie).....	87
Figure IV.9 Fonction de saturation SAT - deux seuils -(zone morte).....	88
Figure IV.10 Commande intégrale (fonction cont).....	88
Figure IV.11 Schéma fonctionnel de la commande directe par mode glissant appliqué au MADA.....	91
Figure IV.12.a Schéma fonctionnel de la commande par mode glissant utilisant la fonction sign, appliquée au MADA sous l'environnement Matlab/Simulink.....	92
Figure IV.12.b Schéma fonctionnel de la commande par mode glissant utilisant la fonction de lissage cont appliquée au MADA sous l'environnement Matlab/Simulink.....	93
Figure IV.13 Puissance active statorique de la MADA par mode glissant.....	93
Figure IV.14 Puissance réactive statorique de la MADA par mode glissant.....	94

Chapitre V

Figure V.1 Schéma du neurone biologique.....	101
Figure V.2 Modèle architectural d'un neurone formel	104
Figure V.3 Structure d'un réseau statique avec une couche cachée.....	108
Figure V.4 Réseau de neurone de Hop Field.....	108
Figure V.6 Contrôleur RNA développer pour l'extraction du maximum de puissance, MPPT-RNA.....	113
Figure V.7 Le schéma de principe de l'éolienne comprend le RNA-MPPT.....	113
Figure V.8 Schéma de simulation de la MADA utilisant les réseaux de neurones	114
Figure V.9 La puissance active statorique de la MADA.....	114
Figure V.10 La puissance réactive statorique de la MADA.....	114
Figure V.11 Composante du courant rotorique quadrature.....	114
Figure V.12 Composante du courant rotorique direct.....	114
Figure V.13 Profil du vent appliqué.....	115
Figure V.14 La puissance de la turbine (aérodynamique).....	115
Figure V.15 La vitesse du rotor (vitesse mécanique).....	115
Figure V.16 Le couple électromagnétique.....	116
Figure V.17 Evolution de la puissance active du turbine obtenue par MADA-RNA et MPPT-RNA.....	116
Figure V.18 Puissance réactive statorique et sa référence.....	117
Figure V.19 Vitesse relative de la turbine	117
Figure V.20 Coefficient de puissance de la turbine.....	117
Figure V.21 (a) Les courants statoriques triphasées, avec (b) un zoom.....	118
Figure V.22 (a) Les courants rotoriques triphasées, avec (b) un zoom	119
Figure V.23 Schéma de principe de la commande du système d'éolienne.....	120

Figure V.24 Régulateur RNA-MPPT développé en utilisant la règle P&O.....	121
Figure V.25 Profil de vent	121
Figure V.26 Coefficient de puissance	121
Figure V.27 Puissance du sortie de la turbine	121
Figure V.28 Vitesses de rotation optimales.....	121

Chapitre VI

Figure VI.1 Schéma de principe d'un algorithme génétique.....	126
Figure VI.2 Exemple de sélection par la roulette.....	130
Figure VI.3 Représentation schématique du croisement en un point de coupure (un seul site).....	132
Figure VI.4 Croisement à deux points de coupure.....	133
Figure VI.5 Croisement multiple (cas de 5 points de coupure).....	133
Figure VI.6 Croisement arithmétique.....	134
Figure VI.7 Croisement uniforme.....	135
Figure VI.8 Exemple d'une mutation en un point dans une chaîne binaire.....	136
Figure VI.11 Schéma bloc d'implantation proposée de l'Algorithme Génétique pour l'ajustement des gains K_p et K_i du régulateur PI dans la commande MPPT.....	140
Figure VI.12 Profil du vent appliqué.....	140
Figure VI.13 La puissance aérodynamique de la turbine.....	140
Figure VI.14 la vitesse de la turbine.....	140
Figure VI.15 La vitesse du rotor (mécanique).....	140
Figure VI.16 Evolution de couple électromagnétique du turbine, obtenue par RNA et MPPT-AG.....	141
Figure VI.17 Evolution de la puissance active du turbine obtenue par RNA-MADA et MPPT-AG.....	142
Figure VI.18 Puissance réactive de la turbine et sa référence avec un zoom.....	143
Figure V.19 Vitesse relative de la turbine.....	143
Figure V.20 Courant et tension d'une phase statorique de la MADA avec Zoom.....	143
Figure V.21 Les courants statoriques triphasées de la MADA avec Zoom.....	143

Liste des tableaux

Tableau I.1 classification des turbines éoliennes.....	13
Tableau I.2 catégories selon l'échelle Beaufort.....	15
Tableau I.3 Les puissance dans les quatre quadrants.....	22
Tableau V.1 Modèles de fonctions d'activation.....	105

Glossaire

Liste non-exhaustive des principaux paramètres et variables

✓ **Acronymes et abréviations**

SCEE	: Système de conversion de l'énergie éolienne.
MPPT	: Maximum power point tracking.
FLC	: Fuzzy logic control.
MG	: Mode glissant.
WECS	: Wind energy conversion system.
SMC	: Sliding mode control.
VAWT	: Vertical axis wind turbine.
HAWT	: Horizontal axis wind turbine.
Cp	: Coefficient de puissance.
MLI	: Modulation de largeur d'impulsion.
P&O	: Perturbe and observe.
Kp	: Gain proportionnel.
Ki	: Gain intégral.
Kd	: Gain dérivative.
CV	: Commande vectorielle.
MADA (DFIM)	: Machine asynchrone double alimentation.
GADA (DFIG)	: Générateur asynchrone à double alimentation.
AG	: Algorithme génétique.
MLI	: Modulation à largeur d'impulsions.
IGBT	: Insulated gate bipolar transistor.
GTO	: Gate turn off.
PI	: Action proportionnelle et intégrale.
RNA (ANN)	: Réseaux de neurones artificiels.
FTBO	: Fonction de transfert en boucle ouverte.
FTBF	: Fonction de transfert en boucle fermée.

✓ Notations et Symboles

Turbine :

v	m/s	Vitesse du vent.
β	degré	Angle de l'orientation de pale.
C_p		Coefficient de puissance.
$\rho = 1.22$	kg / m ³	Densité d'air.
λ		Ratio de vitesse.
λ_{opt}		Valeur optimale du ratio de vitesse.
R_T	m	Rayon des pales.
S	m ²	Surface circulaire balayée par la turbine.
Ω_T	rad/s	Vitesse angulaire de la turbine.
Ω_m	rad/s	Vitesse angulaire de l'arbre du générateur.
G		Le rapport de multiplication.
C_T	N.m	Couple de la turbine.
C_m	N.m	Le couple mécanique disponible sur l'arbre du générateur.
J	kg/m ²	Inertie totale de la chine éolienne.
J_T	kg / m ²	Inertie de la turbine : comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine.
J_g	kg / m ²	L'inertie de la génératrice.
$C_{arb} = C_g$	N.m	Couple moteur disponible à la sortie du multiplicateur.
P_T	W	Puissance aérodynamique extraite par la turbine.

GADA-CV :

θ	rad	Angle entre un enroulement rotorique et son homologue statorique.
θ_s, θ_R	rad	Angle entre la phase A du stator (respectivement rotor) et l'axe d.
ω_s	rad/s	Pulsation électrique des grandeurs statoriques (champ tournant).
ω_r	rad/s	Pulsation électrique des grandeurs rotoriques (Pulsation de glissement).
$\omega = P\Omega$	rad/s	Pulsation électrique correspondante à la vitesse de rotation.
ω_{coor}	rad/s	Pulsation électrique correspondante à la vitesse du système d'axe (u, v).
Ω	tr/min	Vitesse mécanique.
Ω_{ref}	tr/min	Vitesse mécanique de référence.
C_{em}	N.m	Couple électromagnétique.
C_r	N.m	Couple résistant.

R_s, R_r	Ω	Résistances des phases statoriques et rotoriques.
L_s, L_r	H	Inductances propres des phases statoriques et rotoriques.
M_s, M_r	H	Inductances mutuelles entre phases statoriques et rotoriques.
$[M_{sr}]$	H	Matrice des inductances mutuelles (matrice de couplage stator-rotor).
M_{\max}	H	Mutuelle max entre une phase statorique et une phase rotorique.
$[I_{sa} I_{sb} I_{sc}]^T$	A	Vecteurs des courants statoriques dans le repère (a b c).
$[I_{ra} I_{rb} I_{rc}]^T$	A	Vecteurs des courants rotoriques dans le repère (a b c).
$[V_{sa} V_{sb} V_{sc}]^T$	V	V ecteurs des tensions statoriques dans le repère (a b c).
$[V_{ra} V_{rb} V_{rc}]^T$	V	Vecteurs des tensions rotoriques dans le repère (a b c).
$[\phi_{sa} \phi_{sb} \phi_{sc}]^T$	Wb	Vecteurs des flux statoriques dans le repère (a b c).
$[\phi_{ra} \phi_{rb} \phi_{rc}]^T$	Wb	Vecteurs des flux rotoriques dans le repère (a b c).
$I_{sd}, I_{sq}, I_{rd}, I_{rq}$	A	Courants statoriques et rotoriques dans le repère (d q).
$V_{sd}, V_{sq}, V_{rd}, V_{rq}$	V	Tensions statoriques et rotoriques dans le repère (d q).
$\phi_{sd}, \phi_{sq}, \phi_{rd}, \phi_{rq}$	wb	Flux statoriques et rotoriques dans le repère (d q).
P_s, P_r	W	Puissance active statorique et rotorique.
φ_s, φ_r	VAR	Puissance réactive statorique et rotorique.
S_s, S_r	VA	Puissance apparente statorique. et rotorique.
$[P]$ et $[P]^{-1}$		Matrices de passage et inverse de Park.
f_t	N.s/ra	Coefficient des frottements visqueux.
g	d	Coefficient de glissement.
P		Nombre de paires de pôle.
s, p		Opérateur de Laplace.
T_s, T_r	s	Constante de temps électrique statorique et rotorique.
$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$		Coefficient de dispersion magnétique (coefficient de Blondel).

CMG :

VSS	Systeme à structure variable.
$X \in R^n$	Vecteur d'état.
$V_{rq} V_{rd}$	Vecteur de commande.
x_d	Valeur d'état désirée.

n	Ordre du système.
$e(x)$	Écart de la variable à réguler.
$S(x)$	Surface de glissement.
$S(P_s)$	La surface de la puissance active statorique.
$S(\varphi_s)$	La surface de la puissance réactive statorique.
$U^{eq}, V_{rq}^{eq}, V_{rd}^{eq}$	Vecteur de commande équivalente.
U^n, V_{rq}^n, V_{rd}^n	Vecteur de commande discontinue.

RNA :

x_i	Vecteur d'entrées du neurone.
w	Coefficients de pondération appelés aussi coefficients synaptiques, (ou poids).
w_{ij}	Le coefficient synaptique de la connexion entre le neurone i d'une couche et le neurone j de la couche précédente.
S	Potentiel somatique du neurone.
S_{pi}	potentiel somatique du neurone i .
f	Fonction d'activation ou fonction de seuillage (de décision).
θ	Seuil du neurone.
y	Sortie de neurone.
T_{pi}	Sortie désirée (Target).
p	Nombre d'exemple ou de la longueur de l'ensemble d'entraînement
α	Pas d'adaptation.
n	Numéro d'itération.
u_i	Neurone appartenant aux couches cachées.

AG :

P	La population.
E	L'espace de recherche.
N	Le nombre total d'individus dans la population (taille de la population).
$F(x_i)$	La valeur de la fonction d'adaptation correspondante au $i^{\text{ème}}$ individu.
P_c	Probabilité de croisement.
C	Un chromosome.

y	Un gène.
L	La longueur du chromosome.
C_1^i	Parent 1.
E_1^i	Enfant généré.
n	La longueur du chromosome.
C_k^i	Bit i dans le chromosome k (Parent k).
n	La base du codage.
r	Nombre produit aléatoirement dans l'intervalle $[0,1]$.
t	Numéro de la génération.
T	Indice de génération pour laquelle l'amplitude de la mutation s'annule.

Introduction générale

Introduction générale

Aujourd'hui, le développement des sociétés s'explique par la production et la consommation d'énergie. L'accès à l'électricité est maintenant une exigence fondamentale de l'humanité. Une relation forte se situe entre le niveau de consommation d'énergie et la qualité de vie dans les pays modernes.

L'intense industrialisation des dernières décennies, la multiplication des appareils domestiques électriques, le transport, les moyens de communication, et en raison de l'expansion exponentielle de la technologie ont conduit à des besoins planétaires en énergie électrique considérables. Cependant, la plus grande partie de l'énergie consommée actuellement provient de l'utilisation des combustibles fossiles comme le pétrole, le charbon ou le gaz naturel. Ces ressources deviennent de plus en plus rares, pendant que les demandes énergétiques du monde s'élèvent continuellement [1] [2].

Les ressources énergétiques traditionnelles, d'origines principalement fossiles, ne peuvent être exploitées que pour quelques décennies, (leur vitesse de régénération est extrêmement lente à l'échelle humaine). La production fossile va atteindre son pic dans moins de trente ans à cause de la réduction progressive et inéluctable des ressources pétrolières. Il est estimé que les réserves mondiales seront épuisées vers 2040 si la consommation n'est pas radicalement modifiée, et au maximum vers 2090 si des efforts sont produits sur la production et la consommation. De plus, ce type de production d'énergie est très polluant en raison des émissions de CO₂ provenant de ces sources conventionnelles [3-5].

Face à cette demande, toujours croissante de nos jours, les pays industrialisés ont massivement fait appel aux centrales nucléaires. D'autre part, les déchets des centrales nucléaires posent d'autres problèmes en terme de pollution des déchets radioactifs, du démantèlement prochain des vieilles centrales et du risque industriel.

La demande toujours croissante de sources d'énergie à motiver les décideurs politiques des principaux pays industrialisés et des pays émergents à rechercher de nouveaux moyens de production d'énergie plus propres et respectueux de l'environnement.

Le développement des sources d'énergies renouvelables et non polluantes est donc d'actualité. Au cours des deux dernières décennies, les avancées technologiques dans le secteur de l'électronique de puissance ont permis d'exploiter diverses sources d'énergie renouvelables possibles [6-7].

Le soleil envoie chaque année à la surface de la Terre 10 000 fois plus d'énergie que la planète en consomme. Presque toutes les énergies renouvelables sont des dérivées de l'énergie

solaire: le vent, le rayonnement solaire, ou l'énergie hydraulique sont des produits directs ou indirects de l'activité solaire. Les plus importants sont le solaire et le vent, le vent étant la source d'énergie renouvelable la plus rapide au monde [8-10].

L'énergie du vent n'est pas un nouveau concept pour l'humanité. Le mot « éolien » dérive du mot grec «Eoelos » qui représente le Dieu du vent, elle a été utilisée depuis de nombreux siècles, notamment pour faire avancer les bateaux, moulinier la graine, de pomper de l'eau, et pour produire de l'électricité.

Les premières éoliennes ne font leur apparition véritablement qu'à la fin du XIX^{ème} siècle, sous forme expérimentale. C'est l'américain Charles F. B qui conçoit ce dispositif en premier pour alimenter sa maison en électricité, en 1888. L'arrivée de l'électricité donne l'idée à le danois Poul La Cour en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice. Les recherches allèrent bon train dans les années 1920.

Les aérogénérateurs sont des dispositifs électromécaniques qui consistent d'une turbine à vent accouplée à un générateur à courant alternatif permettant de convertir directement l'énergie mécanique du vent en énergie électrique.

Aujourd'hui, la puissance éolienne installée en Europe croît de 30% par an ; cette hausse est comparable à celle qu'a connue le nucléaire durant les années 1970. Le marché mondial de l'énergie éolienne progresse plus rapidement que celui de toute autre source d'énergie renouvelable. Le total mondial, qui ne dépassait pas 4800 MW en 1995, a atteint 493 330 MW en 2016, après 158505MW fin 2009. En 2020, leur scénario prévoit environ 832000 MW de puissance installée.

Le développement des éoliennes représente un grand investissement dans le domaine de la recherche technologique et suscitent aujourd'hui l'intérêt de plusieurs laboratoires de recherches et plusieurs pays industrialisés. De nombreux travaux de recherche sur le contrôle et la commande d'éoliennes ont été menés. [11].

La majorité des systèmes éoliennes commerciaux actuels sont des turbines à axe horizontal avec des rotors tripales fonctionnent à une vitesse variable, ce type d'éoliennes permet d'augmenter le rendement énergétique et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite par rapport aux éoliennes à vitesse fixe.

La taille de ces turbines éoliennes modernes va de quelques watts jusqu'à plusieurs mégawatts. De nos jours, la Machine Asynchrone Double Alimentation (MADA) est la machine à vitesse variable la plus couramment utilisée dans des unités de production supérieure à 1MW, Son principal avantage, est d'avoir ses convertisseurs statiques triphasés dimensionnés pour une partie de la puissance nominale de la MADA, ce qui permet la réduction des pertes dans les composants

d'électronique de puissance par rapport à d'autres solutions possibles de conversion électromécanique. En effet, la MADA permet un fonctionnement sur une plage de vitesse de $\pm 30\%$ autour de la vitesse de synchronisme, de plus, le contrôle de cette machine se fait par les tensions rotoriques ce qui nous permet de réaliser un contrôle indépendant des puissances actives et réactives de la MADA. Par ailleurs, cette dernière permet un fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable ce qui donne la possibilité de produire le maximum de puissance possible sur une large plage de variation de la vitesse [12-16].

Les éoliennes doivent permettre de produire un maximum de puissance en exploitant au mieux l'énergie disponible dans le vent, on parle alors de recherche du point de fonctionnement à puissance maximum (MPPT Maximum Power Point Tracking) [17]. Il est possible de modifier l'angle de calage des pales, ou bien encore jouer sur la commande de la génératrice. La recherche du maximum se fait en permanence et l'éolienne s'adapte donc à chaque variation de vent pour être dans une configuration d'extraction maximale de puissance. Dans la littérature, plusieurs méthodes ont été développées pour la poursuite du point de puissance maximale d'un aérogénérateur, nous citons la méthode de perturbation et observation, la méthode classique utilisant les régulateurs PI, TSR...etc [18-21].

Ces méthodes classiques ne peuvent être pas fonctionner à des variations brusques de la vitesse de vent, d'où la nécessité des techniques modernes qui peuvent être fonctionner avec des vitesse du vent à des variations brusques, rapide et importantes de la vitesse du vent.

L'objectif de ce travail est d'introduire plus d'intelligence dans le fonctionnement et le contrôle des aérogénérateurs. Pour cela, on sera amené à utiliser de plus en plus les techniques de l'intelligence artificielle (les réseaux de neurones artificiels RNA, les algorithmes génétiques AGs, la logique floue LF, entre autres), afin d'améliorer les performances et d'optimiser la production d'une éolienne.

Pour ce faire, la thèse est organisée en six chapitres détaillés ci-après:

Le premier chapitre présente un état de l'art sur l'énergie éolienne à travers une revue de la littérature disponible. Nous évoquons les différentes technologies éoliennes usuellement utilisées dans le domaine, ainsi que les différents composants constituant l'aérogénérateur seront brièvement présentés. Nous présentons un état de l'art sur la MADA, afin d'étudier son principe de fonctionnement et d'évaluer les avantages et les performances apportés par cette machine dans les différents domaines d'application. En plus, une classification des différents types de cette machine sera présentée.

Dans le deuxième chapitre, la modélisation des différents constituants du système de conversion éolien où les différents éléments de ce système sont représentés en schémas blocs.

C'est ainsi qu'un modèle équivalent de la MADA, du convertisseur, du bus continu, du filtre est détaillé dans cette partie.

Dans le troisième chapitre, le contrôle du système éolien sera présenté en utilisant deux stratégies de commande différentes. La stratégie MPPT (Maximum Power Point Tracking) repose sur le principe de l'extraction du maximum de puissance de l'éolienne et de son injection dans le réseau. Dans la deuxième partie, une commande vectorielle à flux orienté a été expliquée pour une application au MADA pour générer le fonctionnement optimal à chaque instant et contrôler indépendamment les puissances active et réactive du générateur. Une simulation sous MATLAB-Simulink a été effectuée dans l'objectif de vérifier et valider les stratégies de contrôle (MPPT, commande vectorielle).

Les lois de contrôle classique utilisent les régulateurs PI donnent de bons résultats dans le cas de systèmes linéaires à paramètres constant. Pour les systèmes non linéaires où les paramètres ne sont pas constants, ces lois de contrôle conventionnelles peuvent être insuffisantes car elles ne sont pas robustes. Pour cela, nous devons utiliser des lois de contrôle insensibles aux perturbations et aux cas non linéaires.

La commande par mode glissant est par sa nature une commande non linéaire constituent une bonne solution à ces problèmes. Dans le chapitre quatre, nous introduisons la commande par mode de glissement pour contrôler la puissance active et réactive du stator. Et nous montrons comment la commande par mode glissant peut être insensibles aux variation des paramètres et aux la non linéarités. Les performances de la méthode seront justifiées par la simulation.

Le chapitre suivant, est consacré au contrôle de la turbine éolienne par les réseaux de neurones artificiels. Après avoir présenté les réseaux de neurones, ainsi que leurs propriétés, nous présentons initialement deux stratégies de commande de la MADA; la commande en couple électromagnétique (MPPT) et la commande découplée des puissances active et réactive statoriques.

Les algorithmes génétiques sont des algorithmes d'exploration fondés sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique. La recherche dans ce domaine a pour souci principal l'amélioration de la robustesse, l'équilibre entre la performances et le coût nécessaire à la survie dans des environnements nombreux et différents. Le dernier chapitre est consacré à l'optimisation du régulateur PI par algorithmes génétiques.

Cette thèse s'achèvera par une conclusion générale résumant les principaux résultats obtenus ainsi que les perspectives ouvertes relatifs à ce travail.

Chapitre I

Généralités sur les systèmes éoliens

I.1 Introduction

Le contexte critique des énergies fossiles, l'explosion de la demande mondiale en électricité et les prises de conscience environnementale, ont accentué le besoin d'une énergie propre et durable [9] [10].

Les recherches récentes dans les domaines des éoliennes à vitesse variable, l'électronique de puissance et les techniques de commandes avancées ont permis le contrôle des puissances produites par ces aérogénérateurs, d'augmenter le rendement énergétique, d'améliorer la qualité des énergies électriques et mécaniques produites par rapport aux éoliennes à vitesse fixe, ainsi tendent à rendre l'énergie éolienne aussi compétitive que l'énergie d'origine traditionnelle [14] [16-22].

La technologie utilisée dans les éoliennes était à l'origine basée sur un générateur à induction à cage d'écureuil directement connecté au réseau ce qui implique que les pulsations de puissance du vent sont presque directement transférées au réseau électrique [23] [24]. En outre, il n'y a pas de contrôle de la puissance active et réactive, qui sont typiquement des paramètres de commande importants pour réguler la fréquence et la tension, il est donc nécessaire d'introduire l'électronique de puissance comme une interface entre l'éolienne et le réseau [25-27]. Mais comme la gamme de puissance des turbines augmente, les paramètres de contrôle deviennent plus importants, par conséquent les paramètres des interfaces deviennent aussi importants, en effet l'augmentation des pertes, de coût et de volume.

L'intérêt porté au générateur asynchrone à double alimentation (MADA) ne cesse de croître surtout dans le domaine des énergies renouvelables. la MADA présente bien des avantages: le convertisseur lié à l'armature rotorique est dimensionné au tiers de la puissance nominale du rotor, les pertes dans les semi-conducteurs sont faibles, etc. [28-31].

Dans ce présent chapitre, les technologies d'éoliennes ainsi que les différents composants constituant l'aérogénérateur seront brièvement présentés. Les diverses structures d'aérogénérateurs présentes sur le marché (vitesse fixe ou variable) sont démontrées et comparées. Vu les avantages incontestés de la machine asynchrone à double alimentation pour la conversion éolienne, elle sera particulièrement présentée en détail. Enfin, nous allons préciser le choix du type d'éolienne ce qui nous permettra de définir le cadre de notre travail.

I.2 Principe de l'énergie éolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres zones, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Un aérogénérateur transforme une partie de l'énergie cinétique du vent

(masses d'air en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'un générateur [32]. Qui est dans notre cas un générateur asynchrone à double alimentation (Figure I.1).

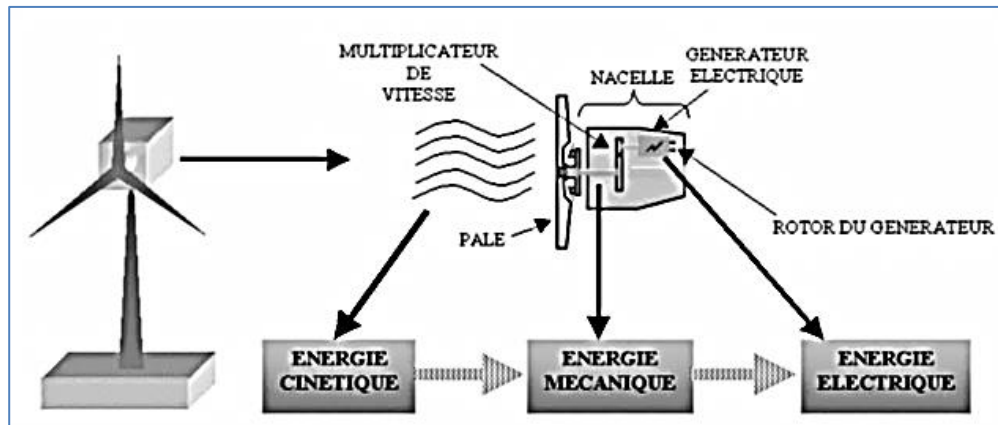


Figure I.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent [33]

I.3 Les différents types d'éoliennes

Depuis le début de la technologie de l'énergie éolienne, des machines de plusieurs types et formes ont été créées et développées autour du monde, certaines de ces machines sont des modèles innovateurs qui ne sont pas commercialement acceptés. Quoique, il y ait plusieurs méthodes pour caractériser les turbines éoliennes, elles sont généralement classées selon la disposition géométrique de leur arbre sur lequel est montée l'hélice, en deux types: les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal.

I.3.1 Les éoliennes à axe vertical

Les aérogénérateurs à axe vertical VAWTs (Vertical-axis wind turbines) ont été les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique, elles ont été prometteuses dans les années 80 et au début des années 90, mais elles sont très vite disparues du marché du fait de leur faible rendement et des fluctuations importantes de puissance provoquées [33] [34].

L'axe de rotation d'une VAWT est vertical par rapport au sol. Le générateur et la boîte d'engrenages de ce type de turbine sont disposés au niveau du sol, ce qui est plus simple et donc économique, ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches, plusieurs prototypes ont vu le jour mais rares sont ceux qui ont atteint le stade de l'industrialisation, ils sont classés selon leur caractéristique aérodynamique en deux familles: Les aérogénérateurs conçus sur la base de la portance (Aérogénérateurs à rotor de Darrieus : conçu par l'ingénieur français George Darrieus dans les années 30). Et ceux basés sur la traînée (Aérogénérateurs à rotor de Savonius : inventé par le finlandais Sigurd Savonius en 1923). La figure (I.2) montre les principales technologies.

I.3.1.1 Aérogénérateurs à rotor de Darrieus

Ce type d'aérogénérateur est basé sur le fait qu'un profil placé dans la direction d'écoulement de l'air selon différents angles est soumis à des forces de direction et d'intensité variable selon l'orientation de ce profil voir Figure.I.2.b La résultante de ces forces génère un couple moteur entraînant l'orientation du dispositif.

I.3.1.2 Aérogénérateurs à rotor de Savonius

Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur (voir Figure.I.5a).

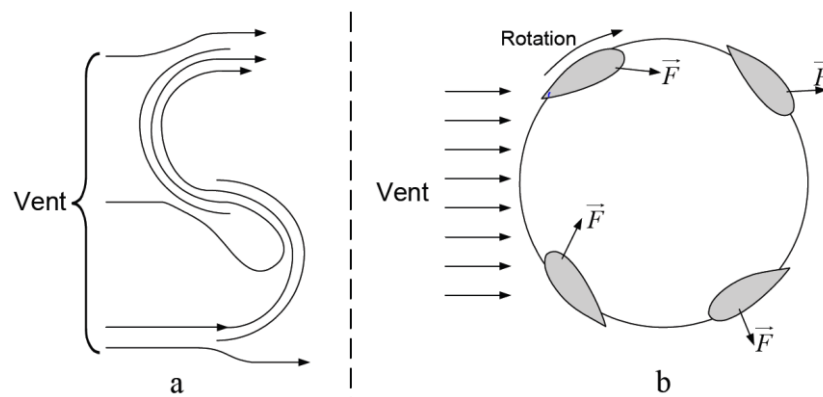


Figure I.2 Aérogénérateur à axe vertical [33]

I.3.1.3 Avantages et inconvénients des aérogénérateurs à axe vertical

Les avantages des éoliennes à axe vertical sont les suivants :

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol, ce qui facilite la maintenance et l'entretien.
- La non nécessité d'un système d'orientation du rotor car le vent peut faire tourner la structure quelque soit sa direction. Cependant elles ont comme inconvénients les points suivants:
- Les vents sont plus faibles à proximité de la surface du sol, car freiné par le relief.
- Un inconvénient, pour certaines VAWT, est de nécessiter un dispositif auxiliaire de démarrage.
- L'efficacité globale des éoliennes à axe vertical n'est pas satisfaisante.
- Occupation importante du terrain pour les puissances élevées. Cela représente un inconvénient majeur pour une implantation sur un site agricole par exemple.
- Faible rendement et fluctuations importantes de puissance.

Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées voire actuellement abandonnées.

I.3.2 Aérogénérateurs à axe horizontal

Les turbines à axe horizontal HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine) ou à hélice sont les plus installées actuellement comparées à celles à axe vertical puisque elles présentent un coût moins important, en plus leur rendement élevé [35]. L'éolienne à axe horizontal capte le vent grâce à des pales assemblées en hélice pour générer un couple moteur entraînant la rotation, le nombre des pales varie entre 1 et 3, le rotor tripal est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien [36]. Dans certains cas, au-delà d'une certaine vitesse, les pales cesseront de tourner par mesure de sécurité.

En suivant le sens de parcours du vent, le rotor peut être placé en amont ou en aval de la nacelle, cette dernière configuration a été à la mode, mais devient anecdotique, elle présente l'avantage que la nacelle et le rotor se mettent automatiquement face au vent. Mais lorsque le rotor se situe en amont, il faut un dispositif particulier pour que l'éolienne se positionne correctement, on peut trouver une aile fixe vertical qui stabilise l'éolienne face au vent (même principe que la gouverne verticale d'un avion). On peut aussi, sur certains modèles, orienter le rotor grâce à un moteur électrique, ce système est réservé aux éoliennes les plus puissantes (à partir de 30 kW). Il existe deux types d'éoliennes à axe horizontal, qui se distinguent par le nombre de pales de l'hélice: les éoliennes à rotation lente, dites "multipales" et les éoliennes à rotation rapide, appelés "aérogénérateurs".

I.3.2.1 Les éoliennes à rotation lentes

Les éoliennes à rotation lentes, "multipales" sont munies d'un grand nombre de pâles. Leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Les éoliennes multipales se caractérisent par un assez bon coefficient de puissance de la machine ($C_p = 0.3$) pour des vitesses de voisines de 2 à 3 m/s, leurs couples de démarrage sont relativement forts. Cependant, elles sont surtout utilisées pour le pompage d'eau.

I.3.2.2 Les éoliennes à rotation rapides

Les éoliennes à rotation rapides ont un nombre de pâles assez réduit, varie en général entre 2 et 4 pâles. Elles sont les plus utilisées dans la production d'électricité en raison de leur efficacité, de leur poids et elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques (d'où leur nom plus courant "d'aérogénérateurs"). Elles présentent, par contre, l'inconvénient de démarrer difficilement. Leurs vitesses de rotation sont d'autant plus grandes que le nombre de pales est faible. La puissance nominale de ces capteurs est très étendue, de quelques dizaines de watts à quelques mégawatts. Les éoliennes rapides obtiennent des rendements élevés (voisins de 85% par rapport à la limite de Betz).

On distingue deux types d'emplacement d'éoliennes à axe horizontal. Les éoliennes on shore (terme américain signifiant sur le sol c'est-à-dire sur les continents), et les éoliennes offshore (littéralement pas sur le sol, donc sur la mer), elles présentent des avantages au niveau des nuisances sonores (moins gênantes car elles sont éloignées des habitations), et des vents marins (plus nombreux et plus forts que les vents continentaux).

I.3.2.3 Avantages et inconvénients des aérogénérateurs à axe horizontal

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation des éoliennes à axe horizontal. Les principaux avantages de ce type d'éolienne sont les suivants :

- un rendement très important: ces éoliennes captent le vent en hauteur et loin du sol, à cette hauteur le vent est beaucoup moins ralenti par le relief. A dimension d'hélice identique, on pourra produire plus de puissance par le biais de cette structure par rapport aux éoliennes à axe vertical [34].
- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical. Ici, seule la tour occupe de la place au sol et contient généralement tous les systèmes de raccordement. Ainsi il n'est pas nécessaire de rajouter un local électrique et l'emprise au sol est vraiment minimale.
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien [35].
- Elles sont équipées d'un système qui permet de les orienter en fonction du vent.
- Les frais de fonctionnement sont faibles.
- Elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques que celles à axe vertical.
- Elles ont un coût d'entretien moins important.
- Elles sont mieux adaptées au secteur rural.

Inconvénient

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

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

Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Dans le reste de notre étude nous nous intéressons à la structure la plus répandue et la plus efficace à savoir celle à axe horizontal et à trois pales [35].

I.4 Principaux composants d'une éolienne

Une éolienne axe horizontal se compose des éléments suivants :

I.4.1 La tour ou le mat: c'est un tube d'acier ou en béton, il doit être le plus haut possible pour bénéficier du maximum de l'énergie cinétique du vent et d'éviter les perturbations près du sol. Au sommet du mat se trouve la nacelle [35].

I.4.2 La nacelle: montée au sommet du mât, abritant les composants mécaniques, pneumatiques, certains composants électriques et électroniques, nécessaires au fonctionnement de la machine. La nacelle peut tourner pour orienter la machine dans la bonne direction.

I.4.3 Le rotor: partie rotative de l'éolienne placée en hauteur afin de capter des vents forts et réguliers, composé des pales et du nez de l'éolienne, fixé sur un arbre tournant dans des paliers installés dans la nacelle. Entraîné par l'énergie du vent, il est relié directement ou indirectement, via un système de boîte de vitesse, au générateur électrique.

I.4.4 Le moyeu: c'est l'élément qui supporte les pales. Il doit être capable de résister à des à-coups violents surtout lors du démarrage de l'aérogénérateur ou lors de brusques changements de vitesse de vent [37].

I.4.5 Les pales: des éléments permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor, leur nombre est de trois pales dans la plupart des aérogénérateurs, ce nombre constitue un compromis entre les performances de la machine et des raisons de stabilité. Ces pales peuvent en moyenne mesurer chacune 25 à 60 m de long et tourner à une vitesse de 5 à 25 tours par minute.

I.4.6 Le multiplicateur de vitesse: sert à adapter la vitesse de la turbine éolienne à celle de la génératrice électrique. En effet, la faible vitesse de rotation de l'éolienne ne permettrait pas de générer du courant électrique dans des bonnes conditions avec les générateurs de courant classiques.

I.4.7 L'arbre: relie le moyeu au multiplicateur, il contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.

I.4.8 L'arbre secondaire: relie le multiplicateur au générateur. Généralement, il comporte un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.

I.4.9 La génératrice électrique: c'est l'élément principal de la conversion mécano-électrique (convertit l'énergie mécanique en énergie électrique) qui est généralement une machine synchrone, asynchrone à cage ou à rotor bobiné. La puissance électrique de cette génératrice peut varier entre quelque kW à 10 MW [35].

I.4.10 Le système de commande: qui contrôle en permanence le bon fonctionnement de l'éolienne et qui intervient automatiquement, en cas de défaillance pour l'arrêter.

I.4.11 Le système d'orientation: il permet d'orienter l'éolienne selon la direction du vent car il ne souffle pas toujours dans le même sens.

I.4.12 Le système d'orientation des pâles: qui sert à la régulation de la puissance (réglage aérodynamique).

I.4.13 Le système de refroidissement: se compose généralement d'un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et d'un refroidisseur à l'huile ou radiateurs d'eau pour le multiplicateur.

I.4.14 L'anémomètre: il mesure la vitesse du vent, relié à un système de contrôle, il permet d'activer les mécanismes de freinage de l'éolienne afin de ralentir, voire d'arrêter l'éolienne si le vent est très fort [38].

I.4.15 La girouette: ce composant indique la direction du vent, l'information est transmise au système d'orientation via un système de contrôle électronique.

I.4.16 Fondation c'est la base d'une éolienne, souvent circulaire et en béton armé dans le cas des éoliennes terrestres, qui permet de fixer et maintenir la structure globale.

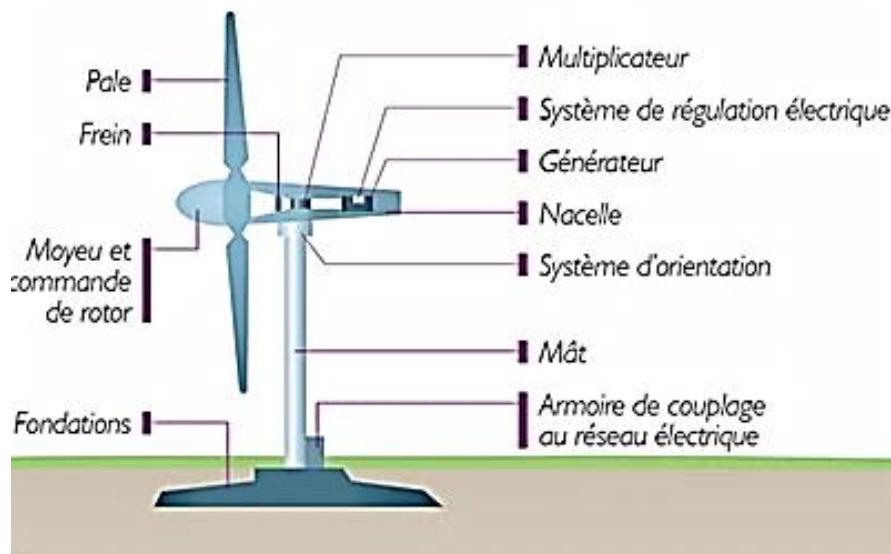


Figure I.3 Eoliennes à axe horizontal

I.5 Taille des éoliennes à axe horizontal

Avec le développement récent et le besoin de fournir des puissances croissantes au réseau, les constructeurs et les chercheurs mettent au point des éoliennes de plus en plus puissantes et donc plus grandes. La surface de disque balayée par le rotor ainsi que la vitesse du vent, évidemment détermine la quantité d'énergie que l'éolienne est susceptible de récolter en une année.

Pour utiliser le maximum de la force du vent, on cherche à ce que l'hélice balaie une surface maximum possible. Les progrès en science des matériaux ont permis la fabrication des pales plus légères et plus solides ainsi que l'amélioration de la conception des tours et des fondations, ce qui permet la construction d'appareils de plus en plus imposants. En 2005, les éoliennes de 1800 kW étaient la dernière nouveauté. Aujourd'hui, des appareils individuels de 3 et 10 MW sont en production commerciale. Les plus grandes éoliennes commercialisées actuellement possèdent une hélice de plus de 180 mètres de diamètre.

La figure (I.4) montre le développement de la croissance sur la taille des éoliennes en relation avec la puissance électrique délivrée au cours des dernières décennies.

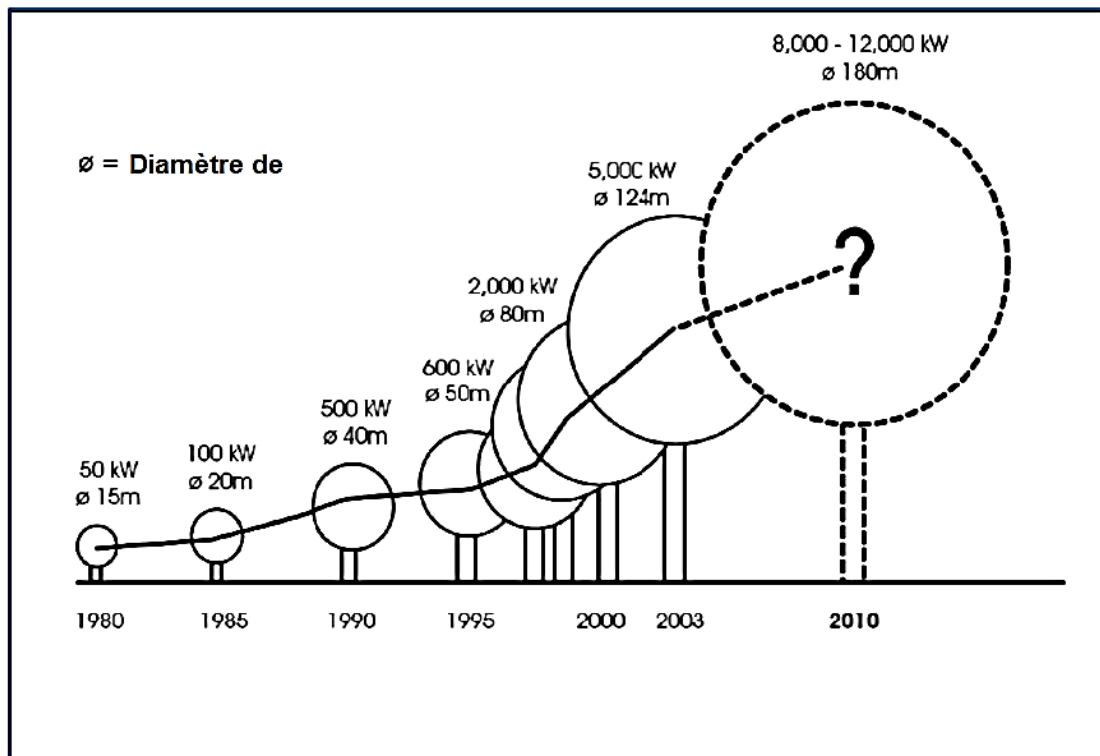


Figure I.4 Evolution de la taille des éoliennes avec la puissance fournie [35]

I.6 Classification des turbines éoliennes (suivant la taille)

On définit différentes classes de taille d'éoliennes. Cette taille augmente avec la quantité de puissance électrique fournie par l'éolienne. En théorie il n'y a pas de relation directe entre la hauteur et la puissance de l'éolienne. En effet, cette puissance dépend essentiellement de la surface balayée par le rotor (diamètre du rotor).

Dans le tableau suivant les dénominations de taille et les ordres de grandeur de puissances associées sont repris. Il s'agit bien d'ordres de grandeur de puissance, le but est uniquement de se donner une idée.

Echelle	Diamètre de l'hélice [m]	Puissance délivrée
Micro	Moins de 1.25	Moins de 0.25 kW
Mini (Domestique)	De 1.25 à 10	De 0.25 à 15 kW
Petite	De 10 à 12 m	De 15 à 40 kW
Moyenne	De 12 à 45 m	De 40kW à 1 MW
Grande	46 et plus	1 MW et plus

Tableau I.1 classification des turbines éoliennes [37]

I.7 Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique

I.7.1 Le vent

Le vent a inspiré dans les civilisations humaines de nombreuses mythologies. Il a influé sur les transports... etc., mais également fourni des sources d'énergie pour le travail purement mécanique (exp : moulins à vent, éoliennes) et pour l'électricité. C'est au début des années 1970 que le vent a commencé à être considéré sérieusement comme source d'énergie pour produire de l'électricité au Canada.

Depuis, les avancées technologiques ont permis d'améliorer considérablement l'efficacité des éoliennes et de perfectionner la science en vertu de laquelle on détermine leur localisation. La production des parcs éoliens peut maintenant être prévue avec beaucoup plus d'exactitude, et ce bien avant la construction des projets.

Le vent est un déplacement d'air qui résulte de l'équilibrage de plusieurs forces en constantes interactions. Les principales forces impliquées sont: les forces de pression, la force de Coriolis, les forces de frottements.

I.7.1.1 Les forces de pression (Le grand responsable de phénomène)

Les inégalités des apports en énergie solaire sur la planète dues à l'inclinaison des rayons solaires provoquent des différences de température des masses d'air, et donc des différences de densité(par conséquent pressions). Plus les rayons sont perpendiculaires par rapport au sol, plus la terre capte d'énergie. C'est pour cette raison que l'équateur est plus chaud que les pôles.

Les forces de pressions sont celles qui provoquent les grands déplacements de masses d'air, entre les zones de hautes pressions (anticyclones) et les zones de basses pressions (dépressions), de manière à équilibrer les températures et les pressions.

I.7.1.2 La force de Coriolis

La force de Coriolis (engendrée par la rotation de la terre) s'exerce sur les masses d'air mises en mouvement et les dévie, vers la droite dans l'hémisphère nord et vers la gauche dans l'hémisphère sud. Comme cette force est nulle au niveau de l'équateur mais que son importance augmente lorsque l'on se rapproche des pôles, son impact sur la circulation atmosphérique dépend de la latitude.

I.7.1.3 Les forces de frottements

Les forces de frottements ; c'est-à-dire les frictions entre les différentes masses d'air ou entre celles-ci et le sol (reliefs) interviennent. Ces frottements peuvent ainsi modifier les caractéristiques

locales du vent en modifiant sa trajectoire, sa vitesse ou encore ses caractéristiques thermiques et hygrométriques.

I.7.2 Vitesse du vent

La vitesse du vent est mesurée avec des anémomètres. Il en existe plusieurs types d'anémomètres classés en deux catégories principales (les anémomètres à rotation et les anémomètres à pression). Une graduation a été établie, selon l'échelle Beaufort qui divise les vents en fonction de leurs vitesses en 17 catégories dont nous citons quelques-unes au tableau:

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

Tableau I.2 catégories selon l'échelle Beaufort [35]

I.7.3 La Conversion Electromécanique

La conversion de l'énergie cinétique en énergie électrique se fait en deux étapes principale :
Au niveau du rotor de la turbine, qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent et la convertit en énergie mécanique puis au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique. Il existe actuellement deux principaux types de systèmes éoliens, en fonction du type de générateur utilisé :

- Système éolien à vitesse fixe avec machine asynchrone à cage.
- Système éolien à vitesse variable avec machine asynchrone à double alimentation ou avec machine synchrone [39].

I.7.3.1 Les Éoliennes à vitesse fixe

Les premières éoliennes de grande puissance mises en œuvre sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage directement couplée sur le réseau électrique (Figure 1.5), ces éoliennes munis d'un système d'orientation de pales (pitch control) permettant à la génératrice de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance.

Une batterie de condensateurs est souvent associée pour compenser la puissance réactive nécessaire à la magnétisation de la machine asynchrone à cage.

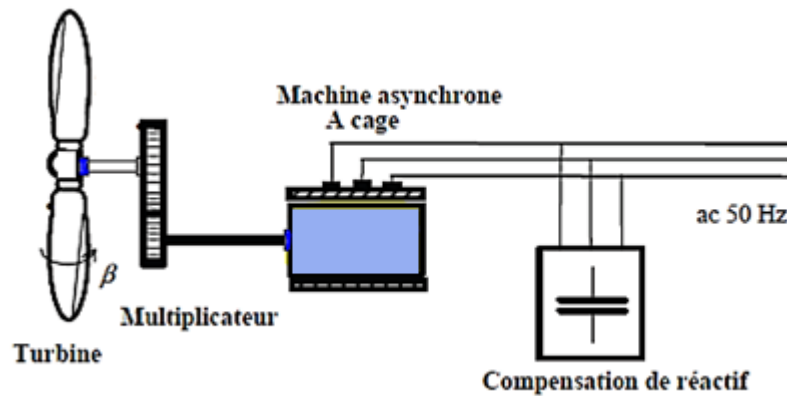


Figure I.5 Eolienne à vitesse fixe à base de la machine asynchrone à cage [64]

La rotation des pales permet l'augmentation de l'angle de calage β . La puissance peut alors être limitée à la puissance nominale de la génératrice. En cas de rafales de vent, cette technique permet la mise en drapeau des pales ($\beta = 90$). En conséquence, on peut observer une variation rapide et importante de la puissance électrique générée.

I.7.3.2 Les éoliennes à vitesse variables

Actuellement les éoliennes à vitesse variable sont les plus utilisées dans l'industrie. Le terme vitesse variable désigne le fait que la vitesse de la turbine est indépendante de la fréquence du réseau électrique par l'introduction de convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau. L'avantage principal d'opérer la turbine à vitesse variable est de maximiser la capture de l'énergie disponible dans le vent.

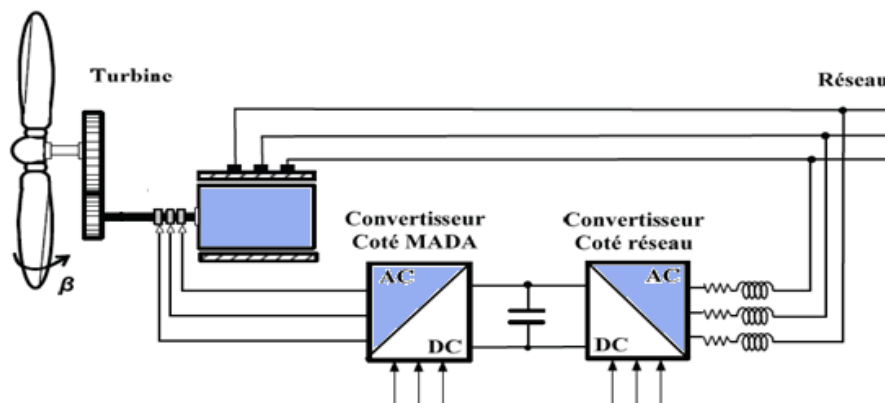


Figure I.6 Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA [64]

L'ensemble des caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent est illustré sur la figure I.7, il apparaît

clairement que si la génératrice est entraînée à une vitesse fixe les maxima théoriques des courbes de puissance ne seraient pas exploités. Afin de pouvoir optimiser le point de fonctionnement en terme de puissance extraite, il y a lieu de pouvoir ajuster la vitesse de rotation de l'arbre de la génératrice en fonction de la vitesse du vent.

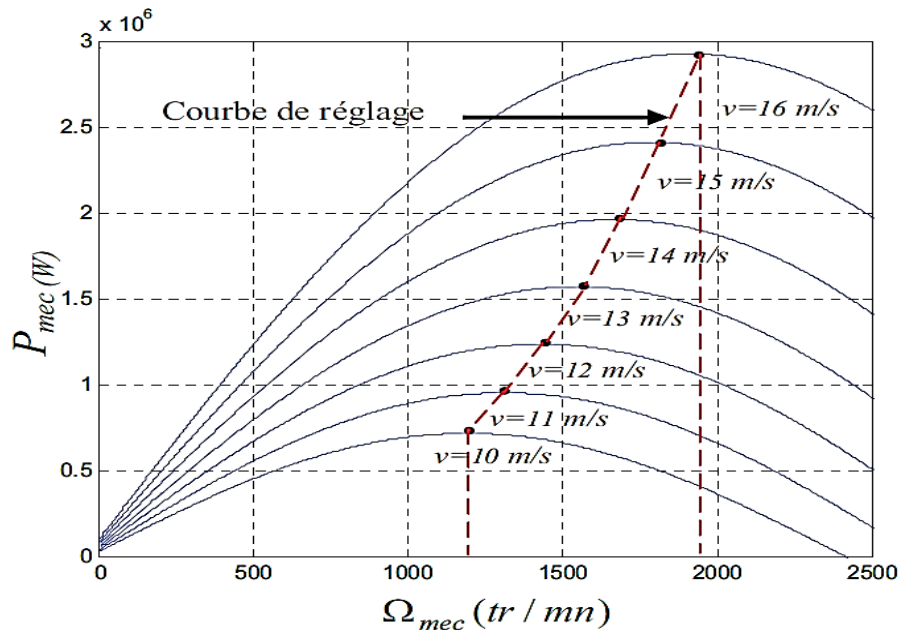


Figure I.7 Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne.

Pour cet exemple, la machine devra pouvoir fonctionner entre 1100 et 1900 tr/min pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour différent vitesse de vent.

Les principaux avantages des éoliennes à vitesse variable comparés aux générateurs à vitesse fixe sont les suivants [40-43]:

- ✓ Augmentation de la plage de fonctionnement, notamment pour les faibles vitesses de vent où le maximum de puissance peut être aisément atteint (Augmentation du rendement énergétique,).
- ✓ Une meilleure intégration de l'éolienne dans le réseau électrique.
- ✓ Réduction des efforts mécaniques grâce à l'adaptation de la vitesse de la turbine lors des variations du vent.
- ✓ Simplicité du système d'orientation des pales. Grâce au contrôle de la vitesse du générateur.
- ✓ Le contrôle de la puissance générée peut aussi être réalisé en agissant sur l'orientation des pales, mais aussi en contrôlant le couple de la génératrice asynchrone au moyen du convertisseur de puissance connecté au rotor de celui-ci.

I.7.4. Loi de Betz

En réalité l'éolienne ne peut récupérer que une partie de l'énergie cinétique de vent, le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance théoriquement disponible est appelé coefficient de puissance C_p .

$$P_{Turb} = C_p P_{vent} \Rightarrow C_p = \frac{P_{Turb}}{P_{vent}} \tag{I.1}$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation (I.1) (Figure I.8), on s'aperçoit que le coefficient de puissance C_p présente un maxima de $16/27$ soit 0,59. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée.

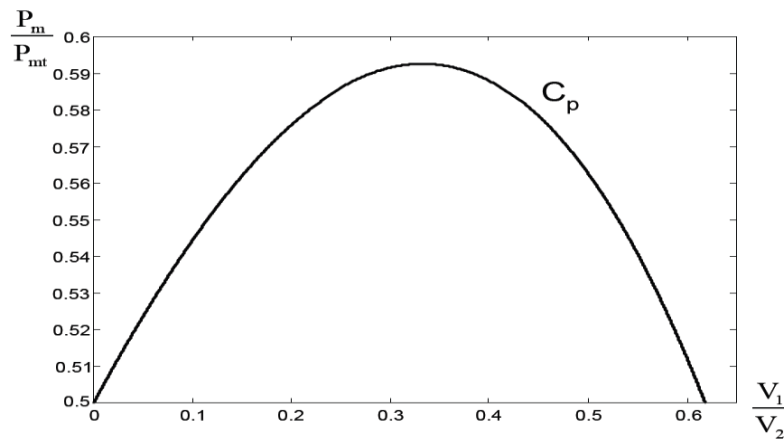


Figure I.8 Coefficient de puissance [42]

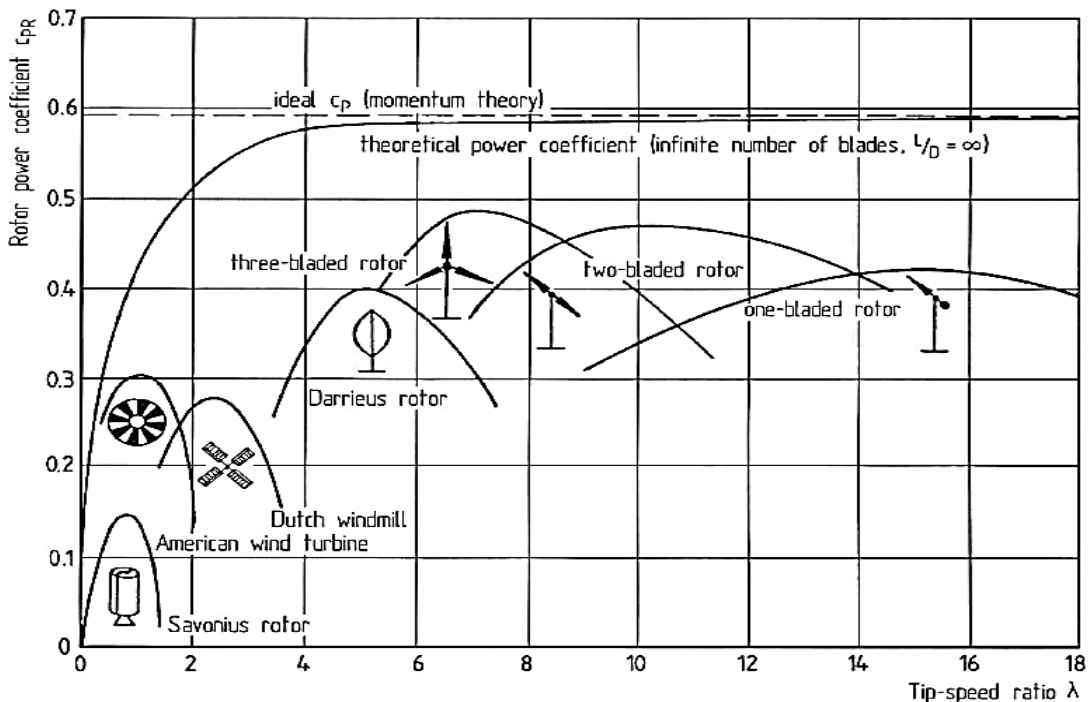


Figure I.9 Coefficient de puissance pour les différents types d'aérogénérateurs [42]

I.8 Etat de l'Art sur la machine asynchrone à double alimentation

Un intérêt de plus en plus croissant est accordé de la machine asynchrone à double alimentation. Cet intérêt est dû aux degrés de liberté qu'elle offre du fait de l'accessibilité de son rotor et donc de la possibilité de l'alimenter par un convertisseur aussi bien du côté du stator que du côté du rotor et un élargissement de la plage de vitesse (hypo-synchrone, synchrone, hyper-synchrone).

