



Université Sidi Mohammed Ben Abdellah
Faculté des Sciences Dhar El Mahraz- Fès
Centre d'Etudes Doctorales
"Sciences et Technologies"

Formation Doctorale : STIC

Discipline : Physique

Spécialité : Génie Electrique

Laboratoire : LESSI

THESE DE DOCTORAT

Présentée par

LAINA RAJAE

Commande Robuste d'un Système Eolien à Base d'Algorithmes Intelligents

Soutenue le 08/12/2018 devant le jury composé de :

Pr. EL BEKKALI Chakib	Faculté des Sciences Dhar EL Mahraz– Fès	Président
Pr. ROUKHE Ahmed	Faculté des Sciences – Meknès	Rapporteur
Pr. SABBANE Mohammed	Faculté des Sciences – Meknès	Rapporteur
Pr. ALFIDI Mohammed	Ecole Nationale des Sciences Appliquées – Fès	Rapporteur
Pr. EL JOUNI Abdeslam	CRMEF – Tanger	Examineur
Pr. KABBAJ Mohammed Nabil	Faculté des Sciences Dhar EL Mahraz – Fès	Examineur
Pr. BOUMHIDI Ismail	Faculté des Sciences Dhar EL Mahraz – Fès	Directeur de thèse

Année universitaire : 2017-2018

Dédicaces

Au rayon de soleil qui illumine ma vie, ma Mère qui m'a toujours soutenu pendant toutes ces longues années d'études et qui n'a jamais cessé de prendre soin de moi et de mes enfants

A mon amour mon mari Mr. Y.OUBENAALLA, qui m'a toujours soutenu et encouragé

A ma très chère sœur Sarra

A mes enfants qui rayonnent mon cœur : Mohammed Amine , Yassine et Adam

A mon père et toutes mes sœurs

Pour leur gentillesse, leur soutien et leur amour

Je dédie ce modeste travail

Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués au sein du laboratoire d'Electronique, Signaux-Systèmes et d'Informatique de la Faculté des Sciences Dhar El Mahraz de Fès.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes remerciements les plus sincères à mon Directeur de thèse Monsieur Ismail BOUMHIDI, Professeur à la Faculté des Sciences Dhar El Mahraz de Fès, pour m'avoir encadré et soutenu tout au long de cette période.

Mes sincères remerciements aux Messieurs : Mohammed SABBANE, Professeur à la Faculté des Sciences Meknès, Ahmed ROUKHE, Professeur à la Faculté des Sciences Meknès et Mohammed ALFIDI, Professeur à l'ENSA de Fès, d'avoir pris le temps de juger ce travail et de m'avoir fait l'honneur d'être rapporteurs de ma thèse.

Je tiens également à remercier Messieurs, Mohammed Nabil KABBAJ, Professeur à la Faculté des Sciences Dhar El Mahraz Fès et Monsieur Abdeslam EL JOUNI Professeur à CRMEF de Tanger, pour avoir accepté d'examiner ce travail et de faire partie du jury.

Je remercie Monsieur Chakib EL BEKKALI, Professeur à la Faculté des Sciences Dhar El Mahraz Fès, pour avoir accepté de me faire l'honneur de présider le jury de ma soutenance.

Mes remerciements vont également à Monsieur Jaouad BOUMHIDI, Professeur à la Faculté des Sciences Dhar El Mahraz de Fès, à Mr Youness OUBENAALLA de m'avoir soutenu pendant ces longues années d'études et à tous ceux qui m'ont aidé, d'une manière ou d'une autre et qui ont contribué à l'élaboration de ce travail.

Avant-propos

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au sein du laboratoire d'Electronique, Signaux-Systèmes et d'Informatique de la Faculté des Sciences Dhar El Mahraz de Fès. Ce travail a donné lieu aux publications et communications suivantes :

Journaux Internationaux indexés :

- Rajae Laina, Fatima Ez-Zahra Lamzouri, El-MahjoubBoufounas, Aumeur El Amrani, Ismail Boumhidi, Intelligent control of a DFIG wind turbine using a PSO evolutionaryalgorithm, Procedia Computer Science Journal, Volume 127, 2018, Pages 471-480, ISSN 1877-0509.
- RajaeLaina, JaouadBoumhidi, Control and modeling of wind turbines using genetic algorithms and support vector machines for regression, International Journal of Computer Networks and Communications Security, Volume 3, may 2015, Pages 235-243, ISSN 2410-0595.
- R. Laina, I. Boumhidi,Optimal Backstepping Control for a Variable Speed Wind Turbine based on Adaptive Particle Swarm Algorithm, International Journal of Innovative Computing, Information and Control (IJICIC), (Révision).
- R. Laina, I. Boumhidi, Intelligent control of DFIG generators for wind turbines variable speed using Backstepping technique, International Review of Automatic Control (I.RE.A.CO.), soumis pour publication.
- RajaeLaina, Ismail Boumhidi, Abderrahim El-Amrani and AbdelazizHmamed, Improved gKYP Lemma for 2D Continuous Systems: Finite Frequency Positive Realness Control, Journal of Circuits, Systems, and Computers (JCSC), soumis pour publication.
- R. Laina, I. Boumhidi, A. El-amrani, Finite frequency Hoo control for T-S fuzzy continuous systems, International Review of Automatic Control (I.RE.A.CO.), soumis pour publication.

Conférences Internationales indexées :

- RajaeLaina, Fatima Ez-Zahra Lamzouri, El-MahjoubBoufounas, Aumeur El Amrani, Ismail Boumhidi, Intelligent control of a DFIG wind turbine using a PSO evolutionary algorithm, 2017 Proceedings of the First International Conference on Intelligent Computing in Data Sciences (ICDS'17) (pp. 471-480) ELSEVIER, Meknes, Morocco, 18-19 December 2017, DOI:10.1016/j.Procs.2018.01.145.
- L. Rajae, B. Ismail, Optimal nonlinear control for a variable speed wind turbine based on support vector machine algorithm, 2017 Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV'17), (pp. 1-6) IEEE, Fez, Morocco, 17-19 April 2017, DOI:10.1109/ISACV.2017.8054954.
- Y. Berrada, E-M. Boufounas, R. Laina and I. Boumhidi, Optimal sliding mode control of a variable speed wind turbine based on neural network and genetic algorithm, the first IEEE International Conference on Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV'15), Fez, Morocco, 25-26 March 2015.

Conférences Nationales:

- R.Laina, I.Boumhidi, Intelligent sliding mode control for a variable speed wind turbine based on support vector machine algorithm, 3rd Symposium on Modeling and Analysis in Energetic Mechanics (CIMAME'16), Taza, Morocco, 28-29 April 2016.

Table des matières

Liste des Figures.....	i
Liste des Tableaux.....	iii
Notations	iv
Acronymes	vi
Résumé	vii
Abstract.....	viii
Introduction générale	1
Chapitre 1 :Description et Modélisation du système de conversion d'énergie éolienne	6
I. Historique	7
II. Introduction	11
III. Etat de l'art sur les technologies éoliennes	12
III.1. Définition de l'énergie éolienne	12
III.2. Conception d'une éolienne	12
III.2.1. Eolienne à axe vertical : VAWT	13
III.2.2. Eolienne à axe horizontal : HAWT.....	13
III.2.3. Eoliennes à vitesse fixe	14
III.2.4. Eoliennes à vitesse variable	15
III.2.5. Eoliennes à attaque directe	17
III.2.6. Eolienne à attaque indirecte.....	17
III.3. Intérêt des éoliennes à vitesse variable	17
III.4. Principaux constituants d'une éolienne	18
III.4.1. Mât	18
III.4.2. Rotor	19
III.4.3. Nacelle	19
III.5. Conversion de l'énergie éolienne	20
III.5. Puissance aérodynamique.....	20
III.6. Coefficient de puissance aérodynamique.....	21
III.7. Couple aérodynamique.....	22
III.8. Principe de fonctionnement d'une éolienne équipée d'une GADA.....	22
III.8.1. Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable	23
III.8.2. Transmission de la puissance.....	24
III.9. Machines asynchrones à double alimentation : MADA.....	25
III.9.1. Structure de la MADA	25
III.9.2. Modèle fonctionnement en Génératrice.....	25
III.9.3. GADA : structure de Scherbiusavec convertisseurs MLI.....	26
III.9.4. Zones de contrôle de la GADA	27
III.9.5. Convertisseursde puissance MLI	28
IV. Modélisation du système de conversion d'énergie éolienne	28
IV.1. Modélisationdu vent	28
IV.2. Modélisation de la turbine.....	29

IV.2.1. Modèle de la turbine à deux masses	29
IV.2.2. Modèle de la turbine à une masse	33
IV.3. Modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA).....	35
IV.3.1. Description.....	35
IV.3.2. Puissances mises en jeu	37
IV.3.3. Hypothèses de simplification	37
IV.3.4. Modèle général de la GADA	37
IV.3.5. Choix du référentiel	42
V. Conclusion	43
Chapitre 2 :Généralités sur les commandes avancées d'un système de conversion d'énergie éolienne	44
I. Introduction	45
II. Apprentissage supervisé	46
III. Machines à Vecteurs Supports à Régression	47
III.1. Historique de la théorie de Vapnik	47
III.2. Principe et fondement mathématique des SVR	48
III.3. Choix de la fonction noyau	50
III.4. Réglage des paramètres SVR	51
III.4.1. Facteur de pénalité C	51
III.4.2. Largeur de la zone insensible $\mathcal{E}$	51
III.4.3. Le paramètre du noyau.....	51
III.5. Optimisation des paramètres des modèles SVR	52
IV. Modes Glissants	52
IV.1. Principe de commande par Modes Glissants.....	52
IV.2. Conditions d'existence des Modes Glissants.....	54
IV.3. Choix de la surface de glissement.....	55
IV.4. Synthèse de la loi de commande	56
IV.5. Phénomène de réticence ou « <i>chattering</i> »	58
V. Commande avec la technique Backstepping	60
V.1. Historique	60
V.2. Notions de stabilité au sens de Lyapunov	60
V.2.1. Définition 1 (Stabilité de Lyapunov)	61
V.2.2. Définition 2	61
V.2.3. Définition 3 (laSalle-Yoshizawa)	62
V.3. Principe de la technique de Backstepping.....	63
VI. Optimisation par Essaim Particulaire adaptatif (APSO)	66
VI.1. Introduction	66
VI.1.1. Principe général.....	66
VI.1.2. Formalisation mathématique.....	67
VI.1.3. Algorithme d'optimisation	68
VI.1.4. Amélioration de PSO.....	69
VII. Conclusion	70
Chapitre 3 : Etude et optimisation des performances d'une turbine éolienne à vitesse du vent faible	71
I. Introduction	72
II. Objectif de la commande d'une turbine éolienne	73

III. Stratégie de commande de la turbine éolienne.....	74
IV. Loi de commande SVR-SMC	78
IV.1. Synthèse de commande par SMC	79
IV.2. Amélioration de la connaissance du système parSVR.....	81
IV.2.1. Structure de SVR utilisés	82
IV.2.2. Structure de la commande intelligente SVR-SMC.....	83
IV.2.3. Résultats de simulation	83
▪ Interprétation.....	88
V. Commande robuste intelligente avec Backstepping-APSO.	88
V.1. Motivation et Performances de la technique de Backstepping	88
V.2. Conception de la loi de commande basée sur le Backstepping	89
V.3. Amélioration de la commande de Backsteppingavec l'algorithme APSO.....	92
V.4. Résultats de simulation	94
▪ Interprétation.....	96
VI. Etude comparative des différentes techniques de commande utilisées	96
VII. Conclusion	97
Chapitre 4 :Commande avancée d'un système éolien à basede la GADA	99
I. Introduction	100
II. Commande intelligente robuste d'un SCEE équipée d'une GADA.....	101
II.1. Topologie et stratégie de commande d'un SCEE équipée d'uneGADA	101
II.2. Commande intelligente robuste PISMC à vitesse du vent faible.....	104
a. Commande par Modes Glissant standard : SMC	106
b. Commande par Intégrale Mode Glissant : ISMC	107
c. Commande par Proportionnel Intégral Mode Glissant: PISMC.....	108
d. Amélioration de la commande PISMC avec PSO	109
e. Résultats de simulation.....	111
II.3. Commande intelligente robuste PISMC à vitesse du vent fort.....	116
III. Conclusion	123
Conclusion générale.....	125
Références.....	128
Annexe A.....	134
Annexe B	137

Liste des Figures

Figure 0.1 : Stratégie énergétique au Maroc à l'horizon 2020 [ONE17]	13
Figure 1.1 : Eolienne de Mr Charles F. Brush en 1887	17
Figure 1.2: Eolienne de Mr Danois Poul La Cour (1846-1908)	18
Figure 1.3: Eolienne de Mr Darrieus en 1983	18
Figure 1.4: Eolienne de Mr Johannes Juul en 1957	19
Figure 1.5: Eolienne classique depuis 1980	19
Figure 1.6: Gisement éolien au Maroc	21
Figure 1.7: Eoliennes à axe vertical : VAWT	23
Figure 1.8: Eoliennes à axe horizontal	24
Figure 1.9: Eoliennes HAWT : (a) Structure en amont, (b) Structure en aval	24
Figure 1.10: Connexion au réseau d'un système à vitesse fixe	25
Figure 1.11 : Connexion d'un système à vitesse variable au réseau	26
Figure 1.12: Connexion d'un système à vitesse variable au réseau	26
Figure 1.13: Exemple de puissance théorique disponible au niveau d'une éolienne	27
Figure 1.14: Architecture d'une éolienne à axe horizontal	28
Figure 1.15: Principe de conversion d'énergie éolienne	30
Figure 1.16: Vitesse tangentielle et angulaire	31
Figure 1.17 : Coefficient de puissance en fonction de λ et β	32
Figure 1.18: Courbe typique de la puissance produite par une éolienne	34
Figure 1.19 : Génératrice Hypo-Synchrone	36
Figure 1.20: Génératrice Hyper-Synchrone	36
Figure 1.21 : GADA structure de Scherbius	37
Figure 1.22 : Zones de contrôle de la GADA	37
Figure 1.23 : Modèle d'une turbine éolienne	39
Figure 1.24 : Schéma de dispositif d'entraînement	40
Figure 1.23 : Modèle d'une turbine éolienne	40
Figure 1.24 : Schéma de dispositif d'entraînement	41
Figure 1.25 : Schéma bloc de la turbine	41
Figure 1.26 : Schéma bloc de l'équation du couple T_{ls}	42
Figure 1.27: Schéma bloc de l'équation dynamique du rotor	43
Figure 1.28: Schéma bloc de l'équation dynamique du générateur	43
Figure 1.29: Schéma bloc complet du modèle à deux masses	44
Figure 1.30: Modèle de la turbine à une masse ramenée sur l'arbre lent	45
Figure 1.31 : Schéma bloc du modèle de la turbine à une masse ramenée sur l'arbre lent	45
Figure 1.32: Modèle de la turbine à une masse ramenée sur l'arbre rapide	46
Figure 1.33: Schéma bloc du modèle de la turbine à une masse ramenée sur l'arbre rapide	46
Figure 1.34: GADA pilotée au rotor	47
Figure 1.35: Transit de puissance dans la GADA	48
Figure 1.36 : Représentation de la GADA dans le repère triphasé	49
Figure 1.37 : Représentation de la GADA dans le repère (d – q)	50
Figure 1.38 : Choix du référentiel	53
Figure 2.1 : Principe de l'apprentissage supervisé	57
Figure 2.2 : Illustration du $\mathcal{E}$ -Tube pour un cas d'approximation	59
Figure 2.3 : Illustration du principe des variables d'écart dans le cas d'une Régression non-linéaire	60
Figure 2.3 : Différents mode de convergence pour la trajectoire d'état	64
Figure 2.4: Interprétation de U_{eq}	68
Figure 2.5 : Interprétation de U_s (avec fonction Signe)	68
Figure 2.6 : Phénomène de la réticence	69
Figure 2.7 : Représentation de la commande U_2 en fonction de la variable de glissement	70
Figure 2.8: Représentation de la fonction hyperbolique	70
Figure 2.9 : Principe de déplacement d'une particule	78
Figure 3.1 : Courbe typique de la puissance extraite par une éolienne en fonction de la vitesse du vent	85
Figure 3.2 : Courbe de coefficient de puissance avec $\beta = \beta_{opt}$	87
Figure 3.3 : Caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation de la turbine	87
Figure 3.4 : Diagramme de conversion de puissance	88

Figure 3.5 : Diagramme de bloc de la commande du système éolien.....	88
Figure 3.6 : Modèle simplifié de la turbine éolienne.....	89
Figure 3.7 : Architecture du contrôleur SVR-SMC.....	94
Figure 3.7: Architecture du contrôleur SVR-SMC.....	95
Figure 3.8 : Profil du vent variable avec une vitesse moyenne de 7 m.s^{-1}	96
Figure 3.9: Couple aérodynamique estimé avec SVR.....	97
Figure 3.10 : Vitesse du rotor pour $\alpha=0.8$	97
Figure 3.11: Commande T_{em} pour $\alpha=0.8$ avec SVR-SMC.....	98
Figure 3.12 : Commande T_{em} pour $\alpha=0.8$ avec SMC.....	98
Figure 3.13: Vitesse du rotor pour $\alpha=1.98$	98
Figure 3.14: Commande T_{em} pour $\alpha=1.98$ avec SVR-SMC.....	99
Figure 3.15 : Commande T_{em} pour $\alpha=1.98$ avec SMC.....	99
Figure 3.16: Architecture du contrôleur Backstepping-PSO.....	105
Figure 3.17: Profil du vent variable avec une vitesse moyenne de 7 m.s^{-1}	106
Figure 3.18 : Vitesse du rotor avec la commande Backstepping.....	106
Figure 3.19 : Résultat de simulation de la commande T_{em} avec la commande Backstepping.....	107
Figure 3.20 : Vitesse du rotor avec la commande Backstepping-APSO.....	107
Figure 3.21: Commande avec Backstepping-APSO.....	108
Figure 4.1: Topologie d'un SCEE à base de la GADA.....	113
Figure 4.2: Orientation de flux statorique sur l'axe.....	115
Figure 4.3 : Schéma du système de commande PISMC.....	123
Figure 4.4 : Profil du vent avec moyenne de 7 m/s	124
Figure 4.5 : Sorties réelle et désirée de la puissance active statorique.....	125
Figure 4.6 : Sorties réelle et désirée de la puissance réactive statorique.....	125
Figure 4.7 : Courant rotorique selon l'axe d.....	126
Figure 4.9 : Commande en tension rotorique selon l'axe d.....	127
Figure 4.10 : Commande en tension rotorique selon l'axe q.....	127
Figure 4.11 : Glissement de la GADA.....	128
Figure 4.12 : Modèle à une masse de l'éolienne.....	129
Figure 4.13 : Profil du vent fortement variable avec une vitesse moyenne de 20 m/s	132
Figure 4.14 : Puissance électrique de la génératrice.....	132
Figure 4.15 : Vitesse du rotor.....	133
Figure 4.16 : Commande en couple.....	133
Figure 4.17 : vitesse du rotor.....	135
Figure 4.18 : Puissance électrique.....	135
Figure 4.19 : Couple de la génératrice.....	136
Figure 4.20 : Commande en Pitch.....	136
Figure 4.21 : Coefficient de rendement.....	138