Actuellement, la majorité des éoliennes à vitesse variable utilise la machine asynchrone à double alimentation. Cette dernière ne s'agit pas d'une nouvelle structure mais d'un nouveau mode d'alimentation. Dant le stator de celle-ci est directement couplé au réseau alors que son rotor est connecté au réseau à travers une interface composée de deux convertisseurs statiques (convertisseur coté MADA et convertisseur coté réseau) (figure I.11).

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines asynchrone classiques (à cage) constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements (Figure. I.9) [35]. Le rotor est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne (Figure I.10).

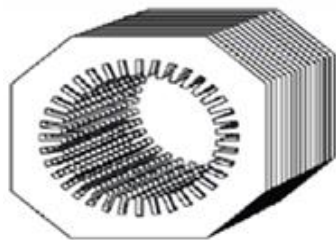


Figure I.9 Le stator

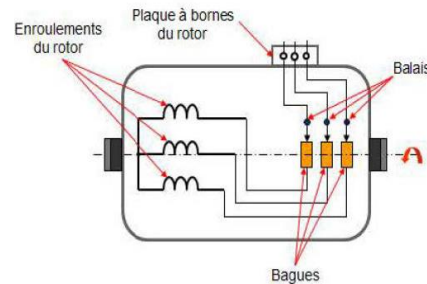


Figure I.10 Le rotor bobiné

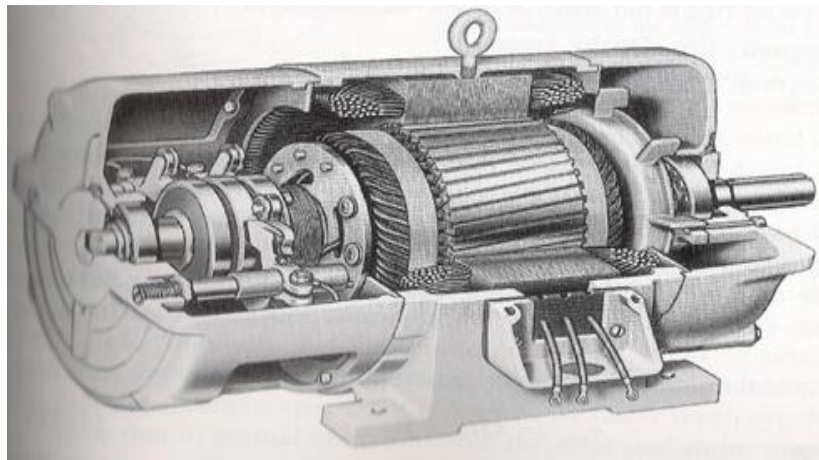


Figure I.11 Coupe d'une machine asynchrone à rotor bobiné [44]

Pour être classer comme machine à double alimentation il faut qu'il y ait des sources actives sur le stator et le rotor à la fois. Dans les systèmes modernes, une de ces sources est dérivée

électroniquement, et peut être commandée pour fournir l'opération vitesse variable du système, soit comme un moteur ou un générateur. Le convertisseur de puissance est typiquement relié à l'enroulement du rotor. L'autre source (réseau) a typiquement une fréquence et une tension nominalement fixées, qui est habituellement un raccordement direct au stator [44].

I.5 Regimes de fonctionnement de la MADA

Les différents régimes de fonctionnement de la MADA peuvent être divisés en fonction de glissement comme suit :

- **Stationnaire ($g=1$)**

Le stator est alimenté directement par le réseau avec une fréquence f_s , par conséquent, le rotor est le siège d'une f.e.m induite avec une fréquence f_r identique avec f_s . Dans cette condition, la MADA se comporte simplement comme un transformateur [35].

- **hypo synchrone ($0 < g < 1$)**

En tournant le rotor dans la direction du flux du stator, la fréquence f_r du rotor commence à décroître. Plus la vitesse du rotor approche de celle du synchronisme, plus f_r tend vers 0, plus la tension induite dans le rotor décroît linéairement et prend une valeur très faible qui correspond à la vitesse du synchronisme [45].

- **synchrone ($g=0$)**

Au point, où la vitesse mécanique du rotor atteint la vitesse de synchronisme, la fréquence f_r du rotor s'annule. Dans ce cas les enroulements du rotor tournent avec la même vitesse que celle du flux statorique ; donc le rotor ne voit aucun mouvement relatif par rapport à ce dernier, par conséquent il n'y a aucune tension induite dans les enroulements du rotor. On constate que la puissance du stator est égale à celle du réseau, alors que celle du rotor est nulle (l'écoulement de puissance entre le réseau et le rotor s'arrête) [35].

- **hyper synchrone ($g < 0$)**

Par davantage d'accélération, le flux rotorique rattrape le flux statorique et la fréquence du rotor devient négative. L'augmentation de la vitesse des enroulements du rotor par rapport à celle du flux statorique mène à une augmentation de la tension induite du rotor.

I.9 Fonctionnement à quatre quadrants de la MADA

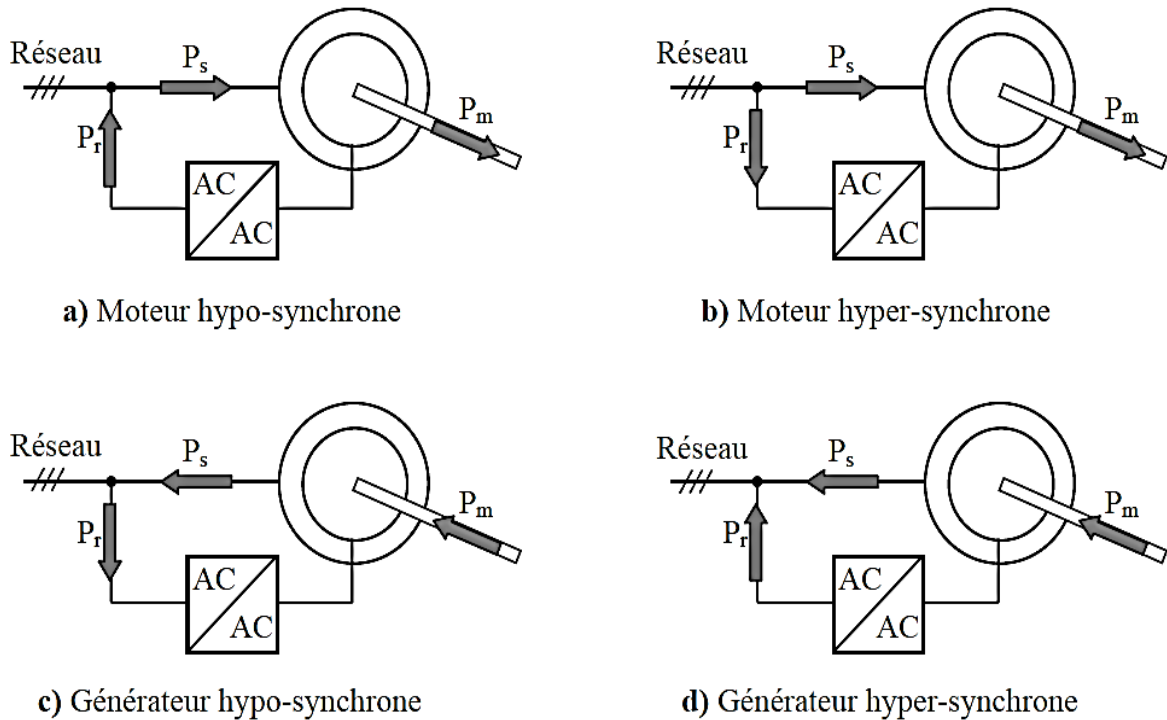


Figure I.12 Modes et régimes de fonctionnement de la MADA [44]

La figure (I.12) montre bien que, lorsque la MADA fonctionne en mode moteur et en régime hypo-synchrone, la puissance P_r est fournie au réseau par le rotor. Ce régime est connu dans la littérature comme mode de récupération d'énergie de glissement (fig. (I.12.a)). Si la vitesse augmente de sorte que le moteur fonctionne en régime hyper-synchrone (fig. (I.12.b)), dans ce cas la puissance P_r est absorbée par le rotor. Lorsque la MADA fonctionne en mode générateur, et si elle est entraînée à une vitesse inférieure de la vitesse de synchronisme (régime hypo-synchrone), la puissance P_r est absorbée par le rotor de celle-ci (figure I.12.c). Si la vitesse d'entraînement augmente au-delà de la vitesse de synchronisme (régime hyper-synchrone), la puissance P_r change sa direction et le rotor fournit de la puissance pour une éventuelle récupération (figure I.12.d) [44].

I.10 Etude de la puissance pour la MADA

On ignorant les pertes; les puissances de la MADA peuvent être écrites par les expressions suivantes:

$$P_r = gP_s \quad , \quad P_m = -(1-g)P_s \quad (I.1)$$

Le tableau I.3 résume les différents modes et régimes de fonctionnement de la MADA dans les quatre quadrants.

		Fonctionnement	
		Moteur $P_m < 0$	Générateur $P_m > 0$
Mode	Hypo-synchrone	$P_s > 0$ $P_r < 0$	$P_s < 0$ $P_r > 0$
	Hyper-synchrone	$P_s > 0$ $P_r > 0$	$P_s < 0$ $P_r < 0$

Tableau I.3 Les puissance dans les quatre quadrants.

I.11 Convertisseurs de puissance associés à la MADA

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. Le stator de la machine est généralement connecté au réseau alors que l'énergie rotorique varie selon différents systèmes décrits ci-dessous. Les convertisseurs utilisés sont alors dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Le surcoût engendré par la présence de bobinages au rotor est alors compensé par l'économie réalisée sur le convertisseur.

I.11.1 MADA à énergie rotorique dissipée

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la (Figure 1-13), le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO.

Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur.

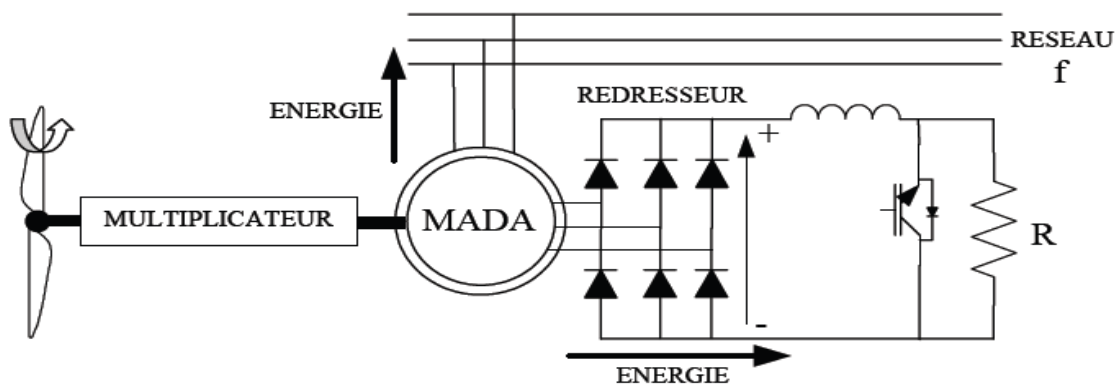


Figure I.13 MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée [45]

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance R , ce qui nuit au rendement du système. De plus cela augmente la puissance transmise dans le convertisseur ainsi que la taille de la résistance. Le fabricant "Vestas" dans son dispositif "Opti-Slip" a mis en œuvre ce système en utilisant des composants qui tournent avec le rotor et une transmission optique des signaux de commande. Les contacts glissants sont ainsi évités. La variation maximale du glissement obtenue dans ce procédé est de 10%.

I.11.2 MADA structure de Kramer

Dans le but de réduire les pertes d'énergie dues à la structure du système précédent, le hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau (structure de Kramer, Figure 1.14) .

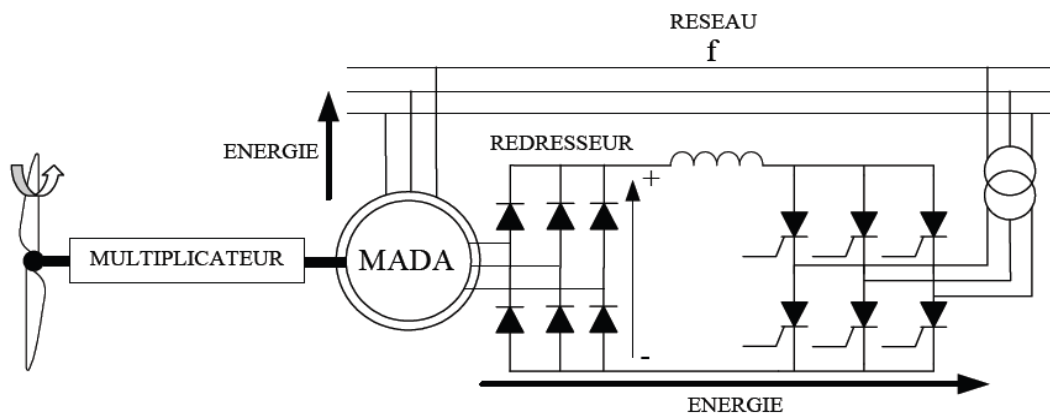


Figure 1.14 MADA, structure Kramer [47]

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

I.11.3 MADA structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

Afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'association redresseur-onduleur peut être remplacée par un cycloconvertisseur (Figure 1.15), l'ensemble est alors appelé structure de Scherbius [44].

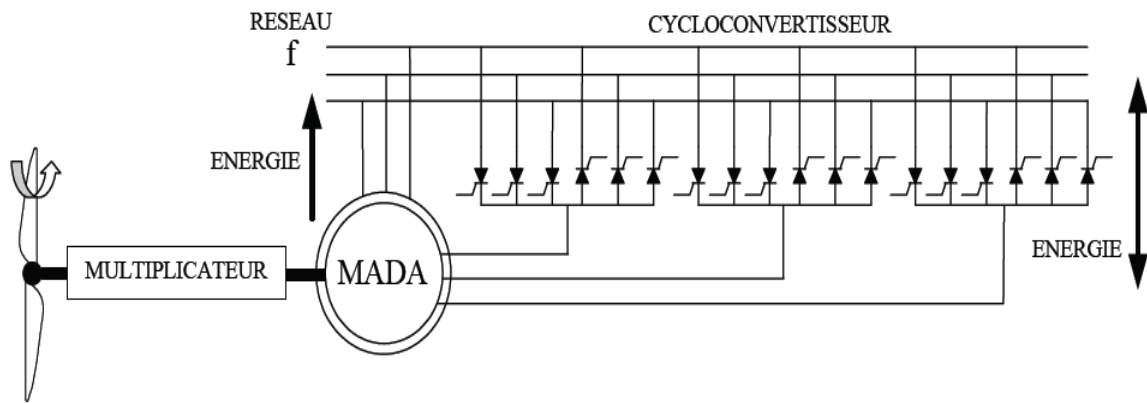


Figure 1.15 Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur [44]

La plage de variation de vitesse est doublée par rapport à la structure de la Figure (1.14). En effet si la variation du glissement doit rester inférieure à 30% pour maintenir l'efficacité du système, cette variation peut être positive (fonctionnement hyposynchrone) ou négative (fonctionnement hypersynchrone).

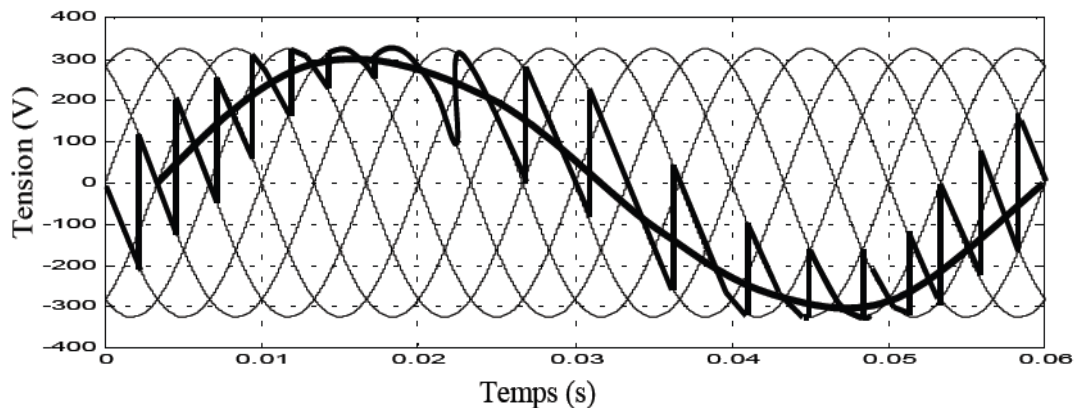


Figure I.16 Principe de fonctionnement du cycloconvertisseur [44]

Le principe du cycloconvertisseur est de prendre des fractions des tensions sinusoïdales du réseau afin de reproduire une onde de fréquence inférieure (Figure 1.16). Son utilisation génère par conséquent des perturbations harmoniques importantes qui affectent au facteur de puissance du dispositif. Les progrès de l'électronique de puissance ont conduit au remplacement le cycloconvertisseur par une structure à deux convertisseurs à IGBT commandés en MLI.

I.11.4 MADA – structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

Cette configuration (Figure 1.17) a les mêmes caractéristiques que la structure de Scherbius avec cycloconvertisseur. Toutefois les interrupteurs utilisés ici (transistors IGBT) peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO. L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de

sortie en Modulation de Largeur d'Impulsions dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées).

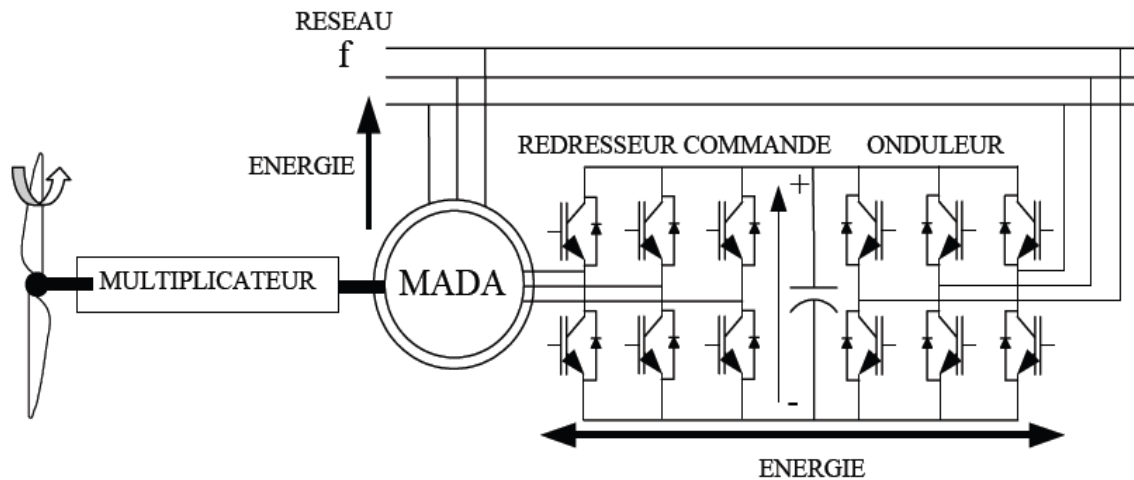


Figure 1.17 structure de Scherbius avec convertisseurs MLI [47]

La bidirectionnalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hyposynchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau.

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

I.12 Avantages et inconvénients de la MADA

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

I.12.1 Avantages de la MADA

Les principaux avantages de la MADA sont :

- ✓ L'accessibilité au stator et au rotor offre l'opportunité d'avoir plusieurs degrés de liberté pour bien contrôler le transfert des puissances et le facteur de puissance avec toutes les possibilités de récupération ou l'injection d'énergie dans les enroulements de la machine [46].
- ✓ La capacité de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse autour de la vitesse de synchronisme. De plus, l'application de la commande vectorielle associée à une technique de

commande moderne permet d'obtenir un couple nominal sur une grande plage de vitesse [35] [47].

- ✓ La mesure des courants au stator et rotor, contrairement à la machine à cage, donnant ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique [47] [48].
- ✓ Le convertisseur lié au rotor est dimensionné au tiers de la puissance nominale de la machine pour une vitesse de fonctionnement autour de celle de synchronisme, dans ce cas les pertes dans les interrupteurs à semi-conducteurs sont faibles, et par conséquent un rendement élevé du système de conversion.
- ✓ Cette machine peut assurer tous les fonctionnements des autres machines. On peut donc y voir un avantage majeur, elle pourrait permettre de passer d'un fonctionnement à un autre tout à fait acceptable.
- ✓ Son utilisation est préférée pour ses propriétés de réglage de vitesse par action sur des résistances placées dans le circuit rotorique, et encore sa possibilité de démarrer sans demander un courant important du réseau [49].
- ✓ Un fonctionnement en régime dégradé, si l'un des deux onduleurs tombe en panne, plus souple que la machine à simple alimentation [47].
- ✓ L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille des convertisseurs d'environ 70 % en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques. Ce dispositif est par conséquent économique et, contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur [45].

I.12.2 Inconvénients de la MADA

Les principaux inconvénients de la MADA sont :

- Machine plus volumineuse que celle à cage grâce à la présence du système balais – bague.
- La machine à double alimentation nécessite un collecteur à trois bagues au rotor. Donc pour une même puissance, ce générateur est un peu plus long et à peine plus lourd que le générateur asynchrone à cage équivalent [46].
- Nécessite une maintenance périodique, ce qui va augmenter le coût d'exploitation.
- L'utilisons d'un nombre des convertisseurs (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) plus importants que la machine à cage (un redresseur et un onduleur) [47].

Le surcoût engendré par la maintenance et du système bagues/balais de la MADA est alors compensé par l'économie réalisée sur les convertisseurs comparé à un système éolien pour lequel les convertisseurs seraient dimensionnés pour la puissance nominale de la génératrice.

I.13 Conclusion

L'état avancé des recherches dans le domaine d'éolien montre une volonté de développer des éoliennes toujours plus puissantes et capables de capter au mieux la puissance disponible dans le vent.

Après un rappel des notions nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, les différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement ont été décrits, ainsi que les différents constituants d'un aérogénérateur. Nous avons présenté ensuite, les deux technologies des éoliennes à savoir les éoliennes à vitesse fixe et celles à vitesse variable.

Un intérêt particulier a été consacré à la technologie d'éoliennes basée sur la machine asynchrone à double alimentation. Cette technologie permet de réduire le dimensionnement des convertisseurs statiques à 30 % en véhiculant seulement la puissance de glissement. En outre, elle permet le réglage des puissances active et réactive fournies.

Ce type d'éolienne n'apporte son maximum de puissance que si sa turbine tourne à la bonne vitesse par rapport à la vitesse du vent. Le contrôleur doit réguler la vitesse de rotation de la génératrice pour poursuivre le point de fonctionnement où la puissance est maximale. Cette régulation est appelée technique d'extraction de maximum de puissance (MPPT - Maximum Power Point Tracking).

Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation et à la simulation du système de conversion éolienne à vitesse variable basé sur la machine asynchrone à double alimentation.

Chapitre II

Modélisation du système éolien à vitesse variable basé sur une MADA

II.1 Introduction

L'étude du comportement d'un système est une tâche difficile, nécessite une bonne connaissance de son modèle dynamique afin de bien prédire, par voie de simulation, son comportement dans les différents modes de fonctionnement envisagés. Nous devons disposer d'un modèle mathématique qui représente d'une manière satisfaisante le comportement réel de ce système.

La chaîne de conversion éolienne sur laquelle sont basés les travaux de cette thèse, est montrée par la figure II.1, elle est constituée d'une turbine éolienne, une génératrice asynchrone à double alimentation, un bus continu, deux convertisseurs statiques de puissance et un filtre triphasé de courant. La turbine éolienne entraîne la MADA à une vitesse de rotation variable à travers un multiplicateur de vitesse. Le stator de cette dernière est directement connecté au réseau tandis que le rotor est connecté au réseau électrique via deux convertisseurs statiques bidirectionnels mis en cascade à travers un bus continu.

Nous allons étudier la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique en modélisant les différents éléments de la système de conversion éolienne. Dans un premier temps, nous présentons le modèle aérodynamique de la turbine, puis le modèle mécanique de l'éolienne. Ensuite, nous présentons la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique (électromécanique) où la MADA sera modélisée dans le repère de Park.

Une série de simulations sera réalisée à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK a été envisagée, non seulement dans le but de vérifier les performances de système de conversion sous différentes conditions et valider les modèles obtenus, mais aussi en vue de leur emploi pour valider les stratégies de commandes développées dans les chapitres suivants.

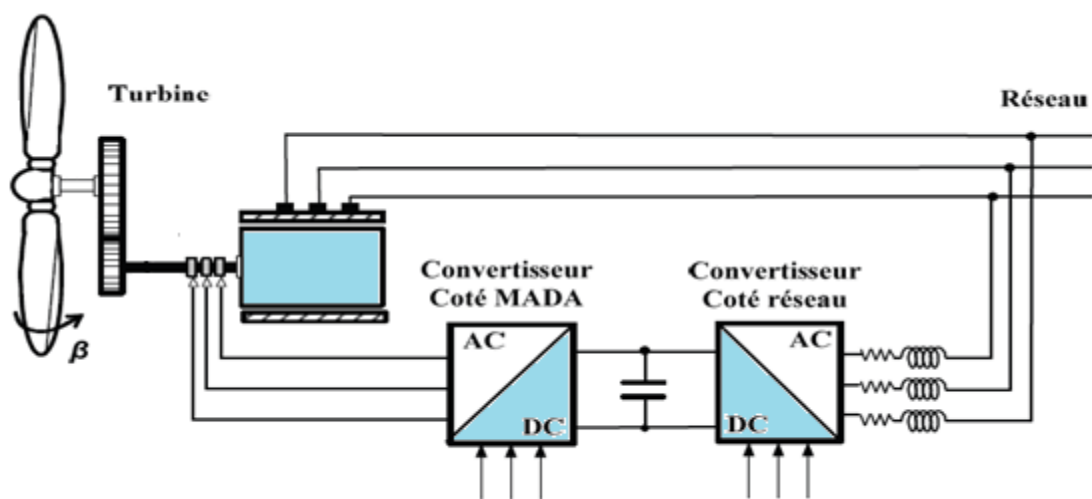


Figure II.1 Système de conversion éolienne à base de la MADA

II.2 Modélisation de la Turbine Éolienne

L'éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor: la densité de l'air ρ , la surface balayée par le rotor S et la vitesse du vent v . La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site [28].

La puissance incidente (la puissance théorique du vent), due au vent qui s'exerce sur les pales d'une éolienne est exprimée comme suit :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho S v^3$$

(II.1)

Dans un système éolien, et à cause des différentes pertes; l'éolienne ne peut récupérer qu'une partie de la puissance du vent:

$$P_T = \frac{1}{2} \rho C_p(\lambda, \beta) S v^3 \quad (\text{II.2})$$

Le ratio de vitesse λ est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire de la turbine et la vitesse du vent, son expression est donnée comme suit:

$$\lambda = \frac{\Omega_T \cdot R_T}{v} \quad (\text{II.3})$$

Où:

β : Angle d'orientation des pales.

$\rho = 1.22 \text{ kg} / \text{m}^3$.

Ω_T : Vitesse angulaire de la turbine.

R_T : Rayon des pales.

C_p : Coefficient de puissance, (dépend des caractéristiques de la turbine).

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Des approximations numériques ont été développées dans la littérature pour modéliser le coefficient, le modèle donné ci-dessus correspond à la turbine proposée par le constructeur allemand ENERCON :

$$C_p = f(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{\frac{-C_5}{\lambda_i}} + C_6 \lambda \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda_t} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (\text{II.5})$$

Le couple mécanique sur l'axe de la turbine est donné par la relation suivante:

$$C_T = \frac{P_T}{\Omega_T} = \frac{\frac{1}{2} \rho C_p \pi R^2 v^3}{\Omega_T} \quad (\text{II.6})$$

II.2.1 Modèle du multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur de vitesse est la liaison entre la turbine et le générateur. A pour but d'adapter la vitesse de la turbine Ω_T , le multiplicateur est supposé rigide et défini par un simple gain. Les pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles.

Il s'agit d'un dispositif très complexe que nous avons modélisé très simplement par les deux équations suivantes :

$$\Omega_T = \frac{\Omega_m}{G} \quad (\text{II.7})$$

$$C_m = \frac{C_T}{G} \quad (\text{II.8})$$

Où

G : Le rapport de multiplication;

C_m : Le couple mécanique disponible sur l'arbre du générateur;

C_T : Le couple de la turbine;

Ω_m : La vitesse mécanique du générateur;

Ω_T : La vitesse de rotation de la turbine;

Ω_m : La vitesse de rotation de l'arbre du générateur;

II.2.2 Modélisation de l'arbre de la turbine

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

$$J = J_T G^2 + J_g \quad (\text{II.9})$$

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

$$\sum C = C_m = J \frac{d\Omega_m}{dt} \quad (II.10)$$

Le couple mécanique est en fonction du couple électromagnétique produit par la génératrice, du couple des frottements visqueux et du couple issu du multiplicateur .

$$C_m = C_{arb} - C_{em} - C_{visq} \quad (II.11)$$

Les frottements des pâles, du moyeu, ainsi que de l'arbre, sont groupés dans un seul coefficient de frottement ramené sur l'arbre de la génératrice et appelé f .

$$C_{visq} = f \Omega_m \quad (II.12)$$

D'après les équations (II.10), (II.11) et (II.12) nous pouvons écrire l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique de la MADA par :

$$C_{arb} - C_{em} = J \frac{d\Omega_m}{dt} + f \Omega_m \quad (II.13)$$

Où

C_{em} : Le couple électromagnétique du MADA.

Le schéma bloc correspondant à la modélisation de la turbine éolienne se déduit aisément des équations ci-dessus et est représenté par la figure II.3.

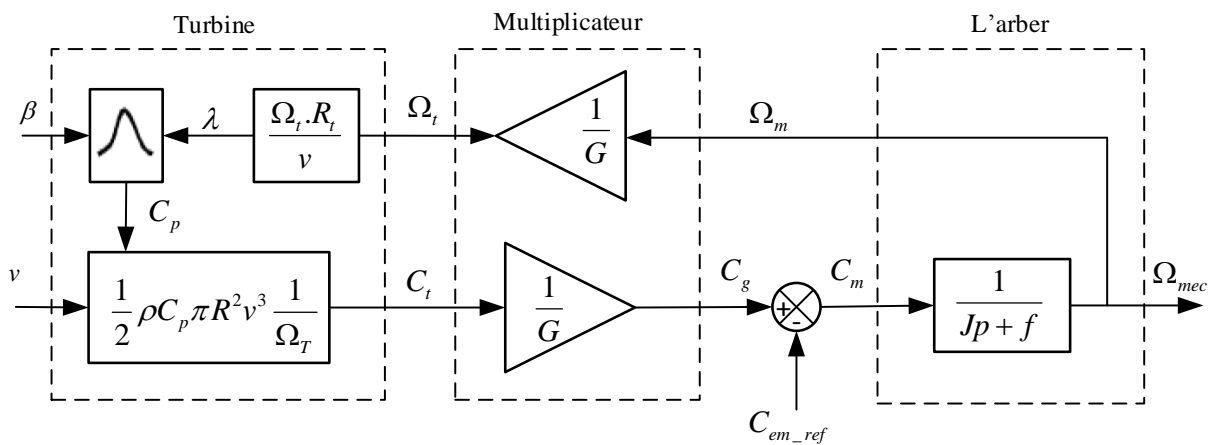


Figure II.3 Schéma bloc de la turbine éolienne

Cette figure montre que la turbine produit un couple aérodynamique C_T à partir de la puissance cinétique du vent P_{vent} . Le multiplicateur de vitesse transforme le couple aérodynamique C_T de la turbine en couple du multiplicateur. La vitesse mécanique de l'arbre de la génératrice Ω_m résulte de l'application du couple moteur disponible à la sortie du multiplicateur C_{arb} auquel s'oppose le couple électromagnétique C_{em} . Le contrôle de la vitesse mécanique de la génératrice peut donc être effectué à travers le couple électromagnétique de la génératrice.

II.3 Modèle mathématique de la MADA

La modélisation des machines électriques tournantes est une phase primordiale de son développement nécessite une parfaite connaissance de la structure électrique (alimentation électrique) et de la structure mécanique (masse tournante, couple résistant, frottement visqueux) [45] [50].

Mathématiquement, les machines électriques sont représentées par des modèles entres/sorties sous forme de fonction de transfert ou encore sous forme standard d'équations en variable d'état. Ce modèle mathématique a pour but de simplifier l'étude de la machine, il est basé sur la transformation des enroulements de la machine originale en des enroulements équivalents du point de vue électrique et magnétique disposés selon des axes fictifs. Cette transformation a pour effet de rendre les inductances propres et mutuelles du modèle indépendantes de la rotation.

Les progrès de l'informatique et du génie des logiciels permettent de réaliser des modélisations performantes et d'envisager l'optimisation des machines électriques [51].

Pour certaines raisons, un certain nombre d'hypothèses simplificatrices (à définir et à respecter) peuvent être adoptées dans l'élaboration des modèles mathématiques [48].

II.3.1 Hypothèses simplificatrices

Pour simplifier l'étude de la machine, on considère les hypothèses simplificatrices suivantes :

- La machine a une parfaite symétrie de construction;
- L'entrefer est d'épaisseur constante;
- L'effet de peau ainsi que l'effet d'encochage sont négligeable;
- Un même nombre des phases entre le stator et rotor;
- L'absence de saturation dans le circuit magnétique;
- Les pertes ferromagnétiques sont négligeables;
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer;
- La résistance des différents enroulements de la machine est constante;

La représentation schématique d'une machine à double alimentation dans le repère triphasé est donnée par la figure (II.4).

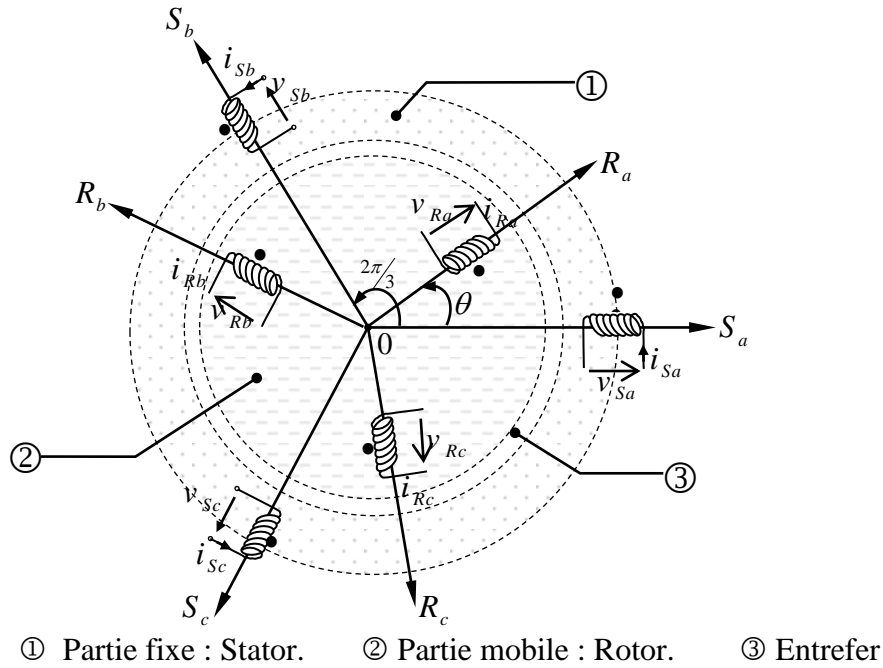


Figure II.4 Représentation de la MADA dans le système triphasé.

II.3.2 Les équations électriques de la machine

Chaque enroulement peut être représenté par un circuit électrique équivalent. Au stator, le circuit électrique se compose simplement d'une inductance en série avec une résistance.

La relation entre le flux et la force électromotrice développée au niveau de l'inductance est donnée par la loi de Faraday:

$$-e = \frac{d\phi}{dt} \tag{II.14}$$

L'application de la loi des mailles à ce circuit donne :

$$-e = \frac{d\phi_{s_a}}{dt} = V_{s_a} - R_{s_a} I_{s_a} \tag{II.15}$$

Dans les conditions précédentes et de la même manière en appliquant la loi des mailles aux trois enroulements du stator et du rotor, les équations sous forme matricielle s'écrivent:

➤ Pour le stator :

$$\begin{bmatrix} V_{s_a} \\ V_{s_b} \\ V_{s_c} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{s_a} \\ \phi_{s_b} \\ \phi_{s_c} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s_a} \\ I_{s_b} \\ I_{s_c} \end{bmatrix} \tag{II.16}$$

➤ Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} V_{r_a} \\ V_{r_b} \\ V_{r_c} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{r_a} \\ \phi_{r_b} \\ \phi_{r_c} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{r_a} \\ I_{r_b} \\ I_{r_c} \end{bmatrix} \tag{II.17}$$

II.3.3 Les équations magnétiques

Chaque flux comporte une interaction avec les courants de toutes les phases y compris la sienne.

$$\begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

$$\begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

Avec :

L_s, L_r : Représentent respectivement les inductances propres des phases statoriques et rotoriques.

M_s, M_r : Respectivement les inductances mutuelles entre phases statoriques et rotoriques.

$$[M_{sr}] = [M_{sr}]^T = M_{\max} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

$[M_{sr}]$: La matrice des inductances mutuelles (matrice de couplage stator-rotor).

M_{\max} : Mutuelle max entre une phase statorique et une phase rotorique.

II.3.4 Transformation de PARK

La machine asynchrone est une machine fortement couplée, sa représentation dans le système triphasé est par conséquent particulièrement complexe. Pour mieux représenter le comportement d'une machine asynchrone, il est nécessaire de faire appel à un modèle précis et suffisamment simple. La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasé-diphasé suivie d'une rotation. Elle permet de passer des référentiels (a, b, c) vers (α , β) ou (d, q). Le référentiel (α , β) est toujours fixe, par rapport à (a, b, c), par contre le référentiel (d, q) est mobile. Il forme avec le repère fixe (α , β) un angle qui est appelé angle de Park [44]. La transformation s'écrit :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} = [P(\theta)] \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}$$

Le nouveau modèle est obtenu en multipliant les équations des courants, des flux et des tensions par la matrice de Park qui est exprimée par [52]:

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

La transformation inverse est définie par :

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x_u \\ x_v \\ x_o \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

La matrice de transformation de Park inverse est définie par :

$$[P(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

$[P(\theta)]$ et $[P(\theta)]^{-1}$: Représentent respectivement les matrices de passage et inverse de Park.

On vérifie que la matrice de passage obtenue est bien orthogonale afin que la puissance instantanée soit invariante :

$$[P(\theta)] \cdot [P(\theta)]^T = [1]$$

II.3.4.1 Application de la transformation de Park à la MADA

En appliquant la transformation de Park, les enroulements réels statoriques et rotoriques (a,b,c) sont transformés respectivement en deux enroulements statoriques fictifs et deux enroulements également fictifs rotoriques dans un même référentiel diphasé (u,v,o).

Désignons par θ_s et θ_r les angles électriques que forment les axes du stator et du rotor avec l'axe direct du référentiel biphasé de Park.

La figure (II.7) illustre la position relative des différents référentiels dans l'espace.

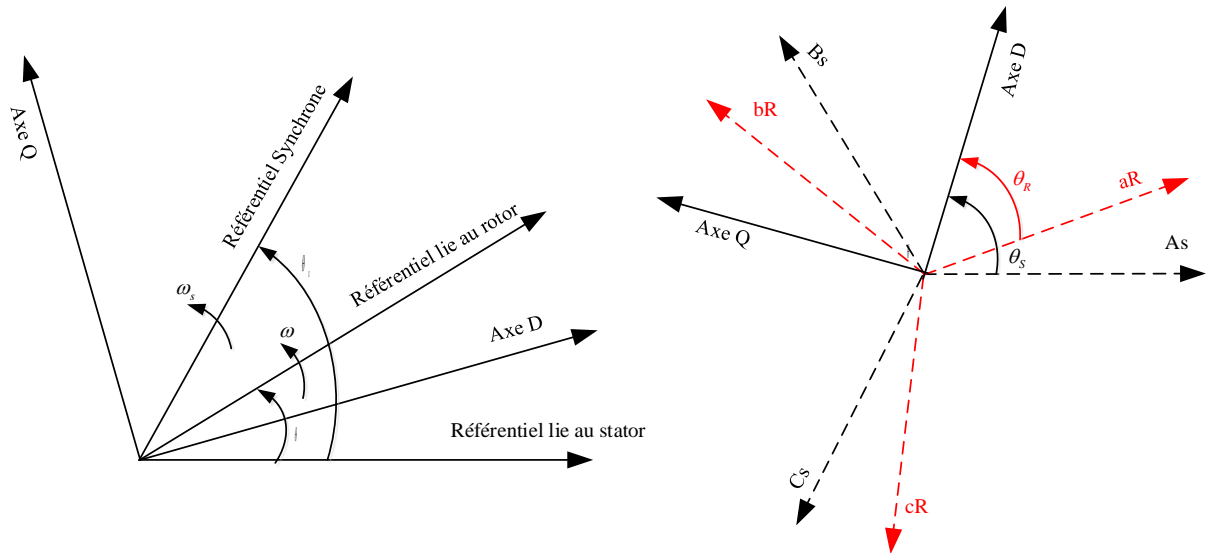


Figure II.7 Position spatiale des différents référentiels[44]

II.3.5 Equations électriques et magnétiques suivant l'axe (u,v)

Les expressions des tensions statoriques et rotoriques suivant l'axe (u,v) sont données par :

$$\begin{bmatrix} V_{su} \\ V_{sv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{su} \\ I_{sv} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{su} \\ \phi_{sv} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{coor} \\ \omega_{coor} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{su} \\ \phi_{sv} \end{bmatrix} \quad (II.24)$$

$$\begin{bmatrix} V_{ru} \\ V_{rv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ru} \\ I_{rv} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ru} \\ \phi_{rv} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -(\omega_{cor} - \omega) \\ (\omega_{cor} - \omega) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{rv} \\ \phi_{ru} \end{bmatrix} \quad (II.25)$$

Avec :

ω , ω_{coor} : Respectivement la vitesse rotorique et la vitesse du système d'axe (u,v).

Les expressions des flux statoriques et rotoriques suivant l'axe (u,v) sont données par :

$$\begin{cases} \phi_{su} = L_s I_{su} + M I_{ru} \\ \phi_{sv} = L_s I_{sv} + M I_{rv} \\ \phi_{ru} = L_r I_{ru} + M I_{su} \\ \phi_{rv} = L_r I_{rv} + M I_{sv} \end{cases} \quad (II.26)$$

II.3.5.1 Choix du référentiel

Pour effectuer une étude par simulation de la machine asynchrone à double alimentation, il est recommandé de choisir un système d'axes de référence qui permet d'aboutir au système différentiel le plus simple possible, car le résultat final est indépendant du choix du système de coordonnées. On trouve que le calcul peut être plus ou moins complexe.

A partir du système d'axe (u,v) on peut utiliser trois systèmes d'axes de coordonnées, qui sont des cas particuliers, dans la suite, les composantes homopolaires sont supposées nulles.

II.3.5.1.a Référentiel fixé par rapport au stator (α, β)

Dans ce référentiel, les axes (u,v) sont immobiles par rapport au stator ($\omega_{\text{coord}} = 0$). Ce référentiel est le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées et dont l'avantage ne nécessite pas une transformation vers le système réel. L'utilisation de ce système permet d'étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines à courant alternatif. Les axes de référence sont fixés par rapport au stator d'où :

$$\omega_s = 0 \Leftrightarrow \begin{bmatrix} u \rightarrow \alpha \\ v \rightarrow \beta \end{bmatrix}$$

Les équations électriques prennent la forme :

$$\begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s\alpha} \\ I_{s\beta} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{s\alpha} \\ \phi_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

$$\begin{bmatrix} V_{r\alpha} \\ V_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{r\alpha} \\ I_{r\beta} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{r\alpha} \\ \phi_{r\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

Ce référentiel sera choisi en vue d'étudier les variations des grandeurs rotoriques.

II.3.5.1.b Référentiel fixé par rapport au rotor (x, y)

Dans ce référentiel, les axes (u,v) sont immobiles par rapport au rotor tournant à une vitesse ω donc ($\omega_{\text{coord}} = \omega = P\Omega$). L'utilisation de ce référentiel permet d'étudier les régimes transitoires dans les machines alternatives asynchrones et synchrones avec une connexion non symétrique des circuits du rotor. Les axes de référence sont fixés par rapport au rotor d'où :

$$\omega_r = 0 \Leftrightarrow \begin{bmatrix} u \rightarrow x \\ v \rightarrow y \end{bmatrix}$$

Les équations électriques prennent la forme :

$$\begin{bmatrix} V_{sx} \\ V_{sy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sx} \\ I_{sy} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sx} \\ \phi_{sy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{sx} \\ \phi_{sy} \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

$$\begin{bmatrix} V_{rx} \\ V_{ry} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{rx} \\ I_{ry} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{rx} \\ \phi_{ry} \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

Ce référentiel est utilisé pour l'étude des grandeurs statoriques.

II.3.5.1.c Référentiel fixé par rapport au champ tournant (d, q)

Pour un référentiel lié au champ tournant, les axes (u,v) sont immobiles par rapport au champ électromagnétique créé par les enroulements statoriques, d'où

($\omega_{\text{coor}} = \omega_s$ tel que $\omega_s = \omega_r + \omega$). Ce référentiel est généralement utilisé dans le but de pouvoir appliquer une commande de vitesse, de couple, ...etc. Puisque les grandeurs dans ce référentiel sont de forme continue.

Les axes de référence sont fixés par rapport au champ tournant d'où :

$$\omega = 0 \Leftrightarrow \begin{bmatrix} u \rightarrow d \\ v \rightarrow q \end{bmatrix}$$

Le système d'équation devient comme suit:

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sd} \\ \phi_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s \\ \omega_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{sd} \\ \phi_{sq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

$$\begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{rd} \\ \phi_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{rd} \\ \phi_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.32})$$

Les expressions des flux sont données par :

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

Dans notre travail, on utilise le référentiel lié au champ tournant pour la modélisation et la commande de la MADA. Alors, le modèle électrique général de la machine asynchrone obtenue en utilisant la transformation de Park est donné par les équations suivantes :

En remplace (II-33) dans (II-31) et (II-32) on obtient :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + L_s \frac{dI_{sd}}{dt} + M \frac{dI_{rd}}{dt} - \omega_s L_s I_{sq} - \omega_s M I_{rq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + L_s \frac{dI_{sq}}{dt} + M \frac{dI_{rq}}{dt} + \omega_s L_s I_{sd} + \omega_s M I_{rd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + L_r \frac{dI_{rd}}{dt} + M \frac{dI_{sd}}{dt} - \omega L_r I_{rq} - \omega M I_{sq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + L_r \frac{dI_{rq}}{dt} + M \frac{dI_{sq}}{dt} + \omega L_r I_{rd} + \omega M I_{sd} \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

De plus, les équations représentant le mouvement mécanique sont données par :

$$\begin{cases} C_{em} = p \cdot M_{sr} \cdot (I_{sq} I_{rd} - I_{sd} I_{rq}) \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

$$\begin{cases} C_{em} - C_r = j \frac{d\Omega}{dt} + f \Omega \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

Le modèle de la MADA est décrit par l'équation d'état suivante :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{X} \\ Y \end{bmatrix} &= [A] \cdot [X] + [B] \cdot [U] \\ [Y] &= [C] \cdot [X] \end{aligned} \quad (\text{II.37})$$

Avec :

X : Vecteur d'état.

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

B : Matrice de la commande.

U : Vecteur du système de commande.

Y : Vecteur de sortie.

C : Matrice de sortie (matrice d'observation).

Pour la machine asynchrone à double alimentation les variables de contrôle sont les tensions statoriques et rotoriques. En considérant les courants statoriques et rotoriques comme des vecteurs d'état.

$$[X] = \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} \quad [U] = \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix}$$

La représentation matricielle de l'équation d'état en fonctionnement moteur est donnée par :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} -R_s & \omega_s L_s & 0 & \omega_s M \\ -\omega_s L_s & -R_s & -\omega_s M & 0 \\ 0 & \omega_r M & -R_r & \omega_r L_r \\ -\omega_r M & 0 & -\omega_r L_r & -R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

On pose :

$$A = [B] \cdot [S], \quad [B] = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}^{-1} \quad \text{et} \quad [S] = \begin{bmatrix} -R_s & \omega_s L_s & 0 & \omega_s M \\ -\omega_s L_s & -R_s & -\omega_s M & 0 \\ 0 & (\omega_s - \omega) M & -R_r & (\omega_s - \omega) L_r \\ -(\omega_s - \omega) M & 0 & -(\omega_s - \omega) L_r & -R_r \end{bmatrix}$$

II.3.6 Modélisation de la MADA en fonctionnement générateur

Le modèle électrique biphasé d'une MADA au référentiel fixé par rapport au champ tournant en mode hypo-synchrone est données par:

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & 0 \\ 0 & -R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sd} \\ \phi_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s \\ \omega_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{sd} \\ \phi_{sq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.39})$$

$$\begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{rd} \\ \phi_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{rd} \\ \phi_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.40})$$

Les expressions des flux sont données par :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = -L_s I_{sd} + MI_{rd} \\ \phi_{sq} = -L_s I_{sq} + MI_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r I_{rd} - MI_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r I_{rq} - MI_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.41})$$

En remplace (II-41) dans (II-39) et (II-40) on obtient :

$$\begin{cases} V_{sd} = -R_s I_{sd} - L_s \frac{dI_{sd}}{dt} + M \frac{dI_{rd}}{dt} + \omega_s L_s I_{sq} - \omega_s MI_{rq} \\ V_{sq} = -R_s I_{sq} - L_s \frac{dI_{sq}}{dt} + M \frac{dI_{rq}}{dt} - \omega_s L_s I_{sd} + \omega_s MI_{rd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + L_r \frac{dI_{rd}}{dt} - M \frac{dI_{sd}}{dt} - \omega L_r I_{rq} + \omega MI_{sq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + L_r \frac{dI_{rq}}{dt} - M \frac{dI_{sq}}{dt} + \omega L_r I_{rd} - \omega MI_{sd} \end{cases} \quad (\text{II.42})$$

La représentation matricielle de l'équation d'état en fonctionnement générateur est donnée par :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & -L_s & 0 & M \\ -M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & -M & 0 & L_r \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s L_s & 0 & \omega_s M \\ \omega_s L_s & R_s & -\omega_s M & 0 \\ 0 & -\omega_r M & -R_r & \omega_r L_r \\ \omega_r M & 0 & -\omega_r L_r & -R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & -L_s & 0 & M \\ -M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & -M & 0 & L_r \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.43})$$

On pose :

$$A = [B] \cdot [S], \quad [B] = \begin{bmatrix} -L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & -L_s & 0 & M \\ -M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & -M & 0 & L_r \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [S] = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s L_s & 0 & \omega_s M \\ \omega_s L_s & R_s & -\omega_s M & 0 \\ 0 & -(\omega_s - \omega)M & -R_r & (\omega_s - \omega)L_r \\ (\omega_s - \omega)M & 0 & -(\omega_s - \omega)L_r & -R_r \end{bmatrix}$$

II.3.7 Résultats de simulation

Les résultats de simulation présentée sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus pour le modèle d'une machine asynchrone à double alimentation fonctionnement générateur, entraînée à une vitesse fixe égale à 1480tr/min, alimentée directement par une sources de tension triphasée parfait au niveau du rotor avec une amplitude de 24V.

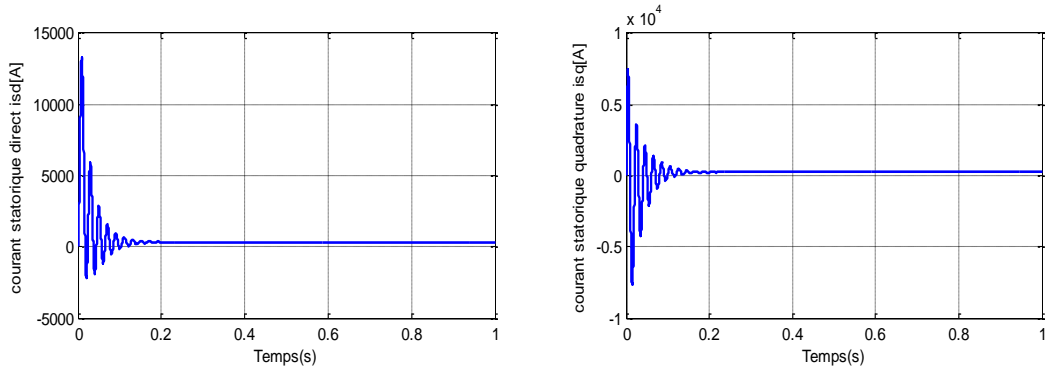


Figure II.8 Les composantes du courant statoriques de la MADA.

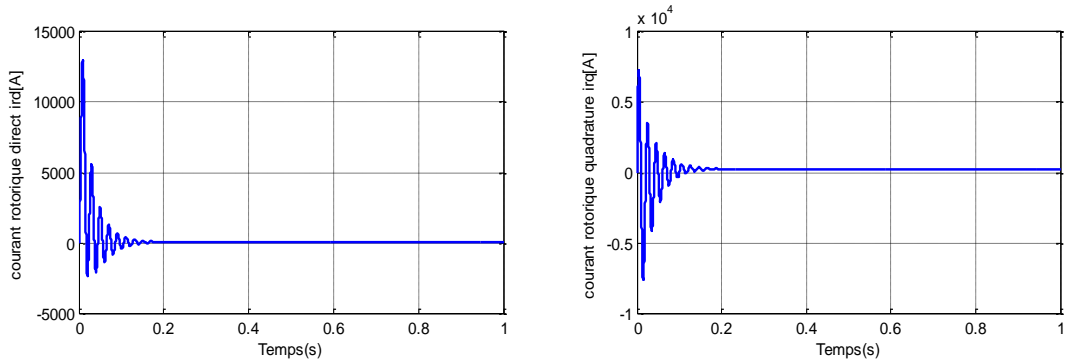


Figure II.9 Les composantes du courant rotoriques de la MADA.

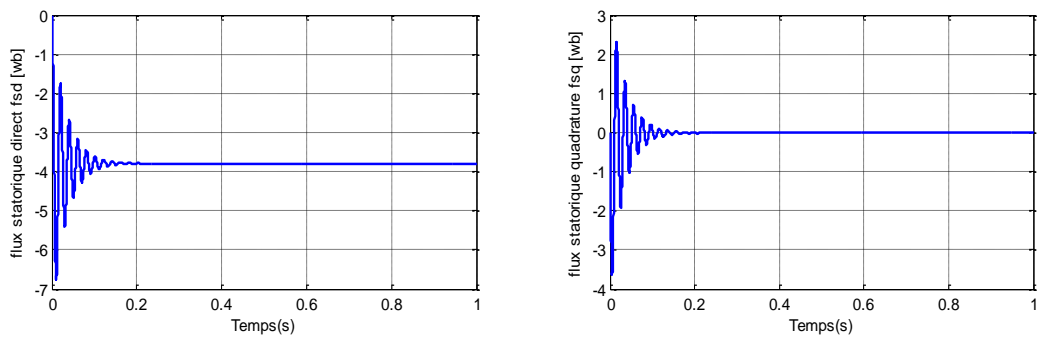


Figure II.10 Les composantes du flux statoriques de la MADA

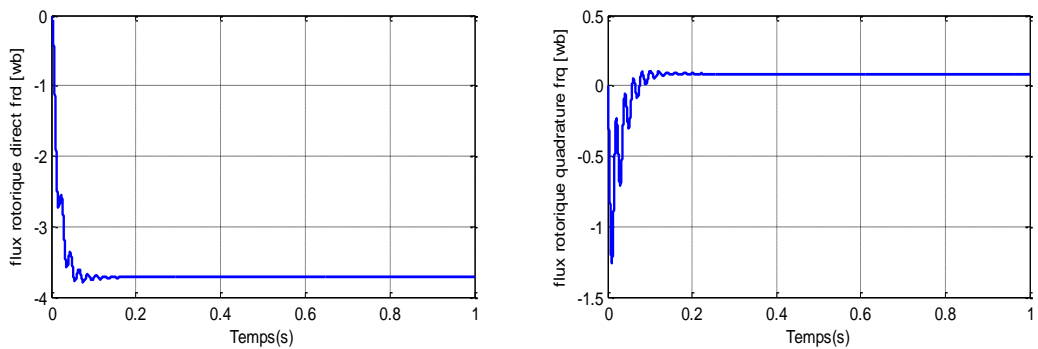


Figure II.11 Les composantes du flux rotoriques de la MADA.

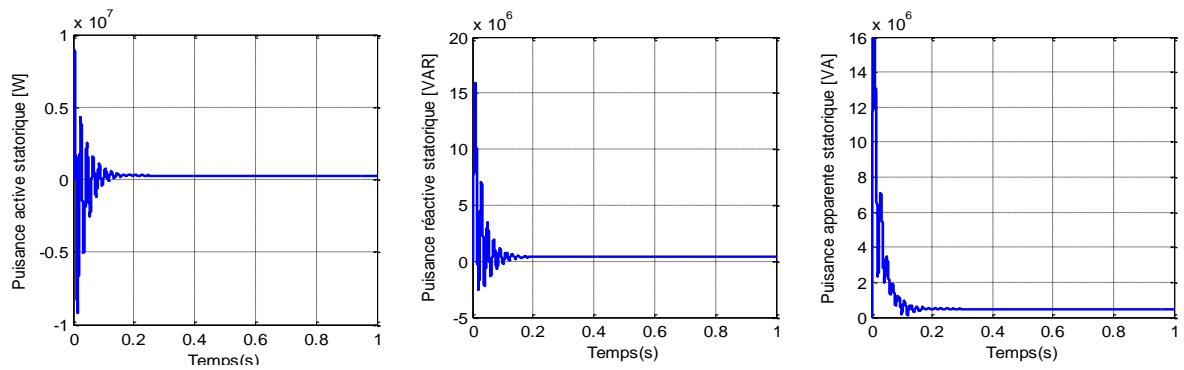


Figure II.12 Les puissances active, réactive et apparente statoriques de la MADA.

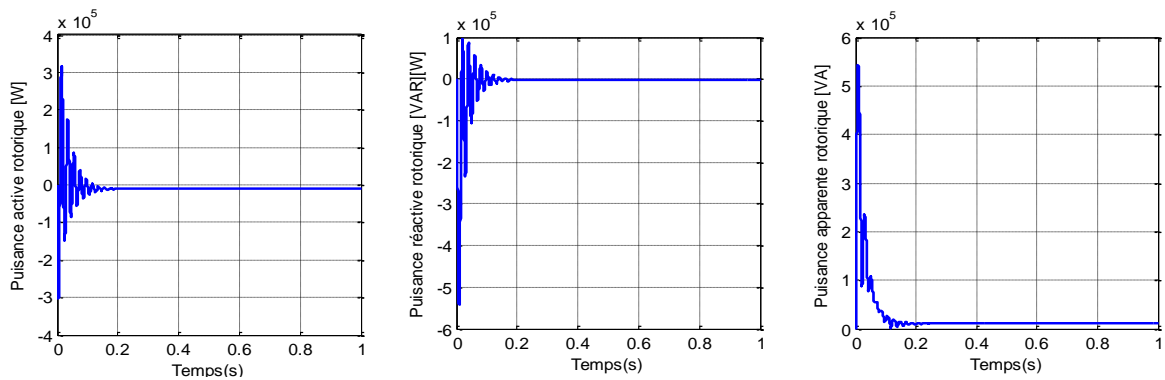


Figure II.13 Les puissances active, réactive et apparente rotoriques de la MADA.

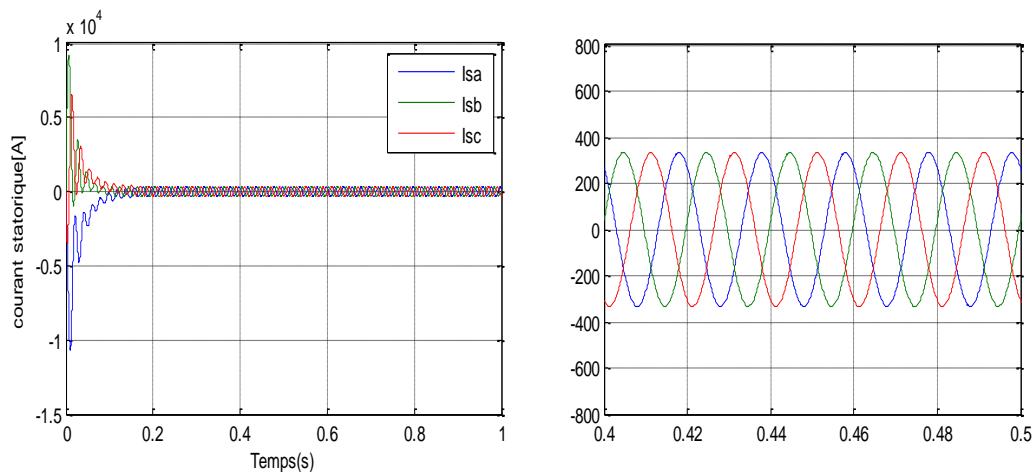


Figure II. 14 Les courants statoriques triphasées avec un zoom.

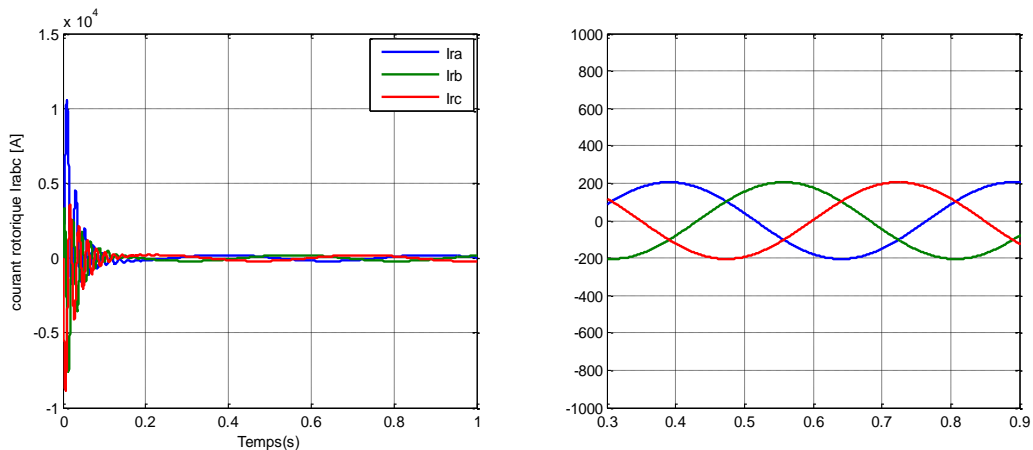


Figure II. 15 Les courants rotoriques triphasées (a,b,c) de la MADA avec un zoom.

II.3.7.1 Interprétation des résultats

Les résultats de simulation obtenus montrent l'importance des courants statoriques et rotoriques pendant le démarrage, après un temps égal à environ 0.2 s, ils se stabilisent et prennent leurs formes sinusoïdales avec une fréquence de 50Hz pour les courants statoriques. Le système est fonctionner à vide c'est pourquoi on remarque que les puissance active réactive et apparente sont maintenues à une valeur presque nul.

II.4 Modèles du convertisseur de puissance

Le convertisseur de puissance représente aujourd'hui un composant essentiel dans les systèmes d'interfaçage avec le réseau électrique. Son utilisation vient du fait qu'il permet de contrôler les puissances actives et réactives échangées avec le réseau.

Pour alimenter en tension continue l'onduleur coté rotor, il faut mettre en œuvre un redressement, à partir de la tension du réseau. Une des contraintes majeures pour une MADA réside dans le fait que la puissance au rotor est bidirectionnelle selon que l'on est en fonctionnement hyper ou en hypo synchrone. Le redresseur alimentant l'onduleur coté rotor doit donc être capable de faire transiter l'énergie électrique dans les deux sens en fonctionnement permanent. Il doit donc être bidirectionnel en courant. C'est principalement pour cette raison que nous mettrons en œuvre un redresseur à Modulation de Largeur d'Impulsions et pas un pont de diodes classique. L'utilisation de ce type de convertisseurs permet d'obtenir des signaux de sortie modulés en largeur d'impulsion (sinus-triangle à fréquence fixe), qui permettent de limiter les perturbations harmoniques.

On peut considérer que la chaîne de conversion électronique est composée de deux onduleurs couplés sur un bus continu commun. De manière générale, l'onduleur permet la conversion de courants triphasés alternatifs en un courant continu et d'une tension continue en tensions triphasées de signe alternatif.

L'onduleur étudié classiquement composé de trois cellules de commutation. Chacune est composée de deux transistors IGBT qui sont connectés à deux diodes en antiparallèle. Les semi-conducteurs ont été choisis en fonction du courant maximal qui les parcourt, de la tension à leurs bornes ainsi que de la fréquence de la porteuse de l'onduleur. Ils ont été considérés comme idéaux et les commutations sont instantanées.

Le bus continu est réalisé par une cellule de filtrage formée d'une capacité réduisant les ondulations de tension à l'entrée de l'onduleur, d'une inductance permettant de mieux lisser le courant, d'une résistance servant à augmenter l'amortissement du filtre réalisé.

Dans cette partie, nous nous intéressons à la modélisation du convertisseur de puissance dans le repère triphasé naturel.

II.4.1 Modélisation de L'onduleur de Tension

Un onduleur de tension est un convertisseur statique qui assure la transformation de la tension d'une source continue en une tension alternative [53].

Le montage onduleur est constitué de six interrupteurs bidirectionnels, chaque interrupteur est constitué d'un transistor (T) et d'une diode (D) montés en tête-bêche (Figure II.17).

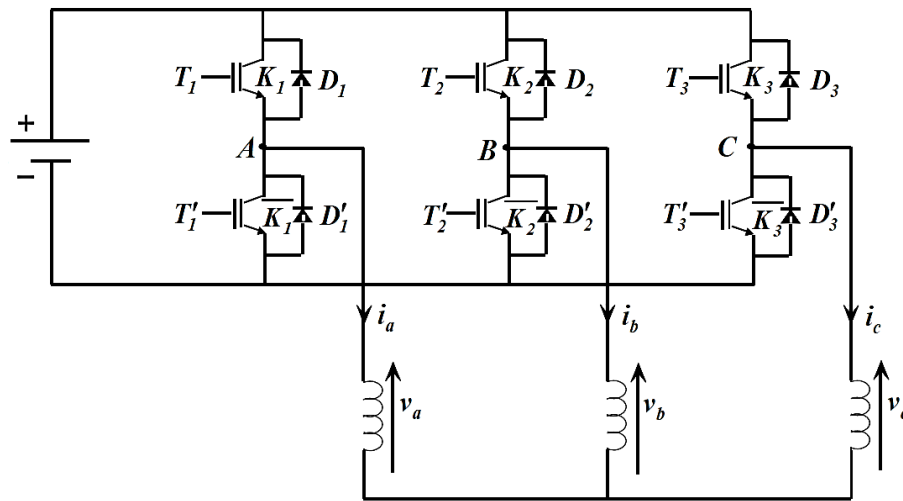


Figure II.17 Onduleur de tension triphasé à deux niveaux [54]

En supposant un mode de fonctionnement continu, chaque ensemble transistor/diode peut être considéré comme un interrupteur idéal.

La condition de ne pas court-circuiter la source de tension continue, impose que les commandes des interrupteurs d'un même bras doivent être complémentaires. Les diodes sont des diodes à roue libre assurant la protection des transistors [53]. Un bras de l'onduleur est représenté par la figure (II.18).

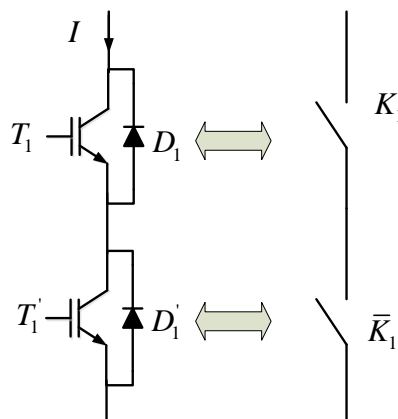


Figure II.18 Représentation d'un bras [53]

Pour obtenir une tension alternative à partir d'une tension continue, il faut découper la tension d'entrée et l'appliquer à la charge tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre sens.

L'onduleur alimenté par une source de tension parfaite impose à sa sortie, grâce au jeu d'ouverture et de fermeture des interrupteurs, une tension alternative formée d'une succession de créneaux rectangulaires, la période de fonctionnement étant fixée par la commande des interrupteurs [54].

Les équations de tension simples appliquées aux trois phases sont :

$$\begin{cases} V_A = V_{AO} + V_{On} \\ V_B = V_{BO} + V_{On} \\ V_C = V_{CO} + V_{On} \end{cases} \quad (\text{II.44})$$

$$\text{Par addition on a : } V_A + V_B + V_C = V_{AO} + V_{BO} + V_{CO} + 3V_{On} \quad (\text{II.45})$$

Sachant que le système des tensions triphasées statoriques est symétrique.

$$\text{Donc : } V_{AO} + V_{BO} + V_{CO} + 3V_{On} = 0$$

$$\text{D'où : } V_{On} = -\frac{1}{3}(V_{AO} + V_{BO} + V_{CO}) \quad (\text{II.46})$$

Si On remplace (II.46) dans (II.44), on aura le système suivant :

$$\begin{cases} V_A = \frac{2}{3}V_{AO} - \frac{1}{3}V_{BO} - \frac{1}{3}V_{CO} \\ V_B = -\frac{1}{3}V_{AO} + \frac{2}{3}V_{BO} - \frac{1}{3}V_{CO} \\ V_C = -\frac{1}{3}V_{AO} - \frac{1}{3}V_{BO} + \frac{2}{3}V_{CO} \end{cases} \quad (\text{II.47})$$

On peut écrire le système (II.47) sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{AO} \\ V_{BO} \\ V_{CO} \end{bmatrix} \quad (\text{II.48})$$

Tel que:

$$\begin{cases} V_{AO} = \frac{E}{2}s_1 \\ V_{BO} = \frac{E}{2}s_2 \\ V_{CO} = \frac{E}{2}s_3 \end{cases} \quad (\text{II.49})$$

On remplace (II.49) dans (II.48), on aura le système suivant :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{E}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.50})$$

Le système (II.50) représente le modèle mathématique de l'onduleur triphasé à MLI.

Avec:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_1 = \begin{array}{l} 1 \quad \text{si } K_1 \text{ conduit, } (\overline{K_1} \text{ bloqué}) \\ -1 \quad \text{si } K_1 \text{ bloqué, } (\overline{K_1} \text{ conduit}) \end{array} \\ S_2 = \begin{array}{l} 1 \quad \text{si } K_2 \text{ conduit, } (\overline{K_2} \text{ bloqué}) \\ -1 \quad \text{si } K_2 \text{ bloqué, } (\overline{K_2} \text{ conduit}) \end{array} \\ S_3 = \begin{array}{l} 1 \quad \text{si } K_3 \text{ conduit, } (\overline{K_3} \text{ bloqué}) \\ -1 \quad \text{si } K_3 \text{ bloqué, } (\overline{K_3} \text{ conduit}) \end{array} \end{array} \right. \quad (\text{II.51})$$

II.4.2. Commande par Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI)

La Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) sinus-triangle est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence (triangulaire). Les instants de commutation sont les points d'intersection entre la porteuse et la modulante. Le résultat de la comparaison de ces deux signaux sert à commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse [55].

Deux paramètres caractérisent cette commande si la référence est sinusoïdale:

- L'indice de modulation m qui définit le rapport entre la fréquence f_p de la porteuse et la fréquence f_r de la référence: $m = \frac{f_p}{f_r}$.
- Le taux de modulation r (ou coefficient de réglage en tension ou encore rapport cyclique) qui donne le rapport de l'amplitude de la modulante V_p à la valeur crête V_r de la porteuse: $r = \frac{V_r}{V_p}$

Le schéma de principe est donné par la figure (II.19).

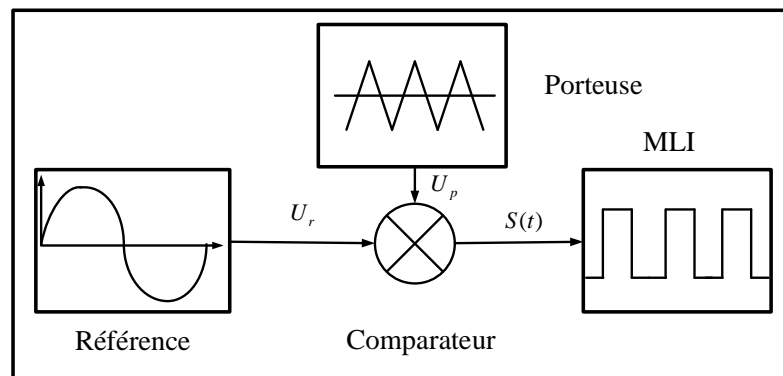


Figure II.19 Schéma synoptique

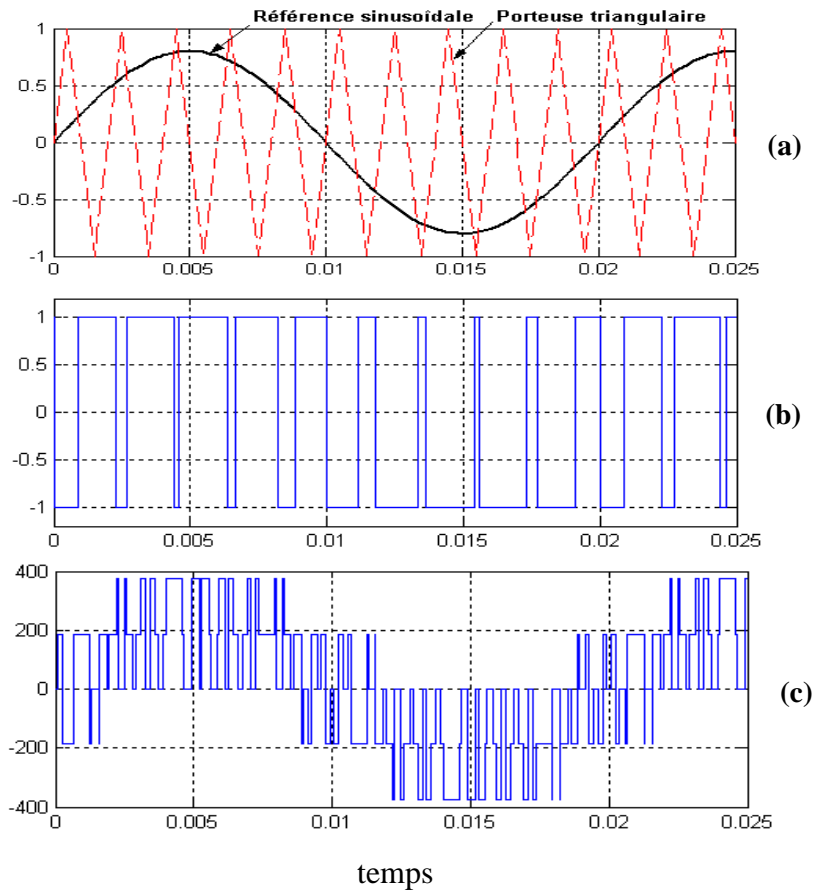


Figure II.20 Principe et réponses de la commande MLI sinus-triangle.
(a) : Signaux de comparaison (référence et porteuse),
(b) : Impulsion de commande du premier transistor,
(c) : Tension composée de sortie de l'onduleur (V).

La porteuse est un signal triangulaire caractérisé par sa fréquence f_p et sa valeur de crête V_p .

On définit l'équation de la porteuse dans sa période $t \in [0, T_p]$ [53] :

$$\begin{cases} y_1(t) = V_p \left(-1 + 4 \frac{t}{T_p}\right) & t \in \left[0, \frac{T_p}{2}\right] \\ y_2(t) = V_p \left(3 - 4 \frac{t}{T_p}\right) & t \in \left[\frac{T_p}{2}, T_p\right] \end{cases} \quad \text{si} \quad (II.52)$$

La référence est un signal sinusoïdal d'amplitude V_r et de fréquence f_r . En triphasé, les trois tensions sinusoïdales de référence sont données par :

$$\begin{cases} V_{rA}(t) = V_r \sin(2\pi f_r t) \\ V_{rB}(t) = V_r \sin\left(2\pi f_r t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{rC}(t) = V_r \sin\left(2\pi f_r t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (II.53)$$

La commande MLI sinus triangle utilise la comparaison avec la porteuse des trois composantes de la tension de référence afin de calculer les états S_1, S_2 et S_3 des interrupteurs de l'onduleur. Ceux-ci sont donnés par l'équation suivante :

$$S_{1,2,3} = \begin{cases} 1 & \text{si } (V_{r_{ABC}} - y(t)) \geq 0 \\ -1 & \text{si } (V_{r_{ABC}} - y(t)) < 0 \end{cases} \quad (\text{II.54})$$

On note que la MLI permet une nette réduction des harmoniques des courants, en augmentant la fréquence de découpage. Elle permet aussi de repousser vers des fréquences plus élevées les harmoniques de la tension ce qui facilite le filtrage; comme elle permet aussi de faire varier le fondamental de la tension désirée.

La tension obtenue par le redresseur présente des ondulations, ce qui nécessite un filtre pour diminuer ces ondulations.

II.4.3 Modélisation du Filtre

Les deux convertisseurs du système éolien (coté MADA et coté réseau) sont interconnectés par l'intermédiaire d'un Filtre RLC qui autorise ainsi un transfert de puissance entre deux sources à fréquences différentes]. Le schéma de principe de ce filtre est donné par la figure. (II.22).

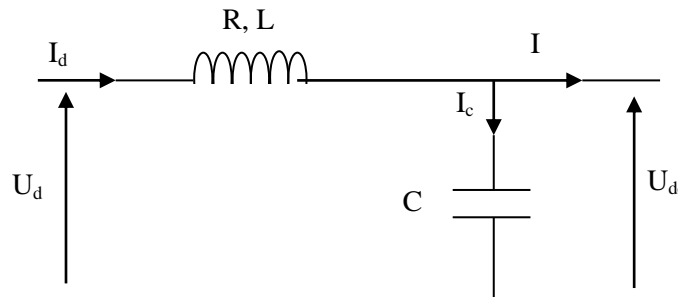


Figure II.21 Représentation du filtre RLC

- Le condensateur permet d'obtenir à l'entrée de l'onduleur une tension sensiblement constante, et d'absorber le courant négatif restitué par la charge.
- L'inductance permet de rendre sensiblement le courant constant [53].

Les équations du filtre sont données par :

$$\begin{cases} U_d(t) = L \frac{dI_d}{dt} + RI_d + U_{dc}(t) \\ \frac{dU_{dc}(t)}{dt} = \frac{1}{C} (I_d(t) - I(t)) \end{cases} \quad (\text{II.55})$$

La fonction de transfert du filtre est donnée par l'équation suivante:

$$F(S) = \frac{U_{dc}(t)}{U_d(t)} = \frac{U_{filtrée}}{U_{redressé}} = \frac{1}{LC S^2 + RC S + 1} \quad (\text{II.56})$$

C'est un filtre RLC de deuxième ordre dont la pulsation de coupure est donnée par:

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 2\pi \cdot f_c \quad (\text{II.57})$$

f_c : est la fréquence de coupure du filtre

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la modélisation du système éolien à vitesse variable constituée d'une machine asynchrone à double alimentation pilotée par le rotor via deux convertisseurs de puissances bidirectionnelles fonctionnant en MLI.

En se basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique de la machine asynchrone à double alimentation a été établi. La transformation de Park nous permis de simplifier ce modèle.

Ensuite, nous avons modélisé le système d'alimentation qui comporte l'onduleur qui est un redresseur triphasé et le filtre. On a appliqué la technique de la MLI pour commander l'onduleur.

Cette modélisation nous a permis essentiellement de retrouver les résultats classiques de système éolien à vitesse variable et de la machine asynchrone à double alimentation, de valider le modèle et de vérifier que les simulations effectuées par MATLAB sont valable. Ainsi, le chapitre suivant sera consacré à la commande vectorielle (découplée) de la MADA.

Chapitre III

Commande Vectorielle de la MADA

III.1 Introduction

La commande des éoliennes à vitesse variable a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche, qui visent à améliorer les performances de ces éoliennes, d'assurer une bonne qualité des puissances mécanique et électrique générées par la turbine, et d'améliorer leur rendement.

Dans notre étude, nous allons nous intéresser à la commande de l'aérogénérateur en visant le contrôle des puissances injectées au réseau. Deux alternatives seront présentées; la première est basée sur la stratégie MPPT, tandis que la seconde repose sur le découplage de la commande des puissances active et réactive.

La technique MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un algorithme permettant de suivre le point de puissance maximale d'un générateur pour une vitesse du vent variable, les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs éoliens ou photovoltaïques.

La commande vectorielle, basée sur l'orientation du flux statorique permet en effet de contrôler de manière indépendante les puissances active et réactive du MADA qui est entraîné par une turbine éolienne commandée par la stratégie MPPT [56].

L'application de la commande vectorielle à la machine asynchrone à double alimentation présente une solution attractive pour réaliser des performances meilleures pour les applications de la production d'énergie dans une gamme de vitesse limitée et constitue actuellement un domaine de recherche [49].

Dans ce chapitre, nous allons présenter une étude sur les techniques d'extraction de maximum de puissance. Ensuite, nous exposons la commande vectorielle des puissance active et réactive statorique du générateur, les résultats de simulation sont présentés afin de valider les algorithmes de contrôles proposés.

III.2 Méthodes de recherche du point maximum de puissance

La courbe typique représentant la puissance aérodynamique d'un aérogénérateur fonctionnant à vitesse variable en fonction de la vitesse de vent est illustrée sur la figure III.1. Trois zones de fonctionnement peuvent être distinguées.

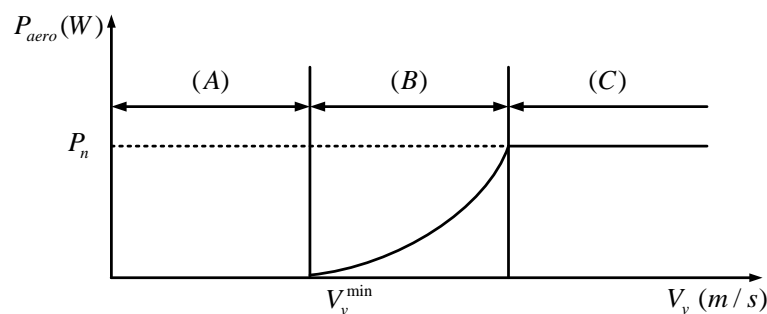


Figure III.1 Courbe typique de la puissance produite d'un aérogénérateur à vitesse variable [60]

• **Zone A:** Correspondant aux vitesses très faibles du vent. Insuffisantes pour entraîner l'éolienne et produire de la puissance électrique, par conséquent, la vitesse de rotation et la puissance mécanique sont alors égales à zéro.

• **Zone B:** Correspondant aux vitesses moyennes du vent, lorsque le vent atteint une vitesse minimale v^{\min} il permet le démarrage de l'éolienne, une fois ce démarrage est effectué, l'éolienne va fonctionner de manière à extraire le maximum de puissance disponible pour avoir un fonctionnement optimal jusqu'à ce que le vent atteigne la vitesse nominale v^n correspondant à la valeur nominale de la puissance mécanique.

• **Zone C:** Le vent atteint des vitesses élevées supérieures à la vitesse nominale pour lesquelles la vitesse de rotation de l'éolienne est limitée à une valeur optimale, par conséquent la puissance mécanique doit être maintenue à sa valeur nominale pour éviter des dégâts. Ces limitations peuvent s'effectuer, par exemple, en orientant les pales de l'éolienne afin de dégrader son rendement (augmentation de l'angle de calage des pales). Dès que le vent atteint sa valeur maximale, une procédure d'arrêt de l'éolienne est effectuée afin d'éviter toute destruction de celle-ci.

Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéresserons plus particulièrement à des points de fonctionnement de l'éolienne se situant dans la zone B. Il existe différentes stratégies de commande pour contrôler le couple électromagnétique afin de régler la vitesse de rotation de la génératrice de manière à maximiser la puissance électrique produite,

La MPPT (Maximum Power Point Tracking) est une méthode de contrôle très fiable, robuste et simple à implanter, elle consiste à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée.

Le schéma de la Figure I.7 illustre les courbes caractéristiques d'une éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation de la turbine. Chaque courbe correspond à une vitesse de vent donnée. L'ensemble des sommets de ces caractéristiques, qui sont les points optimaux recherchés, définit une courbe fortement non linéaire à une forme de « cloche » dite de puissance optimale illustrée par l'équation :

$$P_{T \max} = \frac{1}{2} \rho C_{p-opt}(\lambda, \beta) S v^3 \quad (\text{III.1})$$

La puissance aérodynamique extraite par la turbine éolienne peut être essentiellement maximisée en ramenant le coefficient C_p à sa valeur maximale C_{p-opt} . Ce coefficient étant dépendant de la vitesse relative λ (ou la vitesse du générateur), par conséquent, l'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet de maximiser cette puissance. Il est donc nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser la puissance électrique générée (à

travers le couple électromagnétique) en ramenant la vitesse relative à sa valeur optimale (λ_{opt}) et pour cela en régulant la vitesse de rotation de la génératrice à une valeur de référence quel que soit la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice. Selon le besoin ou non d'un capteur de vitesse de vent, on peut distinguer principalement deux modes de contrôle [58]:

- Le contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation.
- Le contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation.

Pour l'étude de ces deux modes de contrôle, on supposera que la génératrice et les convertisseurs sont idéaux, quelle que soit la puissance mécanique transmise par la turbine, ainsi que le couple électromagnétique est donc à tout instant égal à sa valeur de référence imposée par la commande.

III.2.1 Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation

Dans cette méthode le système de contrôle vise à faire régler le couple électromagnétique du générateur $C_{em} = C_{em_ref}$, de manière à fixer la vitesse de rotation de celle-ci aux alentours d'une vitesse de référence (valeur optimale). Un asservissement de la vitesse de rotation de la MADA doit être effectué, pour cette raison un régulateur PI est utilisé. $C_{em_ref} = PI(\Omega_{ref} - \Omega_{mec})$

La vitesse de référence dépend de la vitesse de la turbine, en prenant en compte le gain du multiplicateur, on a donc :

$$\Omega_{ref} = G \Omega_{T_ref} \quad (III.2)$$

La vitesse de rotation de la turbine est égale à:

$$\Omega_T = \frac{v \lambda}{R} \quad (III.3)$$

La vitesse de référence de la turbine correspond à la valeur optimale de la vitesse spécifique

λ_{opt} : est définie par:

$$\Omega_{T_ref} = \frac{v \lambda_{opt}}{R} \quad (III.4)$$

Tel que:

PI : Régulateur de vitesse.

Ω_{ref} : La vitesse mécanique de référence.

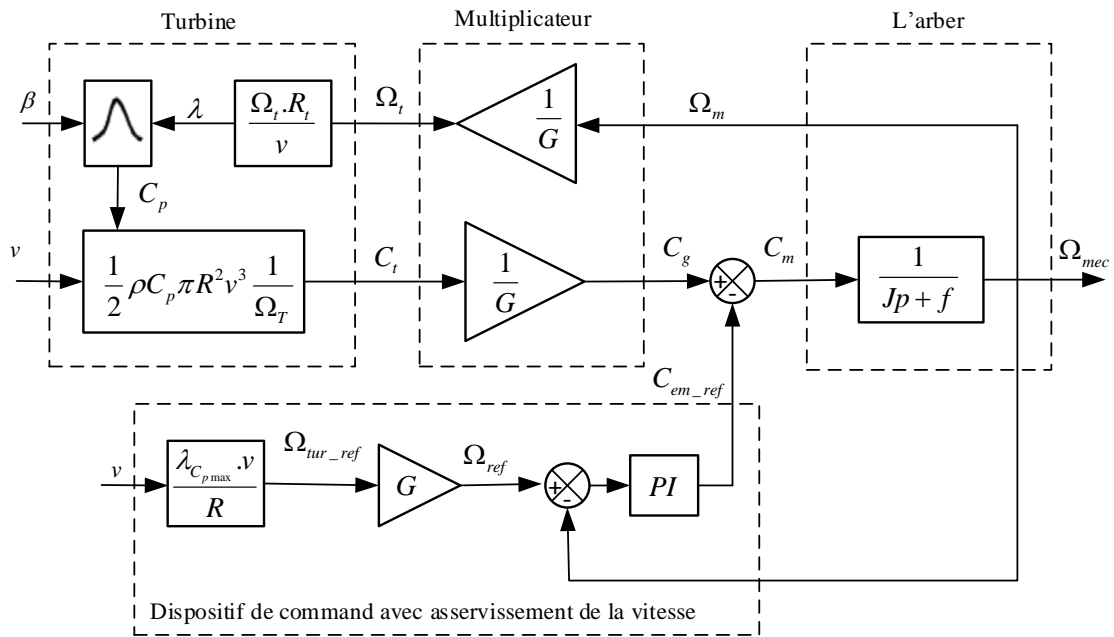


Figure III.2 Contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation

Cependant, cette méthode exige une mesure de la vitesse du vent généralement réalisée par un anémomètre. En pratique, une mesure précise de la vitesse du vent est difficile à réaliser et augmente le coût du système. Ceci pour deux raisons :

- D'une part, l'anémomètre est situé derrière le rotor de la turbine, ce qui donne une lecture erronée de la vitesse du vent, car elle est très perturbée par les turbulences provoquées par les pales en rotation.
- D'une autre part, l'utilisation d'un unique anémomètre sur l'éolienne conduit à utiliser une mesure locale de la vitesse du vent (donne la vitesse du vent en un seul point de l'espace) qui n'est pas représentative de la valeur moyenne apparaissant sur les pales, le diamètre de la surface balayée par les pales étant important.

Ainsi, une mesure erronée de la vitesse du vent conduit donc forcément à une dégradation de la puissance extraite. Pour cette raison la plupart des turbines éoliennes installées actuellement sont contrôlées sans asservissement.

III.2.2 Contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation

On cherche à extraire le maximum de puissance du vent, le dispositif de commande dans ce cas doit imposer un couple de référence de manière à permettre à la génératrice de tourner à une vitesse réglable afin d'assurer un point de fonctionnement optimal. Cette technique de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. En supposant que l'angle d'orientation des pales β est constant, une estimation de la vitesse du vent est souvent utilisée [59].

$$v_{est} = \frac{\Omega_T \cdot_{est} R}{\lambda} \tag{III.5}$$

Le coefficient de puissance serait maintenu à sa valeur maximal C_{p-opt} et la puissance aérodynamique de référence est donc donnée par :

$$P_{T-ref} = \frac{1}{2} \rho C_{p-opt} S v_{est}^3 \tag{III.6}$$

Le couple aérodynamique aura dans ce cas comme expression:

$$C_T = \frac{P_{T-ref}}{\Omega_T} \tag{III.7}$$

Si on suppose que la vitesse de rotation de la génératrice est fixe pendant la durée d'étude (en régime permanente), en négligeant l'effet du couple des frottements visqueux, on obtient:

$$C_{em-ref} = C_{arb=g} = \frac{1}{G} C_T, \tag{III.8}$$

Avec:

$$C_{em-ref} = \frac{P_{T-ref}}{\Omega_T G} \tag{III.9}$$

Le couple électromagnétique de référence devient:

$$C_{em-ref} = \frac{1}{2\Omega_T G} \rho C_{p-opt} S v_{est}^3 \tag{III.10}$$

Avec:

$$S = \pi R^2 \tag{III.11}$$

L'expression III.10 donne le couple qui doit être imposé à la MADA pour assurer le fonctionnement optimale de l'aérogénérateur. La Figure III.3 résume le schéma bloc de la stratégie MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation.

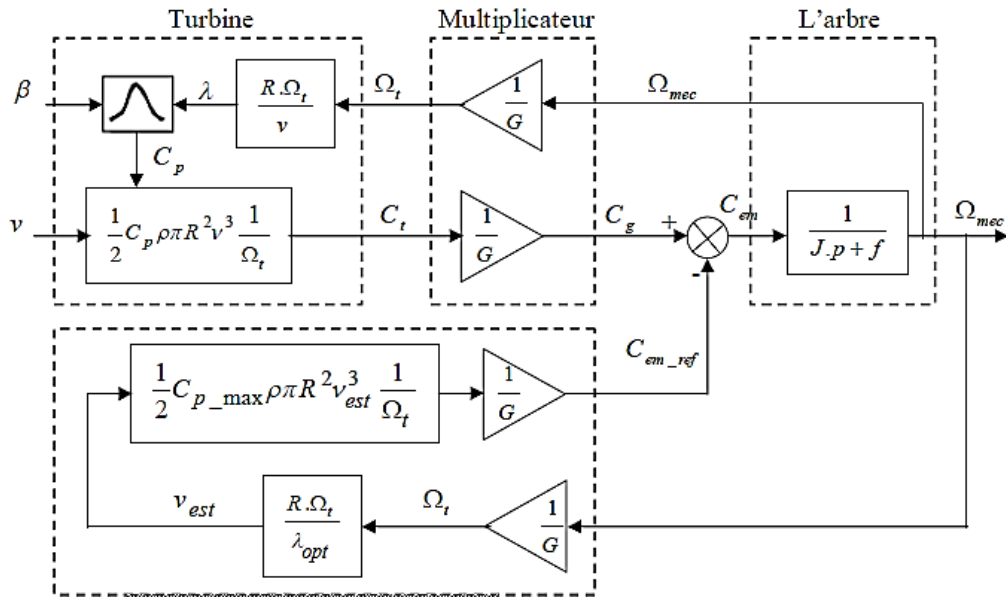


Figure III.3 Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation.

III.3 Commande vectorielle de la MADA

Depuis plusieurs années, des recherches universitaires et industrielles ont été réalisées pour remédier le problème de la commande de la machine asynchrone et établir une similitude avec la machine à courant continu. En effet, la difficulté pour commander une machine asynchrone réside dans le fait qu'il existe un couplage naturelle entre les variables d'entrées, les variables de sorties et les variables internes de la machine comme le flux, la vitesse et le couple.

La commande vectorielle par orientation du flux (*field oriented control*) présente une solution attractive pour réaliser des meilleures performances dans les applications de la production d'énergie dans une gamme de vitesse limitée et constitue actuellement un domaine de recherche [49].

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

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'énergie électrique généré par une MADA couplée à une turbine éolienne, l'une des méthodes les plus utilisée, consiste à réaliser un contrôle indépendant des puissances actives et réactives, en établissant les équations qui lient les valeurs des tensions rotoriques aux puissances active et réactive statoriques [35].

III.3.1 Procède d'orientation du flux

Il existe trois types d'orientation du flux [60] :

- Orientation du flux rotorique avec les conditions $\phi_{rq} = 0 \Leftrightarrow \phi_{rd} = \phi_r$ (III.12)

- Orientation du flux statorique avec les conditions $\phi_{sq} = 0 \Leftrightarrow \phi_{sd} = \phi_s$ (III.13)

- Orientation du flux d'entrefer avec les conditions $\phi_{gq} = 0 \Leftrightarrow \phi_{gd} = \phi_g$ (III.14)

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

III.3.2 Commande vectorielle par orientation du flux statorique

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

L'illustration de l'orientation du flux statorique est représenté dans la figure III.4.

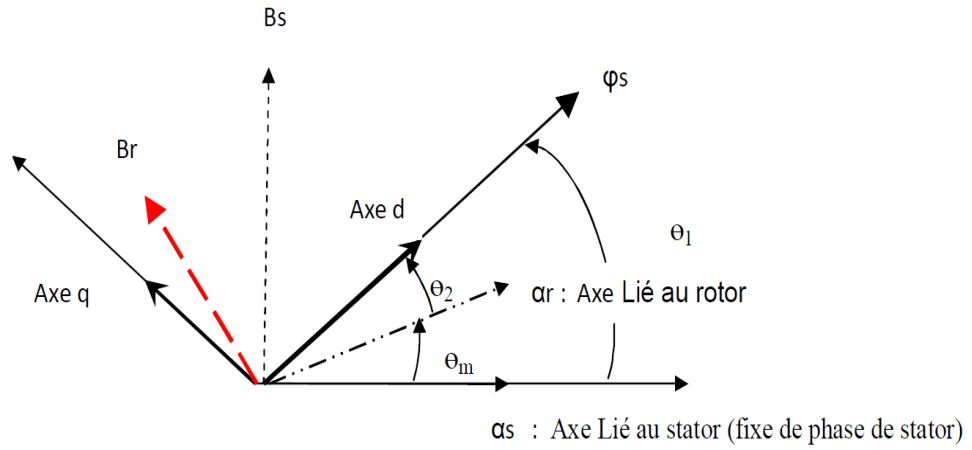


Figure III.4 Illustration de l'orientation du flux statorique.

III.4 Contrôle indépendant des puissances

Contrairement à la machine asynchrone à cage, où nous avons accès à la mesure des courants au stator seulement, la machine asynchrone à bagues doublement alimentée possède l'avantage de offrir la possibilité d'une mesure des courants de deux côtés et par conséquent de pouvoir les contrôler ; donnant une meilleure flexibilité à la commande de cette dernière.

III.4.1 Modèle de la MADA a flux statorique orienté

On rappelle d'abord le modèle électrique biphasé d'une MADA (fonctionnement génératrice) au référentiel fixé par rapport au champ tournant en mode hyposynchrone qui est donné par :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = -R_s I_{sd} + \frac{d}{dt} (\phi_{sd}) - \omega_s \phi_{sq} \\ V_{sq} = -R_s I_{sq} + \frac{d}{dt} (\phi_{sq}) + \omega_s \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt} (\phi_{rd}) - \omega_r \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d}{dt} (\phi_{rq}) + \omega_r \phi_{rd} \end{array} \right. \quad (\text{III.15})$$

La commande vectorielle à orientation du flux statorique est la plus utilisée, elle donne de meilleurs résultats. Avec un flux statorique constant et orienté sa composante quadratique est donc nulle. $\phi_{sq} = 0$ et $\phi_s = \phi_{sd}$: Cela signifie que le flux ϕ_s est aligné en permanence avec l'axe d.

Les équations peuvent se simplifier sous la forme suivante:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = -R_s I_{sd} \\ V_{sq} = -R_s I_{sq} + \omega_s \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt}(\phi_{rd}) - \omega_r \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d}{dt}(\phi_{rq}) + \omega_r \phi_{rd} \end{array} \right. \quad (\text{III.16})$$

Pour les machines de moyenne et forte puissance, on peut de façon légitime négliger la résistance statorique tout en considérant le flux statorique constant (ce qui assuré par la présence d'un réseau stable connecté au stator)

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \phi_s \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt}(\phi_{rd}) - \omega_r \phi_{rd} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d}{dt}(\phi_{rq}) + \omega_r \phi_{rd} \end{array} \right. \quad (\text{III.17})$$

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{sd} = \phi_s = -L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ 0 = -L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r I_{rd} - M I_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r I_{rq} - M I_{sq} \end{array} \right. \quad (\text{III.18})$$

Apartir de l'équation des flux (III.18.), nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{sd} = \frac{M}{L_s} I_{rd} - \frac{\phi_s}{L_s} \\ I_{sq} = \frac{M}{L_s} I_{rq} \end{array} \right. \quad (\text{III.19})$$

Le couple a pour expression :

$$C_{em} = -P(\phi_{sd} I_{sq} - \phi_{sq} I_{sd}) \quad (\text{III.20})$$

Avec une orientation du flux statorique telle que $\dot{\phi}_{sq} = 0$; on obtient une expression simplifiée :

$$C_{em} = -P \phi_{sd} I_{sq} \quad (\text{III.21})$$

Le courant I_{sq} ne pouvant être directement contrôlé, en utilisant l'équation (III.19) , on fait apparaître la composante en quadrature du courant rotorique dans l'expression du couple électromagnétique [1]:

$$C_{em} = -P \frac{M}{L_s} \phi_{sd} I_{rq} \quad (\text{III.22})$$

On voit que le couple électromagnétique est proportionnel au courant I_{rq} si le flux est maintenu constant. Le courant I_{rq} sera variable par action sur la tension V_{rq} . Le flux peut être contrôlé par action sur le courant I_{rd} .

III.4.2 Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques

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

$$\begin{cases} P_s = -V_{sd} \cdot I_{sd} - V_{sq} \cdot I_{sq} \\ \varphi_s = -V_{sq} \cdot I_{sd} + V_{sd} \cdot I_{sq} \end{cases} \quad (\text{III.23})$$

L'adaptation de ces équations au système d'axe choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas ($V_{sd} = 0$) donne :

$$\begin{cases} P_s = -V_{sq} \cdot I_{sq} \\ \varphi_s = -V_{sq} \cdot I_{sd} \end{cases} \quad (\text{III.24})$$

En remplaçant I_{sd} et I_{sq} par leurs expressions données à l'équation (III.19), nous obtenons :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq} \\ \varphi_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - V_{sq} \frac{M}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.25})$$

Les tensions rotoriques diphasées sont les grandeurs à imposer pour contrôler les courants rotoriques. Ces tensions sont ainsi considérés comme des variables de commande qui sont

généérées par le bloc de contrôle à flux orienté (Figure III.5) et les courants rotoriques I_{rd} et I_{rq} comme des variables d'état.

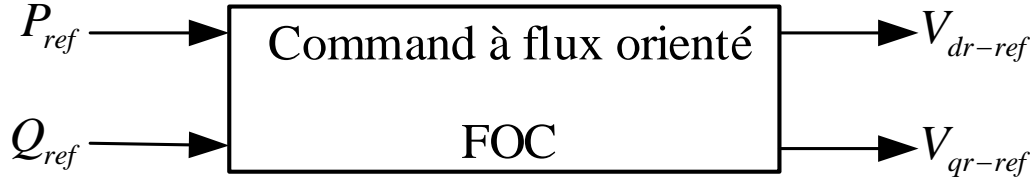


Figure III.5 Bloc du F.O.C (field oriented control)

$$\begin{cases} P_{s-ref} = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq-ref} \\ \phi_{s-ref} = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - V_s \frac{M}{L_s} I_{rd-ref} \end{cases} \quad (III.26)$$

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

III.4.3 Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques

A partir du système d'équation (III.18) et si en remplaçant les courants statoriques par leurs expressions, les expressions des flux rotoriques peuvent être écrites sous la forme suivante:

$$\begin{cases} \phi_{rd} = (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rd} + \frac{M.V_s}{\omega_s.L_s} \\ \phi_{rq} = (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rq} \end{cases} \quad (III.27)$$

Ces expressions des flux rotoriques d'axe d et q sont alors intégrées aux expressions de tensions rotoriques diphasées de l'équation (III.17). Nous obtenons alors :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{rd}}{dt} - g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{rq}}{dt} + g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rd} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (III.28)$$

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

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III.29})$$

En appliquant la transformation de Laplace à ces deux équations (III.28), on obtient :

$$\begin{cases} V_{rd} = \left[R_r + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) .s \right] I_{rd} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = \left[R_r + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) .s \right] I_{rq} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III.30})$$

Avec:

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

$g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$: Est le terme de couplage entre les deux axes. Il représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation.

g :Correspond au glissement de la machine asynchrone.

$$\text{Et : } \sigma L_r = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$$

D'après (III.30), la commande vectorielle de la MADA revient alors à contrôler les deux puissances P_s et φ_s par les composantes V_{rd} et V_{rq} . A partir des équations (III.26) et (III.30) on peut établir le schéma bloc de la MADA, voir la figure III.6.

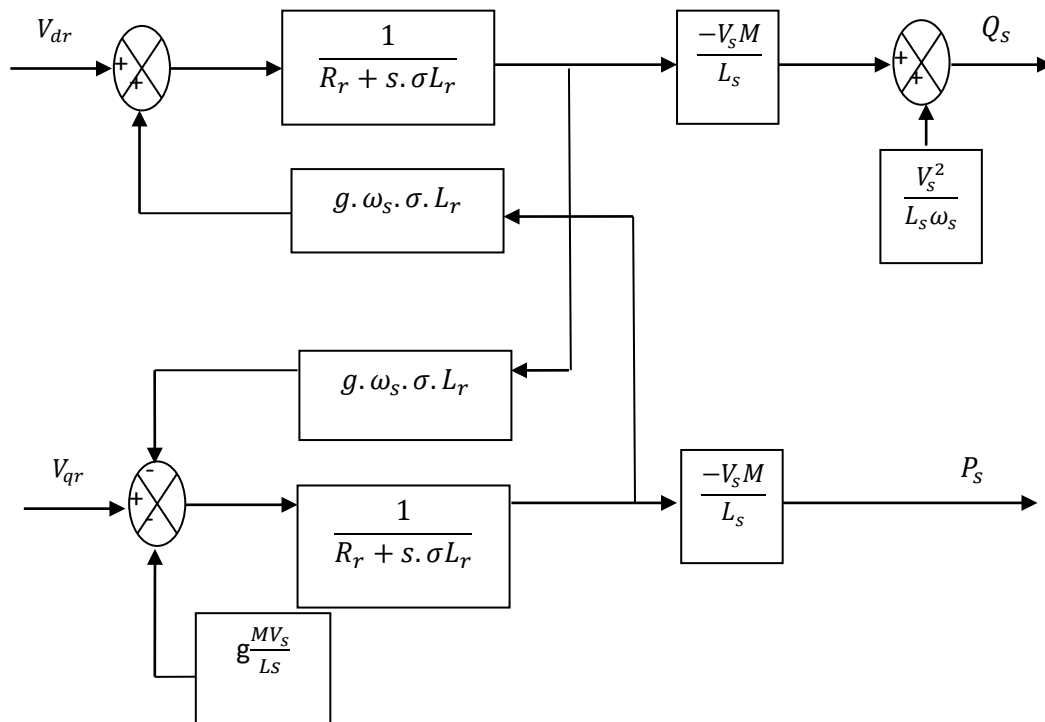


Figure III.6 Schéma bloc du modèle simplifié de la MADA.

Si l'on observe le schéma de la Figure (III.6), on s'aperçoit que les courants rotoriques sont liés aux puissances actives et réactives par le terme $\frac{MV_s}{L_s}$, le modèle est non linéaire à cause des termes de couplages $g \omega_s \sigma L_r I_{rd}$ et $g \omega_s \sigma L_r I_{rq}$. Les termes de couplage sont souvent considérés comme des perturbations à compenser pour obtenir une commande découplée, en éliminant les interactions entre la commande des puissances directe et en quadrature.

Pour réaliser la commande bouclée, des régulateurs classiques de type PI sont utilisés. Ce type de régulateur assure une erreur statique nulle grâce à l'action intégrale tandis que la rapidité de la réponse est établie par l'action proportionnelle.

III.5 Méthodes de la commande vectorielle

Les puissances statorique et les tensions rotoriques sont liées par une fonction de transfert de premier ordre, augmentée de certains coefficients de couplage plus ou moins significatifs. Par conséquent, il apparaît deux solutions pour effectuer la commande en puissance de la MADA : la première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives.

Cette méthode est appelée méthode directe. La seconde méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser. Cette méthode appelée méthode indirecte [60].

III.5.1 Commande vectorielle directe (CVD)

La méthode directe a été proposée par Blaschke et rendue publique vers 1970 [61], elle se base sur la connaissance exacte du flux (statorique) et de sa position. Il faut donc procéder à une série de mesures aux bornes du variateur. Une première possibilité est de placer des capteurs dans le bobinage statorique et de mesurer directement les composantes du flux de manière à en déduire l'amplitude et la phase. Les capteurs mécaniquement fragiles sont soumis à des contraintes sévères dues aux vibrations et à l'échauffement. En outre, ce mode nécessite l'utilisation des capteurs de flux, ce qui augmente considérablement le coût. Par conséquent, dans la grande majorité des cas, on fait appel à des estimateurs ou des observateurs à partir des mesures effectuées sur le variateur [62].

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

Dans le contrôle vectoriel direct, l'idée sur la régulation consiste à contrôler indépendamment et directement les puissances active et réactive de la MADA, dans lequel on négligera les termes de couplages. Le schéma de la figure (III.7) présente le principe de la commande dite directe.

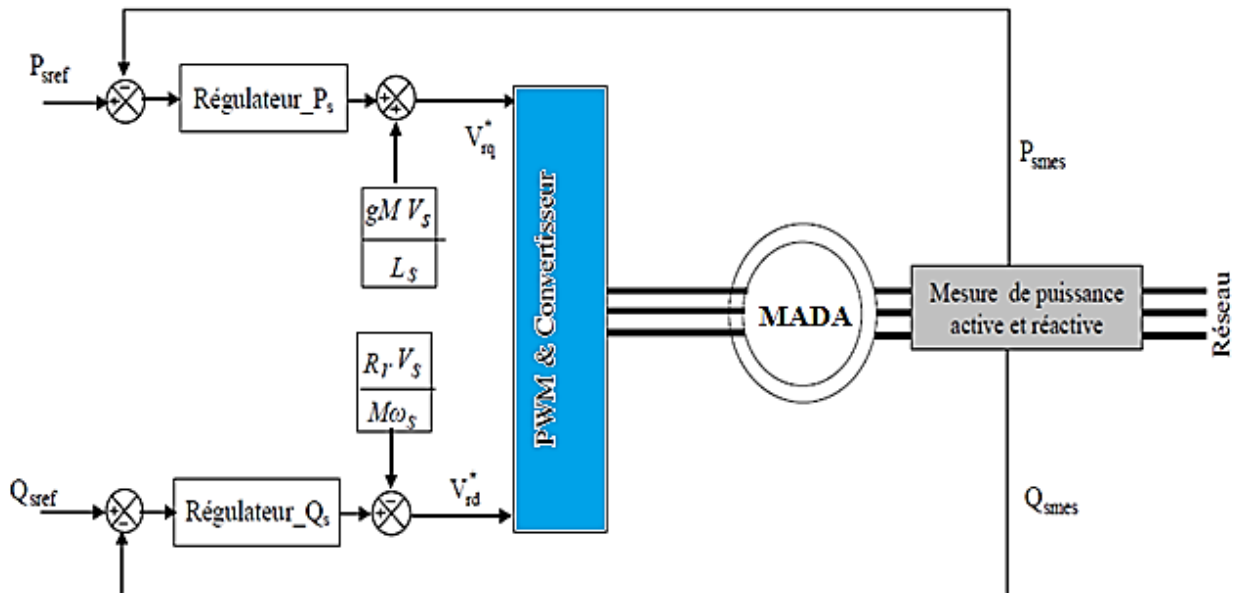


Figure III.7 Schéma de principe de la commande directe de la MADA.