Liste des Tableaux

Tableau 3.1 : Estimation des gains K1, K2 avec l'algorithme APSO	104
Tableau 3.2 : Comparaison des résultats obtenus par les différents contrôleurs	108
Tableau 4.1 : Convergence des gains de PISMIC vers leurs valeurs optimales	123
Tableau 4.2 : Convergence des gains vers leurs valeurs optimales	130
Tableau 4.3 : Convergence des gains vers leurs valeurs optimales	133

Notations

Symboles	Désignation	Unité(SI)
v	Vitesse du vent	m.s-1
V_{moy}	moyenne de la vitesse du vent	m.s-1
V_t	Composante turbulente du vent	
R	Rayon du rotor	M
ρ	Masse volumique de l'air	Kg.m-3
S	Surface circulaire balayée par la turbine	m ²
P_v	Puissance du vent	W
P_a	Puissance aérodynamique	W
J_r	Inertie des masses du coté rotor	Kg.m ²
J_g	Inertie des masses du côté de la génératrice	Kg.m ²
J_t	Inertie de la turbine ramenée sur l'arbre lent	Kg.m ²
J_{ths}	Inertie de la turbine ramenée sur l'arbre rapide	Kg.m ²
K_{ls}	Coefficient de frottements sur l'arbre lent	Nm/rad/s
K_r	Coefficient de frottements externes du rotor	Nm/rad/s
K_g	Coefficient de frottements externes de la génératrice	Nm/rad/s
K_t	Coefficient de frottements externes total ramené sur l'arbre lent	Nm/rad/s
K_{ths}	Coefficient de frottements externes total ramené sur l'arbre rapide	Nm/rad/s
B_{ls}	Coefficient de torsion sur l'arbre lent	Nm/rad
T_{ls}	Couple de l'arbre lent	Nm
T_{hs}	Couple de l'arbre rapide	Nm
T_{em}	Couple électromagnétique de la génératrice	Nm
T_a	Couple aérodynamique	N.m
Ω_t	Vitesse du rotor	rad/s
Ω_{topt}	Vitesse angulaire optimale du rotor	rad.s-1
Ω_{ls}	Vitesse de l'arbre lent	rad/s
Ω_g	Vitesse de la génératrice	rad/s
ω_{hs}	Vitesse angulaire de l'arbre rapide	rad.s-1
ω_{mec}	Vitesse angulaire de l'arbre de la génératrice (modèle à 1 masse	rad.s-1
N_g	Rapport de transmission du multiplicateur de vitesse	
θ_t	Position angulaire du rotor	Rad
θ_{ls}	Position angulaire d l'arbre lent	Rad
θ_g	Position angulaire du rotor de la génératrice	Rad
θ_{ls}	Position angulaire de l'arbre à marche lente	Rad
θ_t	Position angulaire de la turbine	Rad
θ_g	Position angulaire de la génératrice	Rad
U_{eq}	Commande équivalente du système par modes glissants	
U_d	Commande robuste par modes glissants	
$\eta_{aéro}$	Rendement aérodynamique	
C_p	Coefficient de puissance	
$C_{p,max}$	Coefficient de puissance maximal	
C_q	Coefficient de couple	
λ	Vitesse spécifique	
λ_{opt}	Vitesse spécifique optimale	
β	Angle de calage des pales	degré
β_{opt}	Angle de calage optimal	degré
L_s	Inductance cycliques des enroulements statoriques	H
L_r	Inductance cycliques des enroulements rotoriques	H
L_m	Inductance cycliques magnétisante	H
L_s	Inductance propres des enroulements statoriques	
L_r	Inductance propres des enroulements rotoriques	
M_s	Inductance mutuelles entre deux phases statoriques	
M_r	Inductance mutuelles entre deux phases rotoriques	

Msr	Valeur maximale de l'inductance mutuelles cyclique entre phase statorique et une phase rotorique	
Rs	Résistance des enroulements statoriques	Ω
Rr	Résistance des enroulements rotoriques	Ω
Vs, ω_s	Tension et pulsation du réseau	V, rad/s
Irq, Vrq	Courant et la tension rotorique selon l'axe q	A, V
Ird, Vrd	Courant et la tension rotorique selon l'axe d	A, V
Isq, Vsq	Courant et la tension statorique selon l'axe q	A, V
Isd, Vsd	Courant et la tension statorique selon l'axe d	A, V
Ps, Qs	Puissance active et réactive du stator	W
Pr, Qr	Puissance active et réactive du rotor	W
Pmec	Puissance mécanique de la génératrice	W
G	Glissement de la GADA	
P	Nombre de paires de pôles	
F	Fréquence du réseau	Hz
C	Facteur de pénalité	
ε	Largeur de la zone insensible	
K(.,.)	Fonction noyau	
σ	Surface de glissement	
Kp, Ki	Gains du régulateur Proportionnel et Intégral	
K	Gains de Modes glissants	
K1, K2	Gains de Backstepping	
Kp', Ki'	Gains de la commande en pitch	

Acronymes

SCEE	Systèmes de conversion d'énergie éolienne
REN21	Réseau politique sur les énergies renouvelables pour le 21ème siècle
IRESN	Institut de Recherche en Energie Solaire et Energies Nouvelles
CDER	Centre de développement des énergies renouvelables
ONEE	Office national de l'électricité et de l'eau potable
ADEREE	Agence pour le développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique
GTZ	Coopération allemande au développement
COP21	21ème Conférence des parties de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques
MADA	Machine asynchrone à double alimentation
GADA	Génératrice asynchrone à double alimentation
SMC	Commande par modes glissants
SVM	Supports vecteurs machines
SVR	Commande avec les supports vecteurs machines à régression
BACK	Commande par Backstepping
PSO	Algorithme d'optimisation par essais particuliers
APSO	Algorithme adaptatif d'optimisation par essais particuliers
VAWT	Eolienne à axe horizontal
HAWT	Eolienne à axe Vertical
MLI	Modulation de largeur d'impulsion
MPPT	Suivi du maximum de puissance
SISO	Une entrée une sortie
MIMO	Multi entrée multi sortie
sign	Fonction signe
Sat	Fonction saturation
Tanh	Fonction tangente hyperbolique
RSB	Rapport signal bruit
STD	Standard déviation

Résumé

Le développement de la technologie éolienne à vitesse variable et à fréquence finie est devenu un domaine d'intérêt majeur pour la production de l'énergie électrique en raison des avantages environnementaux et économiques. Cependant, il reste toujours des recherches à faire pour améliorer le comportement des machines éoliennes avec un rendement plus fiable.

Ce travail est une contribution à l'amélioration de la commande d'un système de conversion d'énergie éolienne équipé d'une génération de type asynchrone à double alimentation (GADA). Il porte sur la commande robuste à base d'algorithmes intelligents pour l'optimisation de l'énergie éolienne en introduisant les outils intelligents tels que : les Supports Vecteurs Machines à Régression, les Modes Glissants (SMC), la technique de commande du Backstepping et l'algorithme d'Optimisation par Essaims Particulaires (PSO) adaptatif, tout en prenant en compte les aspects dynamiques du système éolien. Ces approches permettent de résoudre les problèmes associés aux effets des incertitudes et des perturbations externes liés généralement aux comportements stochastiques du vent.

Deux stratégies de commande ont été adoptées :

La première est destinée à la partie mécanique de l'éolienne comme étant la partie essentielle de la chaîne de conversion énergétique. Dans cette stratégie, nous avons proposé deux lois de commandes intelligentes et robustes : La première loi est basée sur les Modes Glissants combinés aux Supports Vecteurs Machines à Régression et la deuxième loi est basée sur la technique du Backstepping améliorée par l'algorithme APSO. Dans cette partie, l'étude est limitée au calcul du couple électromagnétique que la génératrice doit fournir pour le bon fonctionnement de l'aéroturbine.

La deuxième stratégie adoptée traite la partie électrique de l'éolienne à savoir la machine asynchrone à double alimentation en mode de fonctionnement génératrice (GADA). La commande proposée pour cette génératrice, consiste à combiner la commande par Modes Glissants à action Proportionnelle Intégrale dans deux zones de fonctionnements. Dans la zone de vitesse du vent faible, l'objectif est l'optimisation de la puissance produite et dans la zone de fonctionnement à vitesse du vent fort, le système de commande a pour objectif de réguler la puissance et la vitesse de rotation, autour de leurs valeurs nominales en se basant sur la commande en couple et en pitch.

La validité en termes d'efficacité, de stabilité et de poursuite des différents contrôleurs proposés qualifiés d'intelligents, robustes et optimales est confirmée par simulation sur MATLAB/SIMULINK.

Mot clés : Système de conversion d'énergie éolienne (SCEE), Machine Asynchrone à Double Alimentation (GADA), Modes glissants SMC, Supports Vecteurs Machines à Régression (SVR), Backstepping, Optimisation par Essaims Particulaires (PSO) Adaptatif, Commande vectorielle.

Abstract

Nowadays, the development of wind turbine technology with variable speed and constant frequency has become a major area of interest for the production of electrical energy due to the environmental and economic benefits. However, there is still much research to be done to improve the behavior of wind turbines and make them more profitable and more reliable.

This work is a contribution to the improvement of the control of a wind energy conversion system led by a generation of asynchronous double feed called DFIG. It relates to the robust control based on artificial intelligence for the optimization of wind energy by introducing intelligent computing such as: SVR regression machine vectors, SMC sliding mode control, Backstepping technique and adaptive APSO swarm algorithm, while taking into account dynamic aspects of the wind system. This aims to solve the problems related to the effects of the uncertainties and external disturbances of the wind model, generally related to stochastic wind behavior.

Two control systems have been adopted:

First, the mechanical part of the wind turbine as the essential part of the energy conversion process. In this part, we proposed two smart and robust control methods: The first is based on the sliding modes combined with the support vector machine for regression. The second is based on the Backstepping technique improved by the PSO algorithm. In this part, the study is limited to the calculation of the electromagnetic torque that the generator must provide for a betterfunction of the aeroturbine.

The second strategy adopted deals with the electrical part of the wind turbine namely DFIG in generating operation mode, with the aim of independently controlling the active and reactive power. This command is developed and tested based on the orientation of the stator flux. We proposed a smart and robust control systems based on integral proportional sliding modes PISMC. The PSO algorithm was used to ensure the improvement of the PISMC-PSO controller by giving the optimal values of their gains. In the low wind speed zone, the objective is to optimize the power produced and in the operating zone at high wind speed, the control system aims is to regulate the power and speed of rotation, around their nominal values based on the torque and pitch control.

The simulation on MATLAB / SIMULINK shows the accuracy and robustness of our approaches.

Key Words: Wind Turbine Energy Conversion, DFIG, Sliding Mode Control, Support Vector Machine-Regression, Backstepping, Particle Swarm Optimization PSO.

Introduction générale

Avec la croissance industrielle de la majorité des pays et la surpopulation sur l'ensemble du globe, la demande en énergie électrique est de plus en plus croissante et les sources d'énergie traditionnelles de moins en moins abondantes, cette croissance exige parallèlement l'augmentation de la production énergétique. Plusieurs pays se sont tournés vers les énergies renouvelables avec le challenge de réduction des émissions de gaz à effet de serre [Ack00]. Depuis lors, la pollution atmosphérique, le réchauffement climatique, les risques du nucléaire et les limites des ressources ont fait prendre conscience qu'un développement économique respectant l'environnement, dans lequel nous vivons, est nécessaire.

Dans ce contexte, les nouvelles énergies vertes dite « renouvelables » sont réapparues et prennent peu à peu une place indéniable dans le marché d'électricité. Parmi celles-ci, l'énergie éolienne apparaît actuellement en bonne place comme énergie d'appoint complémentaire à l'énergie fossile et nucléaire puisque l'énergie potentielle des masses d'air en mouvement représente, au niveau mondial, un gisement considérable. Ces énergies renouvelables peuvent constituer une solution idéale, car elles offrent des ressources inépuisables et généralement propres, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles et parfois aléatoires.

Ce type d'énergie procure l'avantage de ne pas être centralisé mais d'être disponible là où a lieu la demande. Elle est considérée comme une ressource énergétique croissante dans la plupart des pays développés et a une tendance d'être aussi compétitive que l'énergie d'origine fossile [Cun01].

L'année 2017 a battu des records en termes d'installations d'énergies renouvelables dans le monde. Telles sont les conclusions du rapport annuel sur l'évolution mondiale des filières dites « propres », publié par le réseau international **REN21**. La puissance installée du parc éolien a ainsi augmenté de 52.5MW dans le monde pour atteindre presque 540 MW fin 2017. Par rapport à 2016 où l'augmentation avait été de 60 MW, le développement du marché du vent mondial a toutefois légèrement marqué le pas. En cause, selon la synthèse annuelle du conseil mondial de l'énergie éolienne [GWEC17] publiée en Mai 2017, une croissance de cette énergie moins forte que prévu en Chine et dans certains pays de marchés dits « émergents », comme l'Afrique du Sud ou le Brésil. La Chine, les Etats-Unis et l'Allemagne occupent les trois premières places du podium d'un secteur en plein boom, marqué par de nombreux projets d'installations gigantesques autour du globe. Toutefois, Le Maroc, dont le gisement éolien est non seulement très riche, mais aussi très diversifié, ne fait pas exception à la tendance internationale de donner une place de plus en plus importante aux sources d'énergies renouvelables dans le bouquet énergétique mondial [Kou15].

Le royaume a l'avantage de jouir d'un potentiel éolien particulièrement riche par rapport à d'autres pays. L'exploitation optimale de ce potentiel permettra de réduire la dépendance énergétique et de contribuer à la stabilité énergétique du pays. Ceci est justifié par l'ambition du Maroc de devenir un leader dans le domaine des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique en créant en 2011, l'Institut de Recherche en Energie Solaire et Energies Nouvelles (**IRESEN**) et en préparant l'installation de nouveaux parcs éoliens qui renforceront les parcs déjà en fonction. En particulier au Maroc la production annuelle d'électricité à partir de l'énergie éolienne s'élève de 280 MW en 2010 à 2000 MW à l'horizon 2020, soit une hausse de 7,1% au cours de 10ans, sachant que plus de 795 MW déjà opérationnels, 550 MW

en cours de construction et 850 MW en cours d'adjudication. De plus, une capacité additionnelle de 1000 MW est programmée entre 2021 et 2025 [WWEA17]. Et à l'horizon 2020 l'énergie éolienne représentera 14 % (20 % à l'horizon 2030) de la puissance totale installée [ONE17]. Il y a lieu de signaler que l'intérêt qu'a donné le gouvernement marocain au secteur des énergies renouvelables fait que plusieurs universités marocaines orientent leurs recherches vers cet axe. C'est dans cet objectif que vient s'insérer ma thèse qui porte sur l'énergie éolienne (Figure 1.1).

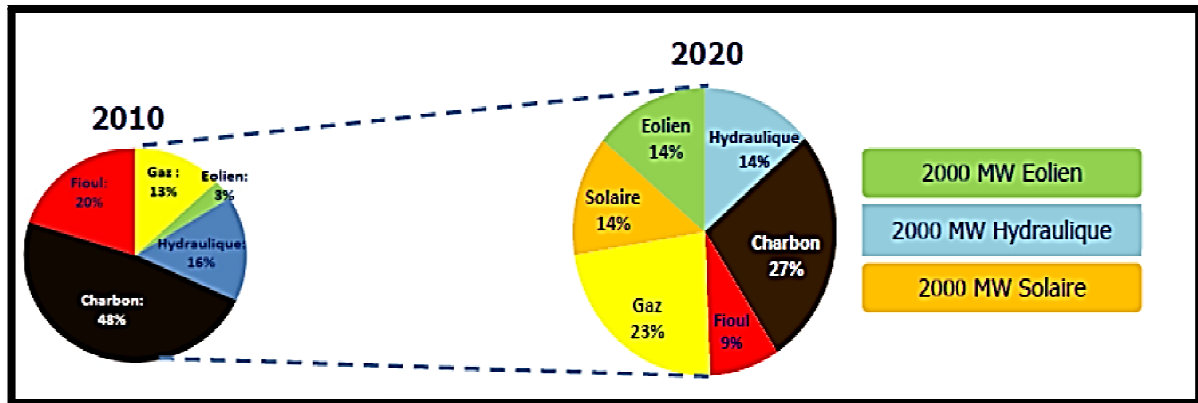


Figure 1 : Stratégie énergétique au Maroc à l'horizon 2020 [ONE17]

Or, les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité propre à condition d'accepter les fluctuations naturelles et parfois aléatoires. En effet, la puissance électrique produite par l'éolienne raccordée au réseau public, est généralement fluctuante puisqu'elle varie brutalement suite à une variation rapide de la vitesse du vent. Ceci peut être considéré comme une perturbation de la puissance injectée dans le réseau et peut mettre en danger la stabilité de celui-ci. Ce travail, s'inscrit dans cette perspective et se base sur les algorithmes intelligents et vise à contribuer à l'amélioration de la qualité de la puissance produite par le système éolien.

Par le passé, la plupart des éoliennes installées étaient à vitesse fixe [Cam04]. Cependant, ces éoliennes possèdent plusieurs inconvénients : un faible rendement énergétique et une courte durée de vie à cause des stress subis par leur structure. En plus, la technologie des éoliennes génère des fluctuations considérables de la tension et de la puissance du réseau lors des variations importantes de la vitesse du vent. Les éoliennes à vitesse variable ont été alors introduites pour apporter des solutions à ces problèmes [Van02] [Aim04], elles fournissent une puissance qui varie de quelques watts jusqu'à plusieurs mégawatts et fonctionnent à vitesse variable et à calage variable. Ce type de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de baisser les charges mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite par rapport aux anciennes éoliennes à vitesse fixe. Ainsi, la production annuelle d'énergie d'une éolienne à vitesse variable a augmenté de 5 à 10% par rapport à une éolienne à vitesse fixe.

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'un générateur. Durant la dernière décennie, le marché des générateurs éoliens à vitesse variable s'est orienté vers des puissances supérieures à 1 MW notamment pour extraire le maximum du gisement éolien sur le site d'implantation. Ces générateurs utilisent souvent la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) comme génératrice qui permet un fonctionnement de l'éolienne à

vitesse variable avec la possibilité de produire le maximum de puissance possible sur une large plage de vitesse de $\pm 30 \%$ autour de la vitesse de synchronisme.

En général, un modèle dynamique précis de l'éolienne est difficile à obtenir. En outre, le modèle non linéaire ne reflète pas fidèlement le fonctionnement du système éolien en raison de plusieurs facteurs, notamment : les dynamiques négligées, les relations mathématiques complexes reliant les différentes grandeurs physiques et les changements de paramètres avec le temps [Asl16]. Pour remédier à ce problème, nous envisageons d'utiliser des algorithmes d'intelligence artificielle dans le but d'introduire plus d'intelligence dans le fonctionnement des aérogénérateurs, en leur imposant des commandes non linéaires intelligentes, robustes et optimales. Ces lois de commande sont amenées à tenir compte de l'aspect dynamique fortement non linéaire de l'éolienne en présence de perturbations provenant du vent, à réduire l'impact de tout type de perturbations sur le système dans son ensemble en les estimant avec suffisamment de précision et à assurer la robustesse du comportement du système vis-à-vis des incertitudes sur les paramètres et leurs variations[Man16] [Gos14].