III.5.2 Commande vectorielle indirecte (CVI)

Afin d'améliorer la commande précédente, on introduit un algorithme de commande indirecte des puissances active et réactive de la MADA en fonction des courants rotoriques, d'où les termes de couplage $g \omega_s \sigma L_r I_{rq}$ et $g \omega_s \sigma L_r I_{rd}$ considérés comme étant des perturbations non négligeables, et seront compensés.

Cette méthode a été introduite par K. Hasse. Le principe de cette méthode consiste à ne pas mesurer ou estimer l'amplitude de flux mais seulement sa position. Cette méthode a été favorisée par le développement des microprocesseurs, mais l'inconvénient majeur de cette méthode est la sensibilité aux variations paramétriques de la machine due à la saturation magnétique et à la variation de température. Il est important de souligner que la méthode indirecte est la plus simple à réaliser et la plus utilisée [63].

La commande, ainsi découplée, est réalisée au moyen de régulateurs PI. Il existe deux méthodes de découplage en boucle ouverte et en boucle fermée pour contrôler les puissances statorique.

III.5.2.1 La commande indirecte en boucle ouverte

Le schéma de l'ensemble commande bloc découplage machine est illustré sur la figure(III.8). Dans cette méthode, le découplage se fait au niveau des sorties des régulateurs en courants rotoriques sans aucun retour au système, en imposant les tensions de références V_{rd} et V_{rq} qui conviennent. En outre, la commande indirecte sans bouclage de puissance (en boucle ouverte) permet de contrôler séparément les courants I_{rd} et I_{rq} en boucle fermée et les puissances P_s et φ_s en boucle ouverte.

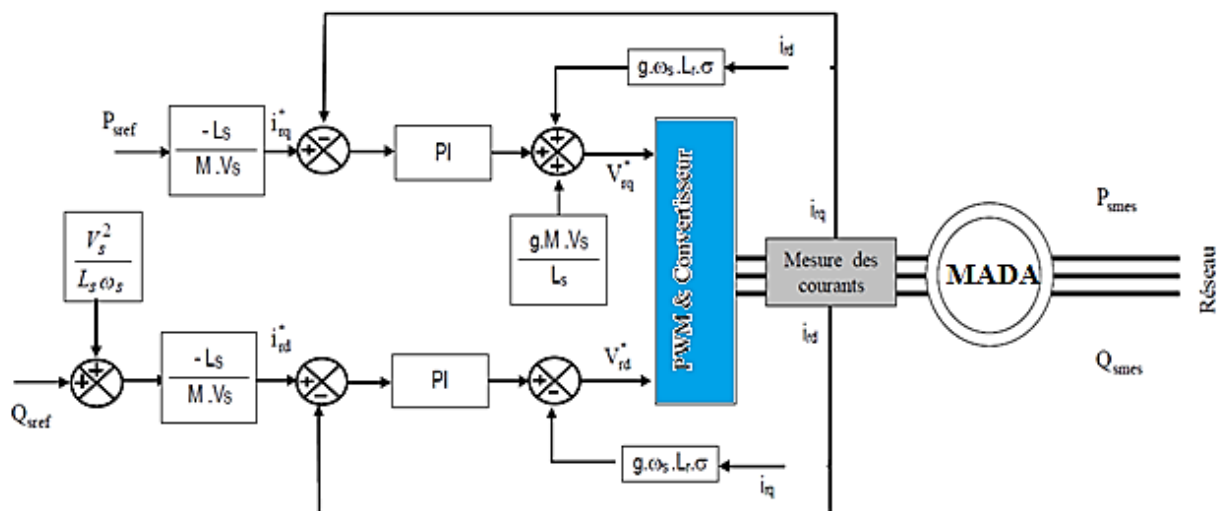


Figure III.8 Schéma de la commande indirecte sans contrôle des puissances de la MADA.

III.5.2.2 Commande indirecte en boucle fermé

Dans cette méthode, le découplage se fait au niveau des sorties des régulateurs en courant rotorique avec un retour du système, qui permet le réglage des puissances, on distingue donc, une commande par boucle en cascade de la puissance et du courant rotorique pour chaque axe. Elle permet de contrôler séparément les courants I_{rd} et I_{rq} , et les puissances P_s et φ_s en boucle fermé. Le schéma simplifié de l'ensemble commande-bloc découplage-machine est illustré sur la figure III.9 [64].

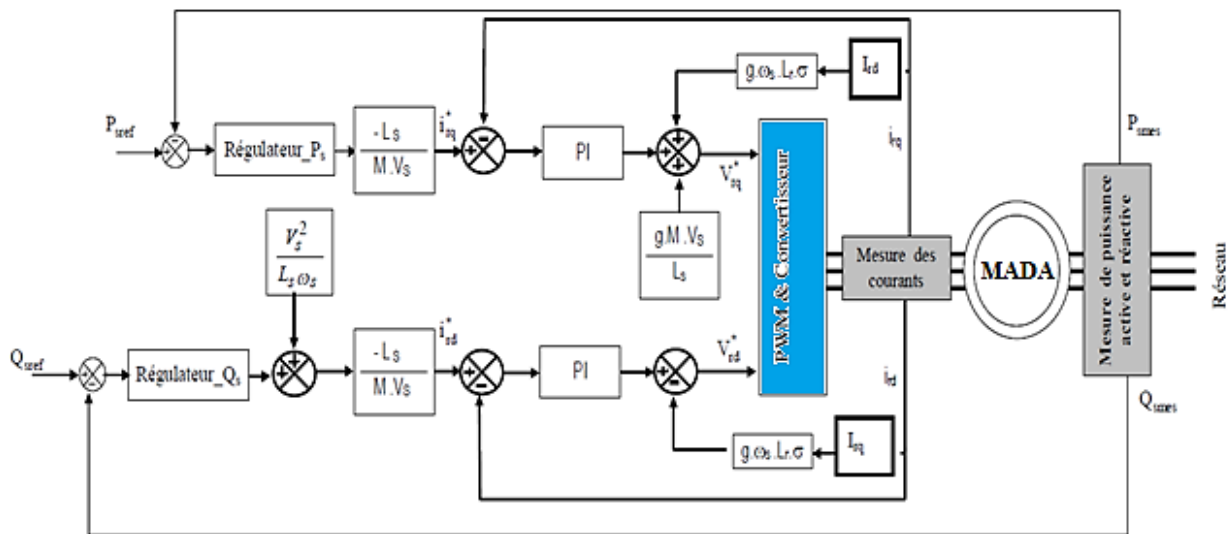


Figure III.9 Schéma de la commande indirecte avec contrôle de puissance de la MADA.

Cette structure aboutit à un système de régulation plus complexe. Toutefois, elle offre une meilleure robustesse face aux éventuelles instabilités sur le réseau électrique. Le régulateur proportionnel intégral utilisé pour l'asservissement des courants et des puissances est simple et facile à mettre en place tout en offrant des performances acceptables pour l'utilisation en génératrice.

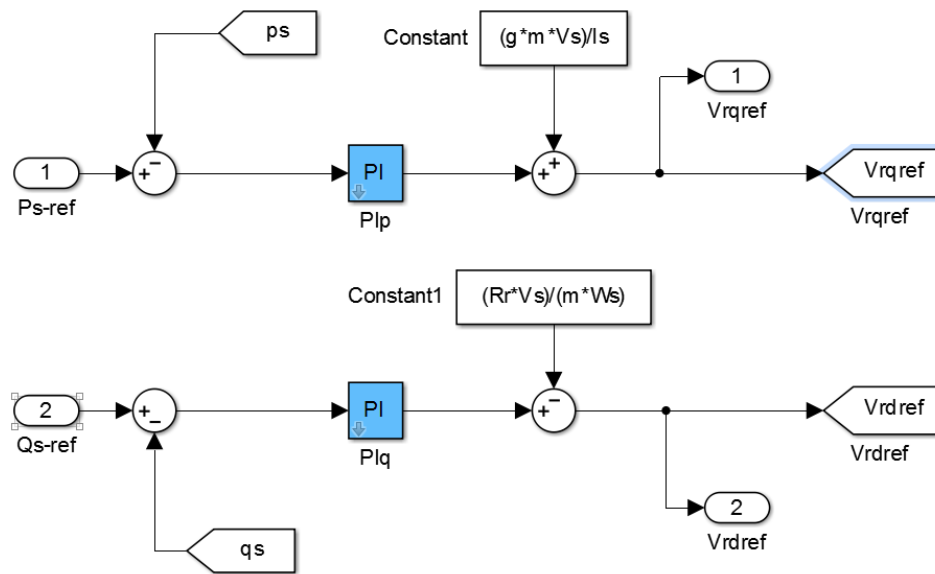


Figure III.10 Schéma bloc de la commande vectorielle directe à flux statorique orienté de la MADA sous MATLAB/Simulink.

III.6 Résultats de simulation

L'ensemble des modèles; turbine, multiplicateur de vitesse et l'arbre mécanique, commandé par la stratégie MPPT a été simulé sous Matlab/Simulink. Les différents paramètres mécaniques du système éolien étudié sont résumés dans **l'annexe A**. Considérons dans cette simulation que le couple électromagnétique du générateur est à tout instant égale sa valeur de référence, ainsi que l'angle d'orientation des pales est fixé à une valeur constante égale à 2° . Également, la valeur initiale de la vitesse mécanique est calculée à partir de la valeur initiale de la vitesse du vent. La grandeur essentielle à contrôler avec une grande dynamique est la puissance active, car elle permettra à la machine de fonctionner à sa puissance maximale afin d'obtenir un bon rendement de l'ensemble du système. Cependant, il est aussi nécessaire de bien contrôler la puissance réactive.

Afin d'analyser les comportements, les performances et la faisabilité des contrôles proposés, le système éolienne basée sur la machine asynchrone à double alimentation est simulé à l'aide de MATLAB / Simulink. Deux études de simulation différentes ont été réalisées. Dans un premier test, il est prévu de vérifier la réponse du générateur et du convertisseur de système avec le contrôleur PI.

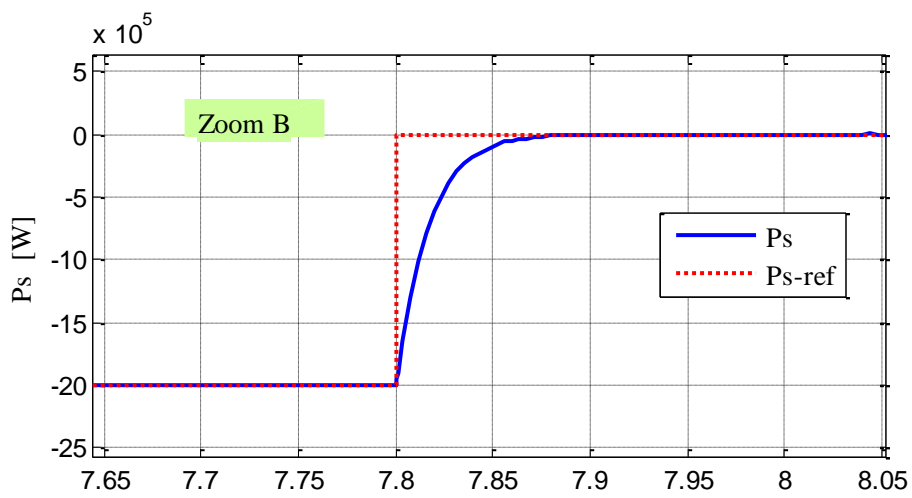
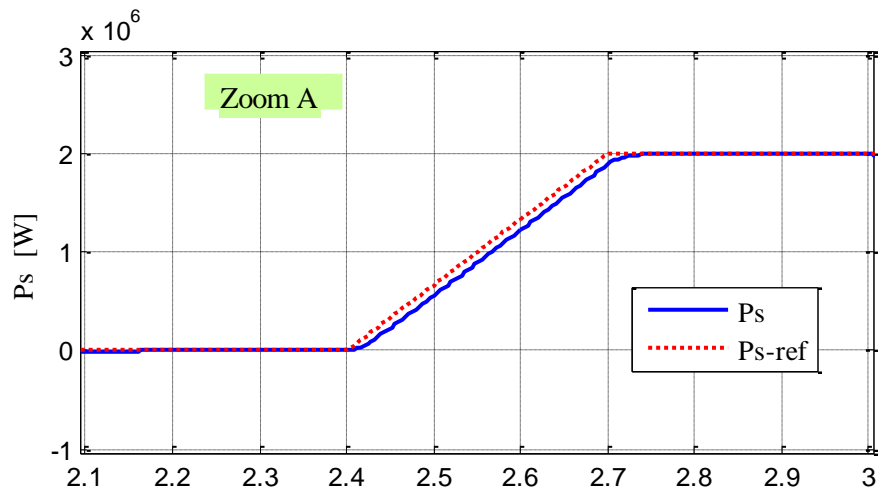
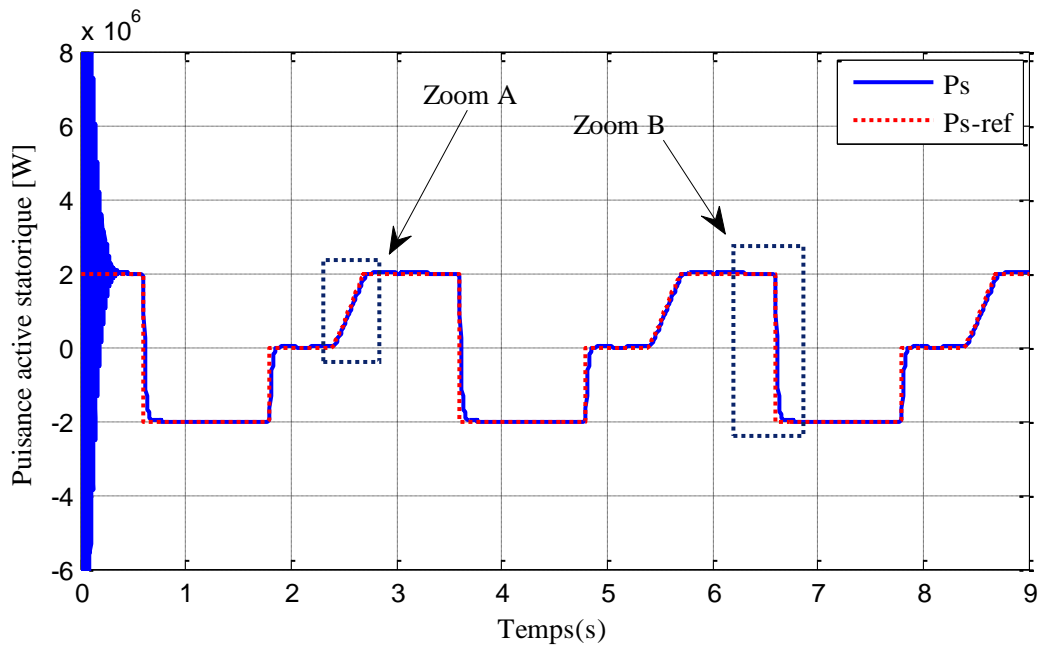


Figure III.11 Puissance active statorique de la MADA par la commande vectorielle

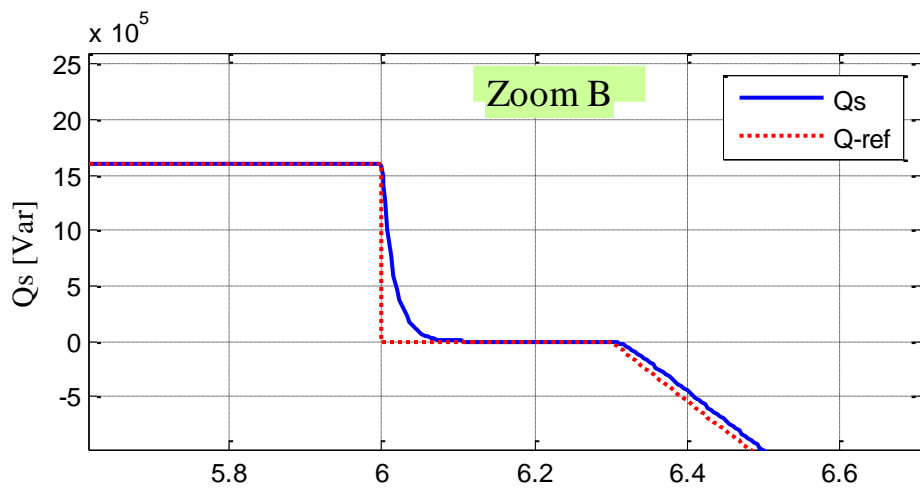
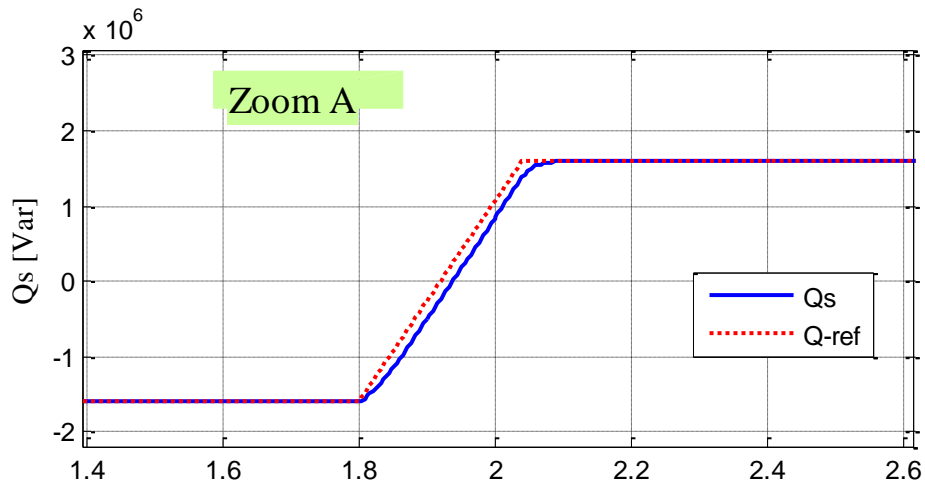
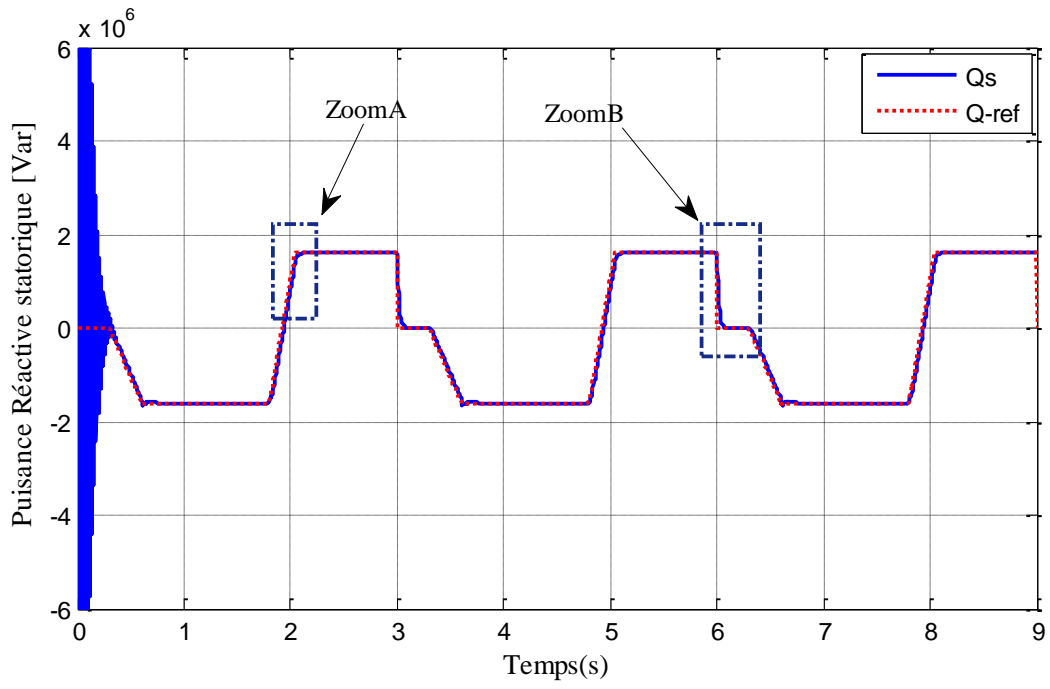


Figure III.12 Puissance réactive statorique de la MADA par la commande vectorielle

La deuxième test, consiste à contrôler l'ensemble du système. Afin d'examiner la commande à vitesse variable, on a soumis à la turbine une vitesse du vent variable et aléatoire, les résultats de la simulation sont basés sur le profil de vitesse du vent de la Figure III.13. Dans ce cas, la puissance du MADA suit la référence de puissance calculée à partir de la vitesse du vent sous le contrôle de MPPT.

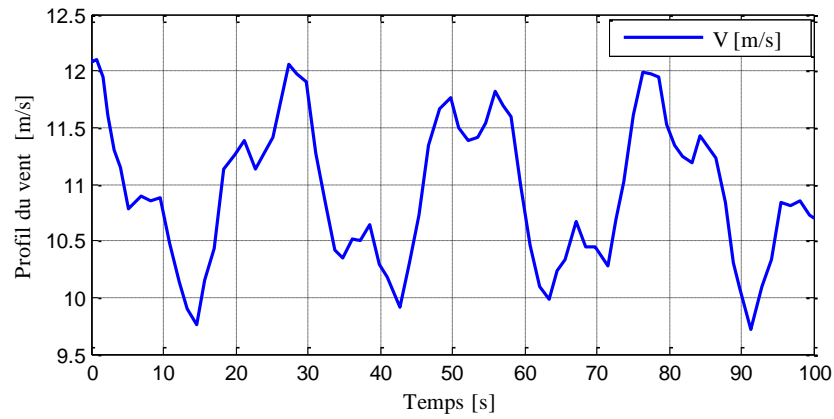


Figure III.13 Profil du vent appliqué

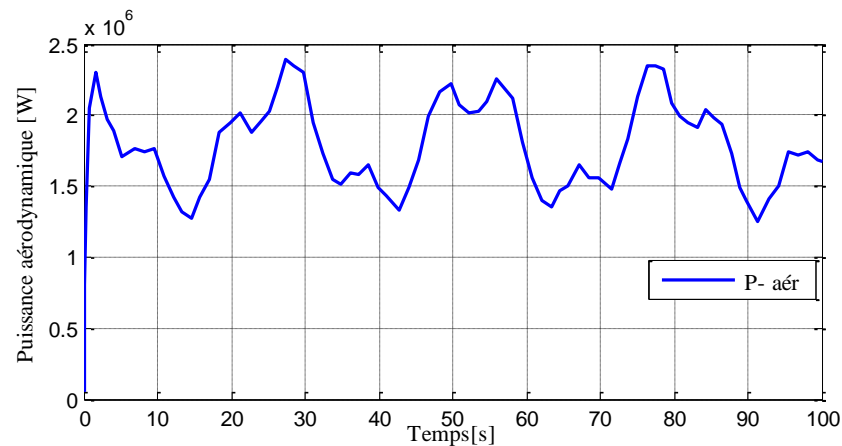


Figure III.14 La puissance de la turbine (aérodynamique)

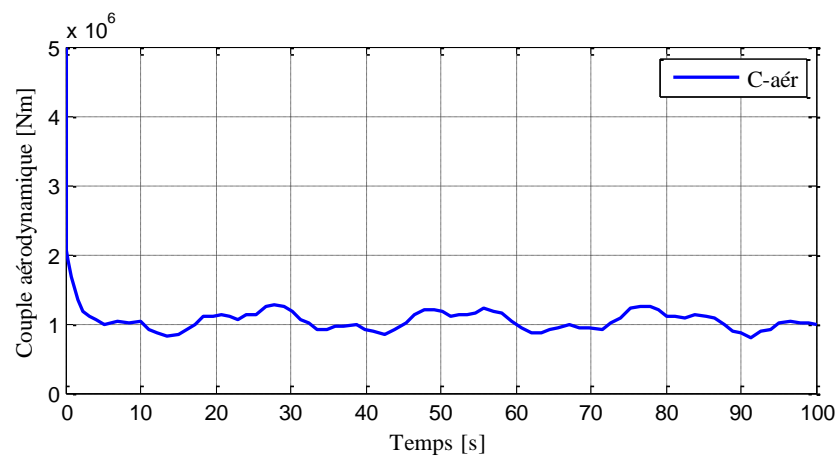


Figure III.15 Le couple aérodynamique

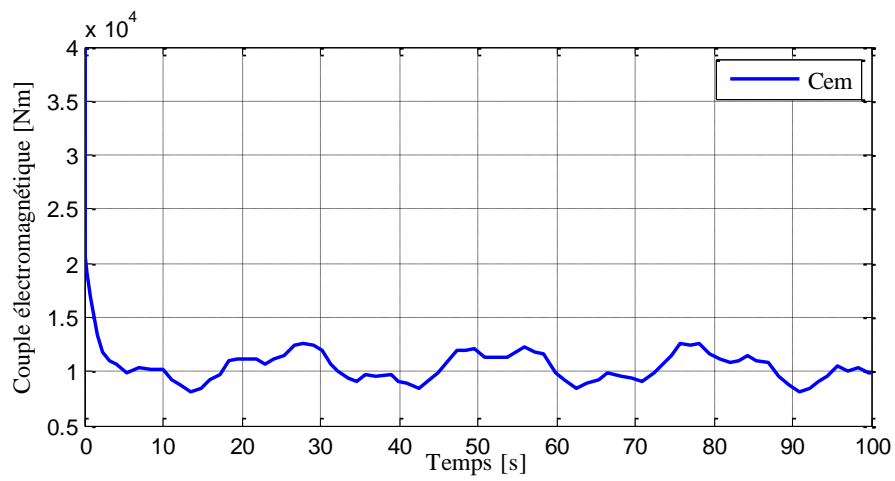


Figure III.16 couple électromagnétique

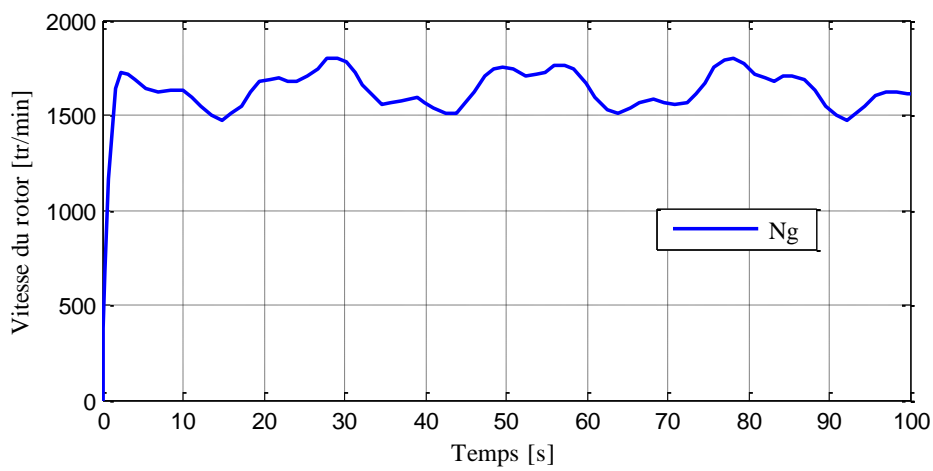


Figure III.17 La vitesse du rotor (mécanique)

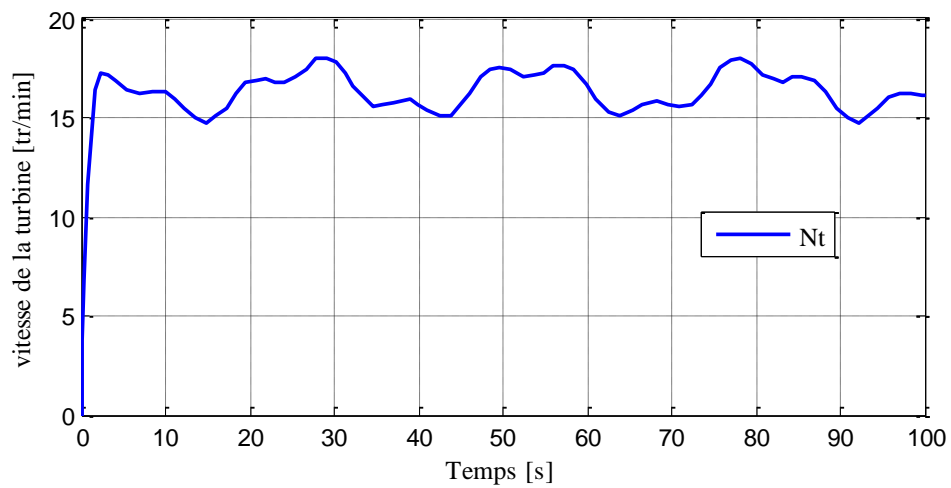


Figure III.18 la vitesse de la turbine

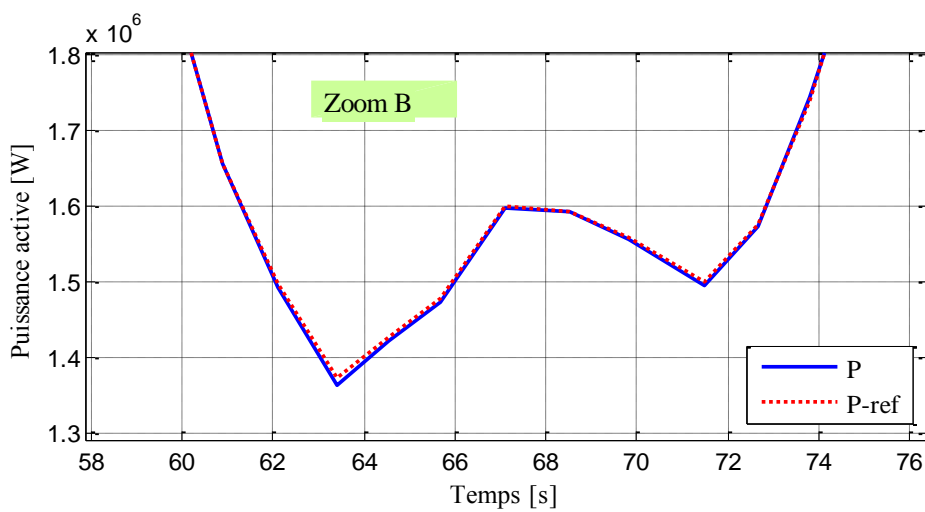
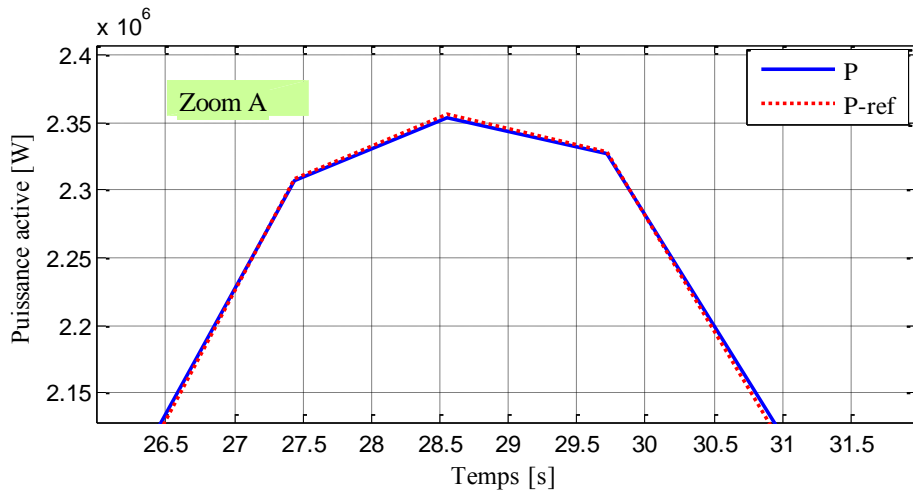
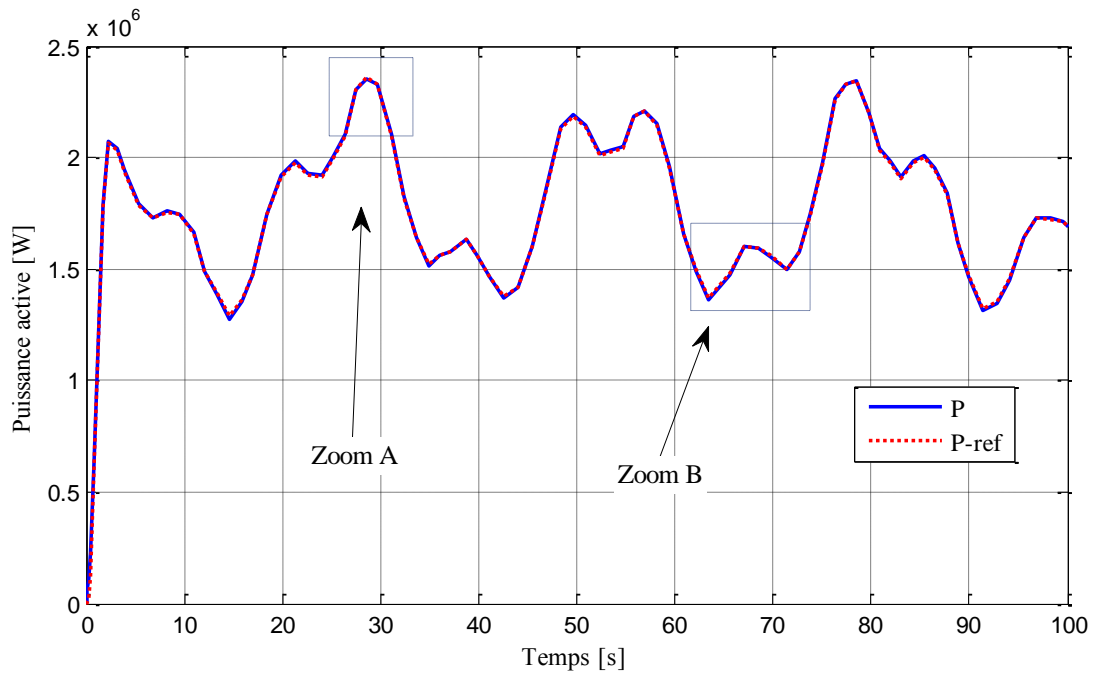


Figure III.19 Evolution de la puissance active du turbine obtenue par PI, avec zoom

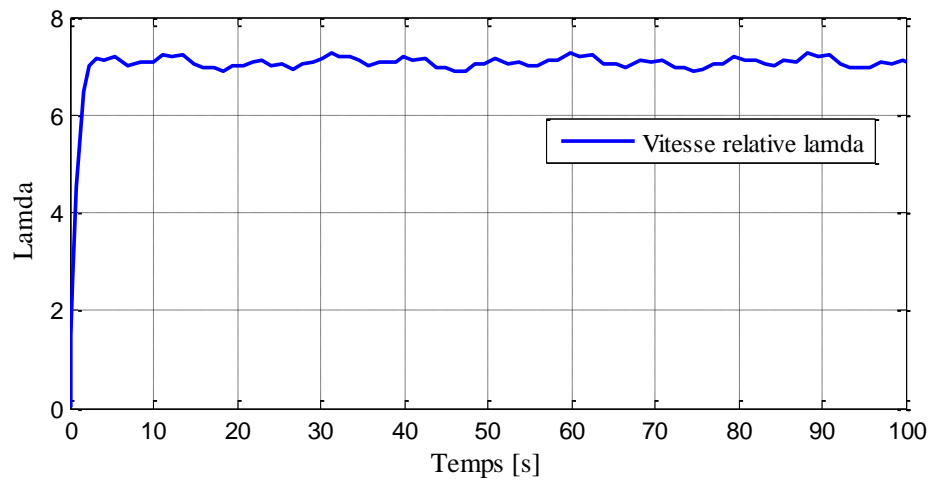


Figure III.20 Vitesse relative de l'éolienne

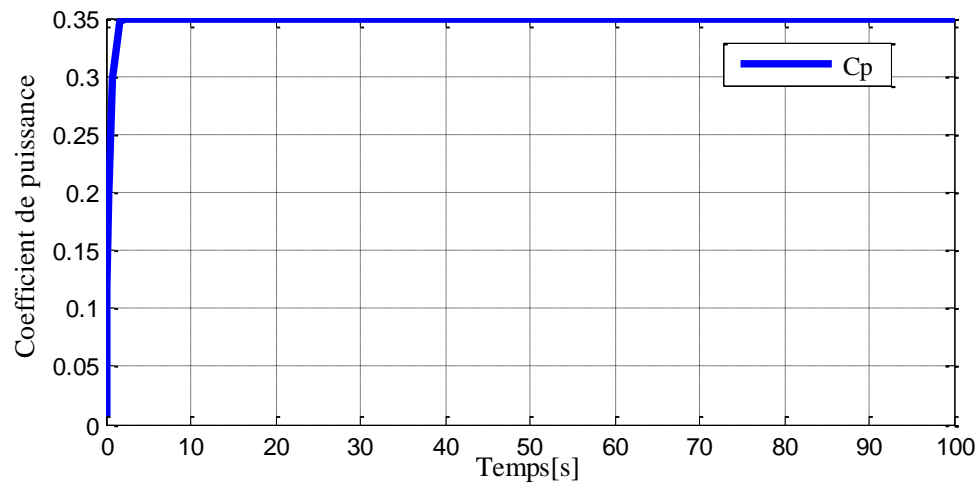


Figure III.21 coefficient de puissance de la turbine éolienne

III.7 Test robustesse

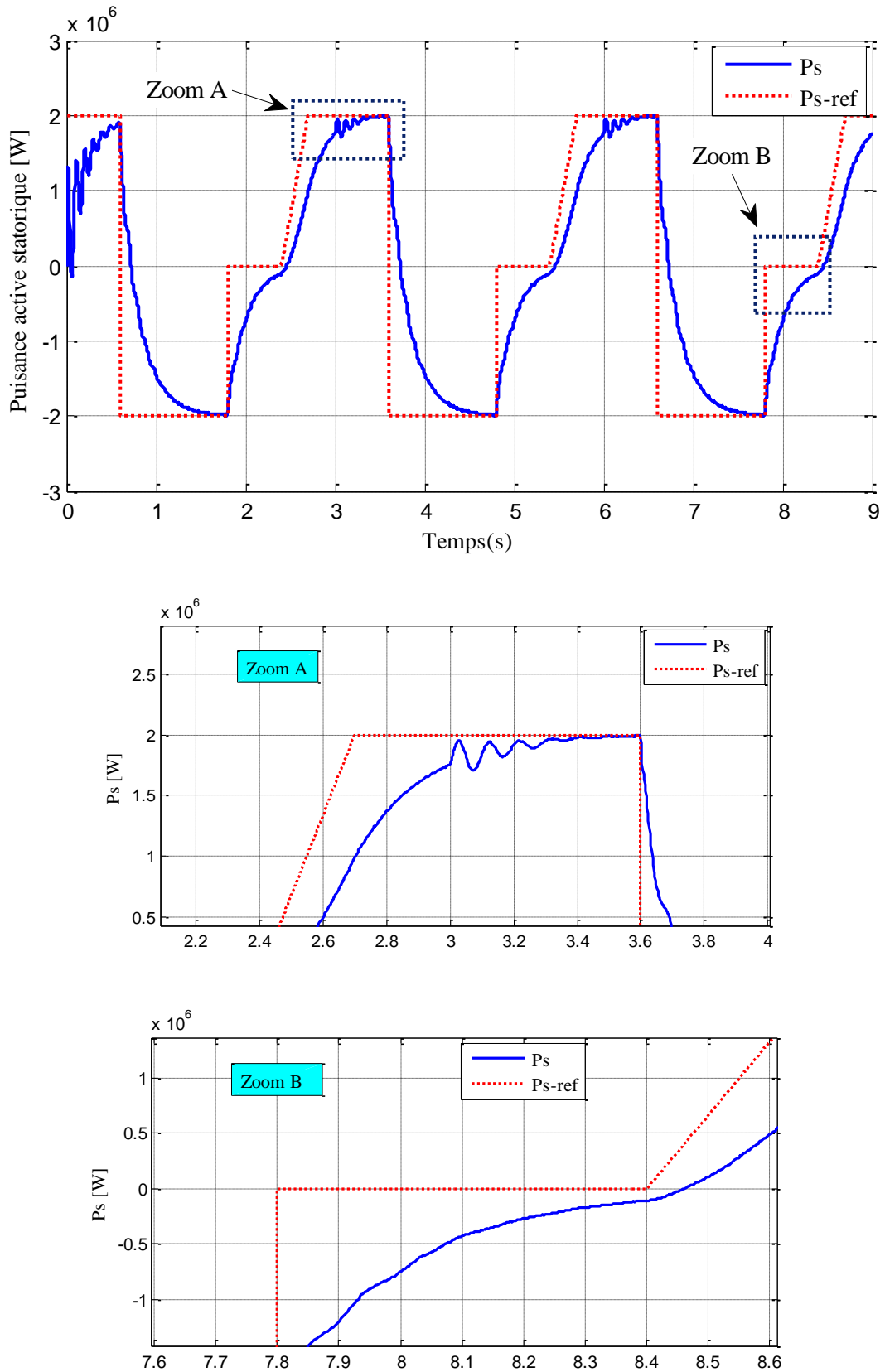


Figure III.22 La puissance active statorique avec une variation de la résistance et l'inductance rotorique de +30% de sa valeur nominale

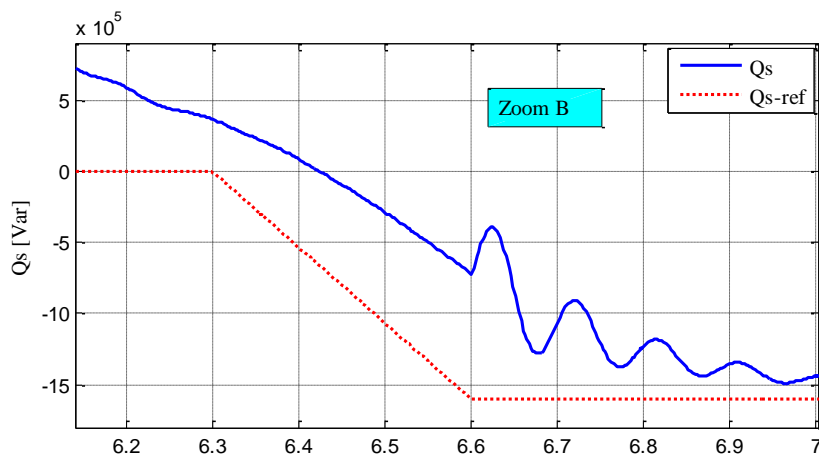
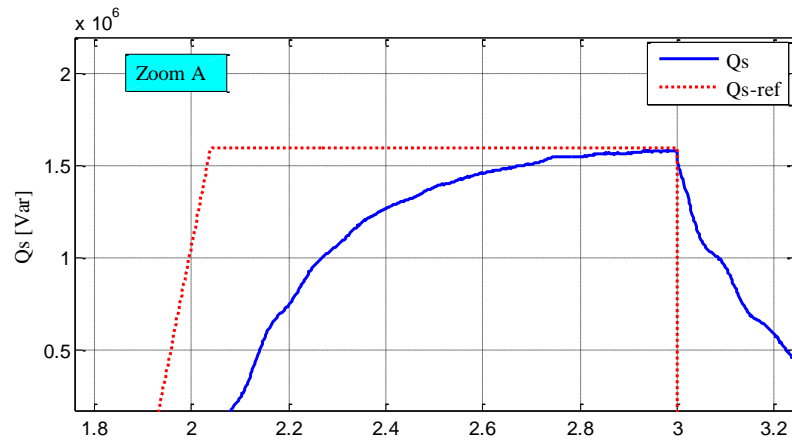
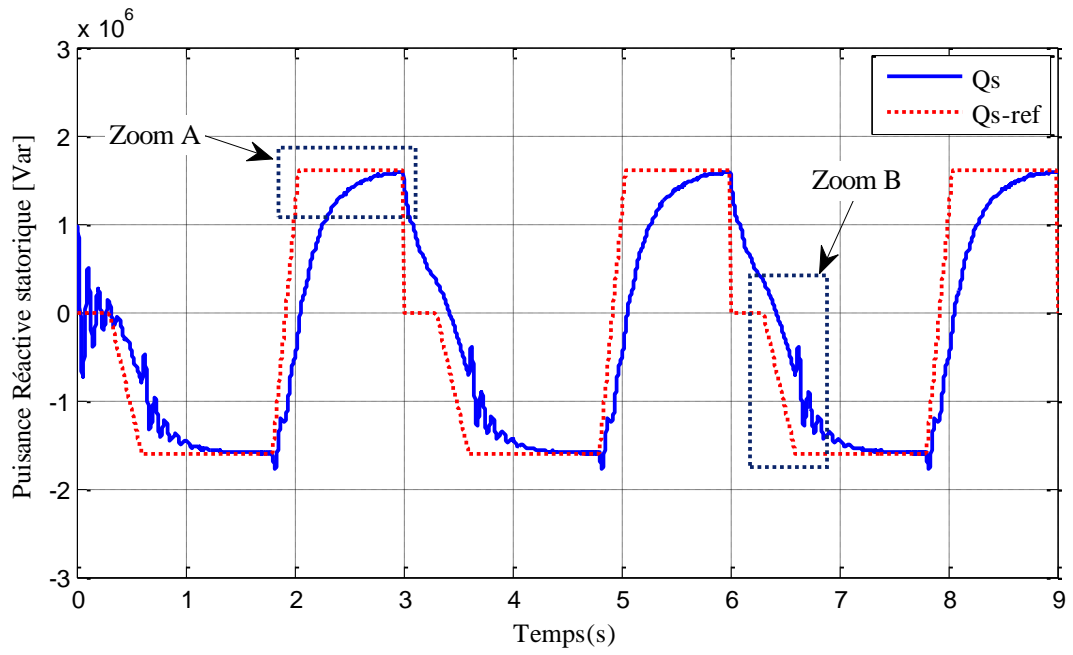


Figure III.23 La Puissance réactive statorique avec une variation de résistance et l'inductance rotorique de +30% de sa valeur nominale

III.8 Interprétation des résultats

On peut remarquer que les échelons de la puissance active et réactive statorique sont bien suivis, rapidement et sans dépassement par la génératrice. On observe un bon découplage entre les deux axes de commande d et q avec des faibles oscillations, tel que la composante en quadrature, contrôle la puissance active statorique; et la composante directe, contrôle la puissance réactive échangées entre le stator et le réseau.(figure III.11,et figure III.12).

La deuxième simulation a été effectuée en utilisant le profil du vent montré sur la figure (III.12). À tout instant, la vitesse mécanique du générateur, passant par les deux modes de fonctionnement hypo-synchrone et hyper-synchrone, suit sa référence correctement, de plus, la puissance mécanique produite par la turbine est maximale. La vitesse relative (λ) et le coefficient de puissance (C_p) maintiennent leurs valeurs optimales. Donc, le générateur est parfaitement commandé à sa vitesse de référence optimale permettant d'extraire le maximum de puissance. Il est déjà mentionné que les pertes mécaniques dans le multiplicateur sont négligées, donc la puissance mécanique du générateur est égale à la puissance mécanique produite par la turbine. D'après ces résultats, on peut conclure que la stratégie de commande MPPT, qui présente de très bonnes performances, permet effectivement d'extraire le maximum de puissance du vent par rapport aux variations de la vitesse de celui-ci dans le temps.

/*Cependant, le point faible de la commande vectorielle réside dans sa faible robustesse vis-à-vis à des variations paramétriques.

III.9 Conclusion

Dans ce chapitre, deux stratégies de commande du système de conversion éolien ont été appliquées avec succès; La stratégie de commande MPPT qui permet d'extraire le maximum de puissance du vent, et la commande découplée des puissances active et réactive. Afin de valider la commande globale du système éolien, nous avons effectué des simulations pour les deux mode de fonctionnements hyposynchrone et hypersynchrone. Les résultats obtenus ont montré que les puissances actives et réactives du système éolien pouvaient être contrôlées de façon indépendante tout en garantissant une puissance active optimale fournie au réseau électrique quel que soit le mode de fonctionnement.

La commande vectorielle à flux orienté que nous avons développé nous permet non seulement de simplifier le modèle de la machine mais aussi de découpler le contrôle des puissances active et réactive. Cette commande présente une poursuite satisfaisante de la référence. Mais il faut signaler que le régulateur PI ne permet pas dans tous les cas de maîtriser les régimes transitoires, et en générale, les variations paramétriques de la machine.

Cependant, il existe des commandes modernes qui s'adaptent mieux avec ces exigences et qui sont moins sensibles et robustes. Notre prochain chapitre est consacré à l'une de ces commandes qui occupe une large place dans la littérature de la commande des systèmes : c'est la commande par mode glissant.

Chapitre IV

Commande Robuste du MADA par Mode Glissant

IV.1 Introduction

Les lois de commande classique utilisant les régulateurs PI donnent des bons résultats dans le cas des systèmes linéaires à paramètres constants. Mais ces lois de commande peuvent être insuffisantes pour des systèmes non linéaires car elles ne sont pas robustes.

Les machines électriques présentent en plus des non linéarités (frictions, hystérésis) et des perturbations paramétriques, on doit faire appel à des lois de commande insensibles aux variations de paramètres, aux perturbations et aux non linéarités [65-66].

Les lois de la commande dite à structure variable constituent une bonne solution à ces problèmes liés à la commande classique. Le mode de glissement est un mode de fonctionnements particulier des systèmes de réglage à structure variable [67].

La théorie de ces systèmes a été étudiée et développée en union soviétique, tout d'abord par le professeur Emelyanov, en suite, les travaux ont été repris aux Etatsunis par Soltine, et au Japon par Young, Harashima et Hashimoto [68-70]. La commande par mode glissant a connu un grand succès ces dernières années, elle est considérée l'une des approches les plus simples pour la commande des systèmes non linéaires et les systèmes ayant un modèle imprécis [71]. Cela est dû à la simplicité de sa mise en oeuvre et la robustesse par rapport aux incertitudes du système et des perturbations externes entachant le processus. L'idée de base de la commande par mode glissant est d'attirer les états du système dans une région convenablement sélectionnée, puis de concevoir une loi de commande qui maintiendra toujours le système dans cette région [72].

Une étude théorique sur la commande par mode de glissement est présenté dans ce chapitre, nous montrons aussi comment la commande par mode glissant peut être appliquée au contrôle de la puissance active et la puissance réactive produite par la génératrice asynchrone à double alimentation dans un système de conversion d'énergie éolienne.

Nous allons enfin montrer les avantages apportés par ce type de réglage par rapport à ceux obtenus par les régulateurs classiques PI, après illustration et visualisation des résultats de simulation.

Des résultats de simulation sont présentés pour mettre en évidence les performances des techniques proposées.

IV.2 Principe de la commande par mode de glissement des systèmes à structure variable

La commande par mode glissant 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 d'état. Les objectifs principaux de cette technique de commande sont [73] :

- Synthétiser une surface de glissement de telle manière à ce que toutes les trajectoires d'état du système obéissent à un comportement désiré en terme de poursuite, de régulation et de stabilité.
- Déterminer une loi de commande ou de commutation, qui est capable d'attirer toutes les trajectoires d'état vers la surface de glissement et les maintenir sur cette surface.
- Réduire le phénomène de chattering (broutement), dû à la discrétisation des fonctions de commutation.

Parmi les propriétés des modes glissants [74]:

- Le processus de glissement est d'ordre réduit en comparaison au système original.
- La dynamique du système en mode glissant est déterminée uniquement par le choix des coefficients de la surface de glissement.
- La théorie des modes glissants s'adapte bien pour les systèmes dont la commande est discontinue.

La trajectoire dans le plan de phase est constituée de trois parties distinctes :

- **Le mode de convergence (MC)** : durant lequel la variable à réguler se déplace à partir de n'importe quel point du plan de phase vers la surface de commutation $S(x)=0$ et l'atteint dans un temps fini. Ce mode est caractérisé par la loi de commande et le critère de convergence.
- **Le mode de glissement (MG)** : durant lequel la variable d'état a atteint la surface glissante et tend vers l'origine du plan de phase. La dynamique dans ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement $S(x)=0$.
- **Le mode de régime permanent (MRP)** : il est ajouté pour l'étude de la réponse du système autour de son point d'équilibre. Il caractérise la qualité et la performance de la commande et il est utilisé spécialement pour l'étude des systèmes non linéaires.

IV.3 Théorie de la commande par mode de glissement

La théorie des systèmes à structure variable est une technique de commande non linéaire, elle est caractérisée par la discontinuité de la commande aux passages par une surface de commutation appelée surface de glissement. La technique des modes glissants consiste à amener la trajectoire d'état d'un système vers la surface de glissement et de la faire commuter à l'aide d'une commutation appropriée autour de celle-ci jusqu'au point d'équilibre. D'où le phénomène de glissement. En résumé, une commande par régime glissant est divisée en deux parties :

- Détermination d'une région d'espace d'état telle qu'une fois que le système se trouve dans cette région, il ait le comportement désiré.
- Définition d'une loi de commande qui conduit le système jusqu'à cette région de l'espace d'état.

IV.4 Généralités sur la théorie du contrôle par mode glissant

Etant un cas particulier de la commande à structure variable, la commande par modes glissants (CMG) a été largement utilisée dans la littérature. On peut trouver trois configurations de base pour la synthèse des différentes commandes [50]. La première correspond à la structure la plus simple où la commutation est au niveau de l'organe de commande lui-même, on l'appellera, structure par commutation au niveau de l'organe de commande. La deuxième structure fait intervenir la commutation au niveau d'une contre-réaction d'état. La dernière est une structure de régulation par commutation au niveau de l'organe de commande avec ajout de la commande équivalente [75]. Cette dernière structure est retenue pour la suite de notre étude.

Un système à structure variable (VSS) est un système dont la structure change pendant son fonctionnement. Il est caractérisé par le choix d'une structure et d'une logique de commutation. Ce choix permet au système de commuter d'une structure à une autre à tout instant. De plus, un tel système peut avoir de nouvelles propriétés qui n'existent pas dans chaque structure.

IV.4.1 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 interrupteurs de puissance associés dans une grande majorité d'application aux variateurs de vitesse. Elle a été utilisée pour la commande de moteurs pas à pas. Le schéma d'une structure par commutation au niveau de l'organe de commande est donné sur la figure IV.1.

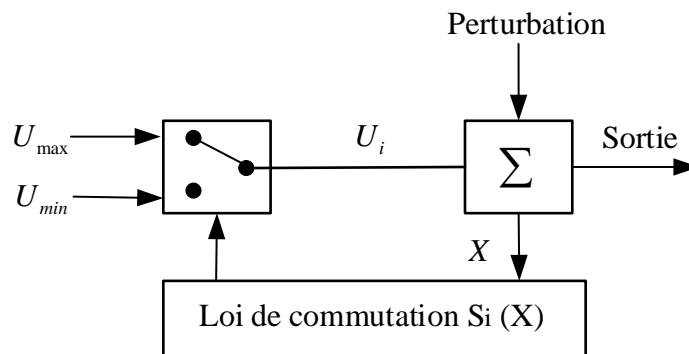


Figure IV.1 Structure de régulation par commutation au niveau de l'organe de commande

IV.4.2 Structure par commutation au niveau d'une contre réaction d'état

Nous pourrions consulter le schéma d'une telle structure sur la figure IV.2. D'après les études menées précédemment, c'est la structure la moins exigeante au niveau de la sollicitation de la commande. Elle a été mise en œuvre dans la commande des moteurs à courant continu et à aimants permanents, ainsi que dans la commande des machines à induction. 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. La non linéarité provient de la commutation entre les gains donc on crée une commutation au niveau de la dynamique du système.

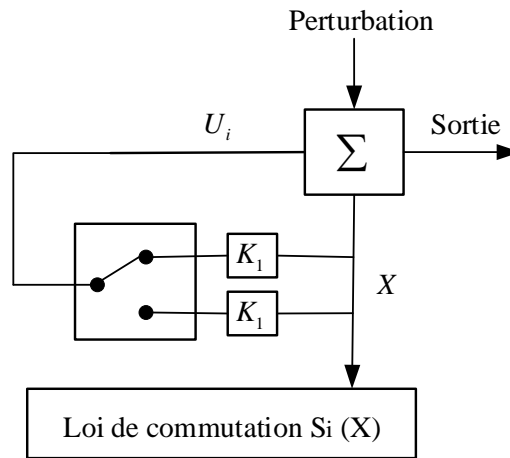


Figure IV.2 Structure de régulation par commutation au niveau de la contre-réaction d'état

IV.4.3 Structure par commutation au niveau de l'organe de commande, avec ajout de la commande équivalente

Une telle structure dont le principe est montrée sur la figure IV.3, présente un réel avantage. Elle permet de prépositionner l'état futur du système grâce à la commande équivalente qui n'est rien d'autre que la valeur désirée du système en régime permanent. L'organe de commande est beaucoup moins sollicité, mais on est plus dépendant des variations paramétriques du fait de l'expression de cette commande équivalente.

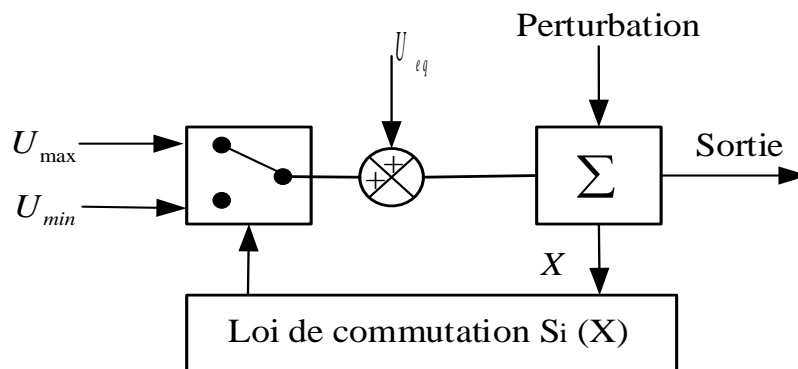


Figure IV.3 Structure de régulation par ajout de la commande équivalente

Avec :

X : vecteur de variables ;

S_i : vecteur surface de commutation ;

U_{eq} : vecteur de commande équivalente ;

ΔU : vecteur de commande discontinue ;

IV.5 Conception de l'algorithme de commande par le mode glissant

La conception de l'algorithme de commande par mode de glissement prend en compte la stabilité et de bonnes performances de façon systématique dans son approche, Une commande par régime glissant est divisée en trois parties [71] :

- Choix des surfaces de glissement;
- Définition des conditions d'existence et de convergence du régime glissant;
- Détermination de la loi de commande.

La conception du système de commande sera démontrée pour un système non linéaire suivant[76]:

$$\dot{X}(P) = f(X, t) + g(X, t) \cdot u(X, t) \quad (\text{IV.1})$$

Avec:

$X \in R^n$ est le vecteur d'état, $u \in R^m$ est le vecteur de commande, $f(X, t) \in R^n$, $g(X, t) \in R^{n \times m}$

IV.5.1 Choix des surfaces de glissement

Une forme d'équation générale pour déterminer la surface de glissement est proposé par J. J. Slotine, qui assure la convergence d'une variable vers sa valeur désirée [77-79]:

$$S(x) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} e \quad (\text{IV.2})$$

Où :

λ : Gain positif [80].

$e(x) = x_d - x$: Écart de la variable à réguler.

x_d : Valeur désirée.

n : Ordre du système, c'est le plus petit entier positif représentant le nombre de fois qu'il faut dériver afin de faire apparaître la commande.

$S(x)$: Est une équation différentielle linéaire autonome dont la réponse "e" tend vers zéro pour un choix correct du gain λ et c'est l'objectif de la commande [80].

IV.5.2 Conditions d'existence et de convergence du régime glissant

Les conditions d'existence et de convergence sont les critères qui permettent aux différentes dynamiques du système de converger vers la surface de glissement et d'y rester indépendamment de la perturbation [71]. On présente deux types de conditions qui sont :

IV.5.2.1 Approche directe

Cette approche est la plus ancienne, elle est proposée et étudiée par Emilyanov et Utkin. Elle est donnée sous la forme :

$$S(x)\dot{S}(x) < 0 \quad (\text{IV.3})$$

IV.5.2.2 La fonction de Lyapunov

Il s'agit de formuler une fonction scalaire positive $V(x) > 0$ pour les variables d'état du système, et de choisir la loi de commutation qui fera décroître cette fonction $\dot{V}(x) < 0$, l'idée est de choisir une fonction scalaire $S(x)$ pour garantir l'attraction de la variable à contrôler vers sa valeur de référence et de concevoir une commande V tel que le carré de la surface correspond à une fonction de Lyapunov. Cette fonction est généralement utilisée pour garantir la stabilité des systèmes non linéaires. En définissant la fonction de Lyapunov par [63] :

$$V(x) = \frac{1}{2}S^2(x) \quad (\text{IV.4})$$

Et sa dérivée par :

$$\dot{V}(x) = S(x).\dot{S}(x) \quad (\text{IV.5})$$

Pour que la fonction de Lyapunov décroisse, il suffit d'assurer que sa dérivée est négative, ceci est vérifié si : $S(x).\dot{S}(x) < 0$ (condition de convergence)

Cette équation montre que le carré de la distance vers la surface diminue tout le temps, contraignant la trajectoire du système à se diriger vers la surface dans les deux côtés. Cette condition suppose un régime glissant idéal où la fréquence de commutation est infinie.

Cette approche est utilisée pour estimer les performances de la commande, l'étude de la robustesse et de la stabilité des systèmes non linéaires

IV.5.3 Détermination de la loi de commande

On a déterminé la loi de commande nécessaire pour attirer et maintenir la trajectoire d'état vers la surface et ensuite vers son point d'équilibre toute en garantissant les conditions d'existence du mode de glissement.

La structure d'un contrôleur en mode glissant comporte deux parties : La première concerne la linéarisation exacte (U_{eq}) et la deuxième est stabilisante (U_n), cette dernière est très importante, elle permet d'éliminer les effets d'imprécisions du modèle et de rejeter les perturbations extérieures [81].

$$U = U_{eq} + U_n \quad (IV.6)$$

U_{eq} correspond à la commande proposée par Filipov. Elle sert à maintenir la variable à contrôler sur la surface de glissement $S(x) = 0$. La commande équivalente est déduite, en considérant que la dérivée de la surface est nulle $\dot{S}(x) = 0$ [82]. Elle peut être interprétée comme étant un retour d'état particulier jouant le rôle d'un signal de commande appliqué sur le système à commander. Elle peut être aussi interprétée autrement comme étant une valeur moyenne que prend la commande lors de la commutation rapide entre les valeurs U_{max} et U_{min} , comme présentée la figure IV.5 .

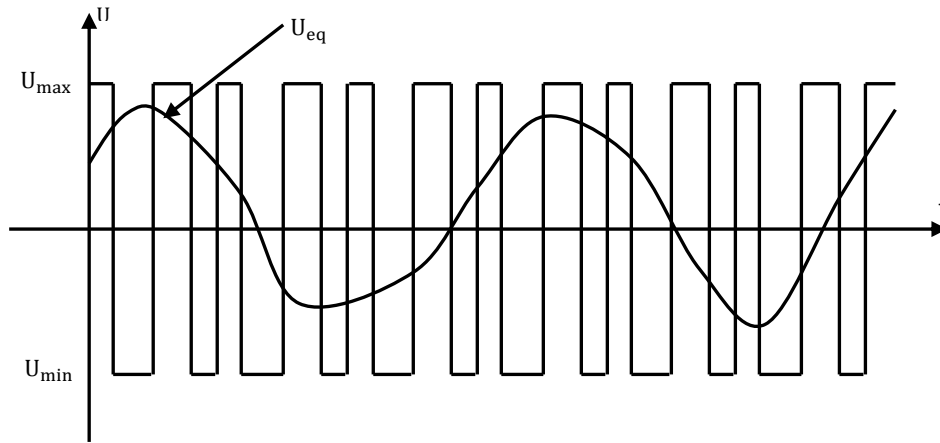


Figure IV.5 Interprétation de U_{eq} .

La commande discrète U_n est déterminée pour vérifier la condition de convergence en dépit de l'imprécision sur les paramètres du modèle du système [71].

Afin de mettre en évidence le développement précédent, on considère le système d'état (l'équation IV.1). On cherche à déterminer l'expression analogique de la commande U .

La dérivée de la surface $S(x)$ est :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial t} \quad (IV.7)$$

En remplaçant les expressions (IV.1) et (IV.6) dans l'expression (IV.7), on trouve :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x} (f(x,t) + B(x,t)U_{eq}(x,t)) + \frac{\partial S}{\partial x} \cdot B(x,t)U_n \quad (IV.8)$$

Durant le mode de glissement et le régime permanent, la surface est nulle, et par conséquent, sa dérivée et la partie discontinue sont aussi nulles. D'où nous déduisons l'expression de la commande équivalente :

$$U_{eq} = -\frac{\partial S}{\partial x} \cdot f(x,t) \cdot \left(\frac{\partial S}{\partial x} \cdot B(x,t) \right)^{-1} \quad (IV.9)$$

Pour que la commande équivalente puisse prendre une valeur finie, il faut que :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x} \cdot B(x, t) \neq 0 \quad (\text{IV.10})$$

Durant le mode de convergence ; en remplaçant la commande équivalente par son expression (IV.9) dans l'expression (IV.8), nous trouvons la nouvelle expression de la dérivée de la surface:

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x} \cdot B(x, t) U_n \quad (\text{IV.11})$$

Et la condition d'attractivité $S(x) \cdot \dot{S}(x) < 0$ devient [77] :

$$S(x) \frac{\partial S}{\partial x} \cdot B(x, t) U_n < 0 \quad (\text{IV.12})$$

Afin de satisfaire cette condition, le signe de U_n doit être opposé à celui de $S(x) \cdot \frac{\partial S}{\partial x} \cdot B(x, t)$ [83].

Généralement la forme la plus simple que peut prendre la commande discrète est celle d'une fonction sign, La commande est donnée par l'expression suivante [35] :

$$U_n = k \cdot \text{sign}(S(x, t)) \quad (\text{IV.13})$$

Où :

k : est un gain.

Le signe de k doit être différent de celui de $\frac{\partial S}{\partial x} \cdot B(x, t)$.

L'expression de la fonction signe est donnée par [84] [85] :

$$\text{sign}(S(x)) = \begin{cases} 1, & \text{si } S(x) > 0 \\ 0, & \text{si } S(x) = 0 \\ -1, & \text{si } S(x) < 0 \end{cases} \quad (\text{IV.14})$$

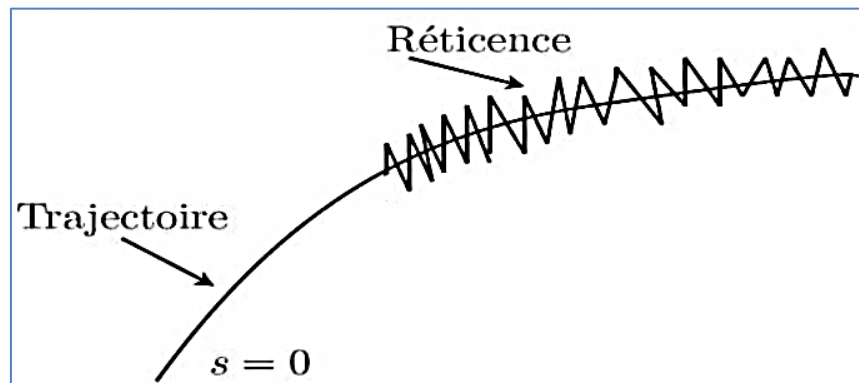


Figure IV.7 La trajectoire dans le plan de phase [79]

IV.6 Minimisation du phénomène du broutement (chattering)

Le phénomène de chattering ou broutement est un sérieux obstacle pour les applications de commande par mode de glissement, car les oscillations dues à ce phénomène peuvent nuire le fonctionnement du circuit de puissance. Ainsi qu'il a plusieurs effets indésirables sur le comportement du système à savoir:

- La création de dynamiques non modélisées ;
- La diminution de la précision de la commande ;
- L'augmentation des pertes d'énergie ;
- L'augmentation de la fatigue des parties mécaniques mobiles ;

Plusieurs techniques ont été dirigés de sorte à éliminer ou du moins réduire ses effets. Parmi ces techniques on présente:

IV.6.1 Proposition de slotine

L'une des solutions envisagées consiste à introduire une ou plusieurs bande d'arrêt autour de la surface de commutation. Pour ce faire, il suffit de substituer une fonction de saturation (sat) caractérisée par un ou deux seuils (atténuation des amplitudes des ondulations).

- Fonction de saturation à une seuil:

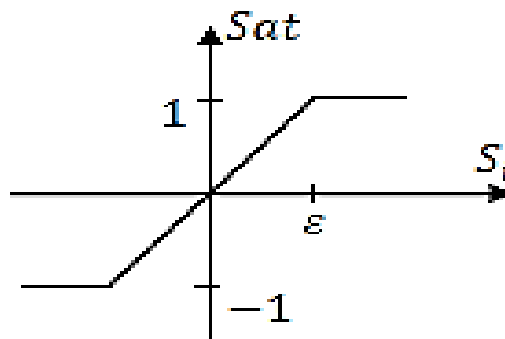


Figure IV.8 fonction de saturation sat -un seuil- (Commande adoucie) [80]

La commande dans ce cas devient $\Delta U = -K_x \text{sat}S(x)$, et la fonction est définie comme suit :

$$\text{Sat}(S(x)) = \begin{cases} 1, & \text{si } S(x) > \varepsilon \\ -1, & \text{si } S(x) < -\varepsilon \\ \frac{S(x)}{\varepsilon}, & \text{si } |S(x)| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (\text{IV.15})$$

- Fonction de saturation à deux seuils:

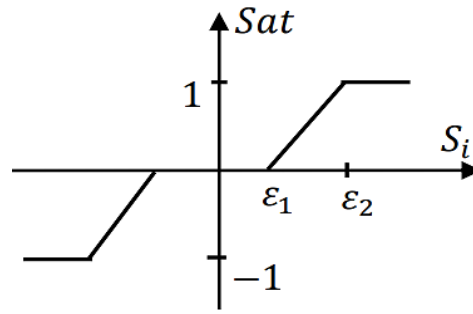


Figure IV.9 Fonction de saturation sat - deux seuils- (zone morte).

La commande dans ce cas devient $\Delta U = -K_x satS(x)$, et la fonction est définie comme suit :

$$sat(s) = \begin{cases} 0 & si \quad |S(x)| < \varepsilon_1 \\ \frac{S(x) - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} & si \quad \varepsilon_1 < |S(x)| < \varepsilon_2. \\ sign(S(x)) & si \quad |S(x)| > \varepsilon_2 \end{cases} \quad (IV.16)$$

IV.6.2 Proposition de harshima

Dans cette proposition, la fonction sign est remplacée par une fonction de lissage appelée « cont », La figue IV.10 représente la fonction de la commande désiré .

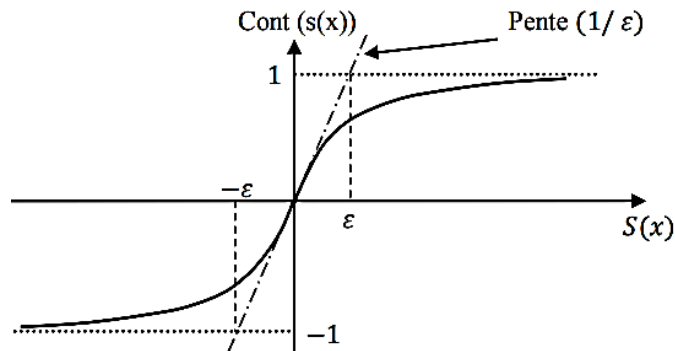


Figure IV.10 Commande intégrale (Fonction Cont).

La commande dans ce cas devient $\Delta U = -K_x contS(x)$ et la fonction est définie comme suit :

$$cont(s) = \begin{cases} \frac{S(x)}{|S(x)| + \varepsilon} & si \quad |S(x)| \leq \varepsilon \\ sign(S(x)) & si \quad |S(x)| > \varepsilon \end{cases} \quad (IV.17)$$

IV.7 Application de la commande par le mode glissant au contrôle des puissances active et réactive du MADA

Après avoir présenté la théorie de la commande par mode de glissement avec les différentes structures de la commande non linéaire, nous allons analyser dans cette partie l'application de la commande par mode de glissement au générateur asynchrone à double alimentation afin de valider les objectifs :

- Assurer la rapidité et la précision de la réponse des grandeurs régulées .
- Assurer la robustesse du système vis-à-vis des perturbations et des variations des paramètres.
- Limiter les amplitudes des tensions et des courants lors des régimes transitoires.

Alors, à partir du troisième chapitre (partie de la commande vectorielle), on tire le système d'équations suivant [85]:

$$\begin{cases} P_s = -\frac{V_s M}{L_s} I_{rq} \\ \varphi_s = -\frac{V_s M}{L_s} I_{rd} + \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} \end{cases} \quad (IV.18)$$

$$\begin{cases} I_{rq} = -\frac{L_s}{V_s M} P_s \\ I_{rd} = -\frac{L_s}{V_s M} \varphi_s - \frac{V_s}{M \omega_s} \end{cases} \quad (IV.19)$$

Les équations des dérivées de courants rotoriques deviennent :

$$\begin{cases} \dot{I}_{rd} = -\frac{R_r}{\sigma L_r} I_{rd} + g \omega_s I_{rq} + \frac{V_{rd}}{\sigma L_r} \\ \dot{I}_{rq} = -\frac{1}{\sigma} \left(\frac{R_r}{L_r} + \frac{M^2 R_s}{L_s^2 L_r} \right) I_{rq} - g \omega_s I_{rd} + \frac{V_{rq}}{\sigma L_r} \end{cases} \quad (IV.20)$$

IV.7.1 Contrôle de la Puissance Active Statorique

L'erreur de la puissance active statorique est définie par :

$$e = P_{s-ref} - P_s \quad (IV.21)$$

Pour $n = 1$, la surface de la puissance active statorique peut être définie à partir de l'équation (IV.2) comme suit :

$$S(P_s) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{1-1} e \quad \Rightarrow \quad S(P_s) = P_{s-ref} - P_s \quad (IV.22)$$

Sa dérivée devient :

$$\dot{S}(P_s) = \left(\dot{P}_{s-ref} - \dot{P}_s \right) \quad (IV.23)$$

En substituant l'expression de P_s de l'équation (IV.18) dans l'équation (IV.23), on trouve :

$$\dot{S}(P_s) = \left(\dot{P}_{s-ref} + \frac{V_s M}{L_s} \dot{I}_{rq} \right) \quad (IV.24)$$

En substituant l'expression de I_{rq} de l'équation (IV.19) dans l'équation (IV.24), on trouve :

$$\dot{S}(P_s) = \left(\dot{P}_{s-ref} + \frac{V_s M}{L_s L_r \sigma} (V_{rq} - R_r I_{rq}) \right) \quad (IV.25)$$

On prend :

$$V_{rq} = V_{rq}^{eq} + V_{rq}^n \quad (IV.26)$$

$$\dot{S}(P_s) = \dot{P}_{s-ref} + \frac{V_s M}{L_s L_r \sigma} \left((V_{rq}^{eq} + V_{rq}^n) - R_r I_{rq} \right) \quad (IV.27)$$

Pendant le mode glissant et dans le régime permanent, on a $S(P_s) = 0$, $\dot{S}(P_s) = 0$, $V_{rq}^n = 0$

Donc, la commande équivalente est donnée par :

$$V_{rq}^{eq} = \dot{P}_{s-ref} \frac{L_s L_r \sigma}{V_s M} + R_r I_{rq} \quad (IV.28)$$

Par conséquent :

$$V_{rq}^n = K_{V_{rq}} \text{sat} \left(S(P_s) \right) \quad (IV.29)$$

$K_{V_{rq}}$: constante positive.

IV.7.2 Contrôle de la puissance réactive statorique

L'erreur de la puissance réactive statorique est définie par :

$$e = \varphi_{s-ref} - \varphi_s \quad (IV.30)$$

Pour $n=1$, la surface de la puissance réactive statorique peut être définie à partir de l'équation (IV.2) comme suit :

$$S(\varphi_s) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{1-1} e \quad \Rightarrow \quad S(\varphi_s) = \varphi_{s-ref} - \varphi_s \quad (IV.31)$$

Sa dérivée :

$$\dot{S}(\varphi_s) = \dot{\varphi}_{s-ref} - \dot{\varphi}_s \quad (IV.32)$$

En substituant l'expression de φ_s de l'équation (IV.18) dans l'équation (IV.32), on trouve :

$$\dot{S}(\varphi_s) = \dot{\varphi}_{s-ref} - \left(\frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{rd} \right) \quad (IV.33)$$

En substituant l'expression de I_{rd} de l'équation (IV.19) dans l'équation (IV.33), on trouve :

$$\dot{S}(\varphi_s) = \dot{\varphi}_{s-ref} + \frac{V_s M}{L_s L_r \sigma} (V_{rd} - R_r I_{rd}) \quad (IV.34)$$

On prend:

$$V_{rd} = V_{rd}^{eq} + V_{rd}^n \quad (IV.35)$$

$$\dot{S}(\varphi) = \left(\dot{\varphi}_{s-ref} + \frac{V_s M}{L_s L_r \sigma} \left((V_{rd}^{eq} + V_{rd}^n) - R_r I_{rd} \right) \right) \quad (IV.36)$$

Pendant le mode glissant et dans le régime permanent, on a : $s(\varphi_s) = 0$, $\dot{s}(\varphi_s) = 0$, $V_{rd}^n = 0$.

Donc la commande équivalente est donnée par:

$$V_{rd}^{eq} = -\dot{\varphi}_{s-ref} \frac{L_s L_r \sigma}{V_s M} + R_r I_{rd} \quad (IV.37)$$

Par conséquent :

$$V_{rd}^n = K_{V_{rd}} \text{sat} \left(S(\varphi_s) \right) \quad (IV.38)$$

$K_{V_{rd}}$: constante positive.

Les figures IV.11 et IV.12 présentent, respectivement, le schéma fonctionnel de la commande par mode glissant appliquée au MADA et son équivalent sous l'environnement Matlab/Simulink.

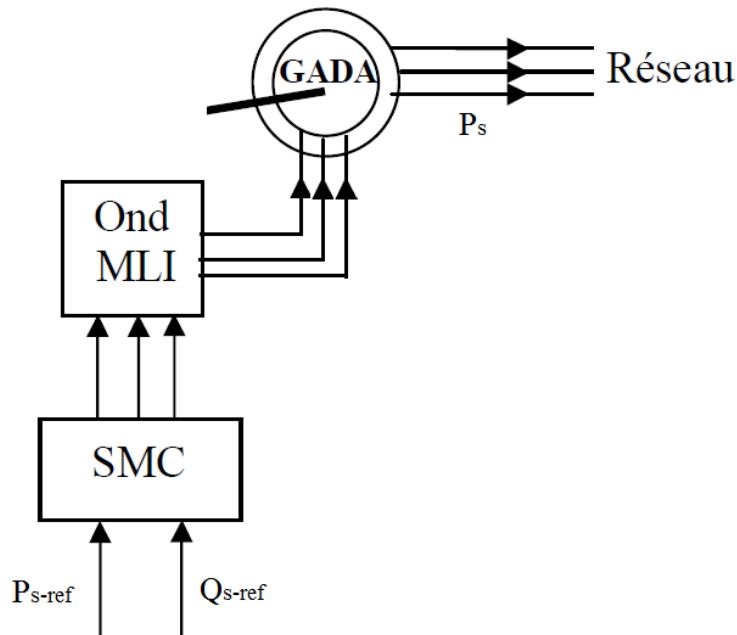


Figure IV.11 Schéma fonctionnel de la commande par mode glissant appliquée au MADA

IV.8 Résultats de simulation

Dans cette partie, deux types différentes de commande par mode glissant, pour contrôler indépendamment les puissances active et réactive générées par la MADA dans un système de production d'énergie éolienne ont été établies (Figure (IV.12)).

En premier lieu, nous avons présenté l'application de la commande par mode glissant en utilisant la fonction de la commande discrète de type relais. Généralement la forme la plus simple que peut prendre la commande discrète est celle d'une fonction sign. La figure IV.12.a, représente la fonction de la commande discrète de type relais.

En deuxième lieu, nous avons présenté l'approche au moyen de laquelle on peut réduire le phénomène de chattering, qui résulte de la loi de commande, on utilisant la fonction de lissage cont.

Pour examiner et visualiser le comportement de chaque type de commande, nous avons donc soumis ces commandes à des échelons des puissances, active et réactive, statoriques.

Ces commandes mettent en évidence le fait d'agir sur les tensions rotoriques afin d'obtenir des puissances générées aux bornes du stator de la MADA désirées.

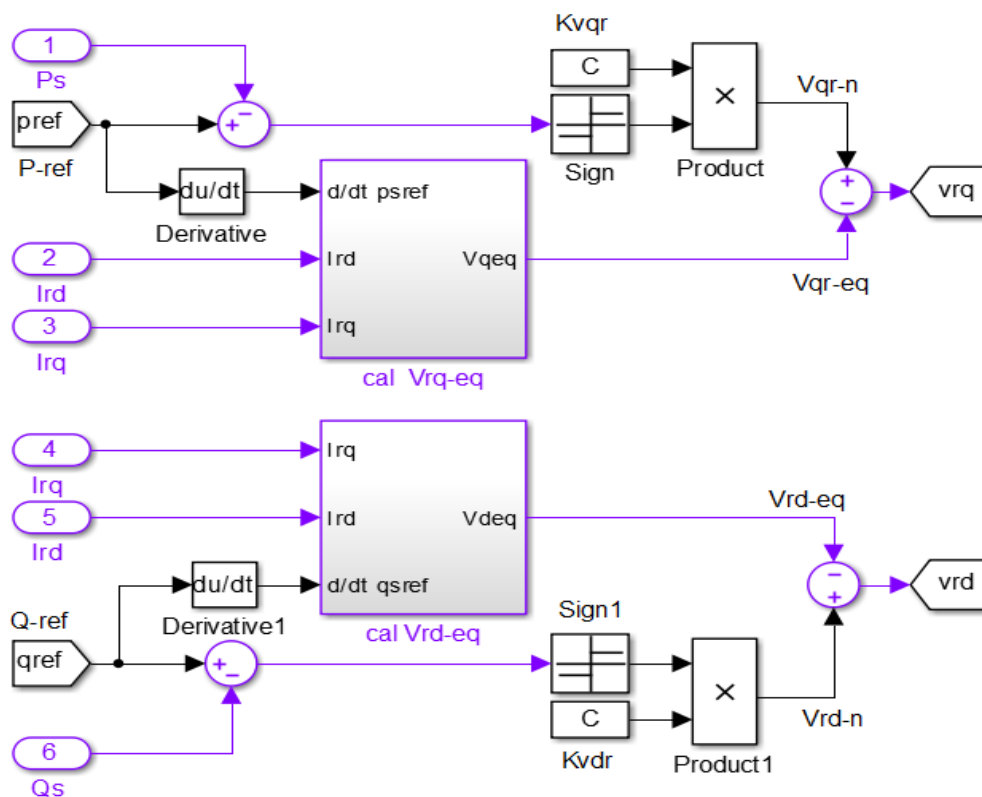


Figure IV.12.a Schéma fonctionnel de la commande par mode glissant utilisant la fonction sign, appliquée au MADA sous l'environnement Matlab/Simulink

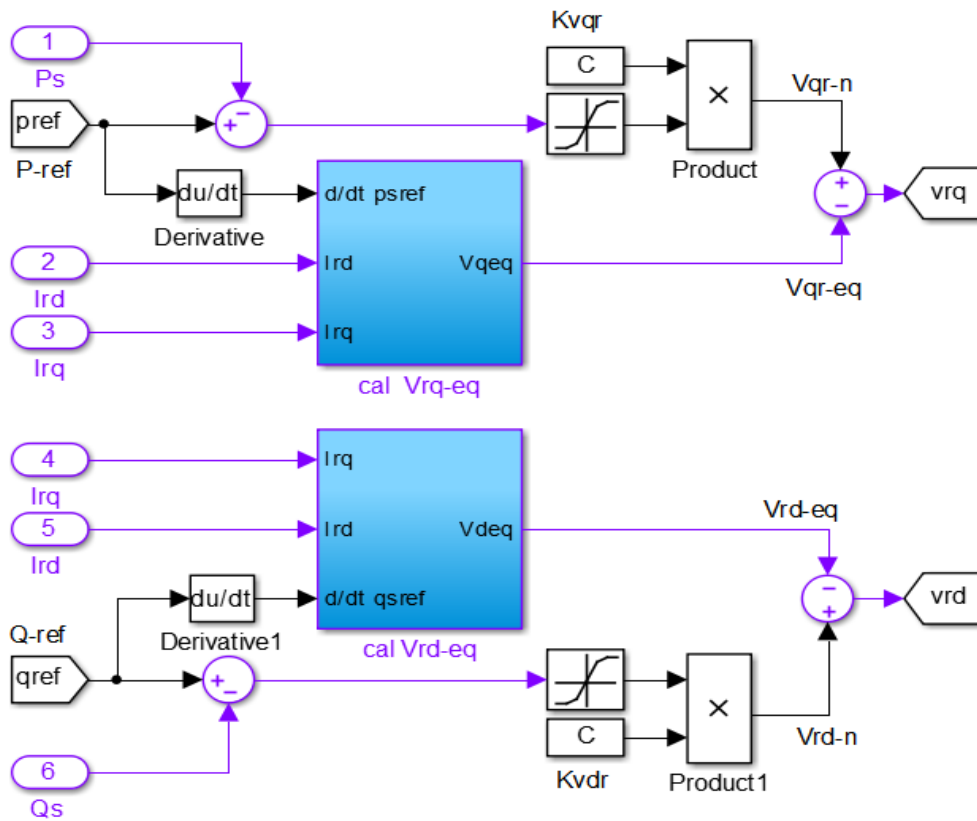


Figure IV.12.b Schéma fonctionnel de la commande par mode glissant utilisant la fonction de lissage cont appliquée au MADA sous l'environnement Matlab/Simulink

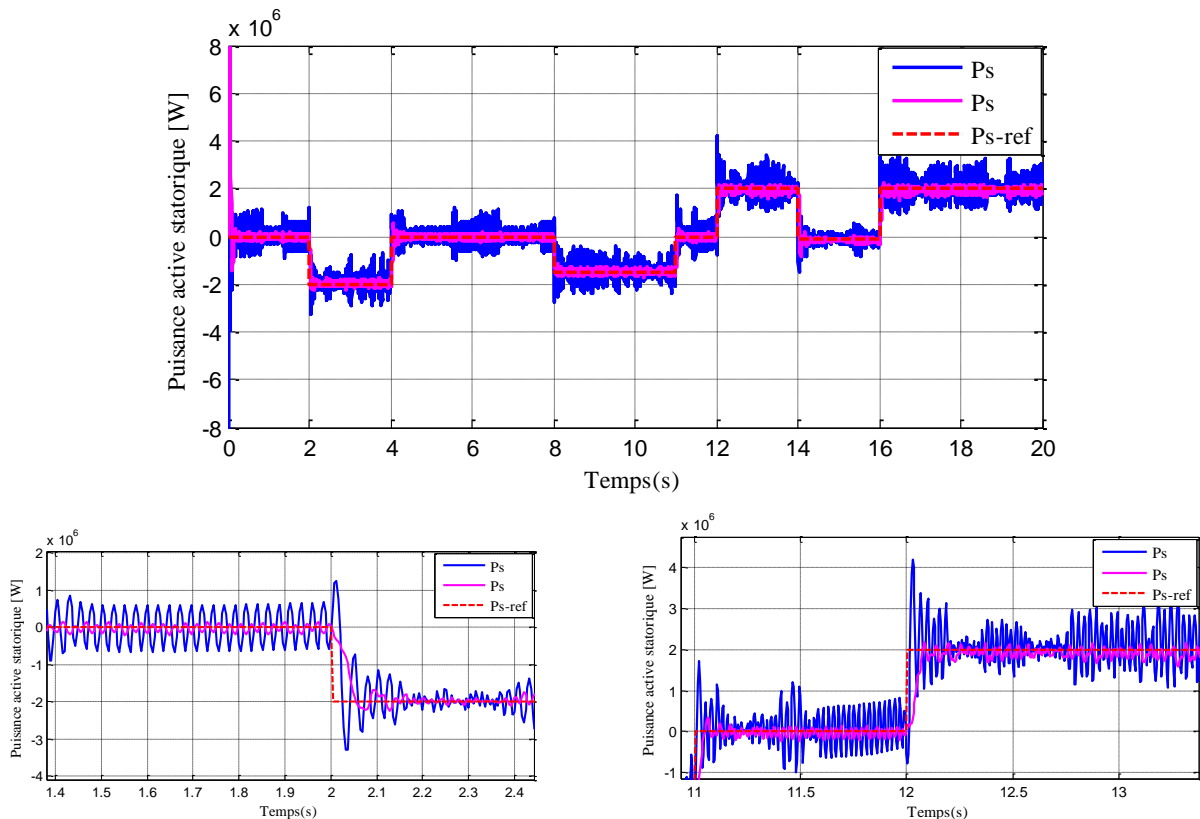


Figure IV.13 Puissance active statorique de la MADA par mode glissant

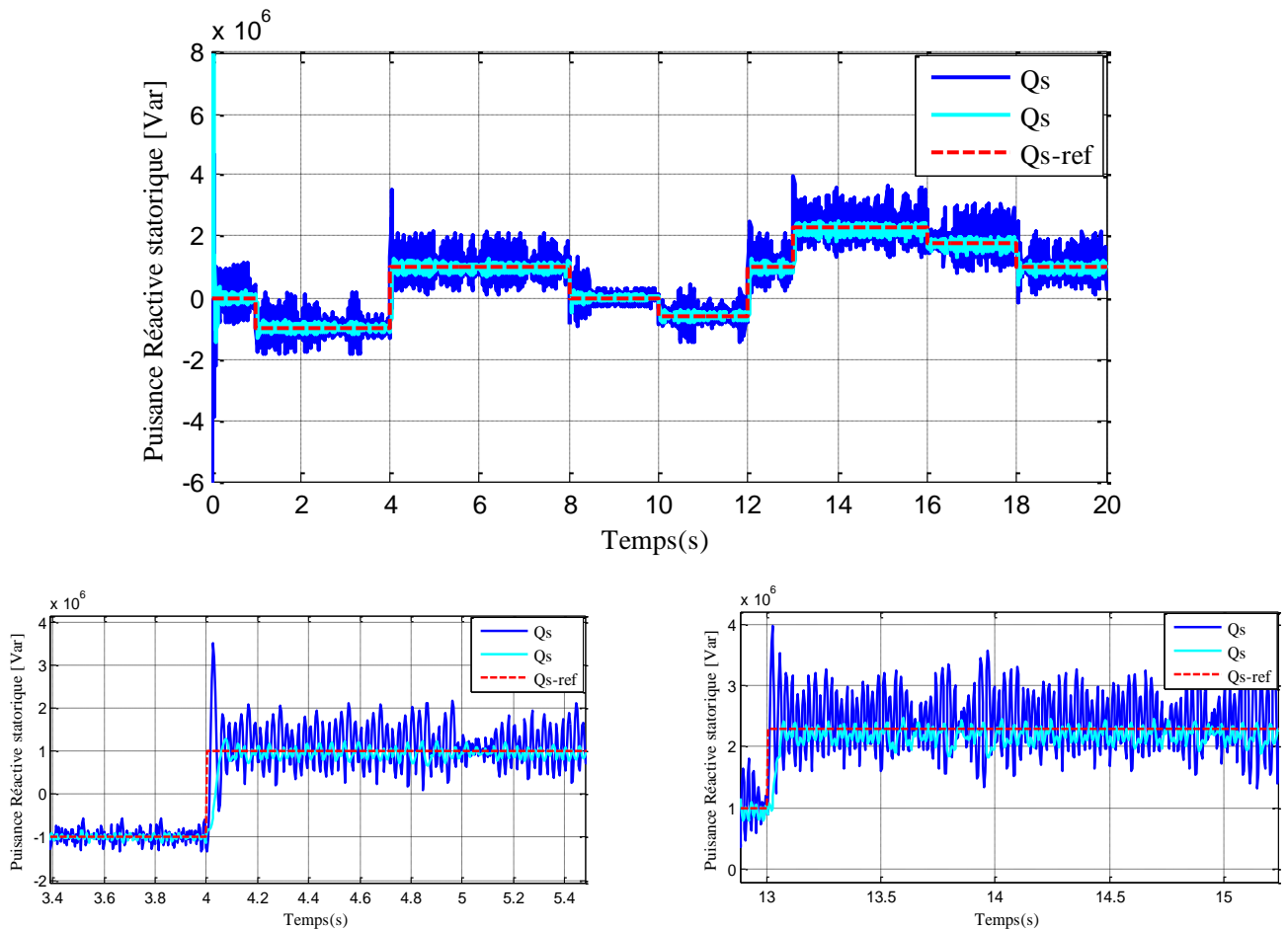


Figure IV.14 Puissance réactive statorique de la MADA par mode glissant

IV.9 Interprétation des résultats

Les résultats de simulation présentés dans les figures (IV.13) et (IV.14) montre que le CMG offre une meilleure poursuite de la référence. Pendant les variations des échelons on remarque un bon découplage entre les deux puissances active et réactive échangées.

Le principal inconvénient de la commande de type relais réside dans le phénomène bien connu de chattering. En régime permanent, ce dernier apparaît comme une oscillation de haute fréquence autour du point d'équilibre, à cause de la nature très discontinue de la fonction signe.

IV.10 Conclusion

Dans ce chapitre, la théorie de la commande par mode glissement et son application au générateur asynchrone à double alimentation pour le contrôle robuste des puissances ont été bien développée, Nous avons commencé notre étude par quelques généralités sur la commande par mode glissant, les concepts de base de cette technique, ensuite la conception de l'algorithme de commande par le mode glissant et l'application de cette commande au contrôle des puissance

active et réactive du MADA, où cette commande à une forme différente comparée à la commande vectorielle classique.

L'inconvénient de la commande de type relais réside dans le phénomène de chattering, à cause de la nature très discontinue de la fonction sign, cette fonction est donc remplacée par la fonction de lissage appelée cont. Les résultats de simulation montrent l'efficacité de ces deux commandes implémentées, ceci a été confirmé par le découplage parfait et la bonne poursuite. On remarqué que les résultats obtenus par la commande par mode glissant utilisant la fonction de lissage cont sont meilleurs et plus performants que ceux obtenus par la commande par mode glissant utilisant la fonction sign, avec une réduction des ondulations au niveau de la puissance active et réactive statorique, par conséquence une minimisation des harmoniques.

Chapitre V

Commande d'un système éolien par les réseaux de neurones artificiels

V.1 Introduction

L'homme a toujours espérer de la machine qu'est parlé, pense et se rappelle. Le but n'est pas de produire une machine humaine ce qui très difficile ou impossible, mais de copier et imiter l'approche naturelle de raisonnement humaine au profite de la science. Le cerveau humain, est le meilleur modèle de la machine, polyvalente incroyablement rapide et surtout douée d'une incomparable capacité d'auto organisation. Son comportement est beaucoup plus mystérieux que le comportement de ses cellules de base.

Les techniques de l'intelligence artificielle telles que la logique floue, les algorithmes génétiques et les réseaux de neurones artificiels sont des outils puissants capables d'être utilisés dans près que tous les domaines technologiques, et on peut citer : Le traitement du signal, vision, parole, prévision, modélisation, aide à la décision, robotique, évaluation des écosystèmes, identification des bactéries, commande des processus, modélisation des systèmes physiques, reconnaissance des formes, mesure, instrumentation,...etc. [86].

L'objectif recherché dans l'utilisation des techniques de l'intelligence artificielle est d'arriver à l'émulation du raisonnement de telle sorte que le système complet commande-machine puisse penser et réagir intelligemment comme un être humain [87] [88]. Un système commande-machine équipé d'un algorithme développant un calcul par intelligence est appelé *système intelligent* [67] [89]. En effet, un système intelligent possède la caractéristique d'apprentissage, d'auto-organisation et d'auto-adaptation. Les techniques de l'intelligence artificielle ont été discutées pendant longtemps et le seront également à l'avenir [90] [91].

Parmi toutes les techniques intelligentes, le RNA semble avoir le maximum d'impact dans le domaine de l'électronique de puissance et dans la commande de machines électriques, ce qui est évident par le nombre important de publications réalisées dans la littérature [89] [92].

La plupart des applications où les réseaux de neurones ont été utilisés avantageusement mettent en jeu la caractérisation de phénomènes difficiles ou impossibles à décrire à l' aide de modèles de connaissance.

Les RNAs constituent une technique de traitement de données bien comprise et bien maîtrisée. Ces techniques s'intègrent parfaitement dans les stratégies de commande. En effet, elles réalisent des fonctionnalités d'identification, de contrôle ou de filtrage, et prolonge les techniques classiques de l'automatique non linéaire pour aboutir à des solutions plus efficaces et robustes.

V.2 Bref historique

Les réseaux de neurones artificiels ont commencé à voir le jour dès 1890 avec W. James, un célèbre psychologue américain qui a introduit le concept de mémoire associative, et proposa une loi de fonctionnement pour l'apprentissage sur les réseaux de neurones. Cette règle sera connue

sous le nom : la règle de Hebb. En 1943, Mc Culloch et Pitts deux bio-physiciens de l'université de Chicago ont démontré qu'un réseau de neurones discret peut représenter n'importe quelle fonction booléenne, principe de base d'un ordinateur. Quelques années après, en 1949, D.O.Hebb, dans un livre resté lui aussi fameux introduisit la notion de « plasticité synaptique », c'est-à-dire le mécanisme de modification progressive des couplages inter neurone responsables de changement permanent de leurs propriétés collectives, ce que l'on peut appeler « l'apprentissage ».

Son hypothèse, limitée à l'augmentation du coefficient de couplage entre deux neurones réels qui sont excités simultanément, a été étendue aux neurones artificiels comme une règle par laquelle les couplages se modifient proportionnellement aux corrélations entre neurones, que ces corrélations soient positives « activation » ou négatives « inhibition ».

Les travaux sur les réseaux de neurones formels ont connu des débuts prometteurs vers la fin des années 50. C'est en 1958 que Rosenblatt décrivit le premier modèle opérationnel de réseaux de neurones, mettant en œuvre les idées de Hebb, MC Culloch et Pitts. C'est le premier système artificiel capable d'apprendre par expérience. Ce réseau, était capable d'apprendre à différencier des formes simples et à calculer certaines fonctions logiques.

Dans la même période, Le modèle de L'Adaline (adaptive linear element) a été présenté par B. Widrow, chercheur américain à stanford. Ce modèle sera par la suite le modèle de base des réseaux multicouches.

L'une des causes qui est à l'origine du désintéressement des chercheurs aux RNA est apparue en 1969, avec l'apparition d'un livre connu sous le nom Perceptrons de Minsky et Papert et dans lequel ils publièrent leur argumentation mathématique visant à démontrer les limitations du perceptron (Réseaux de neurones à une seule couche) et en particulier, l'incapacité du réseau à résoudre les problèmes non linéairement séparables, dont la fonction logique XOR est un célèbre exemple. Ce n'est qu'au début des années 80 que l'intérêt des chercheurs pour les réseaux de neurones renaît et plus précisément en 1982 grâce à Hopfield qui proposa les réseaux de neurones associatifs. Parallèlement, Werbos conçoit un mécanisme d'apprentissage pour les réseaux multicouches de type perceptron.

En 1986, Rumelhart, Hinton et Williams publient, l'algorithme de la rétropropagation de l'erreur qui permet d'optimiser les paramètres d'un réseau de neurones à plusieurs couches. À partir de ce moment, la recherche sur les réseaux de neurones connaît un ressort fulgurant et les applications commerciales de ce succès académique suivent au cours des années quatre-vingt-dix.

Actuellement, les chercheurs s'intéressent beaucoup plus à l'exploitation des structures d'identification et de contrôle mono et multivariable de la commande adaptative avec les réseaux de neurones [93].

V.3 Domaines d'application des réseaux de neurones

L'intérêt porté aujourd'hui aux réseaux de neurones tient sa justification dans les quelques propriétés intéressantes qu'ils possèdent et qui devraient permettre de dépasser les limitations de l'information de l'informatique traditionnelle.

Pour cette raison les réseaux de neurones artificiels ont trouvé plusieurs applications et dans plusieurs domaines, notamment, les domaines suivants :

V.3.1 Traitement du signal

Dans ce domaine, les applications réalisées traitent essentiellement de la reconnaissance de signatures radar ou sonner .

La société NESTOR a développé un réseau de neurones qui identifie une cible à coup sûr (100 % de réussite) et reconnaît du bruit avec un taux de réussite de 95 % .

Cette application a été construite à partir de signaux sonars et des traits caractéristiques de ces signaux déterminés par les experts comme utiles pour identifier une cible en environnement bruité. Le réseau agit dans ces applications comme un filtre pour éliminer le bruit.

V.3.2 Classification des signaux

Classer des signaux dans les catégories différentes en fonction des caractéristiques de forme (amplitude, fréquence, phase, etc....) peut être réalisé aisément par l'utilisation d'un réseau de neurones.

Supposons qu'on a deux catégories de signaux A et B et qu'on souhaite classer de différentes formes dans ces deux catégories en fonction des caractéristiques de ces formes. On peut simplement définir la fonction non linéaire F qui vaut +1 pour les formes de la classe A et -1 pour celles de la classe B, le problème de classification revient à approximation de la fonction non linéaire F qui peut être résolue par un réseau de neurones qui possède des entrées et une seule sortie pour fournir la décision.

V.3.3 Identification des processus

Identifier un processus ; c'est d'essayer de donner un modèle plus proche au processus réel qui permet de reproduire avec la précision voulue, la sortie en fonction des entrées du processus, c'est typiquement un problème d'approximation qui peut être résolu par un réseau de neurones.

V.3.4 Reconnaissance des formes :

C'est un domaine privilégiée d'application pour les réseaux de neurones formels qui s'y sont attaqués dès leurs débuts. Ce terme général désigne les processus qui traitent des données pour en extraire des informations afin de parvenir à leur classification parmi les applications de la reconnaissance des formes, on trouve : La reconnaissance de caractères manuscrits ou

dactylographiés, les prévisions météorologiques, l'analyse de tendances financières, l'imagerie bio-médicale ...etc.

V.3.5 L'application au diagnostic

Les réseaux de neurones sont bien adaptés à la résolution des problèmes de diagnostic, utilisant la classification automatique des signaux et des formes.

V.3.6 L'application au contrôle

Grâce à leur propriétés (parallélisme de traitement, capacité d'adaptation, et de généralisation, etc.). Les réseaux de neurones sont appliqués au contrôle intelligent, plusieurs tentatives ont été faites pour appliquer les réseaux de neurones ; Ces applications peuvent être classifiés en plusieurs méthode, telles que : le contrôle supervisé , Le contrôle inverse et le contrôle neuronal adaptatif [94].

De plus les réseaux de neurones sont appliqués à la commande de la machine asynchrone par l'implantation des régulateurs [95]. Dans ce contexte, on distingue une application des réseaux de neurones pour le contrôle des puissances active et réactive de la MADA.

V.3.7 Application militaires

Bien que naturellement les publications soient relativement rares et que peu de détails soient donnés, les applications militaires « classiques » se retrouvent en reconnaissance de cibles, analyse d'image, traitement de signaux radar ou sonar, et dans une certaine mesure en robotique. Le dernier circuit intégré d'Intel (qui est un «accélérateur de reconnaissance », selon ses propres termes) a été financé pour moitié sur crédits militaires, à hauteur d'environ 1,5 million de dollars \$. Ce circuit implante une architecture de type RBF (mesure des distances entre stimulus prototypes), développée par la société Nestor [96].

V.3.8 La planification

L'optimisation est souvent sollicitée pour la planification des actions ou des tâches. A cet effet, l'utilisation du modèle de Hop Field et du modèle de Kohonen paraît très utiles pour la résolution des problèmes d'optimisation.

V.4 Neurone biologique

V.4.1 Modèle de neurone biologique

Les cellules nerveuses, appelées neurones, sont les éléments de base du système nerveux centrale. Celui-ci en posséderait environ cent milliards, forment un réseau interconnecté complexe. Les neurones possèdent de nombreux points communs dans son organisation générale et leur système biologique avec les autres cellules. Ils présentent cependant des caractéristiques qui leurs sont propres et se retrouvent au niveau de cinq fonctions spécialisées qu'ils assurent [97] [98] :

- Recevoir des signaux en provenance de neurones voisins.
- Intégrer ces signaux.
- Engendrer un influx nerveux.
- Le conduire.
- Le transmettre à un autre neurone capable de le recevoir.

V.4.2 Structure de neurone

Les neurones biologiques sont des cellules nerveuses décomposables en 4 parties principales comme le montre la figure (figure V.1):

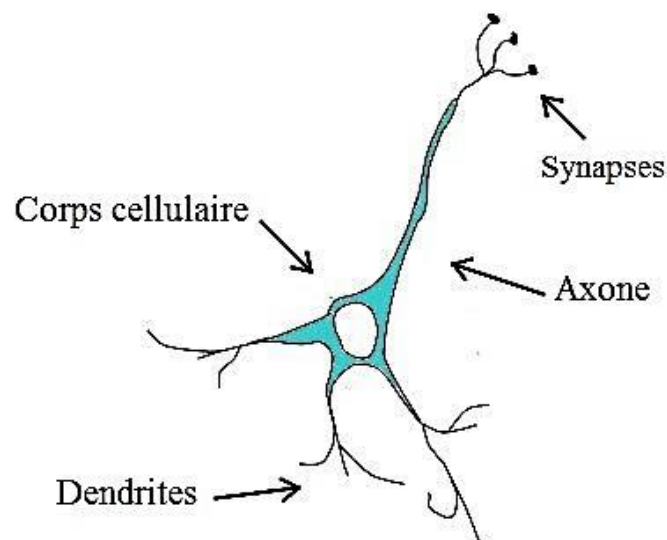


Figure V.1 : Schéma du neurone biologique

V.4.2.1 Le corps cellulaire

Le corps cellulaire ou se situe le mécanisme du déclenchement du neurone, contient le noyau du neurone et effectue les transformations biochimiques nécessaires à la synthèse des enzymes et des autres molécules qui assurent la vie de neurone. Sa forme est pyramidale ou sphérique dans la plupart des cas. Elle dépend souvent de sa position dans le cerveau [93].

V.4.2.2 Les dendrites

Le neurone possède plusieurs dendrites. Celles-ci sont de fines extensions tubulaires, de quelques dizaines de microns de diamètre et d'une longueur de quelques dizaines de microns. Elles sont les récepteurs principaux du neurone qui servent à capter les signaux qui lui parviennent [93] [99].

V.4.2.3 L'axone

L'axone peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres, qui est à proprement parler la fibre nerveuse, sert de moyen de transport pour les signaux émis par le neurone. Il se distingue des dendrites par sa forme et par les propriétés de sa membrane externe. En effet, il est en général plus

long que les dendrites, et se ramifie à son extrémité, là où il communique avec les autres neurones, alors que les ramifications des dendrites se produisent plutôt près du corps cellulaire.

Pour former le système nerveux, les neurones sont connectés les uns aux autres suivant des répartitions spatiales complexes. Les connexions entre deux neurones se font à des endroits appelés synapses ou ils sont séparés par un petit espace synaptique de l'ordre d'un centième de micron.

V.4.2.4 Les synapses

Les neurones sont interconnectés entre eux par des synapses dont le nombre est d'environ 10000 milliards. Ceci signifie qu'un neurone reçoit en moyenne des excitations en provenance de 1000 neurones, et qui émet également des informations à 1000 neurones différents. Le rôle des synapses est fondamental pour permettre aux cellules nerveuses de communiquer entre elles. Les signaux qui se propagent dans les neurones sont de nature électrique. Cependant, il n'existe pas de liaisons directes entre deux cellules nerveuses.

Celles-ci sont séparées par un espace appelé fente synaptique que l'influx électrique ne peut traverser. Le relais s'effectue à ce niveau par l'intermédiaire d'un médiateur chimique.

V.5 Fonctionnement des neurones

Généralement, le soma de neurone traite les courants électriques (information) qui lui proviennent de ses dendrites et qu'il transmet le courant électrique résultant de ce traitement aux neurones auxquelles il est connecté par l'intermédiaire de son axone. Les réseaux de neurones artificiels sont posés sur une théorie électrique suivant laquelle la jonction synaptique, est l'endroit où le neurone perçoit un stimulus par voie électrochimique [94].

D'après le modèle classique, le soma effectuant une sommation des influx nerveux transmise par les dendrites, Si la sommation dépasse un seuil, le neurone répond par un influx nerveux au potentiel d'action qui se propage le long de son axone. Si la sommation est inférieure à ce seuil, le neurone reste inactif.

Lorsqu'un potentiel d'action est parvenu à synapse, provoque à travers la membrane de libération d'un médiateur chimique celle-ci se diffuse jusqu'à la membrane de dendrite qui provoque naissance un potentiel.

C'est ce type de modèle qui est majoritairement retenu pour simuler artificiellement les neurones du cerveau humain.

V.6. Réseau de neurone artificiel

Les réseaux de neurones artificiels, pour le moment, ne sont capables que de Simuler de façon très simplifié le cerveau humain. Un neurone formel ou artificiel est un processeur très

simple (simulé sur ordinateur ou réalisé sur circuit intégré) imitant grossièrement la structure et le fonctionnement d'un neurone biologique [95].

D'autre définition les réseaux de neurones artificiels sont des réseaux fortement connectés de processeurs élémentaires fonctionnant en parallèle. Chaque processeur calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit. Toute structure hiérarchique de réseaux est évidemment un réseau [97-99].

V.6.1. Modélisation des réseaux de neurones

Le neurone artificiel est une modélisation mathématique très simple qui a pour but de reproduire le raisonnement « intelligent » d'une manière artificielle, tel que la sommation et la comparaison.

Le premier modèle du neurone formel a été présenté par W. McCulloch et W. Pitts. D'une façon générale, un neurone formel est un élément de traitement qui fait une somme des potentiels d'action venant de n entrées x_1, \dots, x_n , pondérée par des coefficients, dits poids synaptique (les potentiels des entrées ont des valeurs numériques). Si la somme de ces potentiels dépasse un certain seuil (fonction de seuillage F , ou fonction d'activation), le neurone est activé et transmet une réponse dont la valeur est celle de son activation. Si le neurone n'est pas activé, il transmet rien. Chaque neurone formel calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit. (figure (V.2)).