Dans le domaine de la commande, plusieurs techniques ont été établies pour assurer un réglage désiré. Ces techniques sont élaborées afin de rendre le système insensible aux perturbations extérieures et aux variations paramétriques. Les techniques de commande classique de type PI ou PID couvrent une large gamme dans les applications industrielles. Ce sont des techniques de commande linéaires qui présentent l'intérêt de la simplicité de mise en œuvre et la facilité de la synthèse. Au cours du temps, ses applications sont devenues moins efficaces, notamment si les processus à commander ont des structures complexes et non linéaires. Mais en supposant que l'éolienne fonctionne en régime permanent, la plupart des travaux antérieurs sur la commande des éoliennes ne prennent pas en compte les aspects dynamiques du vent et de la turbine, qui ont de fortes caractéristiques non linéaires [Men18] [Joh06]. Une caractéristique intéressante des machines éoliennes est que la vitesse du vent détermine le point de fonctionnement ; il définit simplement la quantité d'énergie disponible qui peut être convertie en électricité. Le vent ne peut pas être contrôlé ; en d'autres termes, le système est entraîné par le vent, ce qui rend les systèmes éoliens essentiellement différents de la plupart des autres systèmes. Trouver le remplaçant des techniques classiques est le souci de plusieurs chercheurs [Han00].

Notre travail consiste à concevoir des lois de commande d'un aérogénérateur à vitesse variable équipée d'une machine asynchrone à double alimentation fonctionnant en mode génératrice (GADA), en tenant compte de la nature non linéaire de l'aérodynamique de l'éolienne et la nature turbulente du vent. L'objectif est l'amélioration du rendement de l'énergie électrique produite, la maximisation du rendement énergétique, la robustesse des commandes et la sécurité du système par minimisation des efforts subits par le dispositif d'entraînement [Dub07], en se basant sur la commande intelligente.

Plan du mémoire

Ce mémoire est composé de quatre chapitres :

Description et modélisation du système de conversion d'énergie éolienne équipée d'une GADA:

Ce premier chapitre est composé de deux sections :

La première partie est consacrée à l'état de l'art sur les généralités et les aspects théoriques des systèmes de conversion d'énergie éolienne. Une description des différents composants de la conversion d'énergie est détaillée, en citant les avantages et les inconvénients pour chaque élément. Cette partie est achevée par une étude théorique sur la GADA, concernant son principe de fonctionnement, ses inconvénients et ses avantages.

La deuxième partie consiste à décrire le système de conversion d'énergie éolienne mathématiquement avec son modèle non linéaire en mettant quelques hypothèses de travail en évidence.

Généralités sur les commandes avancées utilisées :

Ce deuxième chapitre donne un survol, d'une part, sur les outils intelligents utilisés, qui sont basés sur la commande avec la technique des Modes Glissants, les Supports Vecteurs Machines à Régression et d'autre part sur la technique de commande de Backstepping et l'algorithme d'Optimisation par Essaims Particulaires (PSO) Adaptatif.

Etude et optimisation des performances d'une turbine éolienne à vitesse variable :

Ce chapitre est consacré à la modélisation et la simulation de la partie mécanique de l'éolienne. On présente les différentes techniques utilisées pour l'extraction du maximum de la puissance à vent faible à partir du modèle non linéaire à deux masses, qui sont : une commande à base des Supports Vecteurs Machine à Régression (SVR) combinée à la commande par Modes Glissants (SMC), et une commande à base de la technique de Backstepping avec l'Optimisation par Essaim Particulaires (PSO) adaptatif.

La commande avec SMC a prouvé une meilleure performance en poursuite du système mais il n'y a aucune garantie de robustesse dans le cas où le système est affecté par de larges incertitudes qui produisent ainsi le phénomène de réticence (*chattering* en anglais). Afin de palier à ce problème, on propose de combiner la commande par SMC à SVR. Cette approche donne de meilleures performances en atténuant les fluctuations sur la commande mais l'entrée de commande est toujours discontinue et par conséquent le phénomène de réticence persiste toujours. Pour résoudre ce problème, on a fait recours à une commande robuste multivariable, c'est la technique de Backstepping connue par sa rapidité et sa simplicité de mise en œuvre. L'utilisation de l'algorithme PSO adaptatif pour l'optimisation des gains de Backstepping a apporté encore une amélioration à la commande en termes de vitesse de convergence et en termes de sécurité du système. La stabilité de la commande proposée en boucle fermée est démontrée par le critère de *Lyapunov*.

Une étude comparative des méthodes de commande utilisées est exposée à la fin de ce chapitre, pour positionner chaque technique de point de vue performances dynamiques et statiques.

Commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation GADA:

Dans cette partie, nous développerons deux lois de commande robustes optimales pour le système éolien: une commande adaptative robuste à base des Modes glissants à action Proportionnelle Intégrale PISMC, appliquée à une GADA en présence d'incertitudes larges dans la zone de vitesse du vent faible, et la même loi de commande soit appliquée au modèle à une masse d'une éolienne à vitesse variable dans la zone de vitesse du vent fort avec l'angle de calage fixe et variable.

Dans la première partie de ce chapitre, la commande de la GADA permet l'optimisation de la puissance pour les vents faibles et moyens, elle consiste à combiner la commande par Modes Glissants et le régulateur Proportionnel Intégral. Dans cette étude, nous allons les utiliser pour l'estimation des parties incertaines du modèle de la GADA.

La deuxième partie de ce chapitre, est consacrée à la commande d'une éolienne à vitesse variable dans la zone de fonctionnement à vitesse du vent fort. Dans cette zone, le système de commande a pour objectif de réguler la puissance et la vitesse de rotation, autour de leurs valeurs nominales. Pour commander ce système, deux moyens sont possibles : le calage des pales et le couple de la génératrice. Les structures de commande qui agissent seulement sur le couple et maintiennent l'angle de calage fixe **[Bou16]**, conduisent bien à des résultats acceptables pour la régulation de la vitesse du rotor mais avec de faibles performances en régulation de puissance. Pour tenter d'apporter une amélioration, nous avons alors proposé une commande robuste optimale en couple et en pitch.

La validité en termes d'efficacité, de stabilité et de poursuite des différents contrôleurs proposés qualifiés d'intelligents, robustes et optimales est confirmée par simulation sur l'environnement Matlab/Simulink et nous terminerons avec une conclusion générale et quelques perspectives.

Chapitre 1 : Description et Modélisation du système de conversion d'énergie éolienne

I. Historique

Les premières utilisations du vent en tant qu'énergie par l'homme remontent aux moulins à vent, apparus à l'an 600 tout d'abord en Moyen-Orient puis en Égypte, les moulins à vent produisaient une énergie mécanique qui servait à moudre les grains, mais c'est surtout au Moyen Age que les moulins à vent se sont considérablement développés notamment aux Pays Bas qui s'en servaient pour moudre des céréales, broyer, pulvériser diverses substances, presser ou écraser des olives pour produire de l'huile, ou même pour actionner une pompe, par exemple pour l'irrigation.

La première éolienne destinée à produire de l'électricité fut construite par Charles F. Brush en 1887 pour alimenter sa maison en électricité. L'éolienne était composée de 144 pâles et d'un diamètre de 17 m, elle ne produisait que 12 kW et fonctionnait avec des pales à axe vertical et plusieurs accumulateurs (batteries) pour stocker l'énergie produite[Eol1].



Figure 1.1 : Eolienne de Mr Charles F. Brush en 1887

Par la suite, le météorologiste Danois Poul La Cour (1846-1908) qui voyait dans l'électricité une des techniques qui auraient le plus d'importance dans l'avenir, fit des recherches pour améliorer l'efficacité des moulins à vent et améliorer l'invention de Charles F. Brush. Il découvrit qu'une éolienne à rotation rapide ayant un nombre de pales limité produisait plus d'électricité. Il découvrit ceci grâce à ses recherches dans une soufflerie aérodynamique. Il mit au point une éolienne plus performante que Charles F. Brush doté de moins de pales et tournant beaucoup plus vite ce qui augmenta les rendements d'électricité produite. Le météorologiste Danois Poul La Cour avait dessiné plusieurs éoliennes industrielles dont une qui était vendue en 72 exemplaires au début du XXème siècle. Ces éoliennes visaient à produire de l'hydrogène en utilisant la force du vent pour la convertir en énergie chimique par un processus d'électrolyse[Eol2].

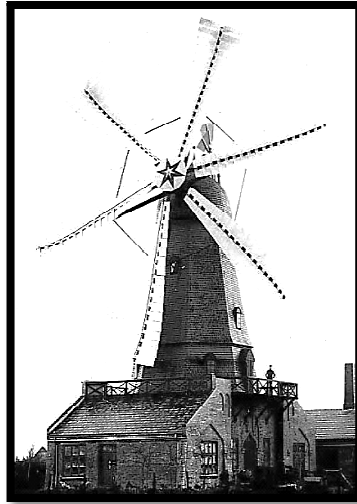


Figure 1.2: Eolienne de Mr Danois Poul La Cour (1846-1908)

En 1956, Johannes Juul, un des élèves de Poul la Cour, avait construit la première éolienne à produire du courant alternatif, elle était composée de 3 pâles et avec une puissance de 200 kW, c'est elle qui a inspiré les éoliennes d'aujourd'hui. Plus tard, Darrieus, un ingénieur français fit construire en 1983 la première éolienne à axe vertical. Il l'avait fait brevété en 1931, cette éolienne dite de type Darrieus dont le fonctionnement repose sur l'effet de portance subit par un profil soumis à l'action d'un vent relatif (effet qui s'exerce sur les ailes d'un avion). Cette configuration présente un important avantage sur les éoliennes classiques: sa capacité à fonctionner quelle que soit la direction du vent[Eol2].

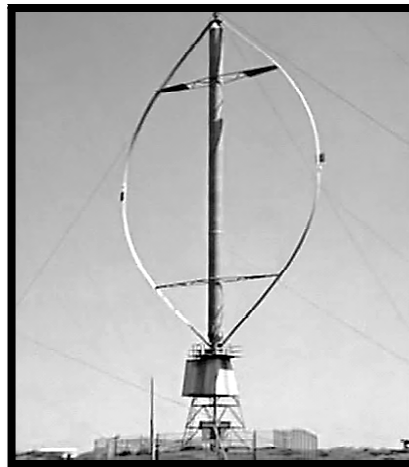


Figure 1.3 : Eolienne de Mr Darrieus en 1983

Pendant tout le XXème siècle, de nombreux essais seront réalisés. En 1957, Johannes Juul avait créé une turbine qu'il avait appelé et qui sert encore aujourd'hui de modèle aux éoliennes modernes avec une puissance d'environ de 1000 kW.

Malheureusement, le marché de l'énergie éolienne est freiné dans son développement pendant une grande partie de XXème siècle en raison de la forte consommation de pétrole et de charbon.



Figure 1.4: Eolienne de Mr Johannes Juul en 1957

La crise pétrolière des années 1970, puis le mouvement anti-nucléaire des années 1980 ont fait grandir l'intérêt pour des énergies alternatives et la recherche de sources d'énergie écologiques et économiquement viables. Les éoliennes conçues à cette époque étaient essentiellement pour la recherche, et coûtaient extrêmement cher. Avec l'aide des gouvernements finançant la recherche internationale et participant à la création d'organismes de recherche dans les années 1980, des nouvelles méthodes de production d'énergie renouvelable ont continué à être explorées, développées et testées. En effet la pénurie de charbon et de pétrole présente l'énergie éolienne comme une véritable alternative et permettre à l'éolien de trouver des fonds pour se développer. Des recherches sont en cours actuellement visant à améliorer ce système qui reste fragile en cas de vents trop violents. Puis il y a aussi l'éolienne classique que l'on voit couramment[Eol3].



Figure 1.5: Eolienne classique depuis 1980

Les experts internationaux du climat et de l'environnement s'accordent sur le fait que l'atmosphère se réchauffe et que les ressources s'épuisent. À cela s'ajoute le fait que les centrales de production d'énergie bâties dans les années 1960 et 1970 vont bientôt devoir être remplacées. Les impératifs économiques et politiques ont considérablement changé depuis

leurs constructions et les problèmes environnementaux ne peuvent plus être ignorés. Les traités internationaux, comme le protocole de Kyoto, établissent des engagements contraignants pour la réduction de l'émission des gaz à effet de serre dans les pays industrialisés. L'exploitation à l'échelle internationale des ressources énergétiques renouvelables est de plus en plus nécessaire. L'énergie éolienne semble ainsi promise à un bel avenir.

Au Maroc :

Après le deuxième choc pétrolier, le Maroc, à l'instar de beaucoup de pays disposant de peu de ressources énergétiques conventionnelles, s'est intéressé aux énergies renouvelables. C'est ainsi que, dès 1982, avec la création du Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER), établissement public sous la tutelle du Ministère de l'Énergie et des Mines, le Département de l'Énergie a intégré les énergies renouvelables dans la politique énergétique nationale.

Le Maroc dépend à 95 % de l'extérieur pour ses besoins énergétiques. L'objectif affiché du gouvernement marocain est de diminuer cette dépendance à 85 % à l'horizon 2020. A cette échéance, les énergies renouvelables fourniront 40 % de la production électrique totale. Disposant d'un grand potentiel en matière d'énergie éolienne, le Royaume entend exploiter pleinement cette source propre et inépuisable. Or, l'Etat est le principal moteur du développement des énergies renouvelables au Maroc à travers les activités de l'Office National de l'Electricité et de l'Eau potable (ONEE). L'Agence pour le Développement des Energies Renouvelables et de l'Efficacité Energétique (ADEREE) contribue à mettre en œuvre la politique du gouvernement. Or, le Maroc dispose de 4 zones particulièrement ventées : l'extrême nord du pays (Tanger, Tétouan), la région d'Essaouira, la zone Atlantique sud de Tarfaya à Lagouira et le couloir de Taza entre les chaînes montagneuses de l'Atlas et du Rif. Le vent atteint dans ces régions une vitesse moyenne de 8 m/s.

Ce projet éolien fait partie du vaste plan énergétique lancé par le Maroc qui vise à couvrir 52% de ses besoins grâce aux énergies renouvelables d'ici 2030. Après des phases de prospection, de maturation de l'offre technique et de développement de projets pilotes importants, les énergies renouvelables ont été adoptées par des programmes nationaux de développement, notamment d'électrification et d'approvisionnement en eau potable des zones rurales pour le photovoltaïque et par la mise en œuvre de projets de parcs éoliens de puissance et de centrales thermo-solaires.

Concernant l'énergie éolienne, il faut remarquer qu'un des principaux atouts pour le Maroc est tout d'abord son gisement. Le Maroc bénéficie d'un gisement éolien important avec des régions dépassant 10 mètres par seconde (10 m/s) de vitesse annuelle moyenne du vent. La mise en évidence de ce gisement a été réalisée par le Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER) avec l'aide de la coopération allemande (GTZ) qui a permis l'installation de plusieurs mâts de mesure sur différents sites et le suivi des données sur des périodes d'au moins une année. Ce programme se doit d'être développé pour affiner les données dans certaines régions prometteuses. Il a cependant permis de définir les sites où aujourd'hui les grands projets éoliens sont lancés. Une première carte éolienne du pays a montré que la zone Nord (Tanger à Tétouan) et la bande côtière allant de Tarfaya jusqu'à Lagouira présentent des sites exceptionnels avec des vents réguliers et des vitesses moyennes suffisantes pour développer des projets rentables[Eol4].

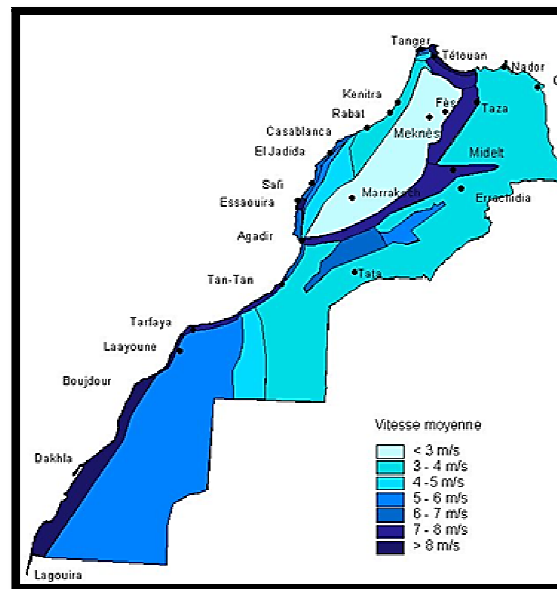


Figure 1.6: Gisement éolien au Maroc

Cette carte permet de cibler les zones les mieux ventées pour installer des parcs éoliens en vue d'alimenter des régions isolées pour avoir une autonomie énergétique par rapport au réseau national déjà très chargé. Le Maroc souhaite bénéficier de sa situation géographique stratégique et de la connexion électrique existante avec l'Espagne pour, à terme, revendre son surplus d'énergie et passer d'une position d'importateur d'énergie à celui d'exportateur.

Ces grands projets de type éoliens, dénotent d'une volonté aussi claire qu'ambitieuse du Royaume à aller de l'avant dans son processus de réalisation du développement durable. Une volonté déclinée notamment par l'annonce du Maroc, en prélude de la COP21 (30 novembre - 11 décembre à Paris), à lutter contre le réchauffement climatique, et à réduire ses émissions de gaz à effet de serre de 42% d'ici 2030. L'efficacité énergétique dans tous les secteurs économiques (industries, transports, production d'énergies, éclairage, agriculture...) permettra au Maroc d'économiser 12% de sa consommation énergétique à l'horizon 2020 et 20% en 2030.

II. Introduction

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables a connu une forte croissance durant ces dernières années du fait que cette énergie est renouvelable, fiable, rentable et non polluante et c'est l'une des plus prometteuses des sources d'énergie renouvelable à travers le monde. L'évolution rapide de cette technologie a donné naissance aux éoliennes fonctionnant à vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de diminuer les efforts mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe[Ern85]. De nos jours, la forme la plus connue et utilisée de technologie éolienne est l'aérogénérateur qu'est un dispositif de production de l'électricité à partir de l'énergie cinétique du vent. Pour ce faire, l'énergie cinétique du vent est captée par les pales afin de la transformer en énergie mécanique, celle-ci est transformée à son tour en énergie électrique par un générateur.

Ce chapitre est un préalable à l'étude du système de conversion d'énergie éolienne (SCEE) fonctionnant à vitesse variable équipée d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA):

D'une part, nous allons présenter une bibliographie sur les différentes technologies d'éoliennes existantes ainsi le principe de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable équipée d'une MADA et leurs différents composants. Ensuite, les différentes associations machines électriques-convertisseurs statiques, utilisées pour la conversion éolienne seront étudiées. Vu les avantages incontestés de la MADA pour la conversion éolienne, elle sera particulièrement présentée en détail dans ce chapitre.