La sortie de neurone est donnée par :

$$y = f(S) \quad (V.1)$$

$$S = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (V.2)$$

Parfois, il y a un terme additionnel k représentant le seuil interne du neurone, ce terme est considéré comme un poids w_0 associé à une entrée constante, l'expression devient donc :

$$S = \sum_{i=1}^n w_i x_i - k \quad (V.3)$$

Avec

y : sortie de neurone ;

x_i : vecteur d'entrées du neurone ;

w_i : coefficients de pondération appelés aussi coefficients synaptiques, (ou poids) ;

f : la fonction d'activation (de décision, ou de seuillage) ;

S : la sortie intermédiaire ;

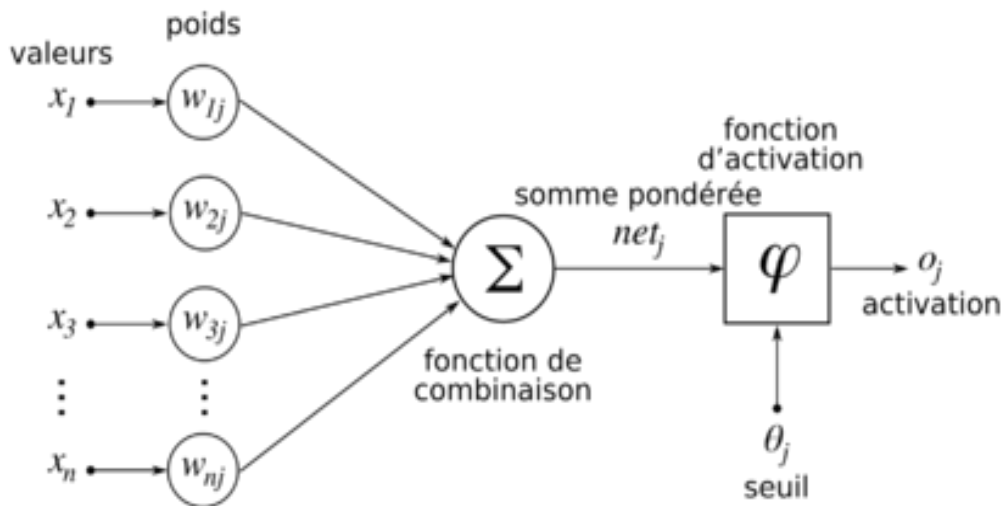


Figure V.2 Modèle architectural d'un neurone formel [97]

En général, un réseau de neurone artificiel peut être défini par les éléments suivants :

La nature de ses entrées;

La fonction d'entrée totale qui définit le prétraitement effectué sur les entrées;

La fonction d'activation (ou d'état) du neurone qui définit son état interne en fonction de son entrée totale;

La fonction de sortie qui calcule la sortie du neurone en fonction de son état d'activation;

La nature de la sortie du neurone.

V.6.1.1. Nature des entrées

Elle peut être binaires (0, 1).

$$\begin{cases} 1 & \text{si } S > \theta \\ 0 & \text{si } S < \theta \end{cases} \quad (\text{V.4})$$

Ou bien elle peut être réelles (-1, +1).

$$\begin{cases} 1 & \text{si } S > \theta \\ -1 & \text{si } S < \theta \end{cases} \quad (\text{V.5})$$

V.6.1.2. Fonction d'entrée totale

Elle définit le prétraitement effectué sur les entrées, peut-être :

- Booléenne.

- Linéaire: $S = \sum_{i=1}^n w_i x_i$.

- Affine: $S = \sum_{i=1}^n w_i x_i - k$.

- Polynomiale de degré supérieur à deux.

V.6.1.3. Fonction d'activation

C'est une fonction présentée généralement par une non linéarité appelée aussi fonction de décision. Elle permet de définir l'état interne du neurone en fonction de son entrée totale et rendre l'activité du neurone bornée. ; Par ailleurs, les fonctions de transfert sont de qualités diverses : elles peuvent être déterministes, continues, discontinues ou aléatoires. Le choix de la fonction d'activation dépend de l'application. S'il faut avoir des sorties binaires c'est la première fonction que l'on choisit habituellement. Le Tableau V.1, donne les modèles de fonctions d'activation utilisées [99] [100].

Nom de la fonction	Nom MATAB	Relation entrée/sortie	Icône
Seuil (Heaviside)	hardlim	$y=0 \quad \text{si} \quad x < 0$ $y=1 \quad \text{si} \quad x \geq 0$	
Seuil symétrique	hardlims	$y=-1 \quad \text{si} \quad x < 0$ $y=1 \quad \text{si} \quad x \geq 0$	
Linéaire sans saturation	purelin	$y=x$	
Linéaire saturée	satlin	$y=0 \quad \text{si} \quad x \leq 0$ $y= x \quad \text{si} \quad 0 < x \leq 1$ $y=1 \quad \text{si} \quad x > 1$	
Linéaire saturée symétrique	satlins	$y=-1 \quad \text{si} \quad x < -1$ $y= x \quad \text{si} \quad -1 \leq x \leq 1$ $y= 1 \quad \text{si} \quad x > 1$	
Linéaire positive	poslin	$y=0 \quad \text{si} \quad x \leq 0$ $y=x \quad \text{si} \quad x > 0$	
Sigmoïde	logsig	$y = \frac{1}{1 + \exp^{-x}}$	
Tangente hyperbolique	tansig	$y = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$	

Tableau V.1 Modèles de fonctions d'activation.

V.6.1.4. Fonction de sortie

Elle calcule la sortie de neurone en fonction de son état d'activation, en général cette fonction est considérée comme la fonction identité, par la suite confondrons toujours activation et sortie du neurone.

V.6.2. Propriétés des réseaux de neurones

L'intérêt porté aujourd'hui aux réseaux de neurones tient sa justification dans quelques propriétés intéressantes qu'ils possèdent et qui devraient permettre de dépasser les limitations de l'informatique traditionnelle, tant au niveau programmation qu'au niveau machine.

D'une manière générale un réseau de neurones possède les propriétés suivantes:

V.6.2.1. L'approximation universelle

Cette propriété justifie dans une large mesure, l'utilisation des réseaux de neurones dans les domaines des sciences de l'ingénieur.

Pour toute fonction déterministe suffisamment régulière, il existe au moins un réseau de neurone non bouclé, possédant une couche de neurones cachés et un neurone de sortie linéaire, qui réalise une approximation de cette fonction et ces dérivées successive, au sens de moindres carrées, avec une précision arbitraire [100].

V.6.2.2 Le parallélisme

Cette notion se situe à la base de l'architecture des réseaux de neurones considérés comme ensemble d'entrées élémentaires qui travaillent simultanément. Par l'étude du fonctionnement des réseaux de neurones, on pourrait aboutir à des nouvelles techniques de formalisation de problème qui permettraient de les traiter en parallèle.

V.6.2.3 La capacité d'adaptation

Celle-ci se manifeste tout d'abord dans les réseaux de neurones par la capacité d'apprentissage qui permet au réseau de tenir compte des nouvelles contraintes ou des nouvelles données du monde extérieur. Certains réseaux se caractérisent par leur capacité d'auto-organisation qui assure leur stabilité en tant que système dynamique capables de tenir compte des situations non encore connues.

V.6.2.4 La résistance aux panne

À cause de l'abondance des entrées et la structure du réseau, les données bruyantes où les pannes locales dans certains nombres de ses éléments n'affectent pas ses fonctionnements collectifs et simultanés des neurones qui le composent.

V.6.2.5 La capacité de généralisation

La capacité de généralisation d'un réseau de neurones est important surtout dans le cas où la constitution de recueils d'expertise pour un système expert devient difficile (reconnaissance

intuitive ou implicite). Les réseaux neuronaux peuvent apprendre à retrouver des règles à partir des exemples [98-100].

V.6.2.6 Structure de connexion

Les connexions entre les neurones qui composent le réseau décrivent la topologie du modèle. Elles sont très variées, le nombre de connexions étant énorme. Cette topologie fait apparaître une certaine régularité de l'arrangement des neurones

D'une manière générale, l'architecture des réseaux de neurones formels peut aller d'une connectivité totale (tous les neurones sont reliés les uns aux autres), à une connectivité locale ou les neurones ne sont reliés qu'à leurs plus proches voisins. Il est courant d'utiliser des réseaux à structure régulière pour faciliter leurs utilisations.

V.7 Topologie des réseaux de neurones

On peut classer les réseaux de neurones en trois grandes catégories, selon la dépendance de l'évolution de ceux-ci en fonction explicite du temps.

V.7.1. Les réseaux statiques ou réseau à couche (Feed forward)

Les réseaux statiques (non bouclés) sont des réseaux à couches, constitués d'une couche d'entrée, une couche de sortie et entre les deux au moins une couche composée de nombreux éléments de traitements non linéaires, appelée couche cachée.

Ils sont les plus utilisés en diagnostic industriel en raison de leur capacité à résoudre les problèmes de classification non linéaires par l'utilisation de l'algorithme de rétropropagation du gradient dérivé de la règle de Widrow- Hoff pour le calcul des poids des connexion des neurones des couches internes.

Les signaux des entrées se propagent de la première couche à la couche de sortie en passant par les couches cachées, Il n'y a pas des communications entre les unités de la même couche, d'où le nom de feed forward. Les liens dirigés connectant les neurones sont appelés les interconnexions [100].

On distingue des réseaux à deux couches tel que le perceptron qui sont caractérisés par :

- La simplicité de réglage d'apprentissage.
- La facilité de détermination de l'influence d'un neurone d'entrée sur l'erreur d'un neurone de sortie d'en déduire les modifications à apporter au lien qui les relie.
- La limitation au calcul de fonction très simple.

Un réseau de neurones non bouclé réalise une (ou plusieurs) fonctions algébriques de ses entrées, par composition des fonctions réalisées par chacun de ses neurones. Ces réseaux ne pouvaient résoudre que des problèmes simples de classification. Pour des problèmes complexes, une solution consiste à organiser le réseau en plusieurs couches.

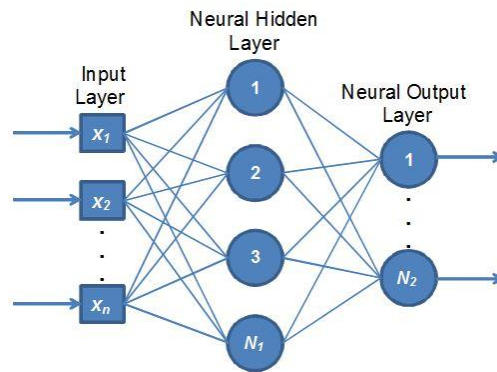


Figure V.3 Structure d'un réseau statique avec une couche cachée [20]

V.7.2 Les réseaux dynamiques ou entièrement connectés ou récurrents (Feed back network)

Dans ces réseaux, chaque cellule est reliée à toutes les autres et possède même un retour sur elle. L'importance de ces réseaux n'est pas due à une origine biologique comme pour les réseaux à couches cachées, mais au fait qu'on a pu établir une analogie entre les réseaux de ce type constitués d'automate à seuil et le comportement d'un verre de spin. Ceci a permis de mettre à la disposition des chercheurs tout le formalisme de la mécanique statistique et entraîné un regain d'intérêt pour l'étude des réseaux de neurones.

Il faut bien distinguer la dépendance théorique, pour laquelle l'état du réseau à un certain instant dépend de son état à l'instant ou aux instants précédents, du temps nécessaire à obtenir une réponse, dans le cas d'une réalisation matérielle ou d'une simulation sur ordinateur.

La théorie de ces réseaux fut publiée par Hopfield dans les années 1980 et sont souvent appelées « Hopfield nets ». Ils sont principalement utilisés pour l'implémentation des mémoires associatives « BAM : bidirectional associative memory » [102].

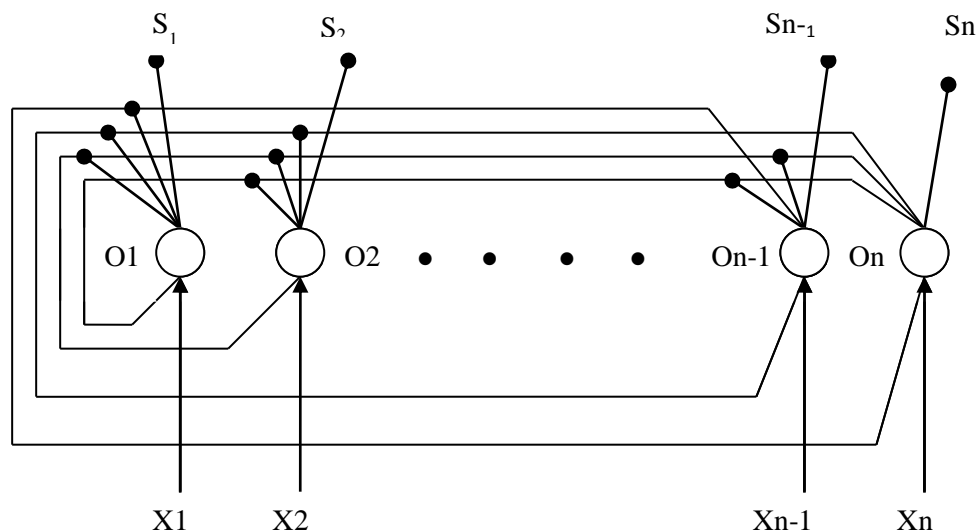


Figure V.4 Réseau de neurone de Hop Field.

V.7.3 Réseaux de neurones a architecture évolutive

Ces réseaux de neurones changent leurs structures interne pendant l'utilisation (augmentation ou diminution du nombre de neurone) [103].

V.8 Apprentissage des réseaux de neurones

Les réseaux de neurones peut considérer comme une boîte noire contenant l'information qu'elle doit apprendre et mémoriser. Mais au démarrage lorsqu'on choisit notre réseau, la boîte noire est vide et ne contient aucune information, ni aucune connaissance sur son sujet, c'est pourquoi un apprentissage est nécessaire.

La phase d'apprentissage consiste à modifier les poids jusqu'à obtention d'une stabilisation du réseau. C'est-à-dire, jusqu'à ce que le poids ne se modifie plus que d'une façon minimale (jusqu'à l'obtention du comportement désiré), d'après un algorithme itératif d'ajustement ou d'adaptation lui permettant de prendre en considération toutes les données (exemples) qui lui sont fournies à son entrée et ainsi ajuster ses paramètres pour trouver le juste milieu permettant de prendre en charge n'importe quel exemple ou donnée apparaissant à son entrée provenant de son environnement. L'apprentissage mathématique, basé sur ce concept, sert à minimiser une fonction de coûts formulée autour de l'erreur de sortie. Alors l'adaptation commence, par les neurones de la couche de sortie, forcés de la bonne valeur, puis on fait varier légèrement les poids des neurones des couches précédentes :

Différents algorithmes d'apprentissage et différents types d'apprentissage ont été développés dans la littérature dans le but de réaliser l'adaptation et l'optimisation des poids d'un RNA. L'apprentissage par correction d'erreur (apprentissage à rétropropagation), l'apprentissage type Boltzmann, l'apprentissage Hebbien et l'apprentissage compétitif peuvent être mentionnés parmi les algorithmes les plus cités dans la littérature [104].

Quant aux types d'apprentissages : l'apprentissage supervisé, l'apprentissage par renforcement et l'apprentissage non supervisé peuvent être aussi mentionnés [105] [106].

Dans le domaine de l'identification et la commande de systèmes dynamiques, l'apprentissage supervisé est souvent utilisé pour corriger l'erreur de la sortie d'un RNA. Ce type d'apprentissage sera abordé en détail dans la partie suivante.

Les algorithmes d'apprentissages donnent des meilleurs résultats lorsqu'on leur fournit des exemples multiples et variés ; ainsi le réseau peut assimiler toutes les connaissances.

V.8.1 Apprentissage supervisé

Dans ce type d'apprentissage, la connaissance a priori de la sortie désirée est nécessaire. On présente au réseau le vecteur d'entrée puis on calcule sa sortie, cette dernière sera comparée avec la sortie désirée, ensuite les poids sont ajustés de façon à réduire l'écart entre elles. Cette

procédure est répétée jusqu'à ce qu'un critère de performance soit satisfait. Après la phase d'apprentissage et la convergence des calculs, il n'est plus nécessaire, en général, de mémoriser le jeu d'apprentissage. Ces algorithmes sont particulièrement dédiés aux problèmes de classification des données bruitées ou incomplètes [107].

La méthode la plus utilisée pour ce type d'apprentissage, pour entraînements des réseaux statiques est la retro-propagation. Une fois l'apprentissage est accompli, le RNA peut alors être exploité dans l'identification ou dans la commande de systèmes.

V.8.2 Apprentissage non supervisé

L'apprentissage est non-supervisé lorsque l'adaptation des poids ne dépend que des critères internes au réseau. L'adaptation se fait uniquement avec les signaux d'entrées. Aucun signal d'erreur, aucune sortie désirée n'est prise en compte.

L'apprentissage non supervisé copie le fonctionnement du cerveau humain qui retrouve les informations par association. On présente à l'entrée du réseau des exemples connus et le réseau s'organise lui-même autour d'attracteurs qui correspondent à des configurations stables du modèle dynamique non linéaire associé au réseau.

V.8.3 Apprentissage hybride

Dans ce mode d'apprentissage il y a deux approches supervisé et non supervisé une partie des poids va être déterminée par l'apprentissage supervisé et l'autre partie par apprentissage non supervisé.

V.8.4 Apprentissage par renforcement (semi-supervisé) :

L'apprentissage est de type par renforcement lorsque le réseau de neurones interagit avec l'environnement. L'environnement donne une récompense pour une réponse satisfaisante du réseau et assigne une pénalité dans le cas contraire. Le réseau doit ainsi découvrir les réponses qui lui donnent un maximum de récompenses [108].

Le choix d'utiliser telle ou telle architecture de réseau de neurones, tel ou tel type d'apprentissage dépend de l'application mais aussi des capacités de traitement du système sur lequel ces architectures vont être implantées.

V.9 Algorithme de retro propagation

La retropropagation est actuellement l'outil le plus utilisé pour l'apprentissage supervisé des réseaux neuronaux. C'est une technique de calcul des dérivées qui peut être appliquée à n'importe quelle structure des fonctions dérivables. Le terme se réfère à un algorithme pour ajuster les poids de connections d'un RNA multi couches appelés aussi perceptrons, ce paradigme a été appliqué avec succès dans différents domaines.

L'année 1986 a vu l'apparition de l'algorithme de rétropropagation de l'erreur publié par Rumelhart, Hinton et Williams qui permet d'optimiser les paramètres d'un réseau de neurones à plusieurs couches.

La rétropropagation est basée sur des principes mathématiques. Cette méthode a donné de bons résultats dans beaucoup d'applications. Pour l'appliquer il suffit d'avoir des données d'entrées et des données de sortie.

Cependant, toute information que possède un réseau de neurone est représentée par les poids d'interconnexions, cette information est acquise durant la phase d'apprentissage.

Cette propriété d'apprendre a permis l'application des tels réseaux dans plusieurs domaines, contrôle, identification, diagnostic, ... etc.

Cet algorithme que l'on désigne couramment par «Back propagation» est une généralisation de la règle de «Widrow Hoff» pour un réseau multi couches. Il a été mis au point simultanément par deux équipes indépendantes en France «Fegelman N Saulie, Gallinari, Lecun» et aux états-unis «Rumelhart, Hinton, Williams».

L'idée simple qui est à la base de cet algorithme, et qui permet de lever la difficulté du «crédit assigné problème» est l'utilisation d'une fonction dérivable (fonction sigmoïde) en remplacement de la fonction de seuil utilisée dans le neurone linéaire à seuil.

Mathématiquement, cet algorithme utilise simplement les règles de dérivation composée et ne présente aucune difficulté particulière.

Le principe de cet algorithme est que, de même que l'on est capable de propager un signal provenant de cellules d'entrée vers la couche de sortie, on peut, en suivant le chemin inverse, rétropropager l'erreur commise en sortie vers les couches internes.

V.10 Les étapes d'algorithme de rétropropagation

L'algorithme de rétropropagation est représenté comme suit :

Etape 01 : Initialiser les connexions (les poids et les seuils internes des neurones) par des valeurs aléatoires faibles.

Etape 02 : Présenter l'ensemble des couches (entrée, sortie désirée).

Etape 03 : Présenter l'entrée et la sortie souhaitée de l'ensemble.

Etape 04 : Calculer :

- 1- La somme des entrées des neurones de la couche cachée.
- 2- Les sorties des neurones de la couche cachée.
- 3- La somme des entrées de la couche de sortie.
- 4- Les sorties de réseau.

Etape 05 : Calculer :

- 1- Les termes de l'erreur pour les neurones de la couche de sortie.
- 2- Les termes de l'erreur pour les neurones de la couche cachée.
- 3- La variation des poids.
- 4- L'erreur E_p .

Etape 06 : Présenter un autre couple (entrée, sortie désirée) et aller à l'étape quatre.

Etape 07 : Si tout l'ensemble des couple est présenté, calculer la variation total des poids par époque, en utilisant l'expression :

$$\Delta w_{ij} = \sum_{p=1}^p \Delta_p w_{ij} .$$

Etape 8 : Ajuster les poids.

Etape 9 : Calculer l'erreur totale.

Etape 10 : Comparer l'erreur totale avec une erreur prédéterminée E_{pr} ; $E - E_{pr} < \varepsilon$?

Si la condition est vérifiée aller à l'étape 11.

Si non aller à l'étape 03.

Etape 11 : Fin.

V.11 Application des réseaux de neurones

Nous allons nous intéresser à la commande de l'aérogénérateur en visant le contrôle des puissances injectées au réseau. Deux alternatives seront présentées; la première est basée sur la stratégie MPPT-RNA, tandis que la seconde repose sur le découplage de la commande des puissances active et réactive.

➤ L'extraction de maximum de puissance par les réseaux de neurones

Sur les courbes Ω/P du système de conversion d'énergie éolienne, il existe un point unique, appelé point de puissance maximale, à laquelle le système fonctionne avec une efficacité élevée et produit une puissance de sortie maximale. Pour maintenir le point de fonctionnement du système éolien au point de puissance maximum, un suivi de point de puissance maximum basé sur des réseaux de neurones artificiels est utilisé.

Dans ce travail, Le RNA est utilisé pour estimer la vitesse de rotation optimale qui correspond au MPP quelque soit la vitesse du vent. Pour cela, nous avons élaboré un réseau linéaire.

Nous avons constaté après des essais effectués sur les différentes structures, que le choix le plus judicieux était de prendre une architecture de réseau de neurones multicouches à une couche cachée contenant 15 neurones, et accompagner par une algorithmes de rétro propagation. Le contrôleur neuronale développer est représenté sur la figure V.6.

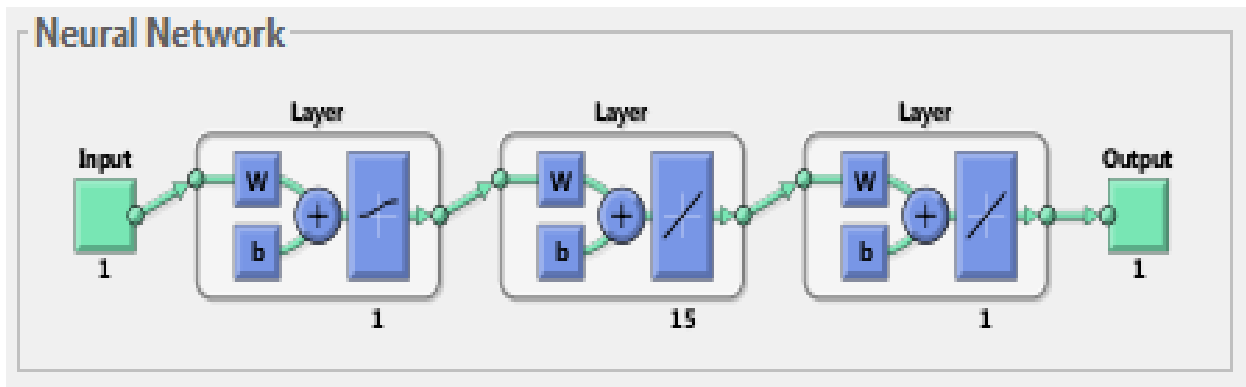


Figure V.6 Contrôleur RNA développé pour l'extraction du maximum de puissance, MPPT-RNA.

La figure V.6 montre la configuration RNA développée, qui est une structure multicouche comprenant une couche d'entrée, par laquelle les données sont transférées, une couche cachée et une couche de sortie où les données sont extraites.

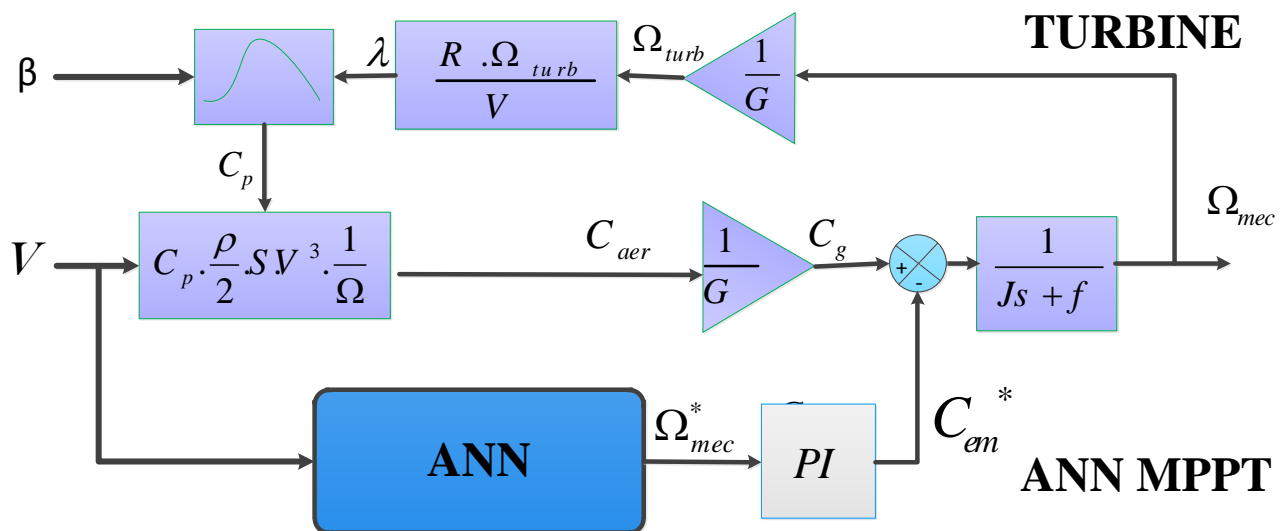


Figure V.7 Le schéma de principe de l'éolienne comprend le RNA-MPPT.

➤ **Contrôle des puissances par les réseaux de neurones**

Un contrôleur neuronal est utilisé pour contrôler facilement et indépendamment les puissances générées par une MADA couplée à une turbine éolienne, le contrôleur est un réseau des neurones à deux couches cachées ayant respectivement 4 et 15 neurones dans chaque couche. Les puissances actives et réactives de références représentent l'entrée du contrôleur. La figure V.8 présente les blocs des contrôleurs Neuronal développés sous l'environnement MATLAB/ Simulink.

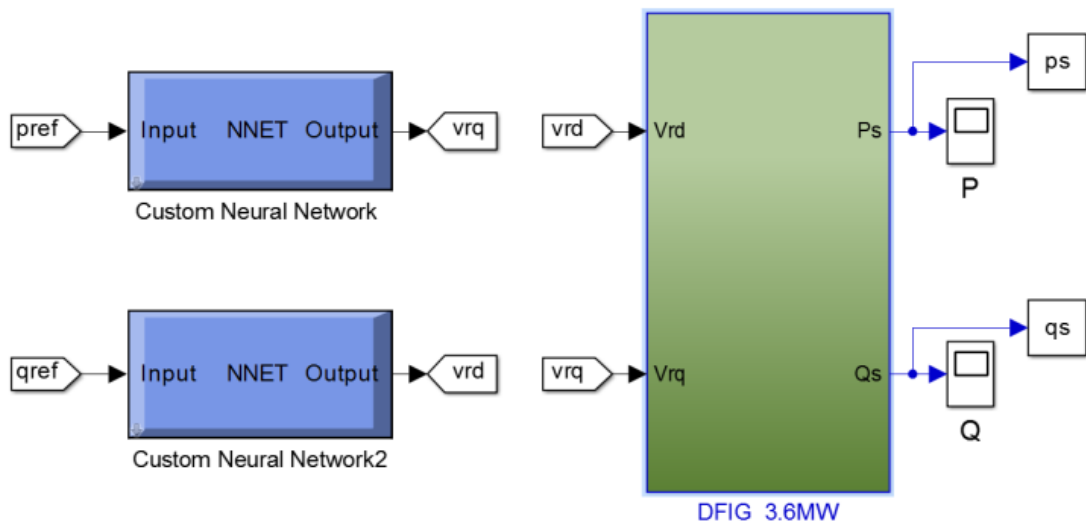


Figure V.8 Schéma de simulation de la MADA utilisant les réseaux de neurones

Afin de montrer l'utilité de la stratégie proposée, la figure V.8 présente la structure du contrôle des puissances par les RNA appliquée sur la MADA. Le modèle du système et de sa commande a été simulé à l'aide de Matlab/ Simulink.

V.12 Résultats de simulation

Les résultats de simulation avec le même profil de vent, présentée sur les figures ci-dessous (Figure V.13), sont ceux obtenus pour le modèle d'un système de convention éolienne de 3.6MW à base d'une machine asynchrone à double alimentation.

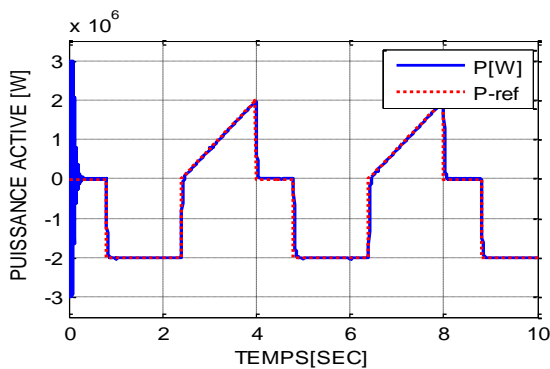


Figure V.9 La puissance active statorique de la MADA.

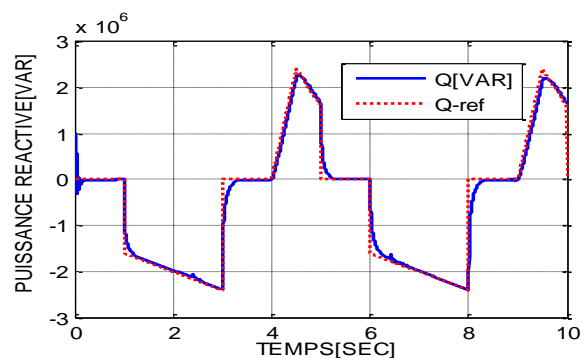


Figure V.10 La puissance réactive statorique de la MADA.

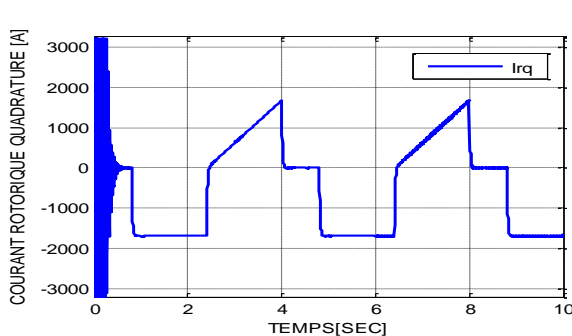


Figure V.11 Composante du courant rotorique quadrature.

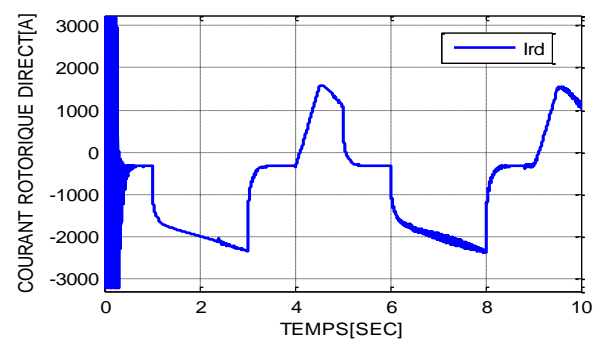
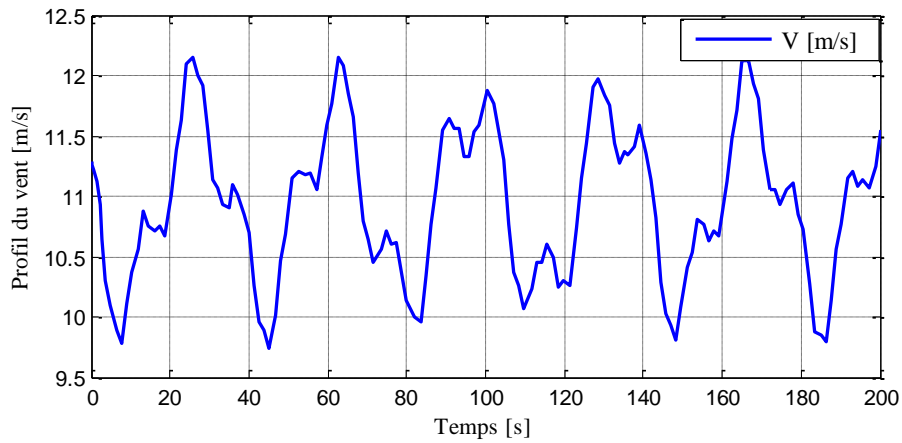
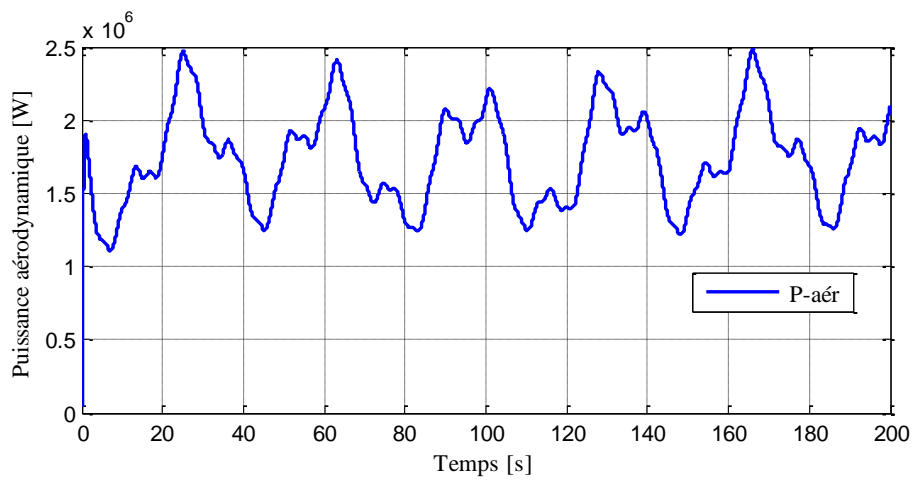
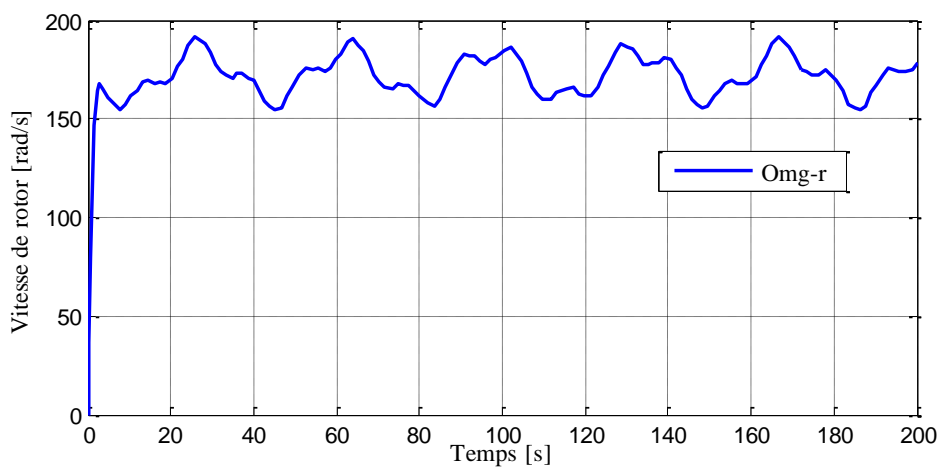


Figure V.12 Composante du courant rotorique direct.

**Figure V.13** Profil du vent appliqué**Figure VI.14** La puissance de la turbine (aérodynamique).**Figure V.15** La vitesse du rotor (vitesse mécanique)

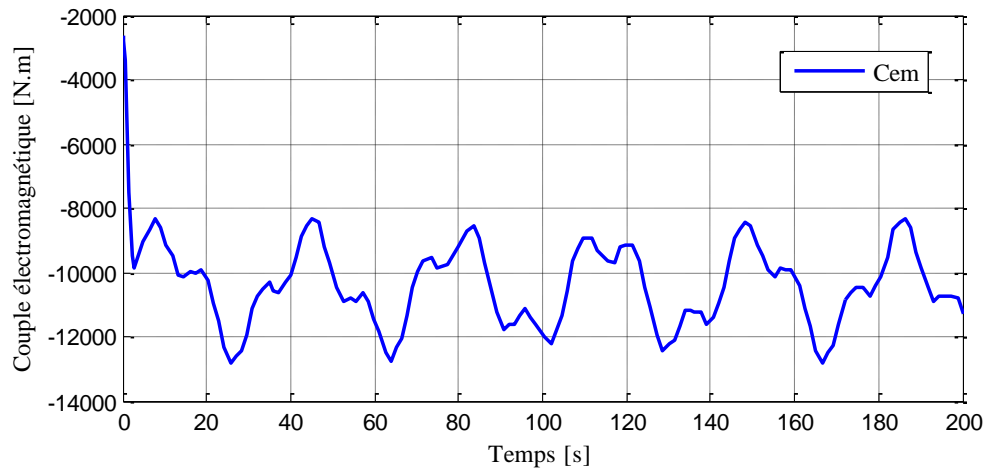


Figure V.16 Le couple électromagnétique

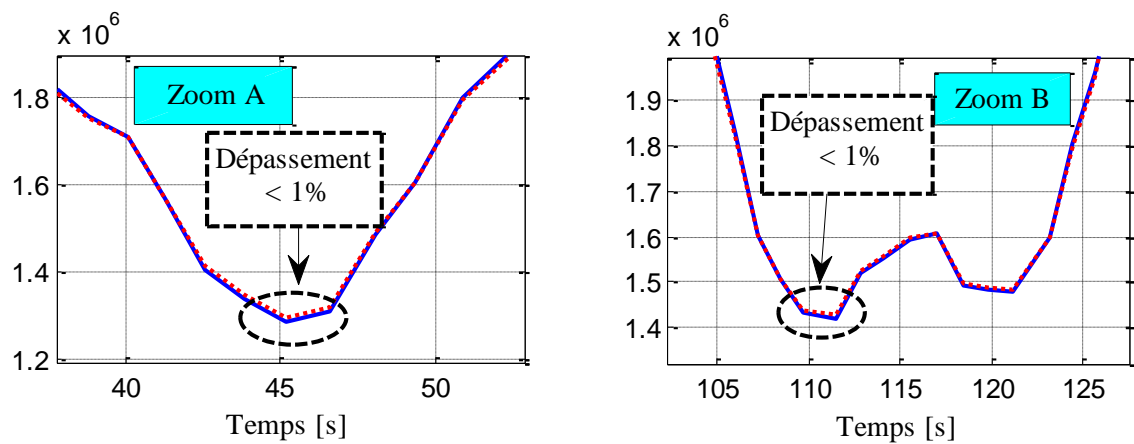
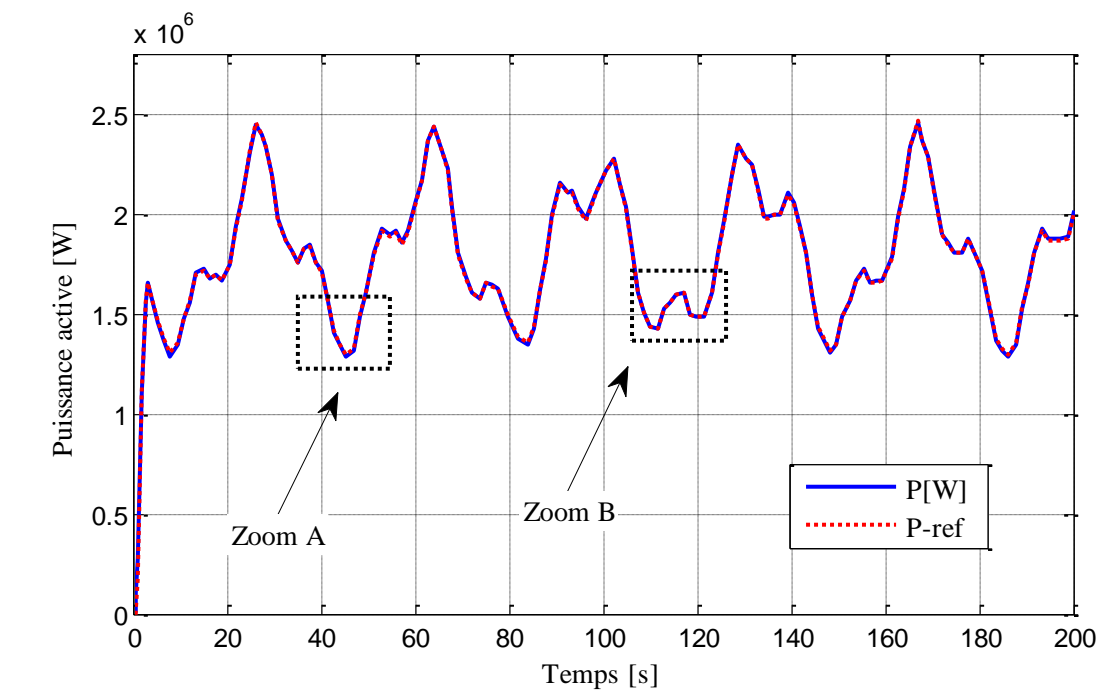


Figure V.17 Evolution de la puissance active du turbine obtenue par MADA-RNA et MPPT-RNA.

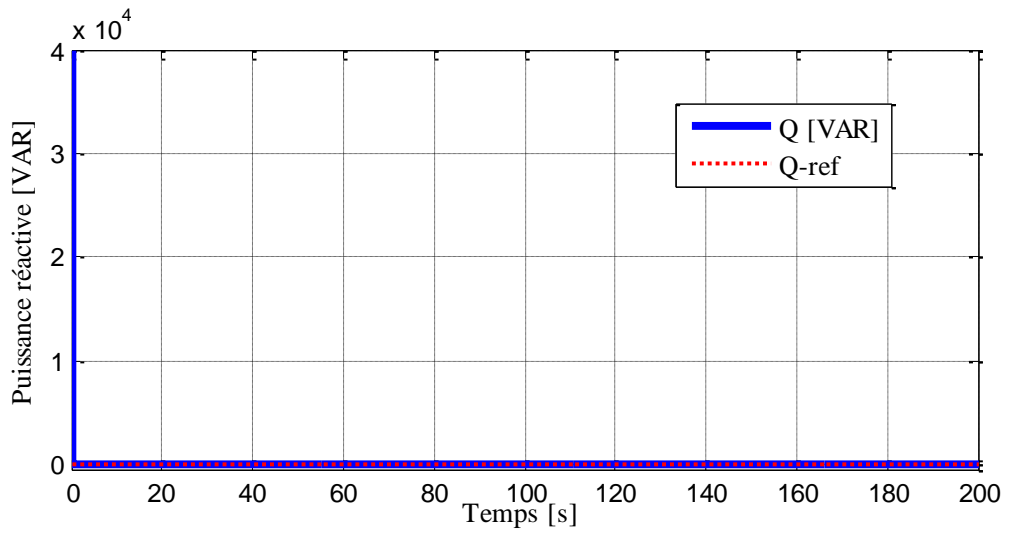


Figure V.18 Puissance réactive statorique et sa référence

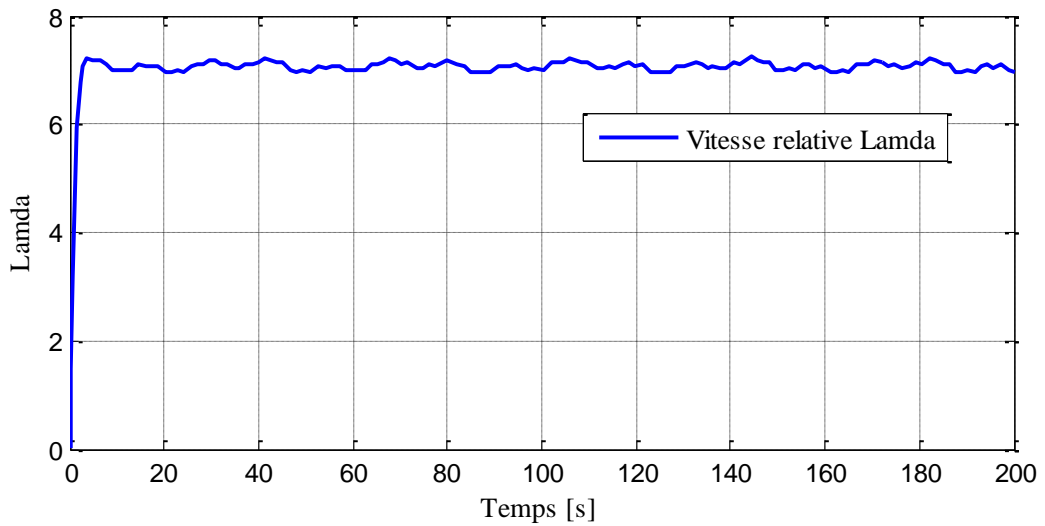


Figure V.19 Vitesse relative de la turbine

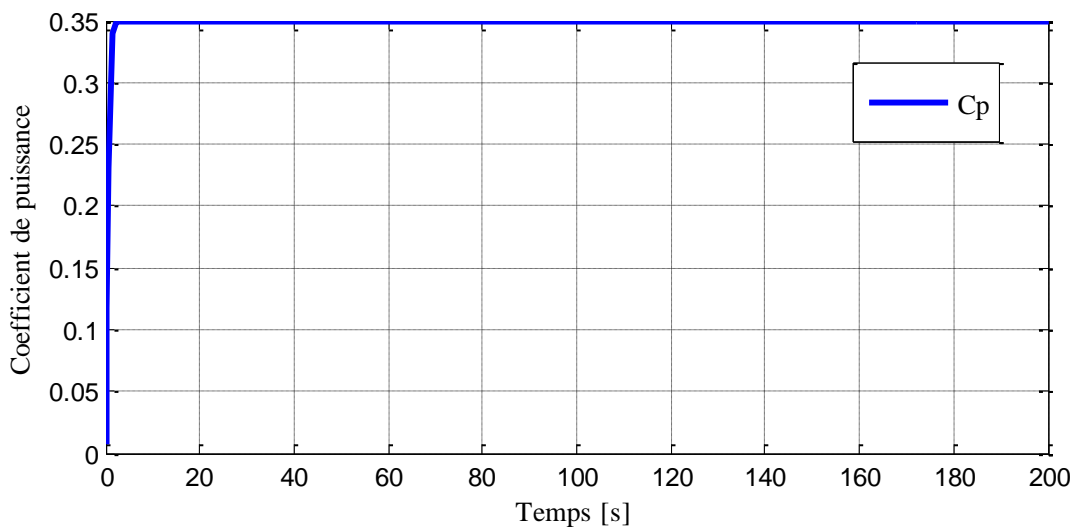
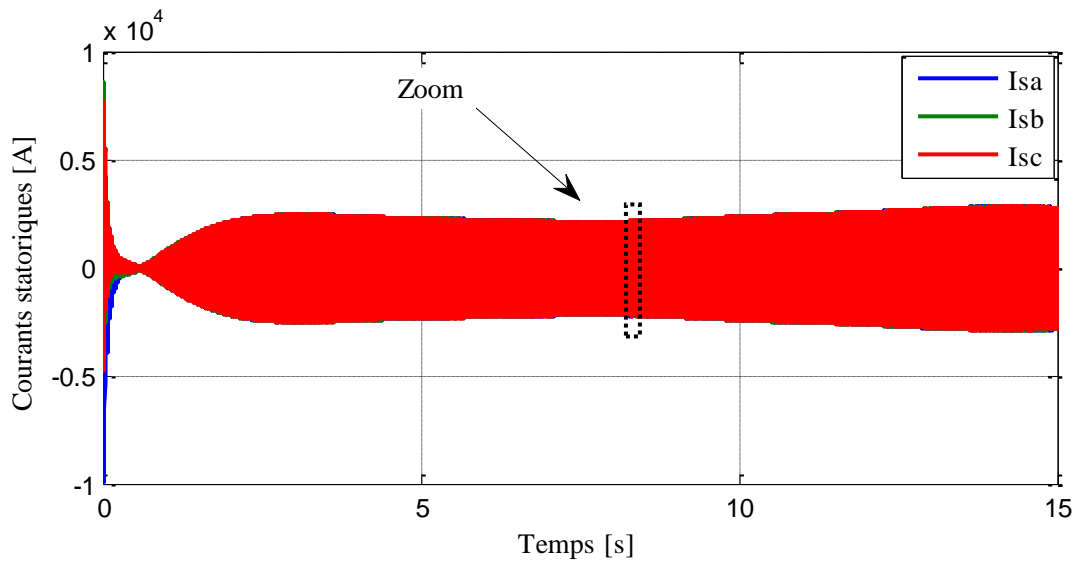
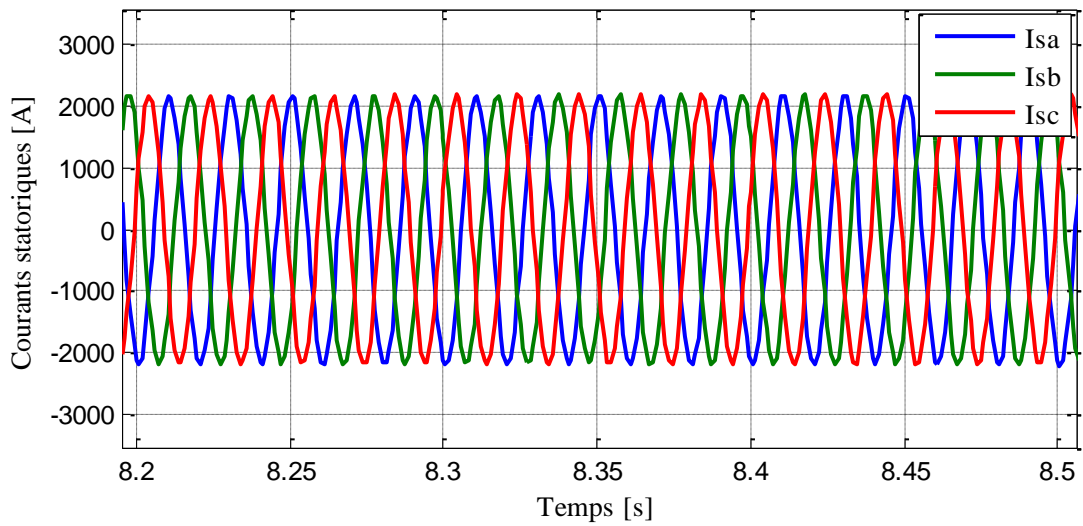


Figure V.20 Coefficient de puissance de la turbine

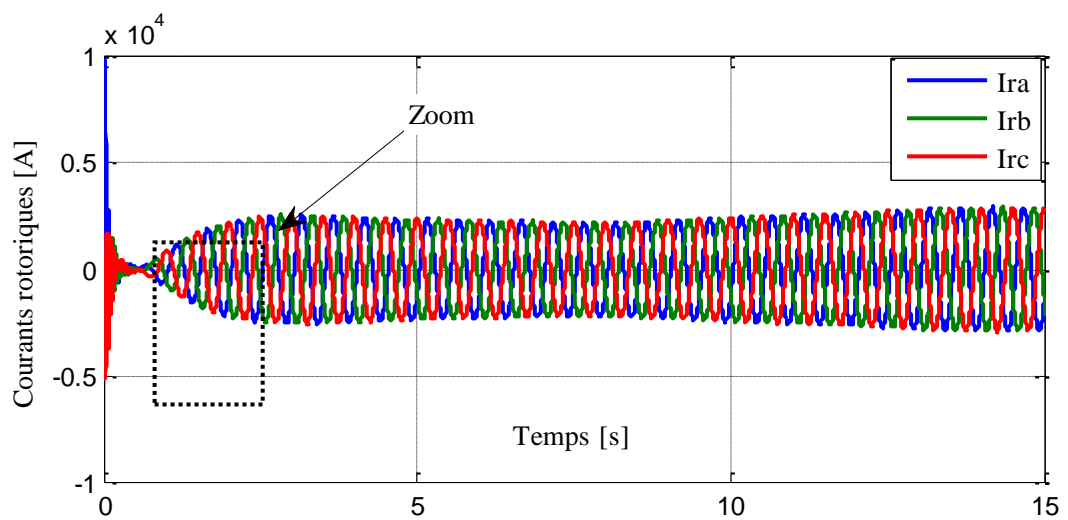


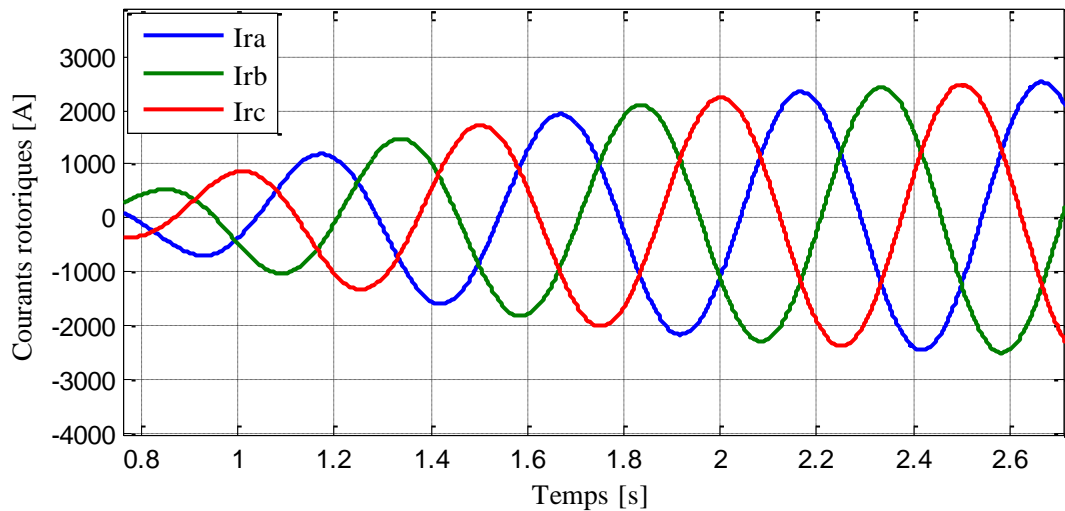
(a)



(b)

Figure V.21 (a) Les courants statoriques triphasées, avec (b) un zoom





(b)

Figure V.22 (a) Les courants rotoriques triphasés, avec (b) un zoom

V.13 Interprétation des résultats

Pour visualiser le comportement de la commande neuronal des puissances, dans cette partie, nous avons soumis cette commande à des échelons des puissances active et réactive. Les figures (V.9) et (V.10) montrent respectivement, les puissances active et réactive envoyées à partir de la MADA ainsi que leurs références. Dans ces figures, on remarque que les puissances active et réactive suivent leurs références correctement, de ce fait la commande indépendante de ces deux grandeurs a été réalisée avec succès en utilisant les réseaux de neurones artificiels.

Les différentes performances de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne proposée ont été obtenues grâce à une application d'un profil du vent (Figure V.13) qui permet de passer par des vitesses au-dessous et au-dessus de la vitesse du synchronisme du générateur pour mettre en évidence les deux modes de fonctionnement hypo-synchrone et hyper-synchrone.

La puissance active illustrée dans la figure V.17 suit sa référence correctement et varie avec la variation de la vitesse du vent, cela signifie que le générateur fonctionne à la vitesse optimale et la puissance électrique convertie à travers le générateur éolien est toujours en maximum. Donc, cette simulation confirme l'efficacité de la technique de commande RNA-MPPT. La puissance réactive injectée au réseau électrique est nulle (Figure V.18), ça signifie que le système éolien fonctionne avec un facteur de puissance unitaire et le réseau ne reçoit que la puissance active.