D'autre part, nous allons élaborer le modèle mathématique de la partie mécanique (la turbine) issu des lois de la physique et de la mécanique des fluides pour le comportement aérodynamique et le modèle mathématique de la partie électrique (la génératrice); à savoir la MADA en mode de fonctionnement génératrice (GADA) qui est une machine qui connaît beaucoup d'avantage dans le domaine de production des énergies électriques d'origine éolienne. Elle permet de produire l'électricité d'une façon optimale pour différentes vitesses de vent et de commander indépendamment les puissances actives et réactives.

III. Etat de l'art sur les technologies éoliennes

III.1. Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une énergie « renouvelable » non dégradée, qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif, elle fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité. Elle est véhiculée par les vents, ceux-ci sont dus indirectement à l'énergie solaire qui, en créant des différences de température entre les régions chaudes et les régions froides, provoque des vents ; le vent est une ressource propre et inépuisable.

Un aérogénérateur (couramment appelé éolienne) est une machine qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière. Cette énergie est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences.

Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale [Bel10]:

- Eoliennes de petite puissance : inférieure à 40 kW
- Eoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW.
- Eoliennes de forte puissance : supérieure à 1 MW.

III.2. Conception d'une éolienne

Du point de vue conception, les éoliennes peuvent être classées en plusieurs catégories :

- Selon l'orientation de leur axe de rotation par rapport à la direction du vent : à axe horizontal ou vertical.
- Selon la vitesse de rotation de l'éolienne : à vitesse fixe ou variable.

- Selon l'accouplement mécanique entre la turbine et la génératrice : à attaque directe ou indirecte.

III.2.1. Eolienne à axe vertical : VAWT

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique. Plusieurs prototypes ont vu le jour mais rares sont ceux qui ont atteint le stade de l'industrialisation. Elles présentent l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance. En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mat, souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal.

Deux structures des aérogénérateurs à axe vertical sont parvenues au stade de l'industrialisation, on trouve les aérogénérateurs à rotor de Darrieus : conçu par l'ingénieur français George Darrieus et les aérogénérateurs à rotor de Savonius : inventé par le finlandais Siguard Savonius en 1924 [Lec09].

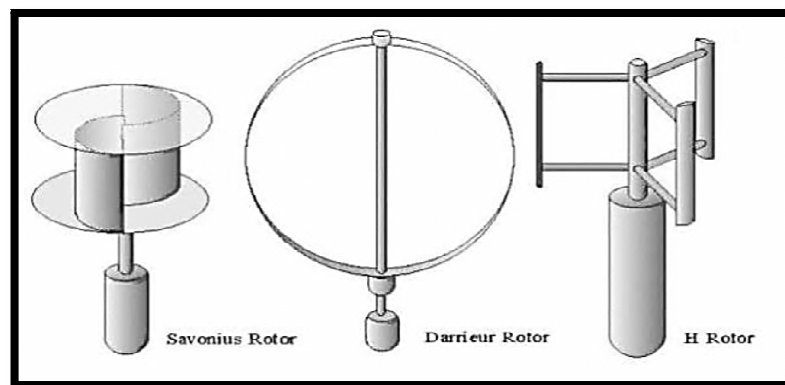


Figure 1.7: Eoliennes à axe vertical : VAWT

III.2.2. Eolienne à axe horizontal : HAWT

Les éoliennes à axe horizontal beaucoup plus largement employées, même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentent un rendement aérodynamique plus élevé, démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, Le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien [Bel10].

Les éoliennes à axe horizontal sont plus stables car la charge aérodynamique est relativement uniforme et elles présentent le coefficient de puissance le plus élevé actuellement. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 63 m pour des éoliennes de plusieurs MW.



Figure 1.8: Eoliennes à axe horizontal

Une turbine à axe horizontal demeure face au vent. Elle est fixée au sommet d'une tour, ce qui lui permet de capter une quantité plus importante d'énergie éolienne. Suivant leur orientation en fonction du vent, les turbines éoliennes à axe horizontal sont dites en «amont » ou en « aval ».

Chaque configuration possède des avantages et des inconvénients : la formule « amont » requiert des pales rigides pour éviter tout risque de collision avec la tour, alors que la configuration « aval » autorise l'utilisation de rotors plus flexibles. Par ailleurs dans le cas d'une machine « amont », l'écoulement de l'air sur les pales est peu perturbé par la présence de la tour. L'effet de masque est plus important dans le cas d'une machine « aval ».

Enfin une machine « aval » est théoriquement auto-orientable dans le lit du vent, alors qu'une éolienne « amont » doit généralement être orientée à l'aide d'un dispositif spécifique. On constate néanmoins que la majeure partie des éoliennes de grande puissance adoptent la configuration « amont » [Bel10].

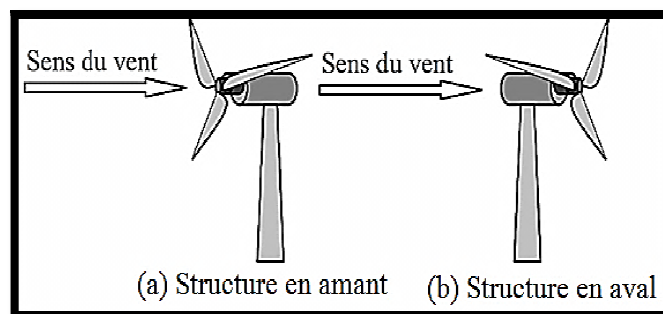


Figure 1.9: Eoliennes HAWT : (a) Structure en amont, (b) Structure en aval

III.2.3. Eoliennes à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été commercialisées. La Figure 1.9 montre cette technologie dont la génératrice asynchrone à cage est directement connectée au réseau électrique; un multiplicateur de vitesse entraîne cette machine à une vitesse qui est maintenue approximativement constante grâce à un système mécanique d'orientation des pales; une batterie de condensateurs est souvent associée pour compenser la puissance

réactive nécessaire à la magnétisation de la machine asynchrone à cage. Le rotor tourne toujours à la même vitesse angulaire, indépendamment de la vitesse du vent. Cette vitesse de fonctionnement dépend uniquement de la structure de la turbine et de la fréquence imposée par le réseau électrique. Les rotors à vitesse fixe sont souvent munis d'un système d'orientation de pales permettant à la génératrice de fonctionner au voisinage du synchronisme.

Cette technologie est moins chère et utilise un système électrique simple ne nécessitant pas de dispositif d'électronique de puissance pour la commande, par contre elle présente des inconvénients puisqu'elle consomme l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la machine asynchrone et il y a toujours une variation du couple mécanique à cause du mouvement des pales pour garder une vitesse constante, ce qui entraîne des variations rapides du courants dans le réseau.

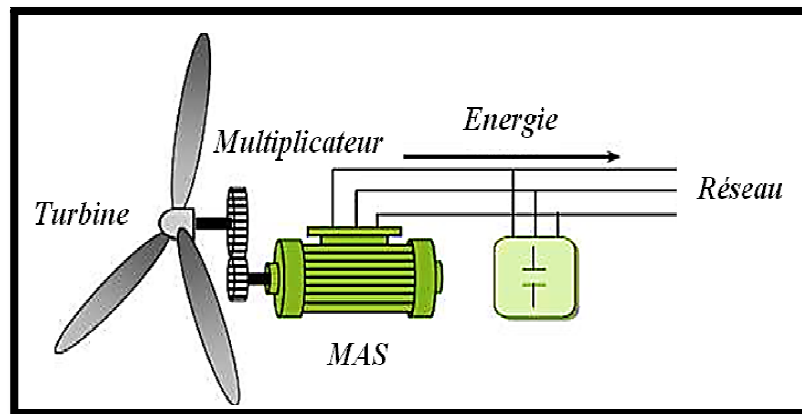


Figure 1.10: Connexion au réseau d'un système à vitesse fixe

III.2.4. Eoliennes à vitesse variable

C'est sans doute la technologie des éoliennes la plus répandue. Le terme vitesse variable désigne le fait que la vitesse de la turbine est indépendante de la fréquence du réseau électrique. L'avantage principal d'opérer la turbine à vitesse variable est de maximiser la capture de l'énergie disponible dans le vent. Contrairement aux éoliennes à vitesse fixe, les éoliennes à vitesse variable sont des conceptions récentes développées grâce à l'évolution de l'électronique de puissance, pour établir une séparation complète entre la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de l'éolienne qui sera adaptée à la vitesse du vent afin d'optimiser la puissance fournie au réseau, elles permettent à la fois de récupérer plus d'énergie, de réduire les coûts du système mécanique, de réduire le bruit et d'améliorer la qualité de l'énergie produite[Lar00]. Il existe plusieurs structures possibles que nous pouvons classer suivant la gamme de variation de la vitesse de rotation de la machine électrique utilisée.

L'obtention de la vitesse variable est souvent réalisée en utilisant deux solutions technologiques :

- La première est représentée dans la Figure 1.11, cette structure utilise une machine asynchrone à rotor bobiné dont le stator est connecté directement au réseau électrique et le rotor connecté à un redresseur alimentant une charge. Celui-ci se compose d'un redresseur à commutation forcée et d'un onduleur à commutation naturelle.

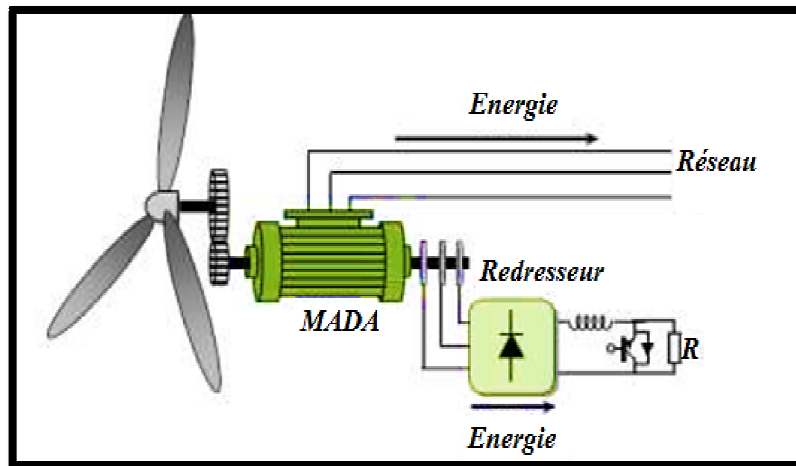


Figure 1.11: Connexion d'un système à vitesse variable au réseau

Dans cette technologie, la vitesse de rotation de la turbine est à environ 10% de la vitesse du synchronisme, mais elle reste encore une faible variation, le système de contrôle est simple et l'électronique de puissance est faiblement dimensionnée, par contre la puissance extraite n'est plus optimisée. Cette structure apporte peu d'avantages par rapport à la structure MAS. Toutefois, on peut la considérer comme un premier pas vers la technologie des éoliennes à vitesse variable.

- La deuxième solution représentée dans la Figure 1.12, la machine asynchrone à rotor bobiné est doublement alimentée par le stator et à travers un convertisseur à commutation naturelle par le rotor. La maîtrise de l'état électromagnétique de la machine par le rotor permet de fonctionner à fréquence et amplitude nominales du réseau même si le rotor s'éloigne de la vitesse de synchronisme. Le dimensionnement du convertisseur est proportionnel au glissement maximal du rotor, autrement dit, il dépend de l'écart maximal entre la vitesse desynchronisme et la vitesse réelle du rotor. En effet, en plus de la vitesse variable, cette structure offre une gestion de puissance très efficace en utilisant une interface d'électronique de puissance dimensionnée à seulement 30% de sa puissance nominale. Actuellement, c'est la structure la plus utilisée vu les avantages qu'elle apporte.

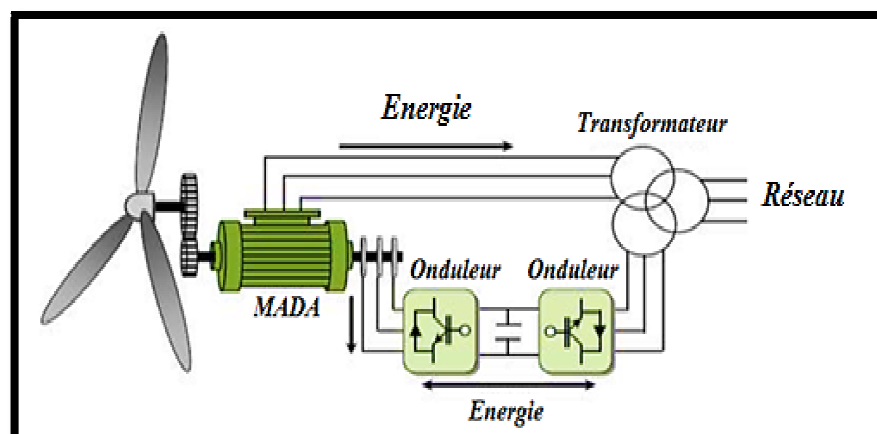


Figure 1.12: Connexion d'un système à vitesse variable au réseau

Le contrôle de puissance de la machine asynchrone à double alimentation par la commande des deux convertisseurs de puissance permet l'optimisation de l'énergie extraite pendant les vents faibles et moyens d'une part, et le contrôle de l'angle de calage des pales de la turbine

permet de limiter la puissance extraite, donc la protection du système, pour les vents forts, d'une autre part. Cette structure fait l'objet de notre travail et elle sera étudiée profondément dans les autres chapitres de ce mémoire.

III.2.5. Eoliennes à attaque directe

Le principe de l'attaque directe est d'accoupler la génératrice directement sur l'hélice. Cette dernière fonctionne à la vitesse basse du rotor, ce qui permet de supprimer le multiplicateur, qui est le siège de pertes de puissance et source de bruit. Ce type de génératrice doit tourner à des vitesses comprises entre 18 et 50 tr/min. Pour produire de l'électricité avec ce type de machines, il faut que la génératrice possède un grand nombre de pôles permettant d'obtenir une fréquence de l'ordre de 50 Hz[Can04].

III.2.6. Eolienne à attaque indirecte

Dans ce type d'éoliennes, la vitesse de rotation de la turbine est relativement faible, et le couple mécanique est élevé en sortie d'arbre de la turbine. Les machines électriques sont dimensionnées en couple, et on cherche à les faire tourner rapidement pour atteindre des puissances massiques satisfaisantes. C'est pourquoi on intercale un multiplicateur mécanique à engrenage entre la turbine et la génératrice ; cette dernière est souvent une machine asynchrone à cage ou alors une machine à double alimentation pour un fonctionnement à vitesse variable économique[Can04].

III.3. Intérêt des éoliennes à vitesse variable

La Figure suivante donne un exemple de caractéristiques de la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent. Il est clair que si la vitesse de rotation est fixe les maxima théoriques des courbes de puissance ne seraient pas exploités. Pour cela, et afin de pouvoir optimiser l'extraction de puissance, il faut ajuster la vitesse de rotation de l'arbre en fonction de la vitesse du vent[Fra05].

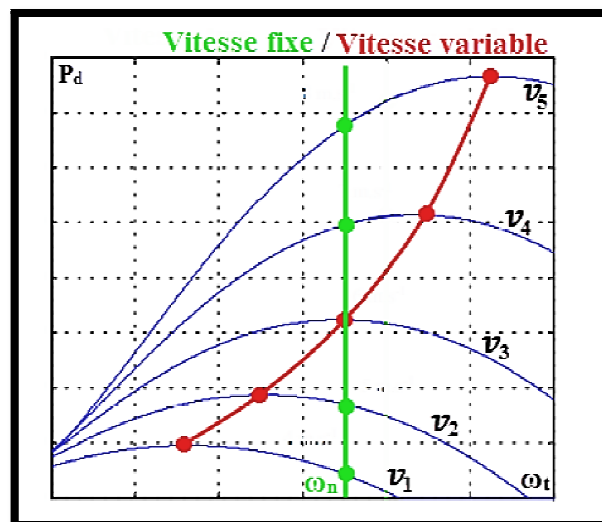


Figure 1.13: Exemple de puissance théorique disponible au niveau d'une éolienne

Les principaux avantages des éoliennes à vitesse variable équipées d'une machine asynchrone à double alimentation en mode génératrice (GADA) comparés aux générateurs à vitesse fixe sont les suivants :

- L'augmentation de la plage de fonctionnement, notamment pour les faibles vitesses de vent où le maximum de puissance peut être aisément converti, ainsi une éolienne à vitesse variable peut extraire annuellement de 8 à 15% plus d'énergie du vent qu'une éolienne à vitesse fixe.
- Un système d'orientation des pales simplifié. En effet la possibilité de contrôler la vitesse du générateur via le couple électromagnétique permet de réduire le rôle du système d'orientation des pales, qui interviendra essentiellement pour limiter la vitesse de la turbine et la puissance générée en présence de vitesse de vent élevées. En conséquence, pour de faibles vitesses de vent, l'angle d'orientation des pales devient fixe.
- La réduction des efforts mécaniques par le fait que lors de variation du vent, la vitesse de la turbine est adaptée. L'élasticité ainsi créée permet d'amoindrir l'incidence des rafales de vent sur la puissance générée pour ce domaine de fonctionnement.
- La réduction du bruit lors des fonctionnements à faible puissance.
- Une meilleure intégration de l'éolienne dans le réseau électrique.

III.4. Principaux constituants d'une éolienne

L'éolienne comporte généralement des éléments mécaniques et électriques qui sont illustrés sur la Figure 1.14 :

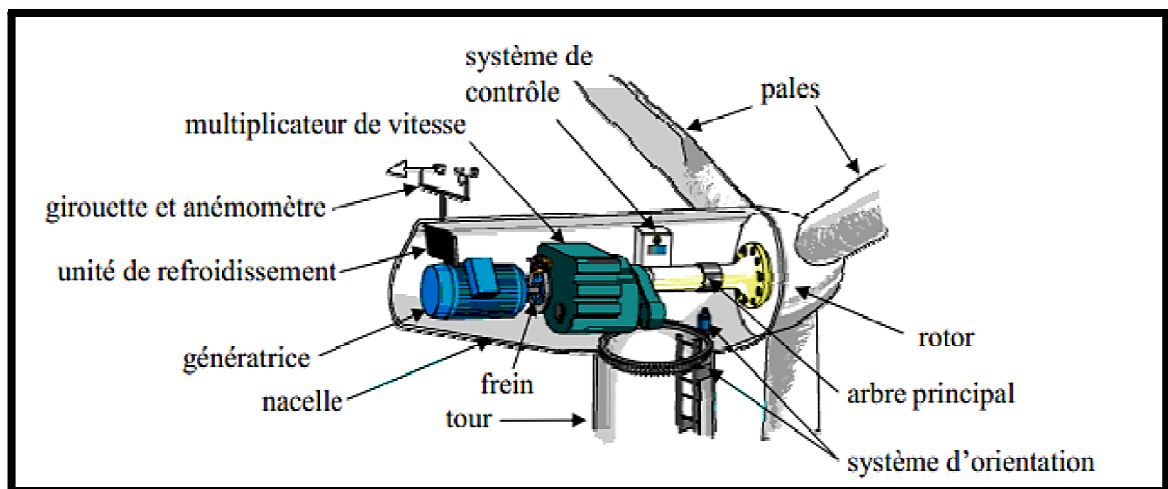


Figure 1.14: Architecture d'une éolienne à axe horizontal

Les trois éléments principaux d'une éolienne sont : le mât, le rotor et la nacelle.

III.4.1. Mât

C'est un tube d'acier qui supporte la nacelle et le rotor de la turbine, il doit être suffisamment solide pour supporter non seulement la nacelle et le rotor, mais aussi les charges puissantes provoquées par le vent : d'une part la puissance exercée par le vent directement sur la tour, d'autre part la puissance transmise par le rotor. Il est important que le mât soit haut du fait de l'augmentation de la vitesse du vent en hauteur pour bénéficier du maximum de l'énergie cinétique du vent et d'éviter les perturbations près du sol. A l'intérieur, elle contient généralement les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, les

appareillages de connexion au réseau de distribution ainsi que l'escalier d'accès à la nacelle. Au sommet du mât se trouve la nacelle[Aim04].

III.4.2. Rotor

C'est la partie tournante dans une éolienne. Il capte et transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le rotor est composé de plusieurs pales (en général trois) assemblées dans leur moyeu. Les pales sont aujourd'hui faites de matériaux composites à la fois légers et assurant une rigidité et une résistance suffisantes (polyester renforcé de fibre de verre et/ou fibre de carbone), leur longueur atteinte actuellement entre 30 et 55 mètres, soit un diamètre du rotor compris entre 60 et 110 mètres. Le rotor peut être couplé directement ou indirectement à un générateur électrique[Abu08].

III.4.3. Nacelle

Son rôle est d'abriter l'installation de génération de l'énergie électrique ainsi que ses périphériques. Elle est constituée des éléments suivants :

- **Multiplicateur de vitesse:** sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique. En effet, la faible vitesse de rotation de l'éolienne ne permet pas de générer du courant électrique dans de bonnes conditions avec les générateurs de courant classiques. L'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.
- **Génératrice électrique:** c'est l'élément principal de la conversion mécano-électrique qui est généralement une machine synchrone, asynchrone à cage ou à rotor bobiné. La puissance électrique de cette génératrice peut varier entre quelque kW à 10 MW.
- **Système de refroidissement:** se compose généralement d'un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice, et d'un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur.
- **Contrôleur électronique - girouette – anémomètre:** est chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante, gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble rotor + nacelle face au vent. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (capteur de vitesse du vent) et une girouette (capteur de direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle. Enfin, le contrôleur assure également la gestion des différentes pannes pouvant survenir.
- **Dispositif d'orientation de la nacelle:** il permet la rotation de la nacelle à l'extrémité supérieure de la tour, autour de l'axe vertical. L'orientation est généralement assurée par des moteurs électriques, par l'intermédiaire d'une couronne dentée. De nombreuses éoliennes comportent un système de blocage mécanique de la position de la nacelle suivant une orientation donnée, cela permet de bloquer l'éolienne durant les opérations de maintenance.
- **Dispositif d'orientation des pâles:** qui sert à la régulation de la puissance (réglage aérodynamique). Il permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent pour maintenir une puissance sensiblement constante à vent fort (turbines à vitesse variable) ou de maintenir une vitesse de rotation constante quel que soit la vitesse du vent (turbines à vitesse fixe).
- **Système de commande:** qui contrôle en permanence le bon fonctionnement de l'éolienne et qui intervient automatiquement, en cas de défaillance pour l'arrêter.
- **Arbre:** qui relie le moyeu au multiplicateur, il contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.

III.5. Conversion de l'énergie éolienne

Le principe de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique a été largement présenté ces dernières années dans plusieurs travaux. La nacelle a pour rôle de capter l'énergie cinétique du vent et la transformer en énergie électrique grâce à des générateurs électriques de type synchrone ou asynchrone (Figure 1.15). Cette opération est basée sur un certain nombre de lois physiques qui sont présentées dans ce qui suit.

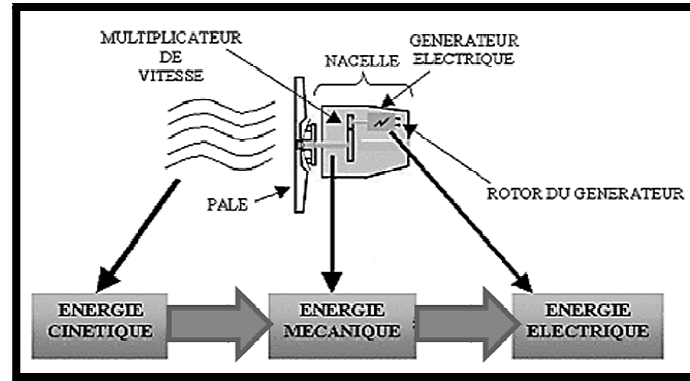


Figure 1.15: Principe de conversion d'énergie éolienne

III.5. Puissance aérodynamique

La puissance du vent ou puissance éolienne traversant une surface, est définie de la manière suivante

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (1.1)$$

Où :

- ρ est la densité de l'air (approx. 1.22 kg/m^3 à la pression atmosphérique 15°C).
- S est la surface circulaire balayée par la turbine.
- R est le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale ($S = \pi R^2$).
- v est la vitesse du vent.

La puissance aérodynamique P_a extraite par le rotor de la turbine (Annexe B), est ainsi une fonction non linéaire de la vitesse du vent, de la vitesse du rotor et de l'angle de calage. Elle est donnée par l'expression suivante :

$$P_a = \frac{1}{2} \rho S v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1.2)$$

Il est impossible d'extraire toute l'énergie disponible, pour cela on introduit un coefficient de performance C_p qui exprime la capacité de la turbine à extraire de l'énergie du vent. Ce paramètre est une fonction de l'angle de calage β et la vitesse spécifique λ , cette dernière est définie comme le rapport entre la vitesse tangentielle du bout de la pale $R\omega_t$ et la vitesse du vent (Figure 1.16).

$$\lambda = \frac{R\omega_t}{v} \quad (1.3)$$

Où ω_t est la vitesse de rotation du rotor de la turbine.

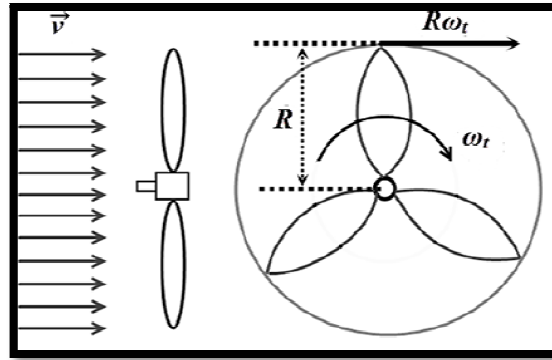


Figure 1.16: Vitesse tangentielle et angulaire

III.6. Coefficient de puissance aérodynamique

Le coefficient $C_p(\lambda, \beta)$ est propre à chaque éolienne du fait qu'il dépend du nombre de pâles du rotor (par décrochage) et du type du fonctionnement (à vitesse fixe ou variable).

Il est impossible d'extraire toute l'énergie disponible du vent qui arrive sur une éolienne. Cela signifie que la puissance maximale récupérée par l'éolienne ne pourra jamais atteindre une valeur plus de 59 % de la puissance disponible du vent. Cette limite supérieure théorique du coefficient de puissance est définie par la limite de BETZ [Lou10]:

$$C_{p\max} = \frac{16}{27} \cong 0.5926 \quad (1.4)$$

Ce coefficient de rendement peut avoir aussi une forme sinusoïdale (Annexe B), Le coefficient de puissance de l'éolienne considérée dans cette thèse est donné:

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) \exp \left(-\frac{C_5}{\lambda_i} \right) + C_6 \lambda \quad (1.5)$$

Où :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (1.6)$$

Et avec :

$$C_1 = 0.5109 ; C_2 = 116 ; C_3 = 0.4 ; C_4 = 5 ; C_5 = 21 ; C_6 = 0.0068$$

La Figure suivante représente la variation de ce coefficient en fonction de la vitesse spécifique λ , pour plusieurs valeurs de β :

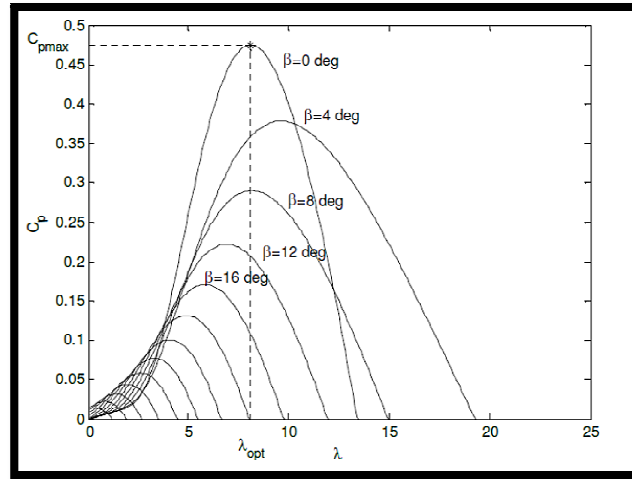


Figure 1.17 : Coefficient de puissance en fonction de λ et β

III.7. Couple aérodynamique.

La puissance aérodynamique extraite par l'aéromoteur est convertie en puissance mécanique qui se traduit par un couple moteur T_a qui fait tourner le rotor à une vitesse ω_t [Bou06], ainsi on a :

$$T_a = \frac{P_a}{\omega_t} = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v^2 \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \quad (1.7)$$

Avec le coefficient du couple aérodynamique est égale à :

$$C_q(\lambda, \beta) = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \quad (1.8)$$

Comme le coefficient de puissance C_p dépend de la vitesse du vent, de la vitesse de rotation de la turbine ω_t et de l'angle de calage β , le coefficient du couple aérodynamique C_q est exprimé le plus souvent en fonction de λ et β .

III.8. Principe de fonctionnement d'une éolienne équipée d'une GADA

Le choix géographique du site éolien est primordial dans un projet de production d'énergie. Les caractéristiques du vent déterminent la quantité de l'énergie qui pourra être effectivement extraite du gisement éolien. Pour connaître les propriétés du site, des mesures de la vitesse du vent ainsi que sa direction sur une grande période du temps sont nécessaires.

Les éoliennes ne fonctionnent que lorsque le vent souffle. Ces systèmes de conversion d'énergie éolienne permettent de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission, puis en énergie électrique via un aérogénérateur. La vitesse de rotation du rotor est de 12 à 15 tr/min, doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tr/min pour une machine à deux paires de pôles, vitesse nécessaire au bon fonctionnement de la génératrice.

Des convertisseurs électroniques de puissance ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique auquel elle est raccordée (50 Hz au Maroc), tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent. La tension

de l'électricité produite par la génératrice, de l'ordre de 600 à 1000 V, est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mât, jusqu'à un niveau de 20 ou 30 KV. Cette tension produite est convenable au réseau sur lequel toute l'électricité produite est déversée.

Pour pouvoir démarrer, une éolienne a besoin d'une vitesse de vent minimale, de l'ordre de 10 à 15km/h donc si la vitesse du vent augmente, grâce au calculateur et une girouette située à l'arrière de la nacelle, une commande aux moteurs d'orientation, l'éolienne se déplace face au vent. Les trois pales sont mises en mouvement par la seule force du vent. Elles entraînent avec elles l'axe lent, le multiplicateur, l'axe rapide et la génératrice asynchrone.

Dès que la vitesse du vent est suffisante, l'éolienne peut être couplée au réseau. Les pales tournent alors à environ 30tr/min et entraînent la génératrice à 1515 tr/min. Cette vitesse de rotation restera constante tout au long de la période de production. Lorsque la vitesse du vent atteint 50km/h l'éolienne fournit sa puissance nominale. La génératrice délivre alors une tension et courant électrique alternatif dont la puissance varie en fonction de la vitesse du vent.

Pour des vitesses du vent supérieur à 50km/h, la puissance est maintenue constante en réduisant progressivement la portance des pales. L'unité hydraulique régule la portance en modifiant l'angle de calage des pales qui pivotent sur leur roulement.

Au-delà de 90km/h, les pales sont mises en drapeau (parallèle à la direction du vent) et leur portance devient quasiment nulle donc l'éolienne cesse de tourner : elle ne produit plus d'électricité. Tant que la vitesse du vent reste supérieure à 90km/h, le rotor tourne (en roue libre) et la génératrice est déconnectée du réseau. Tout d'abord, la fréquence d'occurrence des vents d'une vitesse supérieure à 90km/h est généralement faible (inférieure à 1%), et si les éoliennes fonctionnaient dans ces conditions, elles subiraient des efforts importants qui entraîneraient une usure prématurée de leurs équipements. Compte tenu du faible gain relatif sur la production que représente un fonctionnement par vent fort, les ingénieurs préfèrent, dans ces conditions, stopper les machines et attendre le retour de vents plus modérés et plus réguliers.

Dès que la vitesse du vent diminue, l'éolienne se remet en production. Toutes ces opérations sont entièrement automatisées. En cas d'arrêt d'urgence un frein à disque placé sur l'axe rapide permet de mettre l'éolienne en sécurité.

Il existe un système de refroidissement qui comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice, et un refroidisseur à huile pour le multiplicateur. Certaines éoliennes comportant un refroidissement à l'eau.

La puissance d'une éolienne classique est de 1 à 1,5MW, mais les éoliennes de la nouvelle génération atteignent 2 à 3MW et des modèles de 5MW sont déjà testés par les constructeurs[Man10].

III.8.1. Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable

La Figure suivante montre les zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable :

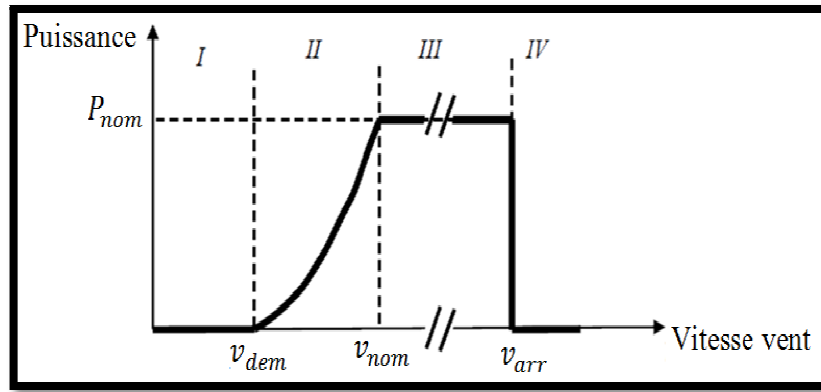


Figure 1.18: Courbe typique de la puissance produite par une éolienne

- La vitesse de démarrage (v_{dem}) est définie comme la vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à générer la puissance. En dessous de cette vitesse, il n'est pas efficace d'activer la turbine car l'énergie produite serait inférieure à l'énergie du fonctionnement.
- La vitesse nominale (v_{nom}) est la vitesse du vent pour laquelle l'éolienne produit sa puissance nominale.
- La vitesse d'arrêt (v_{arr}) est la vitesse maximale du vent à laquelle l'éolienne peut encore fonctionner normalement. Au-delà de cette vitesse, le rotor doit être arrêté pour éviter d'endommager les pales, le générateur électrique et d'autres composants.

Ces trois vitesses divisent la zone de fonctionnement de l'éolienne en quatre:

- **Zone I:** Le vent n'est pas suffisant pour faire fonctionner la turbine, la puissance captée est nulle.
- **Zone II:** La puissance fournie par l'arbre dépend de la vitesse du vent, le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent.
- **Zone III:** La vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation de vitesse et la puissance captée est limitée à P_{nom} .
- **Zone IV:** La vitesse du vent est trop importante, la turbine est arrêtée par un système de protection et la puissance extraite est nulle.

III.8.2. Transmission de la puissance

La puissance captée par la turbine est ensuite transmise à la génératrice. Dans le cas où cette génératrice est une machine asynchrone standard (structures appelées MAS, GADA,...), un multiplicateur de vitesse est inséré sur l'arbre afin d'effectuer l'adaptation de vitesse.

Le multiplicateur de vitesse permet, outre l'adaptation de vitesse, d'avoir une certaine élasticité entre ce qui se passe côté entrée (source primaire fluctuante) et côté sortie (générateur et réseau). Ceci n'est pas sans conséquences, puisque la majorité de la maintenance sur ces structures concerne le multiplicateur de vitesse qui subit des contraintes importantes. Le multiplicateur introduit donc des problèmes de maintenance (une opération tous les six mois est généralement conseillée), des problèmes de poids (environ 19 tonnes pour l'éolienne N80-2500kW de NORDEX)[Eol5] et des problèmes d'oscillations mécaniques. Certains constructeurs ont donc cherché à le supprimer, système dit à attaque directe. Par conséquent, cela impose alors au générateur électrique d'être capable de tourner à la même vitesse que la turbine, donc présentant un nombre important de paires de pôles, donc

une machine spécifique. Enfin, certains constructeurs ont commencé à proposer récemment des structures « intermédiaires » composées d'un multiplicateur à rapport réduit (de l'ordre de 10) et d'une génératrice au volume moins important[Yan12].

III.9. Machines asynchrones à double alimentation : MADA

III.9.1. Structure de la MADA

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique ou l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à rotor bobiné ou à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde. La robustesse et le faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur les bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne. Mais malgré toutes les caractéristiques et avantages des machines asynchrones, ces dernières présentent le défaut d'imposer la présence du multiplicateur de vitesse car elles possèdent un couple mécanique insuffisant pour un couplage mécanique aux pales[Mul08].

Alors, la MADA est une machine à rotor bobiné avec un système de balais et de bagues. Le stator de la machine est directement connecté au réseau au travers d'une chaîne de convertisseurs électroniques à bus continu intermédiaire. La MADA est alimentée à partir de la tension réseau et de la tension à la sortie du convertisseur électronique de puissance à fréquence variable associée au rotor. Afin d'obtenir des vitesses de rotation hypo-synchrone et hyper-synchrone, la chaîne de convertisseurs électronique associée au rotor doit être bidirectionnelle. Cela est effectué à partir d'un convertisseur back-to-back qui est constitué par deux convertisseurs de tension (côté rotor et côté réseau) avec un bus continu en commun. Le convertisseur de tension côté réseau est connecté à celui-ci via trois bobines permettant de filtrer les harmoniques de courant.

Il existe d'autres raisons pour l'utilisation d'une MADA pour une éolienne à vitesse variable; comme la réduction des efforts sur les parties mécaniques, la réduction du bruit, et la possibilité du contrôle des puissances actives et réactives[Toh15].

III.9.2. Modèle fonctionnement en Génératrice

En générale, la MADA permet de fonctionner en mode moteur et en mode générateur, mais la différence avec les autres types de machine réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur. Le cas de la MADA, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper-synchronisme ou en hypo-synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur[Gai10].

Dans notre travail on s'intéresse au fonctionnement de la MADA en mode générateur. Dans les Figures suivantes, P_s , P_r et P_{mec} désignent respectivement les puissances du stator, du rotor et mécanique[Bel10], en négligeant les pertes, on peut généraliser le transfert des puissances comme suit :

$$P_r = g \cdot P_s \quad (1.9)$$

$$P_{rés} = P_{mec} = P_m = P_s - P_r = (1 - g)P_s \quad (1.10)$$

- **Fonctionnement en mode générateur Hypo-Synchrone**

La Figure 1.19 montre que la puissance est fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. Une partie de la puissance transmise par le stator est réabsorbée par le rotor. On a donc un fonctionnement générateur en-dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement.