Les figures V.21 et V.22 montrent que les courants obtenus au stator et au rotor sont de formes sinusoïdales, ce qui implique une énergie propre sans harmoniques fournie par le MADA.

V.14 Contrôleur RNA-MPPT selon la méthode P&O

Dans cette partie, un nouveau contrôleur RNA-MPPT, basé sur la perturbation et l'observation, a été projeté et étudié. Le contrôleur MPPT développé est testé sur un générateur MADA contrôlé par un contrôle en mode coulissant. Le contrôleur RNA-MPPT proposé est établi sur la loi similaire de la méthode de perturbation et d'observation (P&O), diminuant ou augmentant la vitesse du générateur en fonction du signe de $(dP/d\Omega)$, le contrôleur doit le déplacer à droite ou à gauche du MPP. La règle fondamentale du contrôleur RNA-MPPT est récapitulée dans le Tableau V.2.

dP	dΩ	dP/ dΩ	Augmentation/diminution de Ω
+	+	+	$\Omega(s) = \Omega(s-1) + \Delta\Omega$
+	-	-	$\Omega(s) = \Omega(s-1) - \Delta\Omega$
-	+	-	$\Omega(s) = \Omega(s-1) - \Delta\Omega$
-	-	+	$\Omega(s) = \Omega(s-1) + \Delta\Omega$

Tableau V.2 Règle fondamentale du contrôleur RNA-MPPT

Les avantages de la méthode proposée sont les suivants: bonne précision, ne nécessite pas d'information sur le coefficient de puissance C_{p-max} et le rapport de vitesse de pointe λ_{opt} et la courbe caractéristique de l'éolienne.

Une étude de simulation a été testée pour l'estimation de la vitesse du vent et le contrôle de suivi de la puissance maximale, en utilisant un réseau de neurones ayant trois couches. Les variables d'entrée du contrôleur RNA-MPPT sont la puissance de sortie (P) et la vitesse du générateur ($d\Omega$). Le schéma fondamental du système est illustré à la figure V.23.

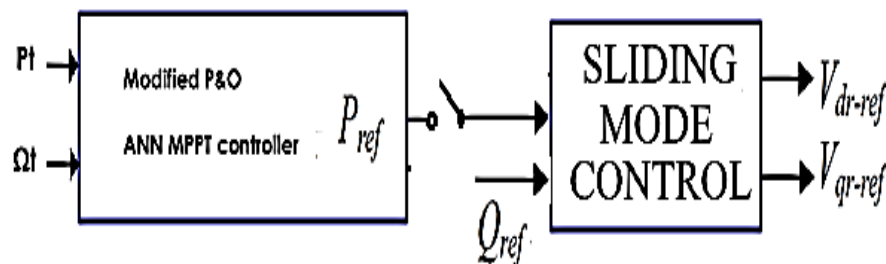


Figure V. 23 Schéma de principe de la commande du système d'éolienne.

La figure V.24 montre le régulateur ANN MPPT développé via Simulink.

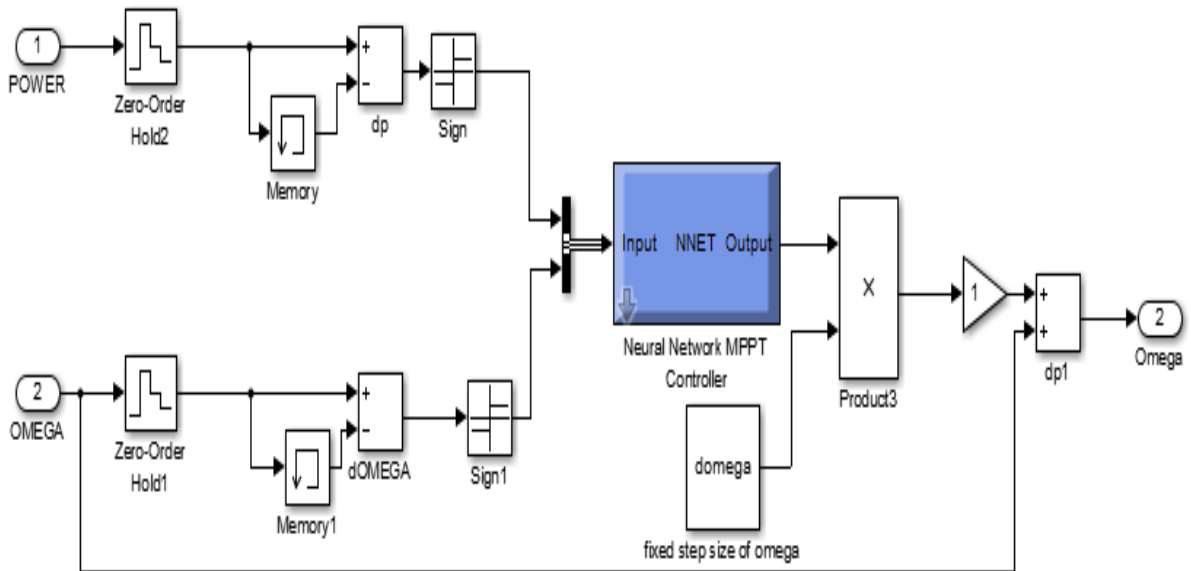


Figure V.24 Régulateur RNA-MPPT développé en utilisant la règle P&O

Les résultats de la simulation ont été établis à l'aide de l'environnement Simulink, à l'aide du profil de vent décrit à la figure V.25. Les figures V.26, V.27 et V.28 montrent le coefficient de puissance, la puissance de sortie et les vitesses de rotation optimales de la turbine, respectivement.

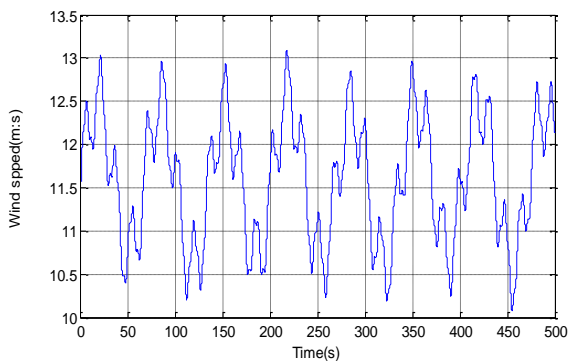


Figure V.24 Profil de vent

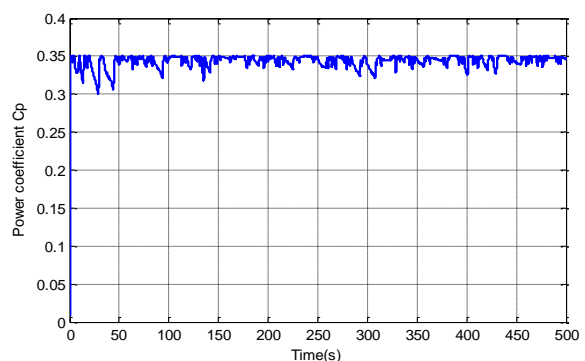


Figure V.26 Coefficient de puissance

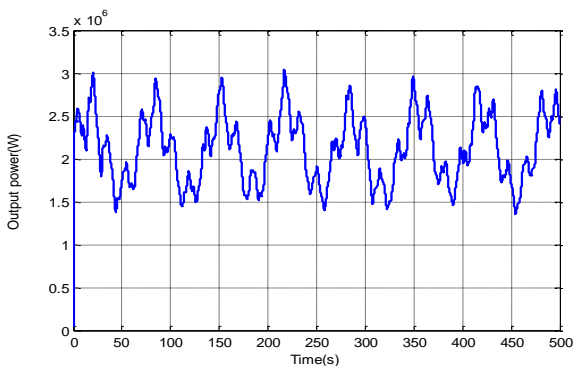


Figure V.27 Puissance du sortie de la turbine

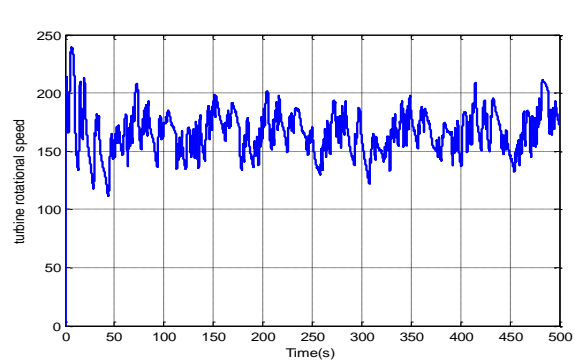


Figure V.28 Vitesses de rotation optimales

D'après les figures, il est clair que le système éolien fonctionne à sa puissance maximale. Le coefficient de puissance et la puissance de sortie correspondent exactement à la valeur nominale respectivement 0,35 et 3 MW. Les résultats obtenus montrent les performances élevées du régulateur RNA-MPPT proposé. Ces résultats de simulation sont proches des résultats théoriquement attendus.

V.14 Conclusion

A partir du comportement du cerveau humain, les chercheurs ont arrivé à construire des modèles neuronaux artificiels plus complexes. Les réseaux de neurones présentent donc une très grande diversité. Dans ce chapitre, nous avons présenté les réseaux de neurones artificiel, nous avons commencé notre étude par quelques généralités sur les RNAs, les concepts de base de cette technique, un bref historique et le modèle mathématique d'un neurone formel, nous avons abordé ensuite une étude sur l'algorithme du rétropropagation qui a prouvé son efficacité dans la pratique avec ses capacités d'apprentissage et d'identification.

Le choix de l'architecture adéquate ou la détermination du pas d'apprentissage se fait par des essais successifs. Le grand avantage des RNAs comparés à la majorité des méthodes de l'intelligence artificielle ou des méthodes conventionnelles réside dans le principe fondamental de l'apprentissage. Un RNA est capable de reproduire un fonctionnement en ajustant uniquement ses poids. Ces réseaux de neurones permettent de résoudre plusieurs problèmes.

Les résultats de simulations ont montré que l'application des réseaux de neurones présente des améliorations importantes par rapport aux techniques classiques (en terme d'atténuation des dépassements au niveau des régimes transitoires et l'insensibilité aux variations paramétriques, c'est pour cette raison que cette méthode est utilisé pour l'extraction et le contrôle des puissances.

Chapitre VI

**Utilisation des algorithmes génétiques
pour extraire la puissance maximale
d'un système éolien à base d'une
MADA**

VI.1 Introduction

L'évolution biologique à engendrée depuis des millénaires des systèmes vivants, autonomes, aptes à résoudre des problèmes difficiles et capables de s'adapter à des environnements complexes, incertains et en constante transformation. La grande variété des situations auxquelles la vie s'est adaptée laisse penser que le processus de l'évolution est capable de résoudre de nombreuses classes de problèmes. Les mécanismes de l'évolution reposent essentiellement sur la compétition qui sélectionne les individus les mieux adaptés à leur milieu en leur assurant une descendance sous forme d'une coopération mise en œuvre par la reproduction [111].

La vie artificielle est l'étude des systèmes conçus par l'homme, qui présentent des comportements similaires aux systèmes vivants naturels. Elle complète l'approche traditionnelle de la biologie, définie étymologiquement par étude des êtres vivants, en essayant de synthétiser leurs comportements sur support artificiel [112].

Dans ce chapitre, nous dressons un état de l'art des algorithmes génétiques qui s'inspirent de l'évolution génétique des espèces en présentant les opérateurs génétiques simple.

Les Algorithmes Génétiques (AGs) ont été initialement développés par John Holland (1975). C'est au livre de Goldberg (1989), leurs champs d'application sont très vastes. Outre leur application plus spécifique au contrôle des systèmes non linéaire discutée dans ce chapitre, les AG sont utilisés en programmation génétique (Koza 1992), en théorie du contrôle optimal (Krishnakumar et Goldberg (1992), Michalewicz, Janikow et Krawczyk (1992) et Marco et al. (1996) et plus récemment Jamshidi et al. (2003)), ou encore en théorie des jeux répétés (Axelrod (1987)) et dynamiques (Özyildirim (1997) et Özyildirim et Alemdar (1998)), ainsi que pour l'optimisation de fonctions (De Jong (1980)) et pour le contrôle de pipeline (Goldberg (1981)).

Les raisons de ce grand nombre d'applications sont la simplicité et l'efficacité de ces algorithmes.

Les Algorithmes Génétiques sont des techniques d'optimisation globale applicable aux systèmes linéaires et nonlinéaires, ils représentent une famille assez riche et très intéressante d'algorithmes stochastiques d'optimisation qui sont fondés sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique. Le principe de ces algorithmes est de procéder par une recherche aléatoire (stochastique) sur un espace important et à travers une population de pseudo-solutions sous un espace de données (pool génétique) dont le but est d'optimiser une fonction prédéfinie appelée critère, fonction coût, d'adaptation ou d'adéquation, ou encore fonction objective "fitness". Ils permettent donc de faire évoluer un ensemble initial de solutions vers un ensemble final (formulés à maximiser ou à minimiser cette fonction) [113] [114].

La robustesse est l'une des caractéristiques principales des algorithmes génétiques ; ils permettent de fournir une ou plusieurs solutions de bonne qualité à des problèmes très variés, en sollicitant un investissement (temps et puissance de calcul) assez faible [110].

Une grande partie de fonctionnement de l'AG est basée sur le hasard. Bien qu'ils utilisent le hasard, les AGs ne sont pas purement aléatoires. Ils exploitent efficacement l'information obtenue précédemment pour spéculer sur la position de nouveaux points à explorer, avec l'espoir d'améliorer la performance [115].

VI.2 Présentation et principes des algorithmes génétiques

Un algorithme génétique implémente une version très simplifiée et très schématique des mécanismes de l'évolution biologique. A partir d'un problème qu'on cherche à résoudre, un algorithme génétique est défini, selon Lerman et Ngouenet (1995), par la donnée des quatre éléments de base suivants :

- ▶ *Individu/chromosome/séquence* : une solution potentielle du problème qui correspond à une valeur codée de la variable (ou des variables) en considération.
- ▶ *Population* : un ensemble de chromosomes ou de points de l'espace de recherche (donc des valeurs codées des variables).
- ▶ *Environnement* : l'espace de recherche (caractérisé en termes de performance correspondant à chaque individu possible).
- ▶ *Fonction de performance* : la fonction - positive - que nous cherchons à maximiser car elle représente l'adaptation de l'individu à son environnement.

VI.3 Fonctionnement des Algorithmes Génétiques

Les algorithmes génétiques sont des algorithmes évolutionnistes d'optimisation qui recherchent le ou les extrêmes d'une fonction définie sur un intervalle de données. Fondés sur la théorie de l'évolution de Darwin et sur les lois de la génétique. Ces algorithmes fonctionnent de la façon dont peut évoluer une population, utilisent des règles de transition probabilistes (inspirées de la nature), c'est l'interaction entre les différentes solutions pour arriver à une meilleure solution et la plus adaptée : des opérateurs comme la fonction d'évaluation permet de choisir de s'intéresser à une solution qui semble représenter un optimum local, on fait donc un choix délibéré, puis de la croiser avec une autre solution optimale localement, en général la solution obtenue par croisement est meilleure ou du même niveau que ses parents [116].

Un algorithme génétique fonctionne typiquement à travers un cycle simple de Cinq étapes [117]:

1. Initialisation : Une population initiale de N chromosomes est tirée aléatoirement.

2. Évaluation : Chaque chromosome est décodé, puis évalué.
3. Sélection : Création d'une nouvelle population de N chromosomes par l'utilisation d'une méthode de sélection appropriée.
4. Reproduction : Possibilité de croisement et mutation au sein de la nouvelle population.
5. Retour à la phase d'évaluation jusqu'à l'arrêt de l'algorithme.

La figure VI.1 illustre le cycle génétique de fonctionnement d'un algorithme génétique :

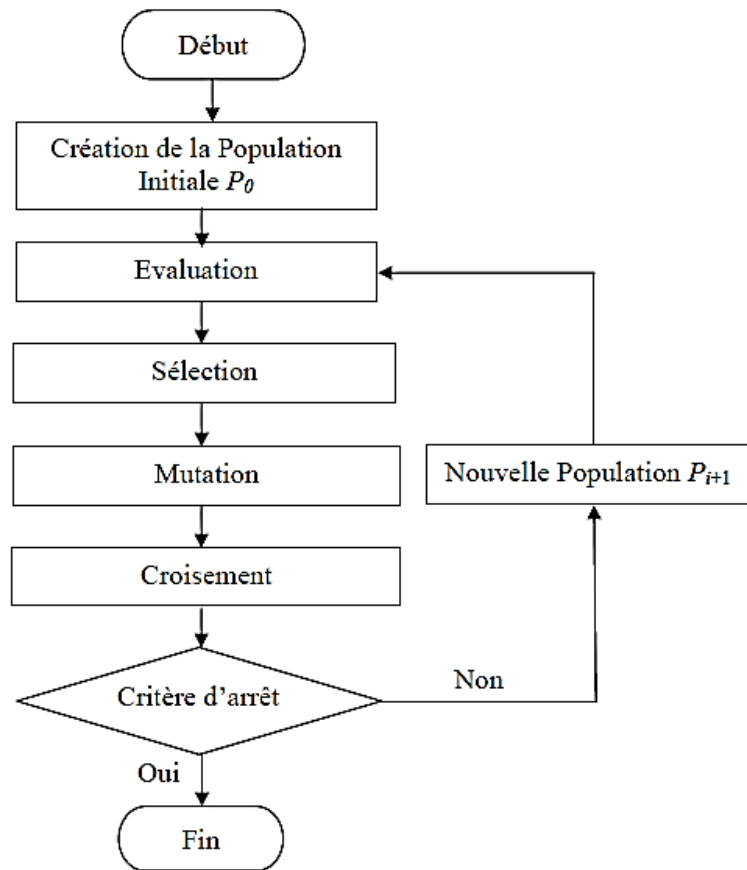


Figure VI.1 Schéma de principe d'un algorithme génétique.

Le schéma de principe décrit par la figure VI.1, est inspiré de la terminologie génétique. Les AGs fonctionnent avec une population regroupant un ensemble d'individus. Cette population est créée aléatoirement ou à partir d'une connaissance précédente concernant le problème à étudier. Chaque chromosome est constitué d'un ensemble de *gènes*. Pour chaque individu, on attribue une valeur calculée par une fonction appelée fonction d'adaptation ou fitness, c'est l'étape de l'évaluation. Ceci permet de sélectionner les chromosomes les plus adaptés. Ces chromosomes appelés "parents" sont soumis à des opérations génétiques (croisement, mutation) pour la production d'autres chromosomes appelés "enfants" constituant la nouvelle génération. Les étapes de l'AG sont répétées durant t cycles, l'arrêt de l'algorithme est fixé d'après un critère d'arrêt [118].

VI.4 Description détaillé des algorithmes génétiques

Dans cette section on va présenter avec plus de détails les différents opérateurs et paramètres d'un AG à savoir, la population, le codage des chromosomes, l'évaluation, les opérateurs de sélection, de croisement et de mutation.

VI.4.1 Population initiale

Le premier pas dans l'implantation des algorithmes génétiques est de créer une population composée de N individus représentant chacun une solution possible du problème donné. Le choix des individus conditionne fortement la rapidité de l'algorithme. Si la position de l'optimum dans l'espace de recherche est totalement inconnue, il est intéressant que la population soit répartie sur tout l'espace de recherche. Si par contre des informations à priori sur le problème sont disponibles, il paraît évident de générer les individus dans un espace particulier afin d'accélérer la convergence [119].

Disposant d'une population initiale souvent non homogène, la diversité de la population doit être entretenue aux cours des générations afin d'explorer le plus largement possible l'espace de recherche. (C'est le rôle des opérateurs de croisement et de mutation).

Où C_i représente le $i^{\text{ème}}$ chromosome dans la population, P_0 est la taille de la population (nombre de chromosomes), la représentation de la population est la suivante [118] :

$$P_0 = (C_1, C_2, C_3, \dots, C_i, \dots, C_N) \quad (\text{VI.1})$$

VI.4.2 Codage des chromosomes

Le codage est une modélisation d'une solution d'un problème donné. Par analogie avec la biologie, chaque individu de la population est codé par un chromosome ou génotype. Une population est donc un ensemble de chromosomes, chaque chromosome code un point de l'espace de recherche. L'efficacité de l'algorithme génétique va donc dépendre du choix du codage d'un chromosome [120]. Il existe principalement deux types de codage : le codage binaire et le codage réel.

VI.4.2.1 Le codage binaire

Dans l'algorithme génétique de Goldberg, l'utilisation doit choisir le plus petit alphabet qui permet une expression naturelle des paramètres du problème [121]. C'est pourquoi, l'alphabet binaire $\{0,1\}$ est particulièrement bien adapté à la représentation des paramètres (principe des alphabets minimaux). Ainsi selon John Holland, un chromosome était représenté sous forme de chaînes de bits contenant toute l'information nécessaire à la description d'un point dans l'espace ce qui permettait des opérateurs de sélection, croisement et de mutation simple [111].

Ce type de codage est appelé le Codage binaire. Il est assez simple à implémenter et les opérateurs de mutation et de croisement sont facilement construits, mais son utilisation nécessite un mécanisme de décodage. Ceci est l'inconvénient majeur de ce type de codage. On appelle Phénotype la valeur réelle de l'individu (après décodage), et Génotype la représentation binaire d'un individu [122].

VI.4.2.2 Codage réel

Le codage réel trouve ces origines dans les techniques de programmation évolutionnaire et les stratégies d'évolution. Il consiste à représenter chaque individu de la population par des nombres réels, il ne souffre plus des inconvénients du codage binaire, puisque, l'espace de recherche est identique à celui de représentation. Enfin l'étape de décodage avant l'évaluation de la fonction objectif n'est pas nécessaire. La représentation réelle propose une solution intéressante en éliminant toutes les opérations de conversion.

VI.4.3 Fonction d'adaptation évaluation (Gestion des contraintes) ou performance

Les AGs étant une technique d'optimisation, ils cherchent la qualité maximale, ce qui nécessite généralement la définition d'une opération rendant compte de la pertinence des solutions potentielles, à partir des grandeurs à optimiser.

Pour but d'orienter l'ensemble de la recherche génétique vers la meilleure solution, l'évaluation est une opération très importante, elle assure la survie d'un individu optimal, cela se fait par une fonction dite « Fitness ».(fitness function ; en terminologie anglo-saxonne) appelée aussi fonction d'évaluation, fonction de qualité ou fonction coût [123].

Le résultat fourni par la fonction d'adaptation va permettre de sélectionner ou de refuser un individu pour ne garder que les individus ayant le meilleur coût en fonction de la population courante. Elle donne, en valeur numérique positive (habituellement réelle), la qualité d'un individu. C'est selon cette valeur numérique qu'est calculée la chance de sélection de cet individu. [120].

Etant donnée une fonction réelle , le nombre d'optimisation sur l'espace de recherche E , s'écrit: $Max_{x \in E} F(x)$ (VI.2)

La fonction doit être positive sur l'ensemble du domaine E . Dans le cas contraire, il convient d'ajouter une valeur afin qu'elle soit positive : $Max_{x \in E} [F(x) + F_{\min}]$ (VI.3)

Dans beaucoup de problèmes, l'objectif est exprimé sous forme de minimisation d'une fonction coût g . Le passage du problème de minimisation au problème de maximisation peut être

réalisé les transformations suivantes [123] : $F(x) = \frac{1}{1 + g(x)}$ (VI.4)

VI.4.4 Opérateurs d'un AG

Le fonctionnement d'un AG est régi par trois opérateurs de base : la sélection, le croisement et la mutation. Ces opérateurs sont appliqués aux individus de la population avec l'espoir d'améliorer leurs caractéristiques génétiques et de les amener à s'adapter à leur environnement [124].

VI.4.4.1 Sélection

La sélection conditionne la capacité d'un individu à se reproduire. Elle détermine également la nouvelle topologie génétique qui servira de modèle pour la génération de nouveaux individus. Le résultat est une population intermédiaire constituée de copies des individus de la population des parents. C'est donc un outil d'exploitation des données génétiques contenues dans la population courante.

En règle générale, le nombre de copies d'un individu est lié directement à la fitness relative de l'individu au sein de la population. Plus la performance d'un individu est élevée par rapport à celle des autres, plus il a une chance d'être reproduit dans la population. Les individus ayant une grande fitness relative ont donc plus de chance d'être sélectionnés [129].

Cette opération est peut-être la plus importante puisqu'elle permet aux individus d'une population de survivre ou de mourir.

On trouve dans la littérature un nombre important de principes de sélection plus ou moins adaptés aux problèmes qu'ils traitent. Les trois principes de sélection suivants ont retenu notre attention :

VI.4.4.1.a Sélection par la roulette

Appelée aussi sélection par roue de la fortune. C'est la méthode la plus utilisée et la plus facile. Pour chaque individu, la probabilité d'être sélectionné est proportionnelle à son adaptation au problème.

Les parents sont sélectionnés en fonction de leur performance. Meilleur est le résultat donné par un individu, plus grandes sont ses chances d'être sélectionné. Il faut imaginer une sorte de roulette de casino sur laquelle sont placés tous les individus de la population, la place accordée à chacun des individus étant en relation avec sa valeur d'adaptation. Cette roulette est représentée par la figure [126]:

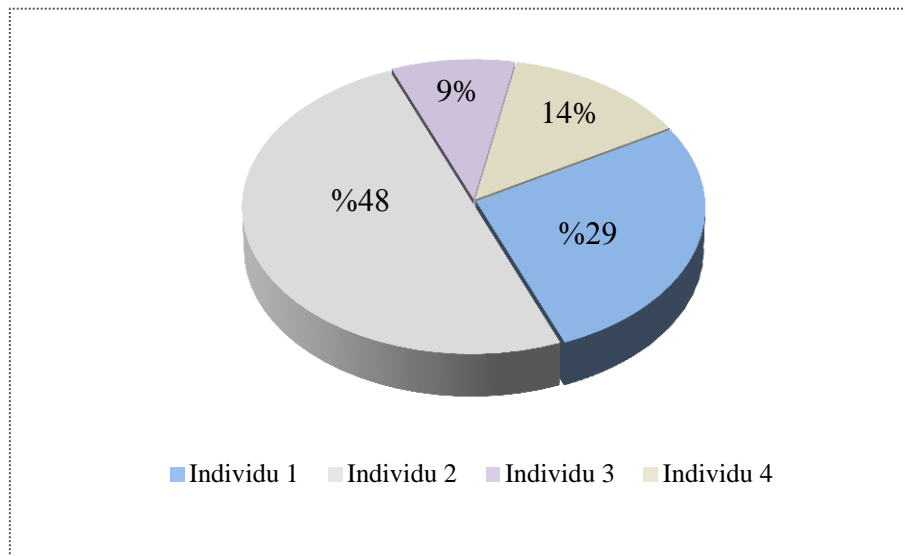


Figure VI.2 Exemple de sélection par la roulette

Selon cette figure, la population est constituée de quatre individus, l'individu 2 et 1 ont plus de chance pour être sélectionnés à cause de leurs performances. En effet, pour sélectionner à l'aide de la roulette, on fait tourner cette dernière N fois (taille de la population) de la façon suivante ; A chaque fois, on génère aléatoirement un nombre r dans l'intervalle $[0, 1]$. Ensuite, on compare ces nombres aux probabilités cumulatives q_j , tel que :

$$q_j = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_j \quad (\text{VI-5})$$

Où : $P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_j$ sont les probabilités de sélection de chaque individu. Cette probabilité est calculée d'après la relation suivante :

$$P_i = \frac{F(x_i)}{\sum_{k=1}^N F(x_k)} \quad (\text{VI.6})$$

Avec : $F(x_i)$ c'est la valeur de la fonction d'adaptation correspondante au $i^{\text{ème}}$ individu ; $\sum_{k=1}^N F(x_k)$ représente la somme de toutes les valeurs des fonctions d'adaptation de chaque individu c_i de la population P_0 .

Ensuite, si $r_1 < q_1$, l'individu c_1 est sélectionné, si non c_j est sélectionné, avec $2 \leq j \leq N$, tel que $q_{j-1} < r_1 < q_j$. On procède de la même manière pour le reste des r_i ($i=2 \dots N$).

VI.4.4.1.b Sélection par ordonnancement

Appelée aussi sélection par classement. Ce type de sélection est basé sur un principe de sélection le plus simple. Il consiste à attribuer à chaque individu son classement par ordre d'adaptation (croissant ou décroissant). Le meilleur (qui possède la meilleure fitness) sera numéro un, et ainsi de suite. On tire ensuite une nouvelle population dans cet ensemble d'individus

ordonnés. Cette procédure semble toutefois assez simpliste et exagère le rôle du meilleur élément au détriment d'autres éléments potentiellement exploitables. Le second, par exemple, aura une probabilité d'être sélectionné nettement plus faible que celle du premier. L'inconvénient majeur de cette méthode est la convergence prématurée de l'algorithme génétique. Une autre difficulté consiste à fixer une limite à la sélection, ce qui empêche parfois de garder des bons candidats pour les futures générations.

VI.4.4.1.c *Sélection par tournoi*

La sélection par tournoi augmente les chances pour les individus de piètre qualité de participer à l'amélioration de la population. Cette technique utilise la sélection proportionnelle sur des paires d'individus, puis choisit pour ces paires l'individu qui a le meilleur score d'adaptation.

Plusieurs variantes existent. On peut par exemple faire varier le nombre d'individus qui doivent s'affronter au départ, ou encore permettre ou non que le même individu soit éligible plusieurs fois lors d'un même tournoi [129].

Le principe de la sélection par tournoi est très rapide à implémenter. Un tournoi consiste en une rencontre entre plusieurs individus pris au hasard dans la population. Le vainqueur du tournoi est l'individu de meilleure qualité. Ce processus est répété plusieurs fois jusqu'à l'obtention de N individus. L'avantage d'une telle sélection est d'éviter qu'un individu très fort soit sélectionné plusieurs fois [126].

VI.4.4.1.d *Sélection uniforme*

Dans ce cas, la sélection se fait aléatoirement, uniformément et sans intervention de la valeur d'adaptation. C'est une technique très simple qui consiste à sélectionner un individu C_i de la population. Chaque individu a donc une probabilité $1/N$ d'être sélectionné, où N est le nombre total d'individus dans la population [125].

VI.4.4.2 *Reproduction (Croisement ou Crossover)*

Après avoir sélectionné les chaînes les mieux adaptées, celle-ci vont subir l'opération de croisement (ou recombinaison en terminologie anglo-saxonne) qui consiste à échanger des matériels génétiques entre deux chaînes reproductrices (parents) pour produire deux nouvelles chaînes (enfants). Il permet donc l'échange d'information entre les chromosomes (individus).

Cet échange d'informations offre aux algorithmes génétiques une part de leur puissance : quelque fois, de bons gènes d'un parent viennent remplacer les mauvais gènes d'un autre et créent des fils mieux adaptés que les parents. Pour effectuer cette opération, un pourcentage de la population sélectionnée notée $p'(Gt)$ sera soumis au croisement. Ainsi, l'opérateur de croisement choisit au hasard, et avec une probabilité fixée notée Pc , deux individus (deux parents) parmi cette

population. Il construit alors deux enfants en faisant l'échange de certains gènes choisis aléatoirement d'un parent avec ceux de l'autre. Les deux enfants issus de ce croisement sont injectés dans la population que l'on note $p''(Gt)$. Cette dernière sera alors constituée d'un pourcentage issu du croisement. Le reste est issu directement de la population $p'(Gt)$ sans aucune modification. Le nombre total d'individus dans $p''(Gt)$ est toujours égal au nombre d'individus de la population initiale.

Il existe plusieurs opérateurs de croisement qui dépendent essentiellement du type du codage et de la nature du problème à traiter. Nous présenterons quelques techniques dans ce qui suit :

VI.4.4.2.a Croisement à un point de coupure (ou discret)

Le croisement à un point est l'opérateur de croisement le plus simple. Il consiste à sélectionner un point de coupure, puis à subdiviser le génotype de chacun des parents en deux parties de part et d'autre de ce point. Les fragments obtenus sont alors échangés pour créer les génotypes des enfants (figure VI.3). Notons que le croisement s'effectue directement au niveau des gènes représentés soit en binaires ou en réels. Un chromosome ne peut pas être coupé au milieu d'un gène.

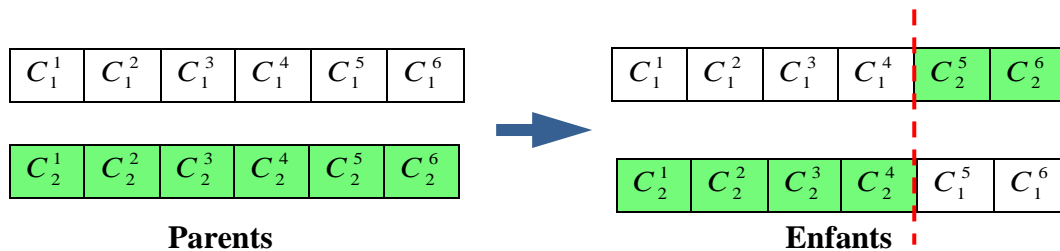


Figure VI.3 Représentation schématique du croisement en un point de coupure (un seul site)

VI.4.4.2.b. Croisement à deux points

Dans ce type de croisement deux parents sont considérés et deux positions de découpage sont sélectionnées uniformément au hasard (On choisit au hasard deux points de croisements successifs). Les deux points de croisement définissent une section compatible qui est utilisée pour effectuer des opérations d'échange de gènes, position par position.

Le croisement à deux points procède par des échanges de position. Au départ, les enfants sont des copies conformes des parents, respectivement. Puis les gènes se trouvant entre les points de coupure sont échangés deux à deux, position par position (C_2^4 avec C_1^4 , et C_2^5 avec C_1^5).

La figure suivante illustre ce type de croisement.

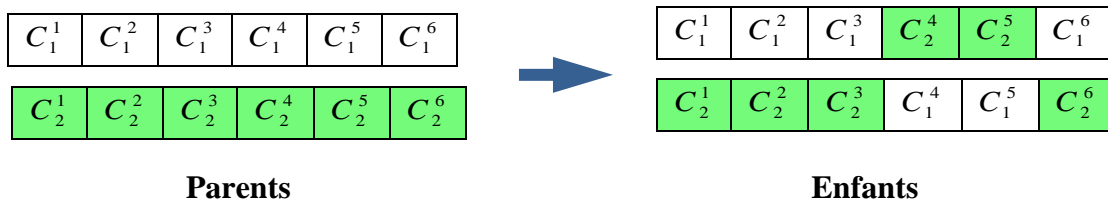


Figure VI.4 Croisement à deux points de coupure

VI.4.4.2.c Croisement multiple (multi-points)

Le croisement multiple s'applique autant pour une codification binaire que réelle des chromosomes, c'est un opérateur très utilisé dans différentes applications du fait que les résultats obtenus sont satisfaisants.

Cet opérateur est une généralisation du croisement à un point avec n points de croisement. Ces points choisis aléatoirement coupent chaque parent en $n+1$ parties.

Un, deux, ..., voire jusqu'à $L-1$ points de croisements sont tirés au hasard, le nombre de points de coupure généré est en moyenne $L/2$ (où L , est la longueur du chromosome). Chaque chromosome se retrouve donc séparé en "segments". Puis chaque segment du parent 1 est échangé avec son "homologue" du parent 2 selon une probabilité de croisement P_c . De ce processus résulte 2 fils pour chaque couple [112].

L'individu est représenté sous la forme d'un anneau et l'échange de gènes entre les deux parents s'effectue de la façon suivante (voir figure VI.5).

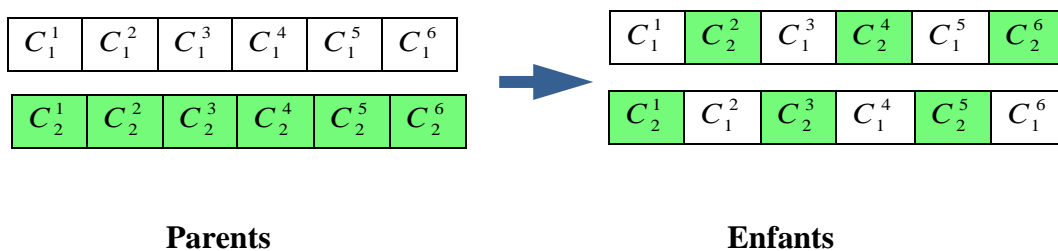


Figure VI.5 Croisement multiple (cas de 5 points de coupure)

On peut noter que le nombre de points de croisements ainsi que la probabilité de croisement P_c permettent d'introduire plus ou moins de diversité. En effet, plus le nombre de points de croisements sera grand et plus la probabilité de croisement sera élevée plus il y aura d'échange de segments, donc d'échange de paramètres, d'information, et plus le nombre de points de croisements sera petit et plus la probabilité de croisement sera faible, moins le croisement apportera de diversité [120].

VI.4.4.2.d Croisement arithmétique (barycentrique)

Dans cette technique de croisement, on choisit aléatoirement des positions d'échange, puis on effectue une moyenne arithmétique pondérée par un coefficient a . Lorsque cette opération est appliquée à deux parents C_1^i et C_2^i , deux enfants E_1^i et E_2^i sont générés, tels que [128]:

$$\begin{cases} E_1^i = aC_1^i + (1-a)C_2^i \\ E_2^i = (1-a)C_1^i + aC_2^i \end{cases} \quad (\text{VI.7})$$

La figure VI.6 illustre un exemple d'application de croisement arithmétique.

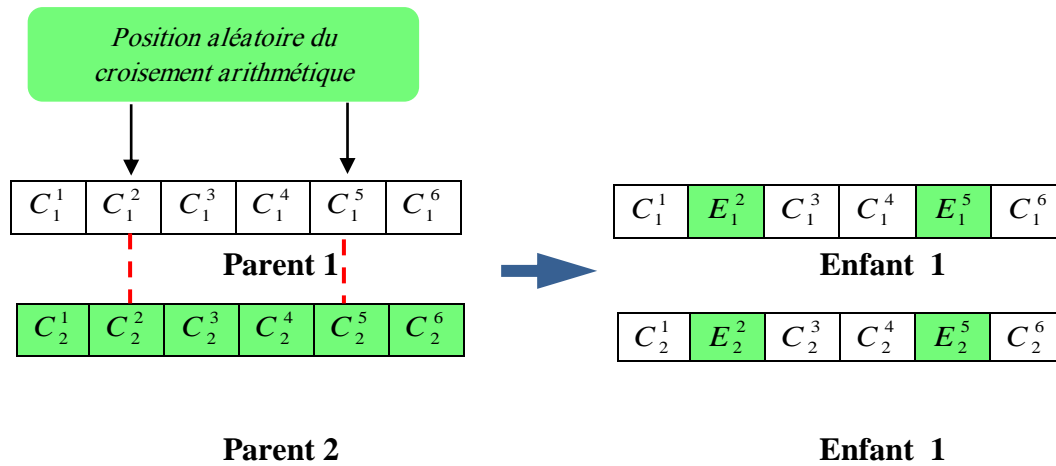


Figure VI.6 Croisement arithmétique.

D'après cette figure, les deux nouveaux deuxièmes et Cinquièmes gènes générés sont:

$$\begin{cases} E_1^2 = aC_1^2 + (1-a)C_2^2 \\ E_2^2 = (1-a)C_1^2 + aC_2^2 \\ E_1^5 = aC_1^5 + (1-a)C_2^5 \\ E_2^5 = (1-a)C_1^5 + aC_2^5 \end{cases} \quad (\text{VI.8})$$

Pour un croisement arithmétique uniforme, la valeur de a est une constante choisie par l'utilisateur, par contre si la valeur de a est générée aléatoirement dans l'intervalle $[-0.5 ; 1.5]$, c'est le cas d'un croisement arithmétique non uniforme.

VI.4.4.2.e Croisement uniforme (continu)

La mise en œuvre de ce procédé est fort simple, elle consiste à définir de manière aléatoire un masque pour chaque couple d'individus ; c'est-à-dire une chaîne de bits de même longueur que les chromosomes des parents sur lesquels il sera appliqué. Son fonctionnement est illustré par la figure suivante [117] :

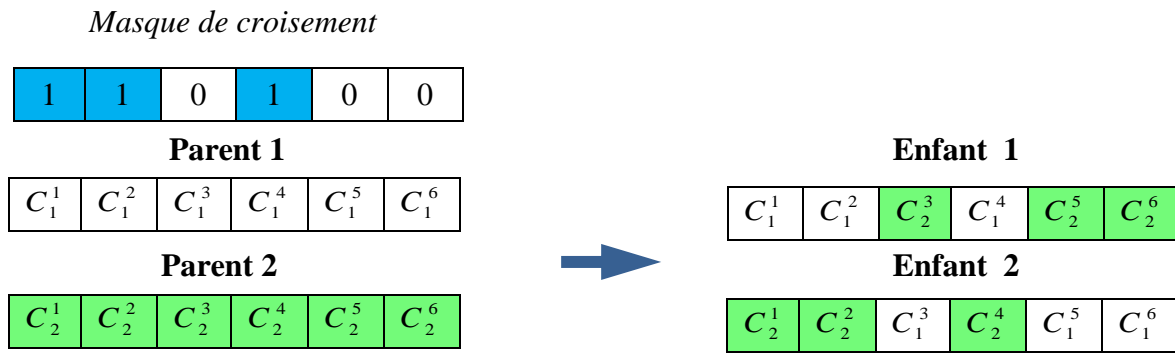


Figure IV.7 Croisement uniforme

Soient C_1^i et C_2^i les parents, et E_1^i et E_2^i les enfants. Pour chaque locus de E_1^i , on détermine aléatoirement (avec une probabilité P) si l'allèle est fourni par C_1^i ou par C_2^i . Le second enfant E_2^i se voit affecter l'allèle du parent qui n'a pas été retenu.

Si E^i dénote la valeur de l'allèle au niveau du locus i pour le chromosome C , n la longueur du chromosome et r un nombre aléatoire, on a :

$$\begin{cases} r = 1 & \Rightarrow E_1^i = C_1^i, E_2^i = C_2^i \\ r = 0 & \Rightarrow E_1^i = C_2^i, E_2^i = C_1^i \end{cases} \tag{VI.9}$$

Pour ce qui est des valeurs optimales du taux de croisement P_c , Il est généralement admis que les valeurs de P_c comprises entre 0.8 et 0.95 donnent les résultats les plus satisfaisants dans la plus plupart des cas.

VI.4.5 Mutation

Opérateur de mutation:

La mutation consiste simplement à changer la valeur allélique d'un gène d'un individu avec une probabilité p_m très faible, généralement comprise entre 0.001 et 0.01. On peut aussi prendre $p_m = 1/\lg$ où \lg est la longueur de la chaîne de bits codant notre chromosome. Il est possible d'associer une probabilité différente de chaque gène. Et ces probabilités peuvent être fixes ou évoluer dans le temps.

L'opérateur de mutation modifie donc de manière complètement aléatoire les caractéristiques d'une solution, ce qui permet d'introduire et de maintenir la diversité au sein de notre population de solutions. Cet opérateur joue le rôle d'un élément perturbateur, il introduit du bruit au sein de la population. Il primordiale puisqu'il donne la garantie que tout point de l'espace de recherche peut être atteint lors du processus d'exploitation, ce qui correspond à la propriété d'ergodicité de

parcours d'espace, essentielle aux AG pour leurs propriétés de convergence. En effet les preuves théoriques de convergence des AG peuvent fonctionner sans croisement, mais pas sans mutation.

La mutation ne crée généralement pas de meilleures solutions au problème, mais, elle évite l'établissement de populations uniformes incapables d'évoluer. Ceci permet à l'AG de converger vers des solutions globales et éviter les extrema locaux [130].

L'opérateur de mutation fonctionne comme suit ; pour les problèmes discrets, un gène du chromosome est tiré aléatoirement et sa valeur est remplacée par une des autres valeurs possibles, tirée aléatoirement elle aussi. Dans le cas des problèmes continus, le gène est également tiré aléatoirement, et remplacé par une valeur aléatoire du domaine d'extension des gènes (espace d'état). La figure suivante montre un exemple de mutation :

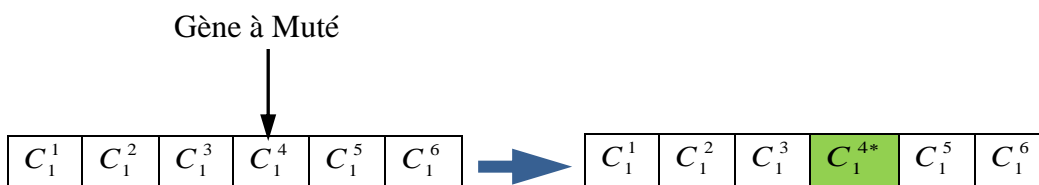


Figure VI.8 Exemple d'une mutation en un point dans une chaîne binaire

Plusieurs techniques de mutation ont été développées dans la littérature. Certaines d'entre elles s'appliquent sur des gènes dont la représentation est binaire et d'autres sur des gènes de type réel.

Dans le cas d'un **codage binaire**, la mutation consiste à compléter la valeur d'un bit du chromosome ou de plusieurs bits, chaque bit $C_k^i \in \{0,1\}$ est remplacé par son complémentaire

$$\overline{C_k^i} = 1 - C_k^i.$$

Pour les chaînes codées en base n , la mutation consiste à remplacer le gène initial par un chiffre en base n choisi au hasard [125].

Dans le cas d'un **codage réel**, deux opérateurs de mutation utiliser : la mutation uniforme et la mutation non uniforme. En supposant fixée la probabilité de mutation P_m , un tirage au hasard pour chaque gène C_k^i d'un chromosome C_k permet de décider si ce gène doit être modifié ou non. Nous supposons que le gène prend des valeurs dans l'intervalle $[C^{i \min}, C^{i \max}]$. Pour la mutation uniforme, qui est une simple extension de la mutation binaire, on remplace le gène C_k^i sélectionné, par une valeur quelconque C_k^{i*} tirée aléatoirement dans l'intervalle $[C^{i \min}, C^{i \max}]$.

Pour la mutation non uniforme, le calcul de la nouvelle valeur d'un gène est un peu plus complexe. Le gène C_k^i subit des modifications importantes durant les premières générations, puis graduellement décroissantes au fur et à mesure que l'on progresse dans le processus

d'optimisation. Pour une génération t , on choisit au hasard une valeur binaire qui décidera si le changement doit être négatif ou positif. La nouvelle valeur C^{i*} du gène C_k^i est donnée par [125]:

$$C_k^{i*} = \begin{cases} C_k^i + \Delta(t, C_k^{i \max} - C_k^i) & \text{si } s = -1 \\ C_k^i - \Delta(t, C_k^i - C_k^{i \min}) & \text{si } s = 1 \end{cases}$$

(VI.10)

Où $\Delta(t, y)$ est une fonction qui définit l'écart entre la nouvelle valeur et la valeur initiale à la génération t et s est nombre aléatoire tel que $s \in \{-1, 1\}$.

Une fonction $\Delta(t, y)$ correspondante à une décroissance exponentielle de l'écart à travers les générations est définie par [129] :

$$\Delta(t, y) = y * \left(1 - r^{\left(\frac{1-t}{T} \right)^\beta} \right) \quad (\text{VI.11})$$

Avec:

r Nombre produit aléatoirement dans l'intervalle $[0, 1]$.

t Numéro de la génération.

T Indice de génération pour laquelle l'amplitude de la mutation s'annule.

β Paramètre de l'opérateur de mutation, souvent $\beta = 5$.

y peut prendre les valeurs $(C_{\max} - C_i)$ ou $(C_i - C_{\min})$ à condition que le résultat ne sorte pas de l'intervalle $[C^{i \min}, C^{i \max}]$.

VI.5 Influence des paramètres d'un AG

L'élaboration d'un algorithme génétique nécessite le réglage de certains paramètres. Ce réglage a une influence sur la convergence de l'algorithme génétique, la rapidité et les résultats obtenus. Cependant, il n'existe pas de règle spécifique pour ajuster les paramètres d'un AG, et ils sont souvent choisis de manière empirique. Quelques remarques sont alors à soulever [131] :

VI.5.1 Taille de la population

Les conditions de convergence changent avec la taille de la population, lorsque celle-ci est grande, sa diversité augmente ce qui diminue la convergence vers un optimum local, le temps d'exécution de chaque génération augmente, la recherche risque de s'effectuer d'une façon redondante et l'efficacité de l'algorithme est globalement affectée. Par contre, si la taille de la population est petite, alors la probabilité de s'attarder sur des extremums locaux (mauvais chromosome) est grande.

Le problème qui se pose c'est comment fixer la taille de cette population. Le choix de ce paramètre exige un bon compromis entre le temps de calcul et la qualité du résultat. Certains chercheurs fixent la taille de la population entre 20 et 100 d'une manière empirique, on trouve même ceux qui ont fixé ce nombre à 50. De plus, il y'a des chercheurs qui utilisent une taille de population de 5 à 10 fois le nombre des variables à optimiser [132].

VI.5.2 Probabilité des opérateurs génétiques

VI.5.2.1 Probabilité de croisement

La probabilité de croisement a une influence considérable sur la vitesse de convergence d'un algorithme génétique. Elle dépend en général de la forme de la fonction de performance. Son choix est bien souvent heuristique. Plus elle est élevée, plus la population subit de changements importants et plus elle favorise la recombinaison des individus tout en favorisant de tomber dans un optimum local. Par contre, si ce taux est trop bas, la population n'évolue pas assez vite. Pour trouver des valeurs optimales de ce paramètre des critères sont proposés par des chercheurs à travers des expériences effectuées et des connaissances a priori. Les valeurs généralement admises sont comprises entre 0.5 et 0.99 .

VI.5.2.2 Probabilité de mutation

Ce taux doit être assez faible par rapport à celle du croisement de manière à ne pas perturber l'évolution de l'algorithme. Une valeur élevée transformera l'algorithme en une recherche aléatoire et ainsi, de s'éloigner de l'optimalité (solution sous-optimale), alors qu'une valeur très faible rendra impossible l'extraction des optimums locaux. Les valeurs classiques pour ce paramètre varient de 0.001 à 0.25 [131].

VI.5.3 Critère d'arrêt

Comme dans tout algorithme itératif, il faut définir un critère d'arrêt. Celui-ci peut être choisi par plusieurs façons, soit par le test de la fonction coût (lorsque le résultat atteint une solution satisfaisante), soit par le nombre de générations (si un certain nombre de générations est dépassé), soit par le test de changements dans la population (s'il n'y a d'amélioration pendant un certain nombre de générations) [112].

VI.6 Applications de technique MPPT-GA pour l'optimisation de système éolienne

En raison de changement du point de puissance maximale en fonction de la vitesse de vent (conditions climatiques), une grande importance est donnée au suiveur du point de puissance

maximum. Ainsi, les techniques heuristiques basées sur le concept de l'optimisation sont de nos jours de grande importance en raison de leur adaptabilité avec les systèmes éoliennes.

L'objectif de ce partie est l'élaboration d'une structure de commande MPPT basé sur Les algorithmes génétiques (MPPT-AG), afin d'atteindre le MPP quelques soient les conditions climatiques. On donne les observations, les interprétations des résultats et on termine par les conclusions qu'on peut tirer à partir de ces résultats.

VI.6.1 Optimisation du régulateur PI par les Algorithme Génétiques

Les algorithmes génétiques peuvent être utilisés en tant que méthode de recherche combinatoire incluant, des propriétés base sur le parallélisme et l'exploration, des heuristiques de recherche intéressante basées sur des principes d'auto-organisation. Les algorithmes génétiques peuvent constituer une alternative intéressante lorsque les méthodes d'optimisation traditionnelles ne parviennent pas à fournir efficacement des résultats fiables. Cependant, la plupart des mises en œuvre courantes des AG nécessitent un environnement suffisamment tolérant pour laisser à l'algorithme le droit à l'erreur, ceci implique que l'environnement doit permettre l'essai et l'évaluation de solutions-candidates médiocres. L'algorithme génétique employé seul constitue un mécanisme de recherche souvent "trop aveugle" alors il peut rendu plus efficace si on le combine avec d'autres méthodes de recherche (régulateur classique, régulateur flou ou un système de commande neuronal). Les paramètres de régulateur PI sont déterminés difficilement et les résultats ne sont pas toujours optimale, afin de remédier ce problème et pour améliorer les performances, cette partie est consacrée à l'application des algorithmes génétiques AGs pour la conception et l'optimisation des gains de régulateurs PI classique. Le but est d'optimiser le temps de réponse ; c'est-à-dire de minimiser l'erreur entre la puissance et sa référence.

L'algorithme génétique a été implémenté en Matlab. Après plusieurs tests préliminaires, les valeurs suivantes ont été choisies empiriquement comme paramètres de notre algorithme génétique : la taille de la population N est égale à 20 chromosomes, le nombre de bits par chromosome est égale à 16, la probabilité de mutation est égale à 0.02, la probabilité croisement est égale à 0.7, le nombre de générations (le test arrêt) est égal à 100.

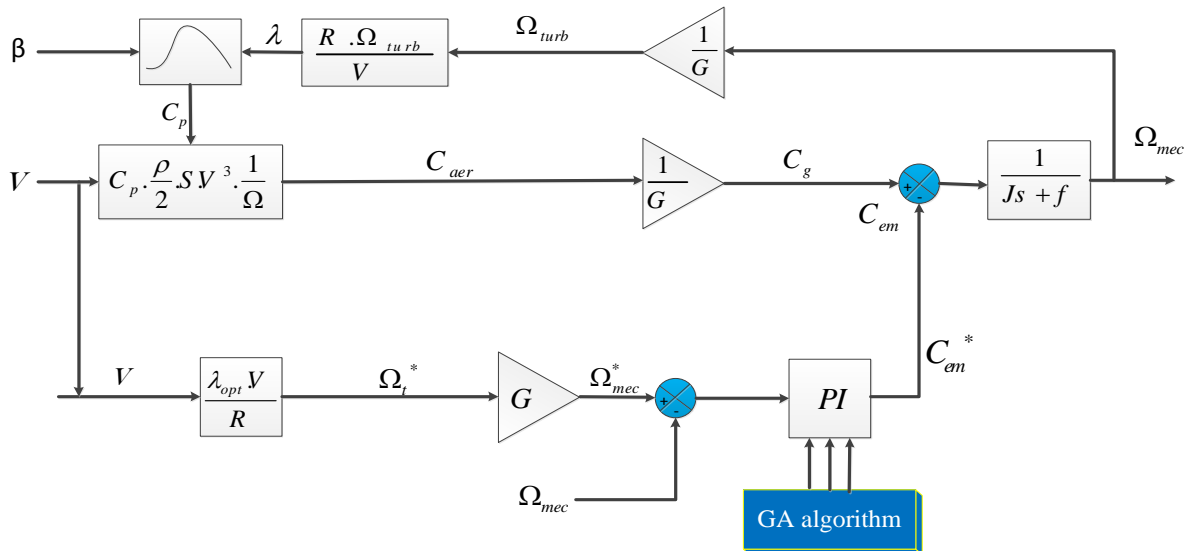


Figure VI.11 Schéma bloc d'implantation proposée de l'Algorithme Génétique pour l'ajustement des gains K_p et K_i du régulateur PI dans la commande MPPT.

VI.8 Résultats de Simulation

Pour tester les performances de l'algorithme, on a inséré la commande MPPT-GA développée du bloc de la Figure VI.11 dans un système de conversion éolienne de 3.6MW à base d'une machine asynchrone à double alimentation, où les puissances de génératrices sont contrôlées par les réseaux de neurones artificiels.