On a alors: $P_s < 0$; $P_r < 0$; $|P_s| > |P_m|$

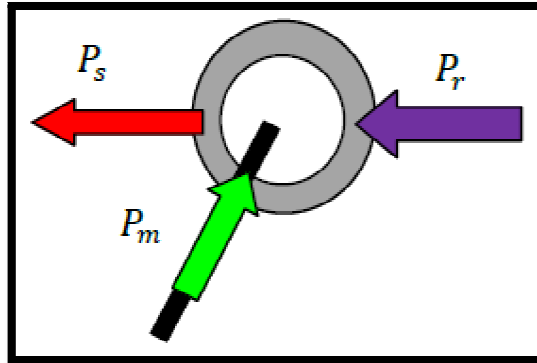


Figure 1.19 : Génératrice Hypo-Synchrone

- **Fonctionnement en mode générateur Hyper-Synchrone**

La Figure 1.20 montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. La totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à $g \cdot P_m$ est transmise par l'intermédiaire du rotor. On a donc un fonctionnement générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor.

On a alors: $P_s < 0$; $P_r > 0$; $|P_s| > |P_m|$

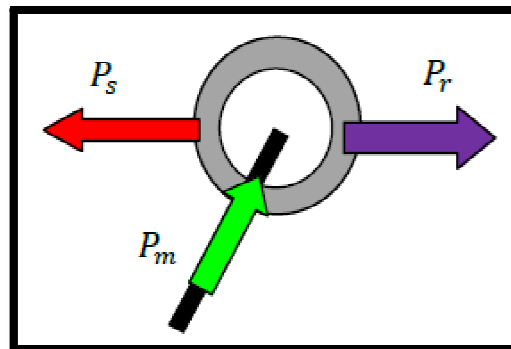


Figure 1.20: Génératrice Hyper-Synchrone

III.9.3. GADA : structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

Pour les éoliennes utilisant la GADA, 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 côté GADA et convertisseur côté réseau) (Figure 1.21). Cette machine sera adoptée pour le reste du travail de thèse.

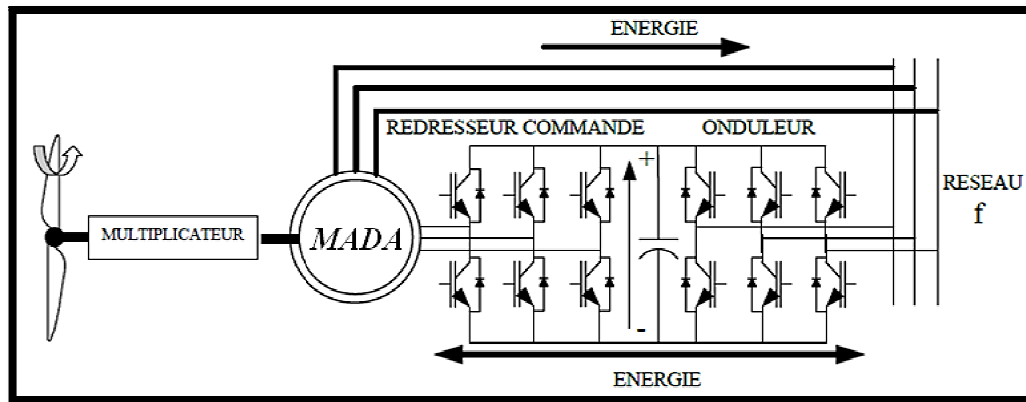


Figure 1.21 :GADA structure de Scherbius

Toutefois, malgré la présence de contacts glissants qui doivent être entretenus et remplacés périodiquement, la conception de cette machine est plus conventionnelle et plus simple que les autres types de GADA. Plusieurs études récentes, confirmées par des relations industrielles, montrent la viabilité de ce dispositif dans un système éolien à vitesse variable. La bidirectionnalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hypo-synchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau. Si le glissement reste inférieur à 30% autour du synchronisme, le convertisseur est alors dimensionné pour un tiers de la puissance nominale de la machine et ses pertes représentent moins de 1% de cette puissance. De plus, le fonctionnement hyper-synchrone permet de produire de l'énergie du stator vers le réseau mais également du rotor vers le réseau. La puissance totale ainsi produite peut alors dépasser la puissance nominale de la machine et le facteur de puissance de l'ensemble peut être maintenu unitaire.

III.9.4. Zones de contrôle de la GADA

La caractéristique (Puissance, Vitesse) mesurée d'une éolienne de 1,5 MW à base de la GADA se distingue par trois zones de fonctionnement selon la Figure 1.22 :

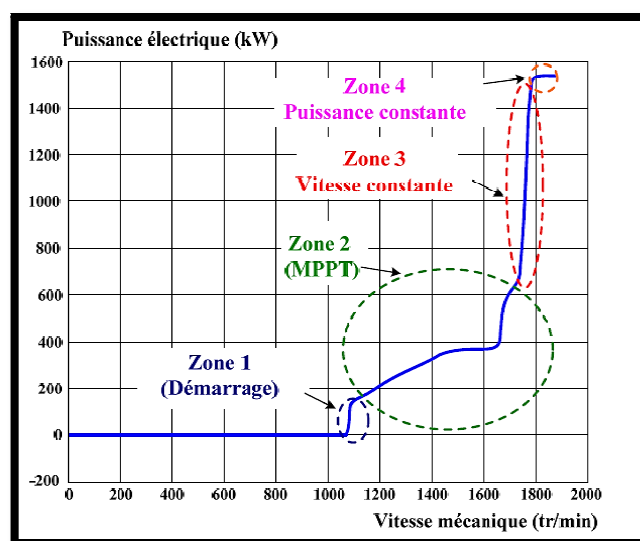


Figure 1.22 : Zones de contrôle de la GADA

- **Zone 1** : correspond au démarrage de l'éolienne: celle-ci commence à produire de la puissance à partir de la vitesse de 1050tr/mn.
- **Zone 2** : est la zone pour laquelle la vitesse de la génératrice est adaptée afin d'extraire le maximum de puissance (Maximum Power Point Tracking: MPPT). Ceci est réalisé grâce à un algorithme MPPT permettant d'imposer un couple de référence. Néanmoins, l'angle d'orientation des pales est maintenu constant.
- **Zone 3** : pour laquelle la vitesse de la génératrice est maintenue constante et égale à 1050tr/min. Cette vitesse est imposée par une action sur l'angle d'orientation des pales ou par une régulation en boucle fermée pour permettre un fonctionnement hyper synchrone. Dans ce cas, la puissance fournie au réseau est proportionnelle au couple (d'origine éolien) appliqué.
- **Zone 4** : correspond à la limitation de la puissance générée à sa valeur maximale(1.5MW) grâce au contrôle de l'angle d'orientation des pales.

III.9.5. Convertisseursde puissance MLI

Tel qu'il est mentionné auparavant, le fonctionnement à vitesse variable de la GADA est atteint avec un convertisseur statique (back-to-back) conçu pour transiter environ 30% de la puissance nominale. Par conséquent, le prototype de l'éolienne commercialisé de 6 MW est équipé d'un convertisseur statique (back-to-back) de 2MW conçu pour un fonctionnement à basse tension (690V). Un transformateur élévateur est généralement utilisé pour se connecter au réseau[Pro10][Lis11]. Dans ce cas, le convertisseur est dimensionné uniquement pour faire passer la puissance destinée à la magnétisation de la machine et est donc moins couteux.

En faisant varier la puissance absorbée, le convertisseur permet de contrôler le facteur de puissance et d'augmenter ou diminuer les courants rotoriques. Le flux et le glissement de la machine en sont alors modifiés. La machine peut ainsi délivrer une tension à fréquence fixe tout en ayant une vitesse de rotation variable. La taille du convertisseur est proportionnelle au glissement maximum, les études montrent que si le glissement dépasse 30%, le coût du convertisseur et la diminution du rendement due aux pertes dans le rotor qui augmentent avec le glissement rendent le système peu attractif. Ce système n'est pas exploité industriellement mais existe à l'état de prototype.

IV. Modélisation du système de conversion d'énergie éolienne

IV.1. Modélisationdu vent

Le vent est la source primordiale d'énergie pour faire fonctionner une éolienne. L'énergie cinétique contenue dans le vent est transformée en partie en énergie mécanique par la turbine, puis en énergie électrique par le générateur. La masse exacte du vent à la hauteur de la turbine est assez complexe. C'est pourquoi il est important de connaître son modèle mathématique car la précision des simulations dépendra de la qualité de son modèle. La définition du modèle du vent nécessite des données climatiques et géographiques du site concerne ainsi que la période de l'année concernée par l'étude.

Le modèle du vent est donné par une représentation en série de Fourier qui présente le vent comme un signal constitué par une superposition de plusieurs harmoniques[Ton10].

Il est donné par :

$$v(t) = v_{moy} + v_t(t) = A + \sum_{k=1}^i a_k \sin(\omega_k t) \quad (1.11)$$

Avec :

- A : Valeur moyenne de la vitesse du vent.
- a_k : Amplitude de l'harmonique de l'ordre k .
- ω_k : Pulsation de l'harmonique de l'ordre k .
- k : Le rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent.

Et :

v_{moy} : Une composante lente, c'est la moyenne de la vitesse du vent qui est variante.

$v_t(t)$: Une composante turbulente du vent qui est un processus aléatoire stationnaire.

Dans notre étude, la vitesse du vent sera modélisée sous la forme d'une sommation d'harmoniques avec la présence des hautes fluctuations et avec une moyenne de 7m/s, générée à partir de son expression qui est donnée par l'équation suivante :

$$v(t) = 7 + 0.2 \sin(0.1047t) + 2 \sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2 \sin(3.6645t) \quad (1.12)$$

IV.2. Modélisation de la turbine

Le modèle de la turbine éolienne doit représenter l'ensemble des éléments du système aérogénérateur éolien (Figure 1.23). Les éoliennes installées sont généralement constituées de trois pales qui pivotent sur leur axe d'un angle β , contrôlé par un système électromagnétique. Le dispositif, qui est étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain n_g afin d'effectuer l'adaptation de vitesse.

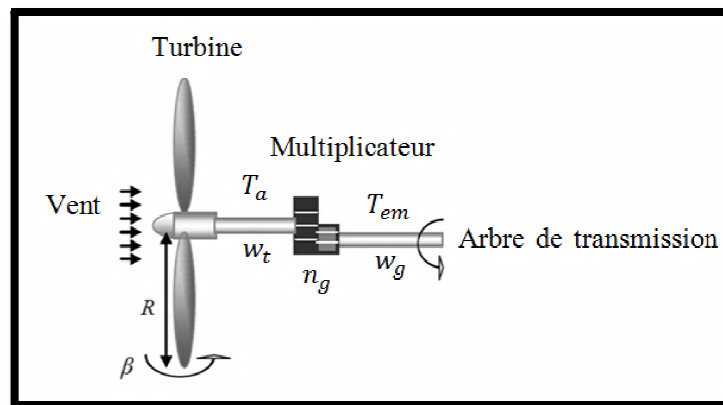


Figure 1.23 : Modèle d'une turbine éolienne

Le dispositif d'entraînement est destiné à transformer la vitesse de rotation lente du côté rotor en une vitesse de rotation rapide du côté générateur. Ceci permet d'utiliser des générateurs de taille plus compacte. On peut lui associer un modèle à deux masses ou un modèle à une masse seulement.

IV.2.1. Modèle de la turbine à deux masses

Le modèle à deux masses est un modèle général appliqué aux éoliennes de toute taille. Ce modèle est très employé dans la littérature (Figure 1.24) en respectant les hypothèses citées ci-dessous[Bou06].

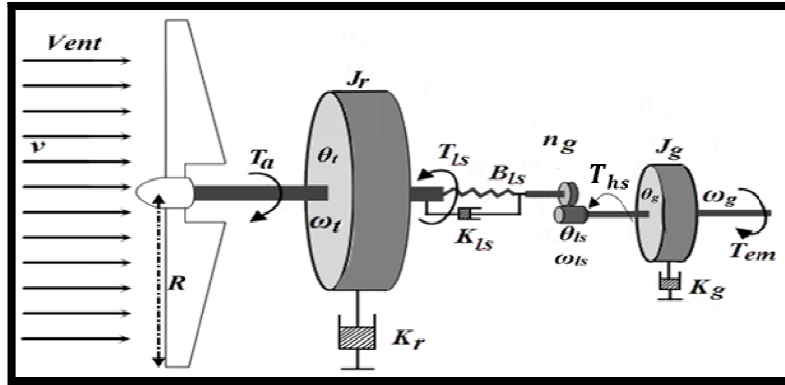


Figure 1.24 : Schéma de dispositif d'entraînement

- Hypothèses de simplification

Les hypothèses relatives à ce modèle [Bou06] sont :

- Tous les modes flexibles sont localisés dans l'élément flexible de l'arbre lent ;
- L'arbre rapide est suffisamment rigide ;
- Les modes flexibles des pales sont supposés suffisamment élevés pour être négligés.
- Les inerties du multiplicateur et de l'arbre lent sont intégrées à celle du rotor. L'ensemble est représenté par J_r .

a. Modèle de la turbine

Le schéma bloc qui représente la turbine éolienne est illustré sur la Figure 1.25 suivante :

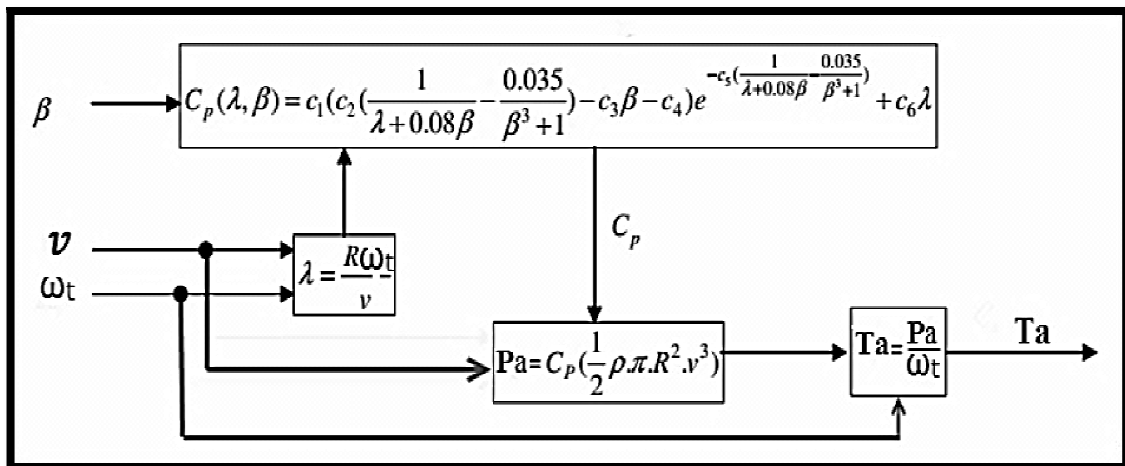


Figure 1.25 : Schéma bloc de la turbine

b. Modèle de multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur sert à augmenter la vitesse de la turbine et à diminuer le couple aérodynamique à transmettre à la génératrice. Il est modélisé par un simple gain n_g . (n_g est le rapport de multiplication de multiplicateur), donc :

Le couple de l'arbre lent est divisé par le rapport de multiplication pour obtenir le couple de l'arbre rapide :

$$T_{hs} = \frac{T_{ls}}{n_g} \quad (1.13)$$

La vitesse et la position angulaire du générateur sont données par :

$$n_g = \frac{\theta_g}{\theta_{ls}} = \frac{\omega_g}{\omega_{ls}} \quad (1.14)$$

Le couple de l'arbre lent T_{ls} résulte des effets de frottements et de torsion générés par les écarts entre la vitesse angulaire du rotor ω_t et celle de l'arbre lent ω_{ls} , d'une part, et entre la position angulaire θ_t et celle de l'arbre lent θ_{ls} , d'autre part :

$$T_{ls} = B_{ls}(\theta_t - \theta_{ls}) + K_{ls}(\omega_t - \omega_{ls}) \quad (1.15)$$

Le schéma bloc de cette équation est illustré sur la Figure 1.26 :

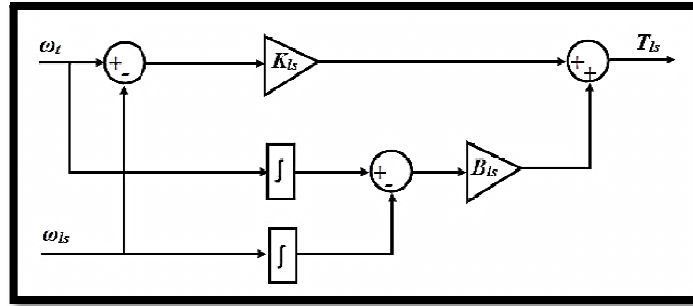


Figure 1.26 : Schéma bloc de l'équation du couple T_{ls}

En pratique, le multiplicateur induit des pertes (0.5% de la puissance nominale). Dans le cas où ces pertes sont prises en compte, le couple de l'arbre rapide fait apparaître le rendement du multiplicateur r_g :

$$T_{hs} = r_g \frac{T_{ls}}{n_g} \quad (1.16)$$

Pour un multiplicateur idéal ($r_g=1$), on a :

$$n_g = \frac{T_{ls}}{T_{hs}} = \frac{\omega_g}{\omega_{ls}} = \frac{\theta_g}{\theta_{ls}} \quad (1.17)$$

c. Modèle du rotor

Le rotor est entraîné par le couple aérodynamique T_a et freiné par le couple de l'arbre lent T_{ls} et le couple issu des frottements visqueux $K_r \omega_t$; sa dynamique est caractérisée par une équation différentielle du premier ordre :

$$J_r \dot{\omega}_t = T_a - T_{ls} - K_r \omega_t \quad (1.18)$$

Le schéma bloc correspondant est donné sur la Figure 1.27(s : opérateur de Laplace)

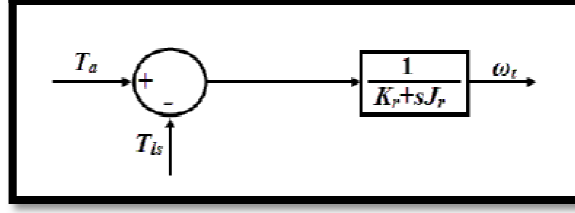


Figure 1.27: Schéma bloc de l'équation dynamique du rotor

d. Modèle du générateur

Le générateur est entraîné par le couple de l'arbre rapide T_{hs} et freiné par le couple électromagnétique T_{em} et le couple issu des frottements visqueux $K_g \omega_g$; sa dynamique est caractérisée aussi par une équation différentielle du premier ordre :

$$J_g \dot{\omega}_g = T_{hs} - T_{em} - K_g \omega_g \quad (1.19)$$

Le schéma bloc de cette équation est donné sur la Figure suivante :

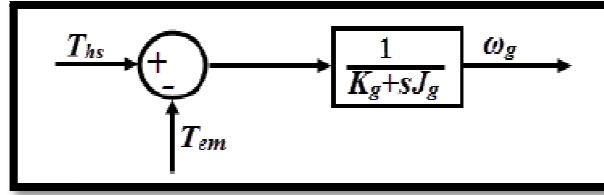


Figure 1.28: Schéma bloc de l'équation dynamique du générateur

e. Modèle complet de la partie mécanique

Le modèle à deux masses de la partie mécanique est décrit par le système non linéaire régit par les équations suivantes :

$$\begin{cases} J_r \dot{\omega}_t = T_a - T_{ls} - K_r \omega_t \\ J_g \dot{\omega}_g = T_{hs} - T_{em} - K_g \omega_g \\ T_{ls} = B_{ls}(\theta_t - \theta_{ls}) + K_{ls}(\omega_t - \omega_{ls}) \\ n_g = \frac{T_{ls}}{T_{hs}} = \frac{\omega_g}{\omega_{ls}} = \frac{\theta_g}{\theta_{ls}} \end{cases} \quad (1.20)$$

En introduisant la dérivée de T_{ls} , ce système d'équations devient :

$$\begin{pmatrix} \dot{\omega}_t \\ \dot{\omega}_g \\ \dot{T}_{ls} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_t \\ \omega_g \\ T_{ls} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} T_a + \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{pmatrix} T_{em} \quad (1.21)$$

Avec :

$$a_{11} = -\frac{K_r}{J_r} ; a_{12} = 0 ; a_{13} = -\frac{1}{J_r} ; a_{21} = 0 ; a_{22} = -\frac{K_g}{J_g} ; a_{23} = \frac{1}{n_g J_g} ;$$

$$a_{31} = (B_{ls} - \frac{K_{ls}K_r}{J_r}); a_{32} = \frac{1}{n_g} (\frac{K_{ls}K_g}{J_g} - B_{ls}); a_{33} = -K_{ls}(\frac{J_r+n_g^2J_g}{n_g^2J_gJ_r});$$

$$b_1 = \frac{1}{J_r}; b_2 = 0; b_3 = \frac{K_{ls}}{J_r}; d_1 = 0; d_2 = -\frac{1}{J_g}; d_3 = \frac{K_{ls}}{n_gJ_g}.$$

Notre système est non linéaire et il a deux entrées : le couple aérodynamique et le couple électromagnétique de la génératrice, et une sortie : la vitesse de rotation de la turbine. Donc la non linéarité de ce système provient du couple aérodynamique qui dépend de ω_t (à travers λ), de l'angle de calage β et de la vitesse du vent v qui est une entrée non commandable, aléatoire et fluctuante.

Le schéma bloc de ce système est représenté par la Figure 1.29 suivante :

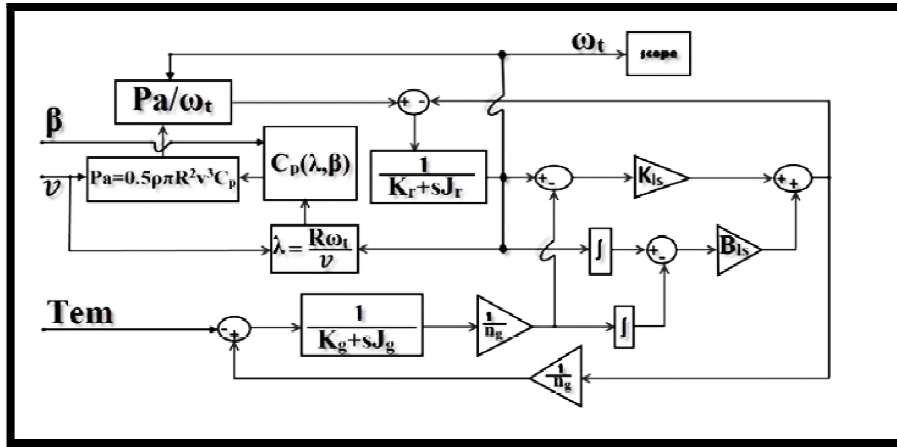


Figure 1.29: Schéma bloc complet du modèle à deux masses.

IV.2.2. Modèle de la turbine à une masse

- Hypothèses de simplification

En se basant sur les hypothèses suivantes le modèle à deux masses peut être réduit au modèle à une masse constitué d'une seule inertie et d'un seul coefficient de frottement [Bou06]:

- Eolienne de grande taille.
- L'inertie de la génératrice J_g peut être négligé devant celle de la turbine J_r ou ramenée du côté de l'arbre lent.
- Les arbres de transmission sont parfaitement rigides et liés par un multiplicateur idéal.

- Modèle à une masse ramenée sur l'arbre lent

La Figure 1.30 donne le schéma du modèle à une masse ramenée sur l'arbre lent :

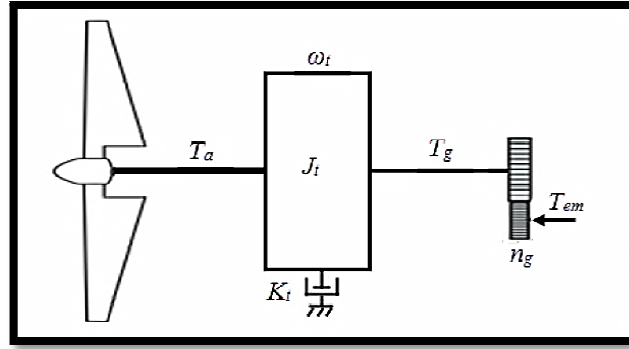


Figure 1.30: Modèle de la turbine à une masse ramenée sur l'arbre lent

D'après les hypothèses, l'arbre lent est parfaitement rigide c-à-dire que B_{ls} est infini. Alors $\theta_t = \theta_{ls}$ et $\omega_t = \omega_{ls}$.

Les équations du rotor et du générateur deviennent :

$$\begin{cases} J_r \dot{\omega}_t = T_a - T_{ls} - K_r \omega_t \\ n_g J_g \dot{\omega}_t = T_{hs} - T_{em} - n_g K_g \omega_t \end{cases} \quad (1.22)$$

En éliminant le couple T_{hs} entre les deux équations on obtient :

$$J_t \dot{\omega}_t = T_a - T_g - K_t \omega_t \quad (1.23)$$

Avec :

$$J_t = J_r + n_g^2 J_g \quad (1.24)$$

$$K_t = K_r + n_g^2 K_g \quad (1.25)$$

$$T_g = n_g T_{em} \quad (1.26)$$

Le schéma bloc de ce modèle est représenté dans la Figure 1.31 suivante :

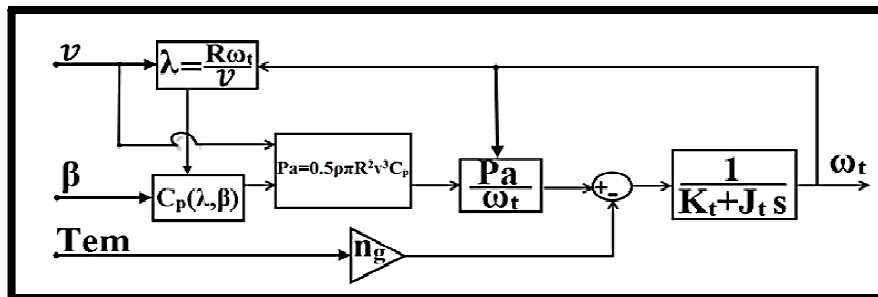


Figure 1.31 : Schéma bloc du modèle de la turbine à une masse ramenée sur l'arbre lent

Ce modèle est généralement utilisé dans la commande de l'aéroturbine.

- Modèle à une masse ramenée sur l'arbre rapide

La Figure 1.32 suivante donne le schéma du modèle à une masse ramenée sur l'arbre rapide.

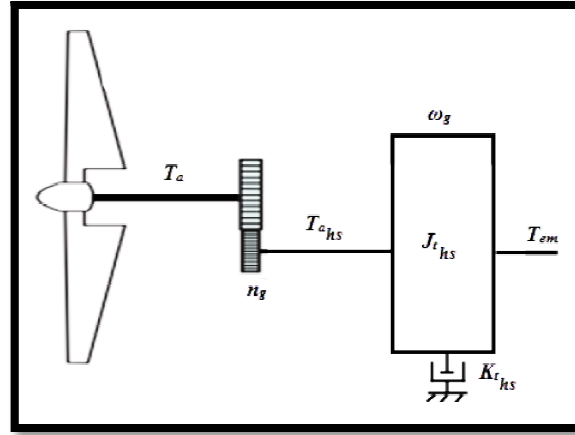


Figure 1.32: Modèle de la turbine à une masse ramenée sur l'arbre rapide

D'après les mêmes hypothèses les équations du rotor et du générateur deviennent :

$$\begin{cases} \frac{J_r}{n_g} \dot{\omega}_t = T_a - T_{ls} - \frac{K_r}{n_g} \omega_t \\ J_g \dot{\omega}_g = T_{hs} - T_{em} - K_g \omega_g \end{cases} \quad (1.27)$$

En éliminant le couple $T_{hs} = \frac{T_{ls}}{n_g}$ entre les deux équations on obtient:

$$J_{t_{hs}} \dot{\omega}_g = T_{a_{hs}} - T_{em} - K_{t_{hs}} \omega_g \quad (1.28)$$

Avec :

$$J_{t_{hs}} = J_g + \frac{J_r}{n_g^2} \quad (1.29)$$

$$K_{t_{hs}} = K_g + \frac{K_r}{n_g^2} \quad (1.30)$$

$$T_{a_{hs}} = \frac{T_a}{n_g} \quad (1.31)$$

Le schéma bloc de ce modèle est représenté dans la Figure 1.33 suivante :

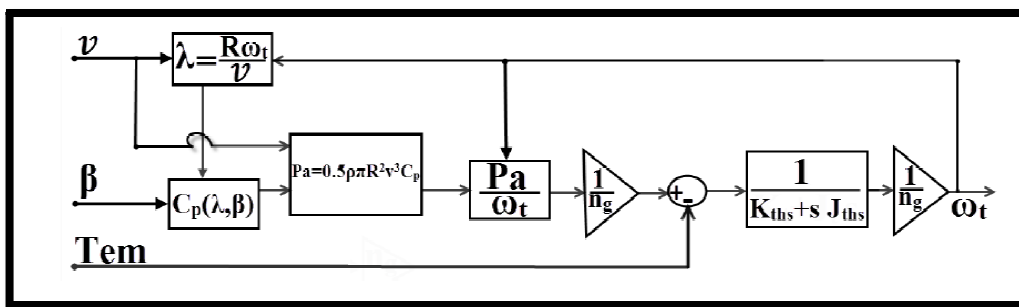


Figure 1.33: Schéma bloc du modèle de la turbine à une masse ramenée sur l'arbre rapide

Ce modèle est généralement utilisé dans la commande de la génératrice.

IV.3. Modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA)

IV.3.1. Description

La configuration choisie de la MADA en mode génératrice (GADA) est celle où le stator est connecté directement aux réseaux et le rotor est connecté au réseau par l'intermédiaire des convertisseurs de puissances. Le redresseur alimente les enroulements rotoriques par les tensions et la fréquence de consigne qu'il reçoit de la procédure de commande. L'onduleur est contrôlé d'une manière à garder constante la tension du bus continu. Cette configuration a l'avantage de réaliser des économies sur les convertisseurs de puissance car la puissance transitée par le circuit rotorique est faible par rapport à la puissance statorique (Figure 1.34).

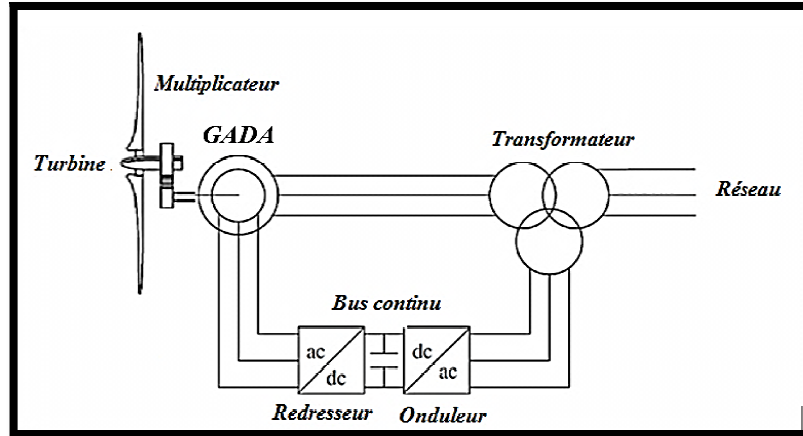


Figure 1.34: GADA pilotée au rotor

La GADA est formé d'un stator fixe et d'un rotor cylindrique mobile. Le stator a trois enroulements couplés en étoiles ou en triangle et sont alimentés par un système triphasé en tensions. Il en résulte alors la création d'un champ magnétique glissant dans l'entrefer de la machine (théorème de FERRARIS). La vitesse de glissement de ce champ par rapport au stator est :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad (1.32)$$

Avec ω_s désigne la pulsation du réseau d'alimentation triphasé statorique et p est le nombre de paires de pôles du champ magnétique apparaissant au stator.

Le rotor de la machine supporte un bobinage triphasé avec un même nombre de pôles que celui du stator couplé en étoile. Ce type de rotor est dit bobiné. Le rotor tourne par rapport au stator à la vitesse suivante :

$$\omega_g = \Omega_{mes} = \frac{d\theta}{dt} \quad (1.33)$$

Avec θ est l'angle entre le repère statorique et le repère rotorique.

La partie convertisseurs de puissance est principalement constituée par :

- Un redresseur : C'est le convertisseur côté rotor qui permet de contrôler le couple électromagnétique T_{em} et la puissance réactive Q_s échangée entre le stator et le réseau.
- Un bus continu ;

- Un onduleur : C'est le convertisseur côté réseau qui contrôle la tension (bus continu) et la puissance réactive Q_r échangée entre le rotor et le réseau.

IV.3.2. Puissances mises en jeu

Le transfert de la puissance dans une éolienne est illustré dans la Figure 1.35. En négligeant toutes les pertes, et en considérant que la puissance P_{est} fournie au stator alors $(1 - g)P_{est}$ retrouvée sous forme de puissance mécanique, le reste gP sort par les balais sous forme de grandeurs alternatives de fréquence gf . Ces grandeurs, de fréquences variables, sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique, auquel elle est renvoyée, par l'intermédiaire du deuxième convertisseur. Ce réseau reçoit donc $(1 + g)P$.

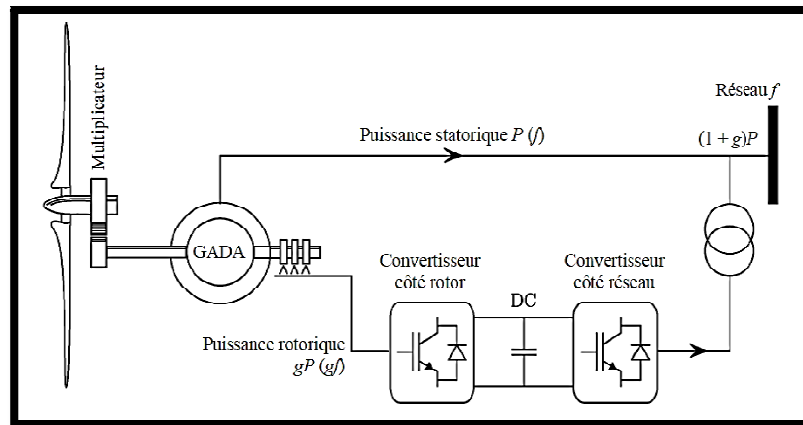


Figure 1.35: Transit de puissance dans la GADA

IV.3.3. Hypothèses de simplification

Avant d'établir le modèle de la GADA en vue de sa commande, nous rappelons brièvement le contexte habituel d'hypothèses simplificatrices, désormais classiques, qui sont :

- L'entrefer est constant, les effets des encoches et les pertes ferromagnétiques sont négligeables ;
- Le circuit magnétique est non saturé, c'est à dire à perméabilité constante ;
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et l'effet de peau est négligeable ;
- La force magnétomotrice créée par chacune des phases des deux armatures est supposée à répartition sinusoïdale ;
- La symétrie de construction est parfaite.

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses, on peut citer :

- L'additivité des flux ;
- La constance des inductances propres ;
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles.

IV.3.4 Modèle général de la GADA

- **Dans le repère triphasé**

La GADA est classiquement modélisée dans le repère triphasé, donnant lieu au système d'équations de flux statorique et rotorique suivant :

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{pmatrix} \quad (1.34)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{pmatrix} \quad (1.35)$$

On définit les vecteurs flux suivants: $\Phi_{sabc} = \begin{pmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{pmatrix}$ et $\Phi_{rabc} = \begin{pmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{pmatrix}$

Et les vecteurs courants suivants : $i_{sabc} = \begin{pmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{pmatrix}$ et $i_{rabc} = \begin{pmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{pmatrix}$

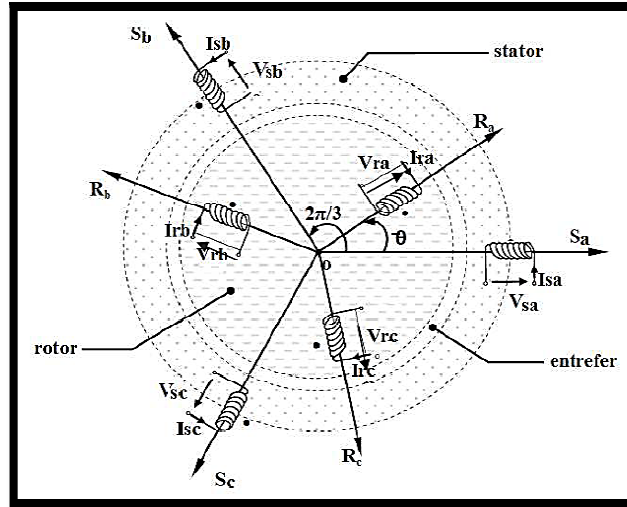


Figure 1.36 : Représentation de la GADA dans le repère triphasé

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

$$\begin{pmatrix} \Phi_{sabc} \\ \Phi_{rabc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{sabc} \\ i_{rabc} \end{pmatrix} \quad (1.36)$$

Avec :

$$L_s = l_s - M_s \quad (1.36)$$

$$L_r = l_r - M_r \quad (1.37)$$

$$L_m = \frac{3}{2} M_{sr} \quad (1.38)$$

- R_s et R_r sont respectivement les résistances des bobinages statoriques et rotoriques.
- l_s et l_r sont respectivement les inductances propres statoriques et rotoriques.
- M_s et M_r sont les inductances mutuelles entre deux phases statoriques et deux phases rotoriques.
- M_{sr} est la valeur maximale de l'inductance mutuelle cyclique entre une phase statorique et une phase rotorique.
- L_s , L_r et L_m représentent respectivement les inductances cycliques statorique, rotorique et magnétisante exprimées en fonction des inductances propres et mutuelles.

• **Dans le repère de Park**

La transformation de Park est un outil mathématique qui a permis la simplification des équations des machines électriques triphasées. Elle permet de passer d'un système triphasé alternatif à un système biphasé ($d-q$) continu, donc elle permet d'obtenir un système d'équation à coefficients constants ce qui simplifie sa résolution [Mer07]. Cette transformation peut être appliquée sur le courant, tension et flux. La transformée de Park appelée souvent transformation des deux axes $d-q$, fait correspondre aux variables réels leurs composantes : Directe et Quadrature (Figure 1.37).