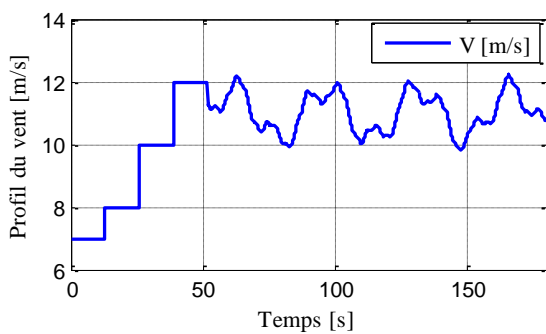


Figure VI.12 Profil du vent appliqué

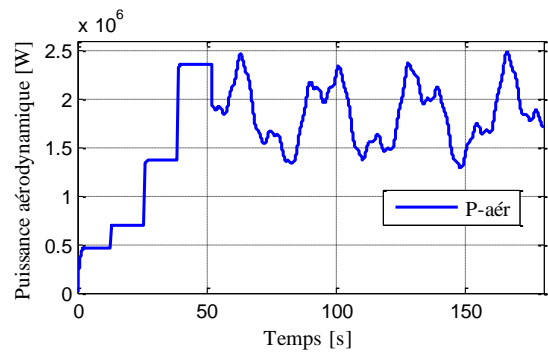


Figure VI.13 La puissance aérodynamique de la turbine

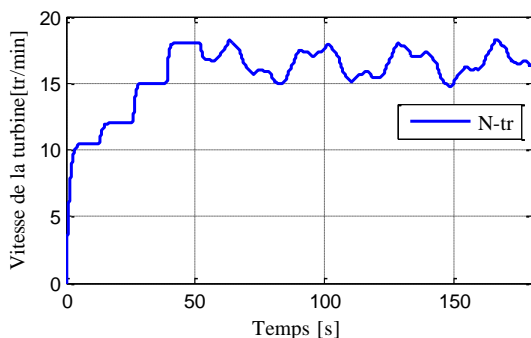


Figure VI.14 La vitesse de la turbine

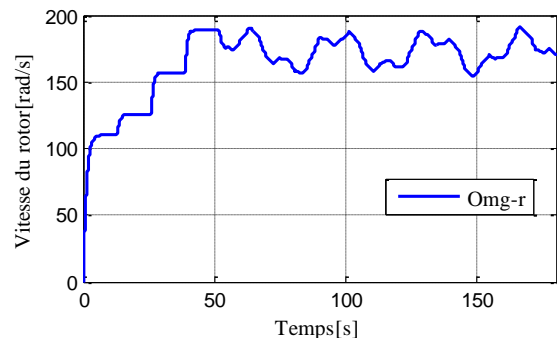


Figure VI.15 La vitesse du rotor (mécanique)

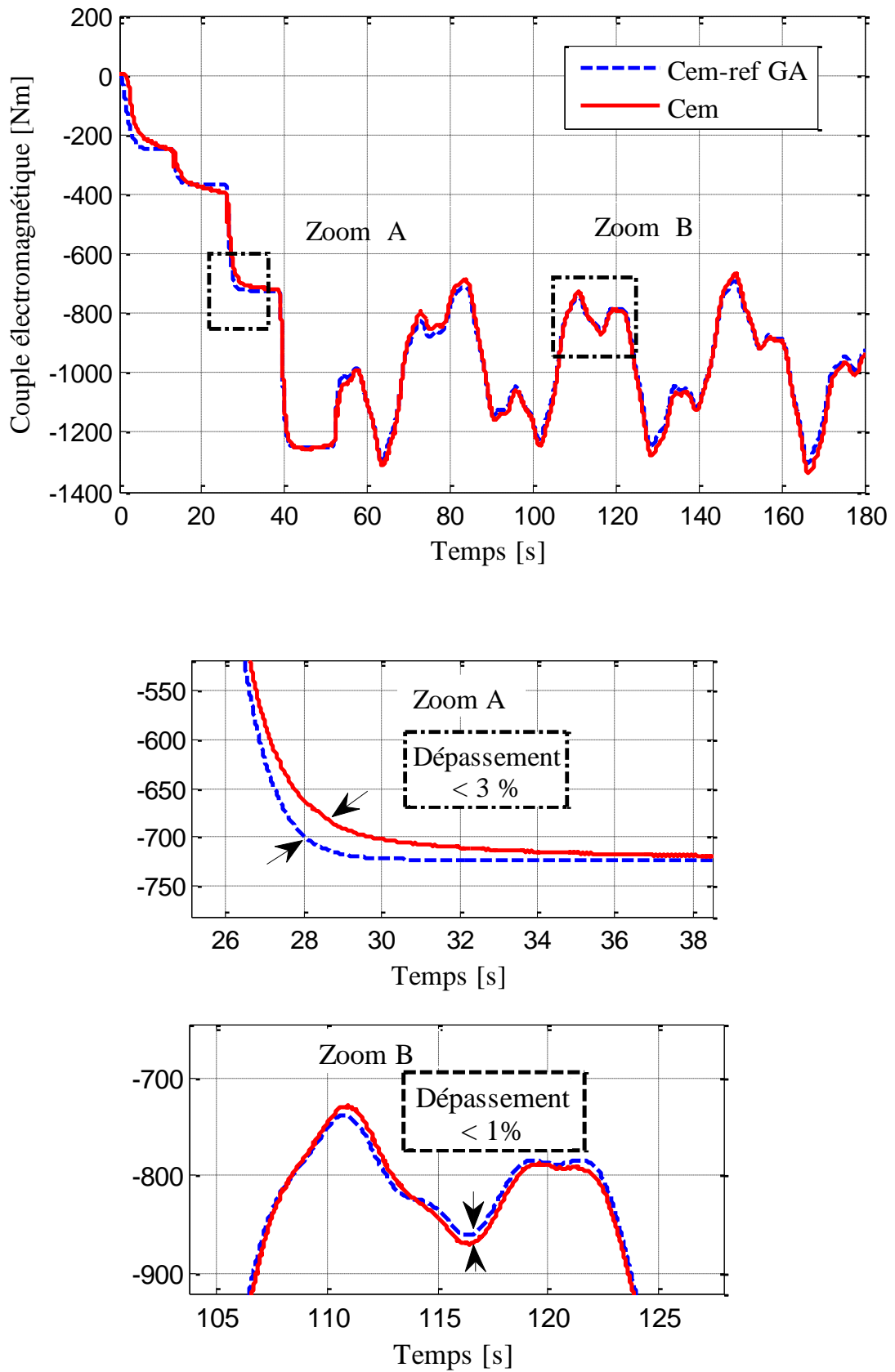


Figure VI.16 Evolution de couple électromagnétique du turbine, obtenue par MADA- RNA et MPPT-AG

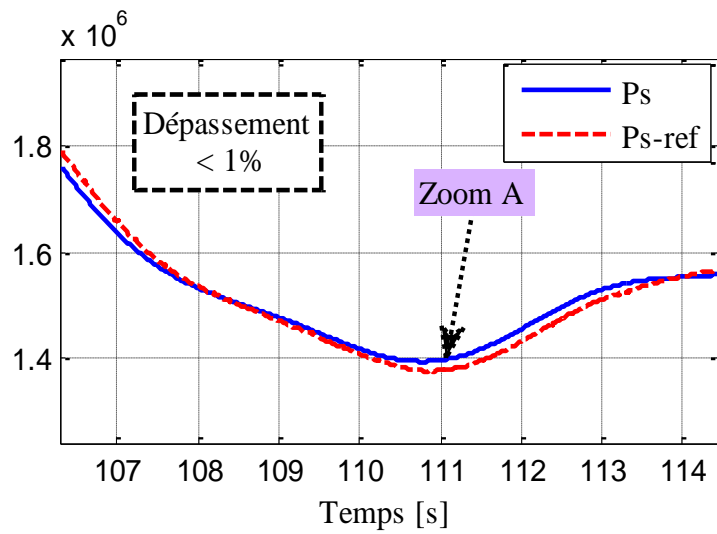
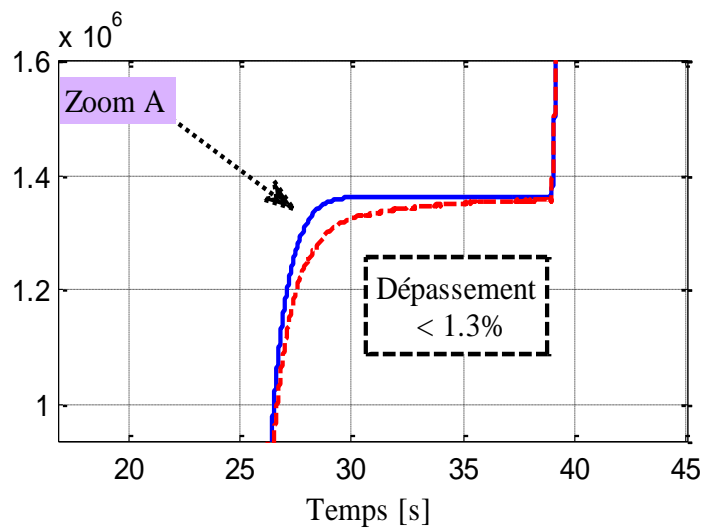
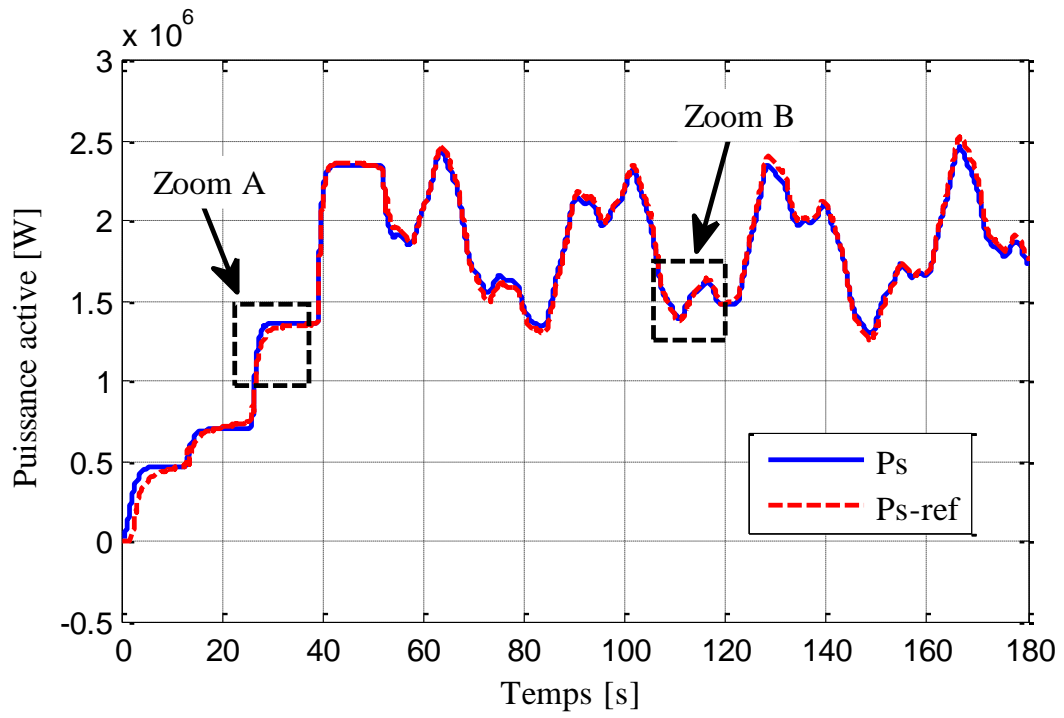


Figure VI.17 Evolution de la puissance active du turbine obtenue par MADA-RNA et MPPT-AG

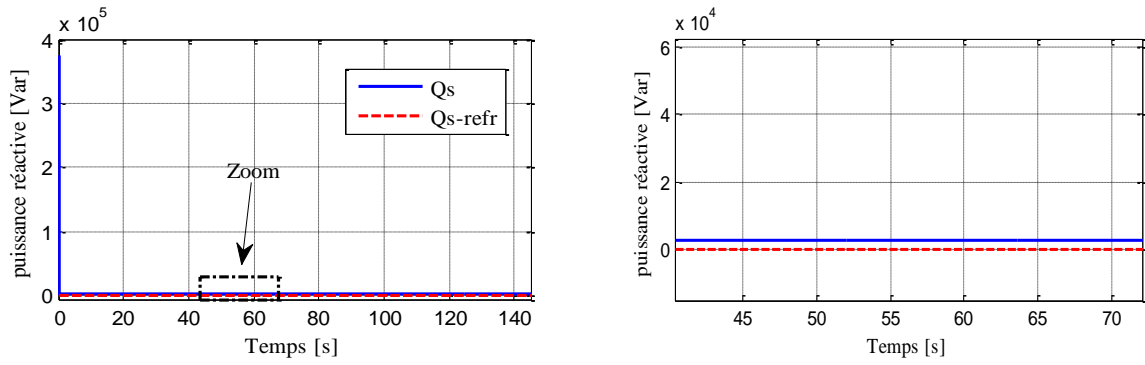


Figure VI.18 Puissance réactive de la turbine et sa référence avec un zoom

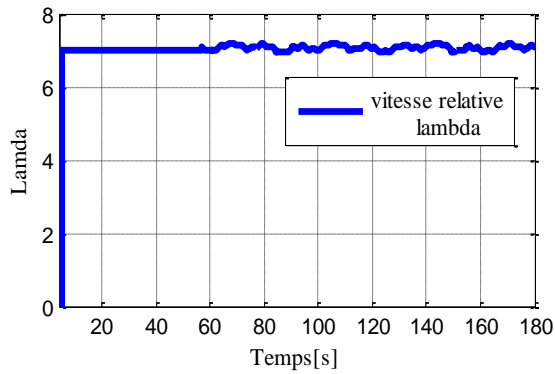


Figure V.19 Vitesse relative de la turbine

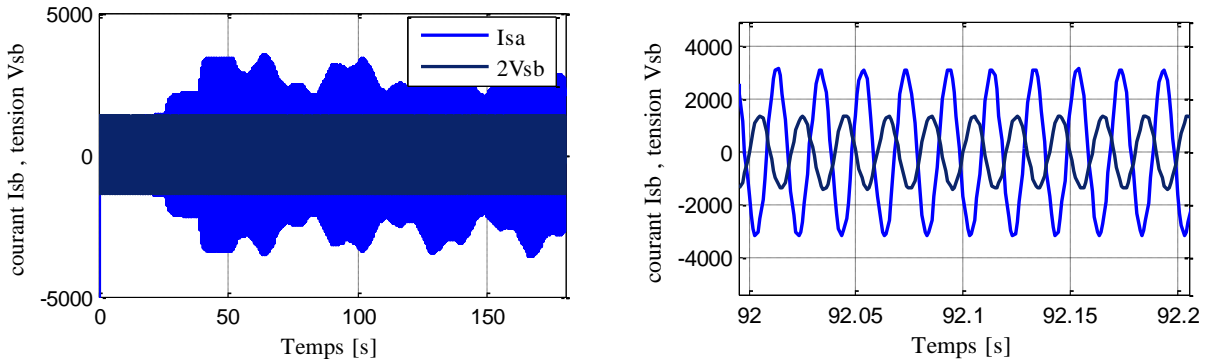


Figure V.20 Courant et tension d'une phase statorique de la MADA avec Zoom

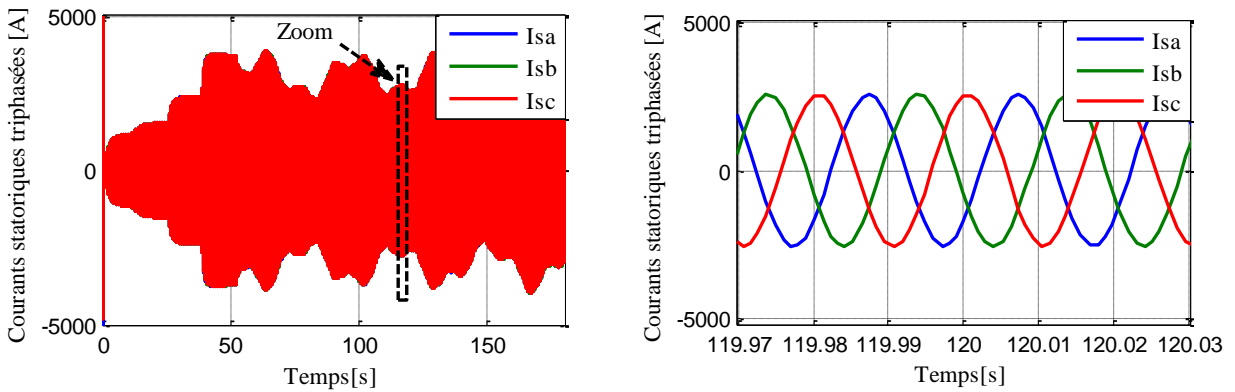


Figure V.21 Les courants statoriques triphasés de la MADA avec Zoom

VI.9 Interprétation des résultats

La technique GA-MPPT a été bien exploitée, voir la figure V.16, car le générateur éolien fonctionne à couple optimale donc la puissance électrique de celui-ci est toujours maximale (figure V.17).

Les références des puissances active et réactive statoriques sont bien suivies, rapidement et sans dépassement par le générateur. Cependant les variations des références, on constate un bon découplage entre les deux axes de commande (d et q) avec des faibles oscillations (figure V.17 et V.18). Les figures IV.32 et IV.33 montrent que les courants obtenus au stator sont aussi de formes sinusoïdales.

VI.10 Conclusion

Les algorithmes génétiques sont des algorithmes d'exploration développés à des fins d'optimisation. Fondés sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique, ils font à chaque génération, évoluer une population qui se reproduit, suite à des opérations de croisement et de mutations.

Au cours de ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions relatives à les AGs nécessaires pour comprendre le principe de fonctionnement d'un régulateur génétiques et nous avons présenté les principes de base des AGs. Leurs applications sont nombreuses et diverse, dans le domaine de l'électrotechnique les algorithmes génétiques sont utilisés pour l'optimisation des régulateurs utilisée au sein de la commande. Dans ce cadre, une nouvelle technique d'optimisation MPPT-AG, qui calcule instantanément le point de puissance maximum MPP d'un système éolienne afin de maximiser le profit de puissance avec les contraintes du changement instantané de la vitesse de vent a été présenté.

Après avoir donné un aperçu général sur le fonctionnement et les étapes d'un AG, nous avons présenté différents résultats pour différentes valeurs de la vitesse de vent, ont été obtenus en simulant le contrôleur MPPT-GA. L'algorithme de recherche force le générateur à travailler à son MPP et induisant une amélioration globale du rendement du système de conversion. On peut dire que cette techniques basées sur les méthodes métaheuristiques est la meilleure technique utilisée pour suivre la puissance optimale MPP, par rapport les autres MPPT classique.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail de recherche présenté dans cette thèse, consiste à identifier les meilleurs stratégies de commande, qui permettront de répondre au mieux à des exigences spécifiques, où la turbine éolienne sollicite des algorithmes de commande sophistiqués et robustes pour un fonctionnement optimal à différentes contraintes.

Tout d'abord, les concepts fondamentaux de la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique ont été rappelés dans le premier chapitre. Les différentes structures de conversion éolienne utilisant les machines électriques ont été présentées et analysées en termes d'avantages qu'elles procurent. La structure utilisant la machine asynchrone à double alimentation présente le meilleur avantage en terme de production de puissance élevée, en fonctionnement à vitesse variable, tout en réduisant le dimensionnement des convertisseurs statiques.

Dans le deuxième chapitre, une modélisation des différents composants d'une éolienne à vitesse variable a été accomplie (vent, turbine, MADA, redresseur, onduleur et filtre). Cette modélisation permettant d'expliquer la conversion d'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Les résultats de simulation montrent l'efficacité de la modélisation réalisée et par conséquent prépare le chemin pour appliquer les différentes techniques de commandes dans le chapitre trois.

Dans le troisième chapitre, les différentes zones de fonctionnement avec les stratégies de contrôle utilisées ont été présentées. La zone particulière a été détaillée (où la maximisation de l'énergie extraite du vent est l'objectif principal). En raison de la nature changeante et instantanée du vent, la puissance de sortie d'un système de conversion est maximisée si le rotor de la turbine est entraîné à une vitesse de rotation optimale pour chaque vitesse de vent.

Afin de commander le système, deux stratégies ont été détaillées : La stratégie MPPT permet de fournir un maximum de puissance active produite, et la commande découplée des puissances active et réactive permet de réguler ces dernières selon des consignes imposées. Notre objectif s'est orienté vers l'analyse et la synthèse d'une commande robuste des grandeurs du MADA ; puissances active et réactive statoriques qui est la commande à structure variable particulièrement la commande par mode glissant. Cette commande à une forme différente comparée à la commande vectorielle classique. Les résultats de simulation montre la fiabilité et la robustesse de cette commande qui est présentée par le bon poursuivre de puissance active statorique à sa référence, qui varie selon le profil, rapidement et sans dépassement avec une erreur près que négligeable.

Nous avons étudié dans cette thèse l'apport des techniques avancées de l'automatique, tels que, les réseaux de neurones artificiels et les algorithmes génétiques, appliqués à la commande d'un

système de conversion d'énergie éolienne basé sur une machine asynchrone à double alimentation. Des améliorations importantes ont été apportées par rapport aux autres régulateurs en termes d'atténuation des dépassements au niveau des régimes transitoires et l'insensibilité aux variations paramétriques. De plus ils permettent de donner des décisions correctes et d'éviter les cas d'indécisions.

Les travaux de cette thèse, propose des traitements de nombreuses solutions relatif aux systèmes éolienne, mais il sera très utile de les compléter en tenant compte les perspectives suivantes :

L'étude d'autres commandes robustes, telles que : les réseaux neuro-flous, la logique floue, capable d'améliorer les performances de la commande.

L'étude approfondie sur les autres types de MADA, pour l'application dans les systèmes d'entraînements ou de productions à vitesse variable.

L'étude et l'application d'autres convertisseurs de niveaux supérieurs pour la minimisation des harmoniques renvoyés au réseau.

Validation expérimentale de cette étude pour confirmer le modèle et les systèmes de commande proposés.

Tout ceci montre que la thématique de la génération d'énergie électrique est ouverte et offre de nombreux sujets de recherche pour l'avenir, aussi bien pour la conception de machine, que pour leur modélisation et l'intégration au réseau électrique.

ملخص:

إن تحسين كفاءة الطاقة في توربينات الرياح متغيرة السرعة يتطلب تقنيات تحكم معقدة وقوية للتغلب على العوائق المختلفة، من أجل الأقصى في تحويل طاقة الرياح.

تحت إطار البحث المتزايد عن تقنيات تحكم جديدة وقوية، تقدم هذه الأطروحة مساهمة في الدراسة والتحكم المتين للمولد الهوائي. في الجزء الأول قدمنا الحالة الوصفية للطاقة الهوائية و النظم المستخدمة في تحويل هذه الطاقة. في الجزء التالي قدمنا نمذجة أجزاء التوربين الهوائي التي تم اختيارها من الدراسة النظرية.

إن دراسة أولية تبين أداء وحدود استخدام تقنية التحكم الشعاعي، والهدف من ذلك هو تطبيق هذه الاستراتيجية للتحكم في تبادل القدرة الفعالة والقدرة الرجعية للساكن بتغذية الدوار بواسطة محول ثنائي الاتجاه. قوانين التحكم التقليدي من نوع PI تؤدي إلى نتائج جيدة في حالة الأنظمة الخطية ذات عناصر ثابتة. لكن بالنسبة للأنظمة الغير خطية والتي تمتلك عناصر غير ثابتة، هذه القوانين تكون غير كافية لأنها غير متينة. لأجل ذلك لا بد لنا من البحث على قوانين تحكم غير حساسة للاضطرابات وللحالة الغير خطية. إن التحكم عن طريق النمط الإنزلاقي وبطبيعته الغير خطية يمثل حل لهذه المعضلة المرتبطة بالتحكم التقليدي.

تستخدم تقنيات الذكاء الاصطناعي بشكل متزايد في مجموعة واسعة من التطبيقات وقد اقترحنا دراستها كجزء من ترتيب توربينات الرياح بشكل أكثر تحديداً، نستخدم الشبكات العصبية والخوارزميات الجينية لاستخراج الحد الأقصى من الطاقة المتاحة، وللتحكم في تبادل القدرة الفعالة والقدرة الرجعية للمولد مع الشبكة، وأخيراً، تظهر نتائج عمليات المحاكاة التي تم الحصول عليها أهمية تقنيات الذكاء الاصطناعي في توربينات الرياح.

كلمات مفتاحية:

الألة اللا تزامنية مزدوجة التغذية – التحكم الشعاعي – التحكم عن طريق النمط الإنزلاقي – الشبكات العصبية الاصطناعية – الخوارزميات الجينية.

Résumé

Dans les éoliennes à vitesse variable l'amélioration du rendement énergétique nécessite des techniques de contrôle sophistiqués et robustes, pour surmonter diverses contraintes et afin d'obtenir une conversion optimale de l'énergie aérodynamique. Dans ce cadre, cette thèse présente une contribution à l'étude et à la commande d'un système éolien à base de la machine MADA.

Dans cette thèse, nous avons présenté un état de l'art sur l'énergie éolienne et les systèmes de conversion utilisés en suite nous avons modélisé la chaîne de conversion éolienne qui a été adoptée à partir de l'étude théorique.

Une première étude montre les performances et les limites d'utilisation de la commande vectorielle. L'objectif est d'appliquer cette commande pour contrôler l'échange des puissances active et réactive générées par la machine asynchrone avec le réseau en agissant sur les signaux rotoriques via un convertisseur bidirectionnel. Les lois de contrôle utilisant PI classiques donnent de bons résultats dans le cas de systèmes linéaires à paramètres constant. Mais Pour les systèmes non linéaires, ces lois de contrôle conventionnelles peuvent être insuffisantes. Pour cela, nous devons utiliser des lois de contrôle insensibles aux perturbations et aux cas non linéaires.

La commande par mode glissant est par sa nature une commande non linéaire constituent une bonne solution à ces problèmes liés au contrôle conventionnel. Cette technique trouve sa plus forte justification aux problèmes d'incertitudes du modèle par l'utilisation d'une loi de commande non linéaire.

les techniques de l'intelligence artificielle sont de plus en plus utilisés dans des domaines d'application très variés. Nous avons proposé de les étudier dans le cadre de la commande de la turbine éolienne. Plus particulièrement, nous utilisons les réseaux de neurones et les algorithmes génétiques afin d'extraire le maximum de puissance disponible, ainsi, de contrôler l'échange des puissances active et réactive de générateur avec le réseau.

Enfin, les résultats de simulations numériques obtenus montrent l'intérêt croissant des techniques avancées dans les systèmes éoliennes.

Mots clés: Machine Asynchrone à Double Alimentation – Commande Vectorielle – MPPT – Commande par Mode Glissant – Réseaux de Neurones Artificiels – MPPT-Algorithmes Génétiques.

Abstract

In variable speed wind turbines, wind generator performance improvement requires sophisticated and robust control techniques to overcome various constraints, in order to achieve optimal aerodynamic energy conversion. In the framework of increasing research to robust new techniques, this thesis presents a contribution to the study and the control of wind turbine.

Firstly, we present the state of the art of wind energy and the used conversion systems and then the overall wind system adopted after theoretical study is modeled.

A first study shows the performances and the limits of use of the vector control. The goal is to apply this command to control the exchange of active and reactive power generated by the DFIG with the network acting on the rotor signals via a bidirectional converter.

The traditional control based on PI gives good results in the case of the linear systems. But for nonlinear systems, these laws of traditional control will be insufficient because they are not robust. For this problem we must use of control insensitive to the perturbations and the nonlinear cases. The sliding mode control with its nonlinear nature constitutes a good solution with these problems involved in the traditional control. This technique finds its strongest justification for model uncertainty problems using a nonlinear control law.

Artificial intelligence techniques are increasingly used in varied applications. We propose to use it for the control of the wind turbine. More particularly, we use artificial neural networks and genetic algorithms, in order to extract the maximum available power as well as to control the exchange of the active and reactive powers of the DFIG with the network.

Finally, the numerical simulation results obtained show the growing interest of intelligent control in wind turbine systems.

Key words: Double Feed Induction Machine – Vector Control – MPPT – Sliding Mode Control – Artificial Neural Networks – MPPT based on Genetic Algorithms.



Annexe

Annexe A

Paramètres de système éolien:

Les paramètres la turbine sont :

Nombre de pales	3
Rayon	48 m
Rapport de multiplicateur	100
Ongle d'attaque	2

Les paramètres de la MADA:

Puissance nominale	3,6 MW.
Tension nominale	690V
Vitesse nominale	1440 tr/min
Résistance statorique	0.0079 Ω
Résistance rotorique	0.025 Ω .
Inductance cyclique statorique	121 μ H
Inductance cyclique rotorique	57,3 μ H,.
Inductance mutuelle	12,12 mH
Nombre de pair de pôles	2
Moment d'inertie	114 kg.m ²
Coefficient de frottement	0.45 Nm*s/rd

Annexe B

Dimensionnement du Régulateur PI

Les boucles de régulation des puissances active et réactive peuvent se présenter par le schéma bloc de la figure A.1

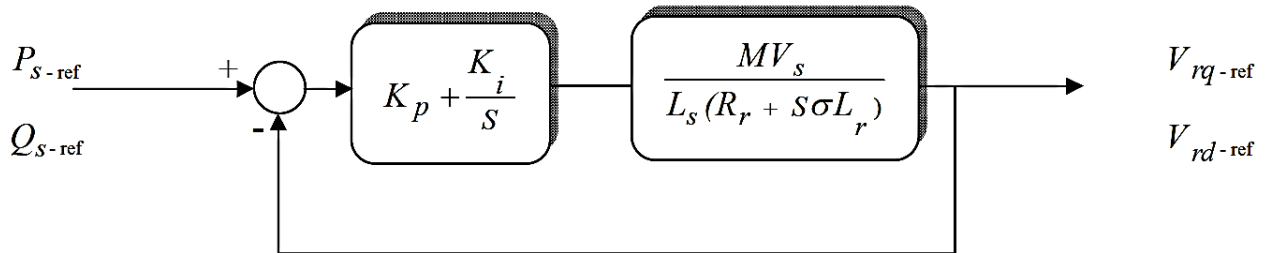


Figure A.1 Schéma de régulation des puissances.

Soit un régulateur PI de fonction de transfert :

$$PI(s) = K_p + \frac{K_i}{S} \quad (\text{A.1})$$

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) de la figure A.1 sera :

$$FTBO(s) = \frac{K_i}{S} \left(\frac{K_p}{K_i} S + 1 \right) \frac{MV_s / L_s R_r}{1 + \sigma T_r S} \quad (\text{A.2})$$

Par compensation de pôle ce qui traduit par la condition :

$$\frac{K_p}{K_i} = \sigma T_r \quad (\text{A.3})$$

Alors la FTBO s'écrit maintenant :

$$FTBO(s) = \frac{K_i MV_s}{L_s R_r S} \quad (\text{A.4})$$

Afin d'avoir un comportement d'un système du premier ordre dont la fonction de transfert est de la forme :

$$G(s) = \frac{1}{1 + \tau s} \quad (\text{A.5})$$

Donc la fonction de transfert en boucle fermée (FTBF) de la figure A.1 sera :

$$FTBF(s) = \frac{1}{1 + \frac{L_s R_r}{K_i M V_s} s} \quad (\text{A.6})$$

Par analogie l'expression (A.6) par l'expression (A.5), on trouve :

$$\tau = \frac{L_s R_r}{K_i M V_s} \quad (\text{A.7})$$

De l'expression (A.3) et (A.7), on a :

$$K_i = \frac{L_s R_r}{\tau M V_s} \quad (\text{A.8})$$

$$K_p = K_i \sigma T_r = \frac{\sigma L_r L_s}{\tau M V_s}$$

Annexe C

Optimisation du régulateur PI classique par les AGs

Les paramètres de l'algorithme génétique utilisé :

Taille de la population	20
Itération maximale	100
Probabilité Croisement	0.7
Probabilité Mutation	0.02
Le nombre de bits par chromosome	16

Bibliographie

- [1] **Praiselin Wij. and Belwin Edward.** "A Review on Impacts of Power Quality, Control and Optimization Strategies of Integration of Renewable Energy Based Microgrid Operation." *International Journal of Intelligent Systems and Applications* 11.3 (2018): 67-81.
- [2] **Said Azzouz. Sabir Messalti1. and Abdelghani Harrag.** "A Novel hybrid MPPT controller using (P&O)-neural networks for variable speed wind turbine based on DFIG." *Modelling, Measurement and Control A*, 9.1 (2019): 23-29.
- [3] **Ravichandran Sharon.** "Coordinated controller design of grid connected DFIG based wind turbine using response surface methodology and NSGA II." *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 8 (2014): 120-130.
- [4] **Bose Bimal** "Global warming: Energy, environmental pollution, and the impact of power electronics." *IEEE Industrial Electronics Magazine* 4.1 (2010): 6-17.
- [5] **Liu Xiangjie. and Yaozhen Han.** "Sliding mode control for DFIG-based wind energy conversion optimization with switching gain adjustment." *Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation. IEEE*, (2014): 1213-1218.
- [6] **Kumar Hemanth. and B Saravanan.** "Power Quality Improvement for Wind Energy Conversion System using Composite Observer Controller with Fuzzy Logic." *International Journal of Intelligent Systems and Applications* 10.10 (2018): 72-80.
- [7] **Sabir Messalti. and Abdelghani Harrag.** "Variable Step Size IC MPPT Controller for PEMFC Power System Improving Static and Dynamic Performances." *Fuel Cells* 17.6 (2017): 816-824.
- [8] **Loukriz Abdelhamid. Sabir Messalti. and Abdelghani Harrag.** "Design, simulation, and hardware implementation of novel optimum operating point tracker of PV system using adaptive step size." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 101. 8 (2019): 1671-1680.
- [9] **Kumar Dipesh. and Kalyan Chatterjee.** "A review of conventional and advanced MPPT algorithms for wind energy systems." *Renewable and sustainable energy reviews* 55 (2016): 957-970.
- [10] **Krishanthan Vigneswaran. and Suresh Kumar.** "Maximum Power Point Tracking (MPPT) Method in Wind Power System." *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* 5.1 (2016): 680-687.
- [11] **Mohamed Kesraoui. Noureddine Korichi. and Amina B. Belkadi.** "Maximum power point tracker of wind energy conversion system." *Renewable energy* 36.10 (2011): 2655-2662.
- [12] **Barakati Masoud. Mehrdad Kazerani. and Dwight Aplevich.** "Maximum power tracking control for a wind turbine system including a matrix converter." *IEEE Transactions on Energy Conversion* 24.3 (2009): 705-713.
- [13] **Hamane Bekhada. Mohamadou Lamine Doumbia. and Mohamed Bouhamida.** "Control of wind turbine based on DFIG using Fuzzy-PI and sliding mode controllers." *2014 Ninth international conference on ecological vehicles and renewable energies (EVER). IEEE* (2014): 440-448.
- [14] **Do Hoang Thinh.** "Maximum power point tracking and output power control on pressure coupling wind energy conversion system." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 65.2 (2017): 1316-1324.
- [15] **Said Azzouz. and Sabir Messalti.** "Comparative study of control strategies for the double fed induction generator." *Second International Conference on Electrical Engineering ICEEB* (2019)

-
- [16] **Zhu Donghai.** "Inductance-emulating control for DFIG-based wind turbine to ride-through grid faults." *IEEE Transactions on Power Electronics* 32.11 (2016): 8514-8525.
- [17] **Lin Whei-Min. and Chih-Ming Hong.** "Intelligent approach to maximum power point tracking control strategy for variable-speed wind turbine generation system." *Energy* 35.6 (2010): 2440-2447.
- [18] **Said Azzouz. Sabir Messalti. and Abdelghani Harrag.** "Novel fuzzy logic FLC MPPT controller driving Wind Energy Conversion Systems Based on DFIG controlled by artificial neural network." *The Seventh International Conference on Control Engineering & Information Technology, Tetouan, Morocco October* (2019).
- [19] **Salah Chokri Ben. and Mohamed Ouali.** "Comparison of fuzzy logic and neural network in maximum power point tracker for PV systems." *Electric Power Systems Research* 81.1 (2011): 43-50.
- [20] **Said Azzouz. and Sabir Messalti.** "Control of active and reactive power of DFIG by artificial neural networks." *Journal of engineering and applied science* 11.10 (2018): 2269–2273.
- [21] **Barbade Swati. and Prabha Kasliwal.** "Neural network based control of Doubly Fed Induction Generator in wind power generation." *International Journal of Advancements in Research & Technology* 1.2 (2012): 83-88.
- [22] **Fernando Arturo Ramirez. and Marco Arjona.** "Development of a grid-connected wind generation system with a modified PLL structure." *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 3.3 (2012): 474-481.
- [23] **Sawin Janet. L** "Renewables 2015 global status report-Annual Reporting on Renewables: The 21st Century for Renewable Energy Policy Network Ten years of excellence." *The 21st Century for Renewable Energy Policy Network* (2015).
- [24] **Muller Set. Mi Deicke. and Rik De Doncker.** "Doubly fed induction generator systems for wind turbines." *IEEE Industry applications magazine* 8.3 (2002): 26-33.
- [25] **Blaabjerg Frede. Marco Liserre. and Ke Ma.** "Power electronics converters for wind turbine systems." *IEEE Transactions on industry applications* 48.2 (2011): 708-719.
- [26] **Blaabjerg Frede.** "Power electronics in wind turbine systems." *2006 CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference. IEEE* 1. (2006): 1-11.
- [27] **Blaabjerg Frede. and Ke Ma.** "Future on power electronics for wind turbine systems." *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics* 1.3 (2013): 139-152.
- [28] **Kendouli F. Hocine Benalla. and Khoudir Abed.** "Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation." *Revue des Energies Renouvelables* 14.1 (2011): 109-120.
- [29] **Holdsworth L. Janaka Ekanayake. and Nick Jenkins** "Comparison of fixed speed and doubly-fed induction wind turbines during power system disturbances." *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution* 150.3 (2003): 343-352.
- [30] **Shaltout Ada. and Aif El-Ramahi.** "Maximum power tracking for a wind driven induction generator connected to a utility network." *Applied Energy* 52. 3 (1995): 243-253.
- [31] **Tapia, Arantxa.** "Modeling and control of a wind turbine driven doubly fed induction generator." *IEEE Transactions on energy conversion* 18.2 (2003): 194-204.
- [32] **Medjber Aki.** "Commande vectorielle indirecte d'un générateur asynchrone double alimenté appliqué dans un système de conversion éolien." *Acta electrotehnica August* 18.4 (2012): 316-322.
-

- [33] **Messaoud Mayouf.** "Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents." mémoire de magister, Université de Batna (2008).
- [34] **Belghitri Houda.** "Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque." mémoire de Magister, Université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen (2011).
- [35] **Poitiers Frédéric.** "Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-machine asynchrone à cage autonome-machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau." Thèse de doctorat de l'université de Nantes (2003)
- [36] **Mirecki Adam.** "Étude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance." Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse (2005).
- [37] **Bencherif Yacine Abderrahmane.** "Modélisation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation pour la production de l'énergie éolienne." projet de fin d'études, ENSP (2008).
- [38] **Liserre Marco.** "Overview of multi-MW wind turbines and wind parks." IEEE Transactions on Industrial Electronics 58.4 (2011): 1081-1095.
- [39] **Belakehal Soltane.** "Conception et commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables." (2010).
- [40] **El Aïmani Salma.** "Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension." thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille (2004).
- [41] **Serban Ioan.** "Contribution to the control of variable speed generators for renewable energy." Th: Génie Electrique: University Poilithenica of Timisoara, Faculty of Electrical Engineering, Timisoara (2005).
- [42] **Camblong Haritza.** "Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable." Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers. Paris (2003).
- [43] **El Mokadem Mostafa.** "Modélisation et simulation d'un système hybride pour un site isolé. Problématique liée aux fluctuations et variations d'énergie au point de couplage." Thèse de doctorat, GREAH laboratory, Université du Havre, France (2006).
- [44] **Dendouga Abdelhakim.** "Contrôle des puissances active et réactive de la machine à double alimentation (DFIM)." Thèse de Doctorat Université de Batna (2010).
- [45] **Zemmit Abderrahim.** "Contribution à la commande de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) par les techniques intelligentes." Thèse de doctorat. Université de M'sila (2017).
- [46] **Elbia Youcef.** "Commande floue optimisée d'une machine asynchrone à double alimentation et à flux orienté". Thèse de doctorat. Université de Batna 2 (2009).
- [47] **Salloum Georges.** "Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation." Diss. Institut National Polytechnique de Toulouse (2007).
- [48] **Boudjemaa Z.** "Commande vectorielle sans capteur de vitesse de la machine asynchrone à double alimentation par régulateur PI-Flou." Mémoire de magistère en Electrotechnique, Ecole Normale Supérieure de L'enseignement Technologique d'Oran (2009).
- [49] **Zemmit Abderrahim. Azzouz Said. and Messalti Sabir.** "Direct Torque Control-Fuzzy Logic Controller (DTC-FLC) of Doubly Fed Induction Machine (DFIM)." Second International Conference on Electrical Engineering Biskra, Algeria (2018): 194-204.

- [50] **Vidal Paul-Etienne.** "Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation." Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Toulouse (2004).
- [51] **Abdessemed Rachid. and Kadjoudj M.** "Modélisation des Machines Electriques" Presse de l'Université de Batna, (1997).
- [52] **Chatelain J.** "Machines Electriques-Traité d'Electricité de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Vol." X. Presses Polytechniques Romandes, Lausanne (1983).
- [53] **Guy Segulier.** "Convertisseurs De l'Electronique De Puissance: La Conversion Alternative- Continue" 1. 3. Technique et Documentation Lavoisier, Paris. (2006).
- [54] **Marty Max. Daniel Dixneuf. and Delphine Garcia Gilabert.** "Principes d'électrotechnique: cours et exercices corrigés." Dunod, Paris (2005).
- [55] **Bekakra Youcef.** "Etude et commande du moteur asynchrone à double alimentation (MADA) par différentes techniques avancées." Mémoire de Magister. Centre Universitaire d'El-Oued (2010).
- [56] **El Aimani Salma.** "Modeling and simulation of doubly fed induction generators for variable speed wind turbines integrated in a distribution network." 10th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2003), Toulouse, France (Conference paper). (2003).
- [57] **Drid Saïd.** "Contribution à la modélisation et à la commande robuste d'une machine à induction double alimentée à flux orienté avec optimisation de la structure d'alimentation: théorie et expérimentation." Thèse de doctorat. Université de Batna. (2005).
- [58] **El Aimani S. and B. François.** "F. Minne et B. Robyns,«Comparison analysis of control structures for variable wind speed turbine,»." chez Proceedings of CESA, Lille, France (2003).
- [59] **Boukhezzar Boubekour.** "Sur les stratégies de commande pour l'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes à vitesse variable." Thèse de doctorat. (2006).
- [60] **Boyette Armand.** "Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne." Thèse de doctorat. Université Henri Poincaré-Nancy1, (2006).
- [61] **Forchetti Daniel. Guillermo Garcia. and M. I Valla.** "Vector control strategy for a doubly-fed stand-alone induction generator." IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society. IECON 02. Vol. 2. IEEE, (2002).
- [62] **Kheldoun Aissa.** "Amélioration des performances d'un variateur de vitesse par moteur asynchrone contrôlé par la méthode à flux orienté." Thèse de doctorat. (2007).
- [63] **Amimeur Hocine.** "Contribution au contrôle de la machine asynchrone double étoile." Thèse de doctorat. Université de Batna 2, (2012).
- [64] **Gaillard Arnaud.** "Système éolien basé sur une MADA: contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service." Thèse de doctorat. Université Henri Poincaré-Nancy 1, (2010).
- [65] **Benchabane Fateh.** "Commande en position et en vitesse par mode de glissement d'un moteur synchrone triphasé à aimants permanents avec minimisation du chattering." Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider-Biskra, (2005).
- [66] **Bouharkat Malek.** "étude de l'évolution des courants rotoriques d'une machine asynchrone a cage en régime dynamique." These de doctorat, Université de Batna, Faculté des sciences de l'Ingénieur (2006).
- [67] **Akkari Nadia.** "Contribution à l'amélioration de la robustesse de la commande d'une machine asynchrone à double alimentation." These de doctorat. Université de Batna 2, (2010).

- [68] **Mérienne Frédéric.** "Influence de l'interaction puissance-commande sur le fonctionnement des convertisseurs d'électronique de puissance: simulation fine, recherche de règles de conception." Thèse de doctorat. l'institut national polytechnique de Grenoble (1996).
- [69] **Hashimoto Hideki.** "Brushless servo motor control using variable structure approach." IEEE Transactions on industry applications 24.1 (1988): 160-170.
- [70] **Hashimoto H.** "Practical realization of VSS controller for robotic arm." IEEE IECON'86. (1986).
- [71] **Nemmour Ahmed. Lokmane.** "Contribution à la commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation." mémoire de magister, université de Batna, Algérie (2002).
- [72] **Ardjoun S. A. E.** "A robust fuzzy sliding mode control applied to the double fed induction machine." international journal of circuits, systems and signal processing 5.4 (2011): 315-321.
- [73] **Laamayad Tahar.** "Commande Optimale d'une Machine Asynchrone Apport de La Logique Floue." Thèse de doctorat. Université de Batna 2, (2008).
- [74] **Lascu Cristian. Ion, Boldea. and Frede, Blaabjerg.** "Direct torque control of sensorless induction motor drives: a sliding-mode approach." IEEE Transactions on Industry Applications 40.2 (2004): 582-590.
- [75] **Abdelouhab B. and H. Adel.** "Commande par Mode de Glissement d'une Suspension Active d'un Véhicule." PFE, Ecole Nationale Polytechnique (2006).
- [76] **Tamrabet H.** "robustesse d'un contrôle vectoriel de structure Minimale d'une MAS." mémoire de magister option électronique de puissance univ de Batna (2006).
- [77] **Abdessemed RA. L. Nemmour. and V. F. Tomachevitch.** "Cascade sliding mode control of a stator field oriented double fed induction motor drive." Archives of Electrical Engineering 51.4 (2002): 371-387.
- [78] **Bekakra Youcef. and Djilani, Ben Attous.** "DFIG sliding mode control fed by back-to-back PWM converter with DC-link voltage control for variable speed wind turbine." Frontiers in Energy 8.3 (2014): 345-354.
- [79] **Benattous Golea. and Rachid Abdelsemed.** "Commande à structure variable par mode glissant pour la commande vectorielle d'un moteur asynchrone." ICEL98 (1998): 5-7.
- [80] **Fenni Athmane.** "Commande Non Linéaire Par Des Régulateurs En Mode Glissant D'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)." Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider Biskra, (2013).
- [81] **Bühler Hansruedi.** "Réglage par mode de glissement. " PPUR presses polytechniques, (1989).
- [82] **Chebre Zerikat. and Y. Bendaha.** "Adaptation des Paramètres d'un Contrôleur PI par un FLC Appliqué à un Moteur Asynchrone." 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP. (2007).
- [83] **Harashima Fumio. Hideki Hashimoto. and Seiji Kondo.** "MOSFET converter-fed position servo system with sliding mode control." IEEE Transactions on industrial electronics 3 (1985): 238-244.
- [84] **Bekakra Youcef. and Djillani Ben Attous.** "A sliding mode speed and flux control of a doubly fed induction machine." International Conference on Electrical and Electronics Engineering-ELECO. IEEE (2009): 174-178.

-
- [85] **Bekakra Youcef. and Djilani Ben Attous.** "DFIG sliding mode control driven by wind turbine with using a svm inverter for improve the quality of energy injected into the electrical grid." ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications 11.1 (2014): 63-75.
- [86] **Touzet Claude.** "les réseaux de neurones artificiels, introduction au connexionnisme. " cours, exercices et travaux pratiques, Paris (1992).
- [87] **Sabir Messalti. Said Azzouz.** "Artificial neural networks controller for power system voltage improvement." IREC2015 The Sixth International Renewable Energy Congress. IEEE, (2015): 1-6.
- [88] **Bose Bimal K.** "Artificial neural network applications in power electronics." IECON'01. 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (Cat. No. 37243). Vol. 3. IEEE, 2001. 1631-1638.
- [89] **Bose Bimal K.** "Neural network applications in power electronics and motor drives—An introduction and perspective." IEEE Transactions on Industrial Electronics 54.1 (2007): 14-33.
- [90] **Hunt K. Jetal.** "Neural networks for control systems—a survey." Automatica 28.6 (1992): 1083-1112.
- [91] **Narendra Kumpati S. and Kannan Parthasarathy.** "Identification and control of dynamical systems using neural networks." IEEE Transactions on neural networks 1.1 (1990): 4-27.
- [92] **Zhao Jin. and Bimal K. Bose.** "Neural-network-based waveform Processing and Delayless filtering in power electronics and AC drives." IEEE transactions on industrial electronics 51.5 (2004): 981-991.
- [93] **H. Azzouz.** "diagnostic des défaillances par la technique de réseau de neurone artificiel appliqué sur la machine synchrone a aimants permanents" Mémoire de Magister, Université Mohamed Boudiaf de M'sila (2005).
- [94] **Boumahraz M.** "Identification et contrôle avec réseaux de neurones." Thèse de Magister, Université de Sétif (1993).
- [95] **Valentin Nicolas.** "Construction d'un capteur logiciel pour le contrôle automatique du procédé de coagulation en traitement d'eau potable. " Diss. Compiègne, (2000).
- [96] **Sabir Messalti. Said Azzouz.** "Artificial neural networks controller for power system voltage improvement." IREC2015 The Sixth International Renewable Energy Congress. IEEE, (2015): 1-6.
- [97] **Chaiba Azeddine.** "Commande de la machine asynchrone à double alimentation par des techniques de l'intelligence artificielle." Thèse de doctorat. Université de Batna 2, 2010.
- [98] **Baghli Lotfi.** "Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques." Thèse de doctorat. Université Henri Poincaré. 1999.
- [99] **Yeddou Y. M.** "Etude de synthèse sur les réseaux de neurones et leurs applications." Thèse magister. École nationale polytechnique d'Alger (1998).
- [100] **Camblong Haritza.** "Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable." Thèse de doctorat. Paris, ENSAM, (2003).
- [101] **Zemmit Abderrahim. Sabir Messalti. and Abdelghani Harrag.** "Innovative improved direct torque control of doubly fed induction machine (DFIM) using artificial neural network (ANN-DTC)." International Journal of Applied Engineering 11 (2016): 9099-9105.
- [102] **Ould-Abdeslam Djafar.** "Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques: application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension." Thèse de doctorat. Mulhouse, (2005).
-

-
- [103] **Messalti Sabir.** "Evaluation De La Stabilité Transitoire Des Systèmes Électro énergétiques Par Les réseaux De Neurones." Mémoire Magister. université de Sétif. juin (2004).
- [104] **Irwin George William. Kevin Warwick and Kenneth J. Hunt eds.** "Neural network applications in control. " No. 53. Iet, (1995).
- [105] **Dreyfus G.** "Apprentissage statistique: Réseaux de neurones: Cartes topologiques Machines à vecteurs supports, eyrolles." (2008).
- [106] **Dreyfus Gérard.** "Réseaux de neurones-Méthodologie et applications." No. BOOK. Eyrolles, 2002.
- [107] **Abadi Mehdi.** "Réalisation d'un réseau de neurones 'SOM' sur une architecture matérielle adaptable et extensible à base de réseaux sur puce 'NoC'." Thèse de Doctorat, Université e de Lorraine, France. (2018).
- [108] **Bouaziz Mohamed.** "Réseaux de neurones récurrents pour la classification de séquences dans des flux audiovisuels parallèles." Thèse de Doctorat, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse. (2017).
- [109] **Simonnet Edwin.** "Réseaux de neurones profonds appliqués à la compréhension de la parole." Diss. Université du Maine France, (2019).
- [110] **Said Azzouz. Sabir Messalti. and Abdelghani Harrag.** " Innovative PID-GA MPPT Controller for Extraction of Maximum Power From Variable Wind Turbine." *Przeglad Elektrotechniczny* 16.5 (2019): 115-120.
- [111] **Yahiaoui Fatah.** "Application des Algorithmes génétiques à la commande basée sur la passivité d'une MSAP." Thèse de doctorat. Université abderrahmane mira béjaia, (2013).
- [112] **Hadji Slimane.** "Optimisation de la conversion énergétique pour les systèmes à énergie Photovoltaïque." Thèse de doctorat. Université Ferhat Abbas Sétif. (2018).
- [113] **Abdelhadi Bachir.** "Contribution à la conception d'un moteur à induction spécial à rotor externe pour système de propulsion électrique: Développement d'un algorithme génétique adaptatif pour identification paramétrique ". Diss. Thèse de Doctorat, Université de Batna, (2004).
- [114] **Reynès Christelle.** "Etude des Algorithmes génétiques et application aux données de protéomique." Thèse de doctorat. Université Montpellier I, (2007).
- [115] **Vacher Jean-Philippe.** "Un système adaptatif par agents avec utilisation des algorithmes génétiques multi-objectifs: Application à l'ordonnancement d'atelier de type job-shop $N \times M$." Thèse de Doctorat en Informatique, Université du Havre, France. (2000).
- [116] **Hui Wang Xiang, Dong. and Duan Guanghong.** "A genetic algorithm for product disassembly sequence planning." *Neurocomputing. IEEE*, 71.13-15 (2008): 2720-2726.
- [117] **Zerari Naima.** "les algorithmes génétiques en maintenance. " Mémoire de magister. Université de batna 2, (2006).
- [118] **Benahmed Nadia.** "Optimisation de réseaux de neurones pour la reconnaissance de chiffres manuscrits isolés: Sélection et pondération des primitives par algorithmes génétiques." Mémoire de maîtrise électronique. École de technologie supérieure, (2002).
- [119] **Bontemps Christophe.** "Principes Mathématiques et Utilisations des Algorithmes Génétiques." Disponible à : http://www2.toulouse.inra.fr/centre/esr/CV_1, Extrait de cours (2014).
- [120] **El-Helw Hadi M. Ahmed Magdy. and Mostafa Marei.** "A hybrid maximum power point tracking technique for partially shaded photovoltaic arrays." *IEEE access* 5 (2017): 11900-11908.
-

- [121] **Goldberg David.** "Optimization, and Machine Learning." Genetic algorithms in Search. Press, Addison Wesley. (1989).
- [122] **Legrand Thomas.** "Algorithmes génétiques et composites conducteurs." Master's thesis, Polytech Lille, France, 2006.< <http://www2.lifl.fr/OPAC/index.php>, (2006).
- [123] **KACIMI Mohand Akli.** "Utilisation des algorithmes génétiques multi-objéctif pour la conception d'un controleur flou appliqué à un système non linéaire et complexe." Thèse de doctorat. Université A/Mira de Bejaia, (2014).
- [124] **Ben Jemaa Abdelhak.** "Coopération méta heuristique et logique floue pour le dimensionnement d'une installation hybride." Thèse de doctorat. Université de Reims, (2015).
- [125] **Guenounou Ouahib.** "Méthodologie de conception de contrôleurs intelligents par l'approche génétique: application à un bioprocédé." Thèse de doctorat, Université Toulouse III-Paul Sabatier, (2009).
- [126] **Hadji Slimane.** "Optimisation de la conversion énergétique pour les systèmes à énergie Photovoltaïque." Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas Sétif 1. (2018).
- [127] **Harrag Abdelghani. and Sabir Messalti.** "Variable step size modified P&O MPPT algorithm using GA-based hybrid offline/online PID controller." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49 (2015): 1247-1260.
- [128] **Tiwari Ramji. and N. Ramesh Babu.** "Recent developments of control strategies for wind energy conversion system." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 66 (2016): 268-285.
- [129] **Cordón Oscar. Francisco Herrera. and Pedro Villar.** "Generating the knowledge base of a fuzzy rule-based system by the genetic learning of the data base." *IEEE Transactions on fuzzy systems* 9.4 (2001): 667-674.
- [130] **Gaspar Alessio. and Philippe Collard.** "Time dependent optimization with a folding genetic algorithm." *Proceedings Ninth IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence.* IEEE, (1997): 125-132.
- [131] **Barka Nour-Eddine.** "Amélioration des Performances de Contrôle D'un Système Photovoltaïque par les Méthodes Métaheuristiques." Mémoire de Magister. Université de d'El-oued. (2013).
- [132] **Mokrani Lakhdar.** "Contribution à la cao optimsee des machines electriques, application au moteur lineaire à induction." Thèse de doctorat. Université de Batna 2, (2015).