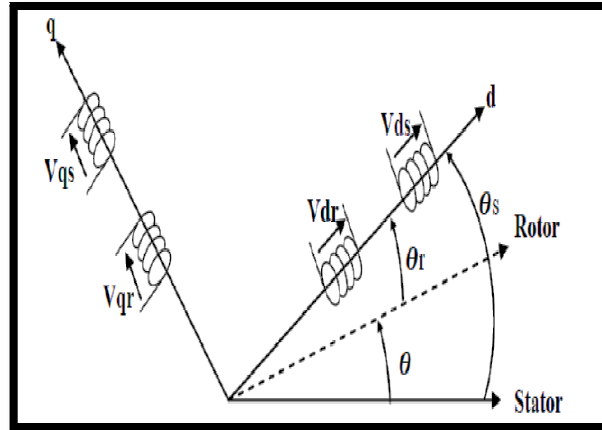


Figure 1.37 : Représentation de la GADA dans le repère ($d - q$)

- d : axe directe stator et rotor.
- q : axe en quadrature stator et rotor.

Le produit matriciel définissant la transformée de Park est le suivant :

$$[x_{dq}] = [P(-\psi)][T_{32}]^T [x_{abc}] \quad (1.39)$$

Avec :

$$[P(\psi)] = \begin{pmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) \end{pmatrix} \quad (1.40)$$

Et:

$$T_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \quad (1.41)$$

Et on a :

θ_s pour les grandeurs statoriques et θ_r pour les grandeurs rotoriques.

En appliquant ces transformations aux tensions et aux flux statoriques et rotoriques, les équations électriques dans le repère biphasé de la GADA sont données comme suit :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d}{dt} \phi_{sd} - \omega_s \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d}{dt} \phi_{sq} + \omega_s \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt} \phi_{rd} - \omega_r \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d}{dt} \phi_{rq} + \omega_r \phi_{rd} \end{cases} \quad (1.42)$$

Et les équations magnétiques sont données comme suit :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s I_{sd} + L_m I_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s I_{sq} + L_m I_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r I_{rd} + L_m I_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r I_{rq} + L_m I_{sq} \end{cases} \quad (1.43)$$

Où $\omega_s = \dot{\theta}_s$ et $\omega_r = \dot{\theta}_r$

Avec :

- $V_{sd}, V_{sq}, V_{rd}, V_{rq}$ sont les tensions statoriques et rotoriques directes et en quadrature du système biphasé.
- $\phi_{sd}, \phi_{sq}, \phi_{rd}, \phi_{rq}$ sont les flux statoriques et rotoriques directs et en quadrature du système diphasé
- ω_s et ω_r sont les pulsations des grandeurs électriques statoriques et rotoriques.

En substituant les équations magnétiques dans les équations électriques, on obtient donc :

$$[V] = [R][I] + \frac{d}{dt}[\Phi] + [\omega][\Phi] \quad (1.44)$$

Et ainsi :

$$\frac{d}{dt}[I] = -([L]^{-1}[R] + [L]^{-1}[\omega][L])[I] + [L]^{-1}[V] \quad (1.45)$$

Où :

$$[\Phi] = [L][I], [V] = \begin{pmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{pmatrix}, [I] = \begin{pmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{pmatrix}, [\Phi] = \begin{pmatrix} \phi_{sd} \\ \phi_{sq} \\ \phi_{rd} \\ \phi_{rq} \end{pmatrix},$$

$$[\omega] = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_s & 0 & 0 \\ \omega_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\omega_r \\ 0 & 0 & \omega_r & 0 \end{pmatrix}, [R] = \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{pmatrix}, [L] = \begin{pmatrix} L_s & L_m & 0 & 0 \\ L_m & L_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_r & L_m \\ 0 & 0 & L_m & L_r \end{pmatrix}$$

Les équations suivantes sont équivalentes et permettent de calculer le couple électromagnétique :

$$\begin{cases} T_{em} = \frac{pL_m}{L_s L_r - L_m} (\phi_{rd} \phi_{sq} - \phi_{rq} \phi_{sd}) \\ T_{em} = \frac{pL_m}{L_s} (I_{rd} \phi_{sq} - I_{rq} \phi_{sd}) \\ T_{em} = pL_m (I_{rd} I_{sq} - I_{rq} I_{sd}) \\ T_{em} = \frac{pL_m}{L_r} (\phi_{rd} I_{sq} - \phi_{rq} I_{sd}) \end{cases} \quad (1.46)$$

Les puissances active et réactive statorique et rotorique de la GADA sont respectivement données :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ P_r = V_{rd} I_{rd} + V_{rq} I_{rq} \end{cases} \quad (1.47)$$

$$\begin{cases} Q_s = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \\ Q_r = V_{rq} I_{rd} - V_{rd} I_{rq} \end{cases} \quad (1.48)$$

La fréquence de la tension statorique étant imposée par le réseau électrique et la pulsation des courants rotoriques est donnée par :

$$\omega_r = \omega_s - p \Omega \quad (1.49)$$

Avec :

Ω : La vitesse de rotation angulaire mécanique de la GADA

p : Le nombre de pair de pôles de la GADA

IV.3.5. Choix du référentiel

Les équations de la machine asynchrone triphasée peuvent être exprimées dans différents référentiels, le choix d'un référentiel se fait selon le problème étudié. Il existe trois choix importants on peut fixer le référentiel ($d-q$) : lié au stator ; lié au rotor ou bien lié au champ tournant.

- **Référentiel lié au stator**

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r = -\frac{d\theta}{dt} = -\omega \quad (1.50)$$

Ce référentiel est le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées, il est utilisé en vue d'étudier les variations importantes de la vitesse de rotation.

- **Référentiel lié au rotor**

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s = \frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (1.51)$$

Ce référentiel est intéressant pour les problèmes des régimes transitoires où la vitesse de rotation est considérée comme constante ($\omega = p\Omega$).

- **Référentiel lié au champ tournant**

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \Rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega = g \cdot \omega_s = \omega_r \quad (1.52)$$

Ce type de référentiel est souvent utilisé dans l'étude de l'alimentation des moteurs à fréquence variable. Son modèle permet d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent d'où la facilité de régulation. 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.

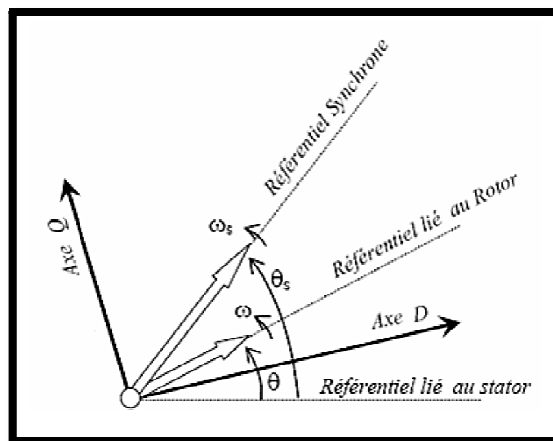


Figure 1.38 : Choix du référentiel

V. Conclusion

Ce chapitre est constitué de deux parties :

La première partie est consacrée à une synthèse bibliographique concernant le système de conversion des énergies éoliennes avec leurs constitutions et leurs modes de fonctionnement. Après un rappel des notions nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette étude nous a permis de comprendre le principe de fonctionnement d'un SCEE équipée d'une MADA en fonctionnement génératrice (GADA). La structure à vitesse variable à base d'une GADA a tiré notre attention vu les avantages qu'elle présente, c'est la raison pour laquelle nous allons consacrer le reste de ce mémoire pour l'étude de cette structure.

La deuxième partie est consacrée à la modélisation du SCEE équipée d'une GADA, nous commençons par l'élaboration du modèle mathématique de la partie mécanique (Turbine), deux modèles sont présentés : le modèle à deux masses et le modèle à une masse ; puis l'établissement du modèle mathématique de la partie électrique (GADA), en se basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été établi, dont la complexité a été réduite. Nous avons constaté que le modèle mathématique de la GADA est un système à équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de Park nous a permis de simplifier ce modèle. Ces modèles non linéaires déduits, que ce soit de la partie mécanique et/ou la partie électrique de l'éolienne seront utilisés pour la synthèse des lois de commande qui font l'objet des chapitres suivants.

Alors dans le chapitre suivant, nous allons nous intéresser aux différentes stratégies de la commande du SCEE équipée d'une GADA et les techniques de l'automatique et aux algorithmes intelligents. Ces outils sont les Modes Glissants, les Supports Vecteurs Machine à Régression, le Backstepping et l'algorithme d'Optimisation par Essaim Particulaire Adaptatif, seront exploités dans les chapitres suivants pour concevoir les lois de commande les plus appropriées à notre système étudié.

Chapitre 2 :Généralités sur les commandes avancées d'un système de conversion d'énergie éolienne

I. Introduction

Les systèmes réels sont dans la plupart du temps non linéaires, mal définis, ont des paramètres variables et sont soumis à des perturbations externes. La modélisation de ces systèmes relève très souvent d'une approximation des phénomènes physiques mis en jeu. Or, c'est à partir de cette représentation approximative des systèmes que l'on souhaite construire une commande pour le système réel. Cette commande doit être alors robuste dans le sens où elle devra assurer une faible sensibilité aux incertitudes sur les paramètres, à leurs variations et aux perturbations externes.

La commande des éoliennes à vitesse variable est indispensable non seulement pour satisfaire les performances désirées en production de l'électricité et maintenir un bon régime de fonctionnement, mais aussi pour diminuer les contraintes mécaniques et la charge quand le vent est fort. L'objectif de commande est d'étendre la durée de vie d'une éolienne et de réduire les coûts de production d'électricité, ainsi que d'assurer l'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes [Bou06].

Plusieurs travaux utilisant différentes méthodes de commande ont été appliqués à la commande de l'éolienne. Parmi ces travaux, on peut citer une commande linéaire quadratique gaussienne optimale avec une commande anticipative « *feedforward* » utilisant des signaux d'estimation du vent permettant de rejeter les perturbations et de réduire la charge sur les pales de [Sel09] ; une commande à mode glissant pour réguler la puissance de production dans une éolienne à vitesse variable de [Bel09] ; une approche basée sur la construction de contrôleur Linéaire à Paramètre Variant de [Slo11] ; une commande adaptative robuste par H_∞ à base des réseaux de neurones flous de [Bou15] ; une commande par combinaison des modes glissants standards et les réseaux de neurones de régression généralisée de [Koum17] et une commande robuste intelligente par combinaison des modes glissants à action intégrale et la machine d'extrême apprentissage de [Koum17], etc..

La théorie de commande non linéaire a été le sujet de développements intenses pendant les deux dernières décennies. Les outils développés dans ce secteur sont appliqués à l'étape de la conception et à l'exécution des unités de commande dans les systèmes non linéaires. Comparativement aux anciens outils, actuellement ces derniers sont devenus plus structurés et mieux développés. Elle constitue une bonne solution aux problèmes liés à la commande classique dont la caractéristique principale de ces systèmes est que leur loi de commande se modifie d'une manière discontinue.

Les approches de commande peuvent avoir un effet majeur sur l'éolienne, et le facteur clé demeure la stratégie de commande, toutefois, plusieurs difficultés et défis sont rencontrés dont :

- La structure complexe de l'éolienne.
- La non-linéarité, l'instabilité et la complexité de l'aérodynamique de l'éolienne.
- Le cisaillement du vent à cause des forces de frottement dues à la rencontre du vent avec les différents obstacles possibles.
- Le vent, cette ressource abondante est nécessaire pour le fonctionnement de l'éolienne puisque c'est la force d'entraînement de cette machine. Cependant, sa nature aléatoire et turbulente nous amène à le considérer aussi comme une perturbation.

- Les fluctuations de la puissance de l'éolienne qui sont dues à des processus stochastiques du vent ainsi qu'à des phénomènes d'oscillations périodiques comme le cisaillement du vent et la réorientation du vent en raison de la structure de la tour de l'éolienne.

Les lois de commande classique, par exemple à action Proportionnelle Intégrale Dérivée, peuvent s'avérer suffisantes si les exigences en précision et en performance du système ne sont pas trop sévères et ils donnent des bons résultats dans le cas des systèmes linéaires à paramètres constants. Pour des systèmes non linéaires où ayant des paramètres non constants, ces lois de commande classique peuvent être insuffisantes car elles sont non robustes surtout lorsque les exigences sur la précision et autres caractéristiques dynamiques du système sont strictes, on doit faire appel à des lois de commande insensibles aux variations de paramètres, aux perturbations et aux non linéarités.

L'objectif de ce travail consiste à déterminer des commandes robustes, performantes et relativement simples à mettre en œuvre et à concevoir leurs algorithmes en assurant une robustesse du comportement, du processus vis-à-vis des incertitudes sur les paramètres et leurs variations. Alors le recours à ces algorithmes de commande est donc souhaitable aussi bien pour la stabilisation que pour la poursuite.

Dans ce chapitre, nous présenterons les Supports Vecteurs Machines à Régression SVR comme nouvel outil d'apprentissage artificiel et leur utilisation avec la commande par Modes Glissants Standard tout en considérant que la vitesse du vent est accessible, après nous décrirons quelques éléments théoriques nécessaires à la synthèse de commande par Backstepping et nous expliquerons l'utilisation de la méthode d'Optimisation par Essaims Particulaires Adaptatif afin d'améliorer ces méthodes de commande.

II. Apprentissage supervisé

L'apprentissage supervisé, en anglais "*Supervised Learning*", est actuellement le mode d'apprentissage le plus utilisé. La Figure 2.1 empruntée à V. Vapnik représente les trois modules nécessaires à l'apprentissage supervisé et illustre le principe de cet apprentissage, dans ce cas, les exemples sont des couples (Entrée, Sortie associée) qu'un superviseur (expert humain) doit fournir et la tâche de la machine d'apprentissage consiste d'en faire une correspondance. L'erreur entre la sortie désirée et la sortie obtenue sert à travers l'algorithme d'apprentissage à ajuster les paramètres de cette machine.

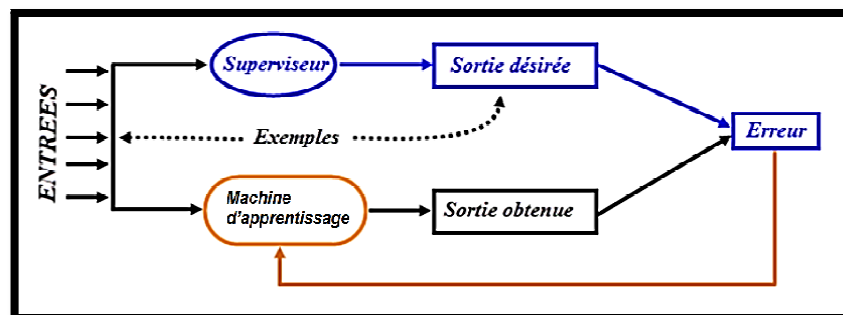


Figure 2.1 : Principe de l'apprentissage supervisé

Un système d'apprentissage statistique est généralement composé de trois modules principaux:

- Les données générées d'une manière aléatoires appelés les vecteurs d'entrée. Ces vecteurs sont indépendants et identiquement distribués.
- Un superviseur qui associe pour chaque vecteur d'entrée x une sortie y .
- Une machine d'apprentissage qui doivent produire pour chaque vecteur d'entrée x une sortie $\hat{y}$ la plus proche possible de la sortie y du superviseur.

III. Machines à Vecteurs Supports à Régression

III.1. Historique de la théorie de Vapnik

La méthode des Machines à Vecteurs Supports (SVM) est un nouvel estimateur non linéaire des fonctions, dont les fondements reposent sur la Théorie Statistique de l'Apprentissage [Vap99] [Vap00] [Cha02] [Cha00] [Gun98]. SVM est le classifieur le plus populaire, efficace et sophistiqué des algorithmes d'apprentissage automatique introduit par Vapnik dans le début des années 1990, conçu pour trouver un séparateur optimal (représenté par les paramètres d'une fonction de décision) qui maximise la marge entre les frontières de chaque classe, par l'utilisation d'un ensemble limite d'entraînement. Les SVM ont été construits au début pour résoudre les problèmes de la reconnaissance de formes ou la classification, cela n'empêche pas le fait qu'on peut en étendre le champ au problème de la Régression (SVR), c'est-à-dire pour l'approximation de fonctions quand la sortie du système est quantitative. Dans le cas non linéaire, le principe consiste à rechercher une estimation de la fonction par sa décomposition sur une base fonctionnelle dont l'objectif principal est de construire une fonction qui permet d'approcher au mieux une fonction inconnue qui génère des données aléatoires, indépendantes et identiquement distribuées.

La technique de Régression par SVM est fait partie des méthodes de l'apprentissage supervisé qui est une technique d'apprentissage automatique (l'un des champs de l'intelligence artificielle) où l'on cherche à produire automatiquement des règles à partir d'une base de données d'apprentissage contenant des exemples de cas déjà traités. Plus précisément la base de données d'apprentissage est un ensemble de couples entrée-sortie (x_n, y_n) $1 \leq n \leq N$ avec $x_n \in X$ et $y_n \in Y$, que l'on considère être triées selon une loi $X.Y$ inconnue, par exemple x_n suit une loi uniforme et $y_n = f(x_n) + \xi_n$ où ξ_n est un bruit.

Le but de la méthode d'apprentissage supervisé est d'utiliser cette base d'apprentissage afin de déterminer une représentation compacte notée h appelée fonction de prédiction, qui, à une nouvelle entrée x associe une sortie $h(x)$, afin de généraliser pour des entrées inconnues ce qu'il a pu « apprendre » grâce aux données déjà traitées par des experts de façon « raisonnable ». On distingue généralement deux types de problèmes que l'on cherche à résoudre au moyen de la méthode d'apprentissage supervisé :

- $Y = \{1, \dots, I\}$: Lorsque l'ensemble des valeurs de sortie est de cardinal fini, on parle de problème de classification car le but est en fait d'attribuer une étiquette à une entrée donnée.
- $Y \subset \mathbb{R}$: Lorsque la sortie qu'on cherche à associer à une entrée est une valeur dans un ensemble des réels, on parle d'un problème de Régression.

III.2. Principe et fondement mathématique des SVR

L'obtention des modèles de fonctionnement des procédés complexes s'avère une tâche difficile qui nécessite des compétences et du temps. L'utilisation des SVR constitue une alternative prometteuse pour la modélisation de ces systèmes.

Cette technique est basée sur l'idée de déduire une estimation $\hat{g}[x]$ de la vraie relation $y = g[x]$ existante entre le vecteur des observations X et le vecteur sortie y .

Où $x \in R^d$ et $y \in R$

Cette déduction se fait à partir d'un ensemble d'apprentissage composé de N échantillons tel que :

- $\mathcal{E}$ est la valeur maximale de déviations qui pourraient exister entre $\hat{g}[x]$ et les sorties désirées y_i , ($i = 1, \dots, N$). En d'autre terme, nous définissons un tube de largeur $\mathcal{E}$ autour des sorties désirées y_i , dans lequel toutes les valeurs prédites devraient y être (Figures 2.2).
- La fonction $\hat{g}[x]$ doit être la plus lisse et plane possible (smooth and flat) [Smo02].

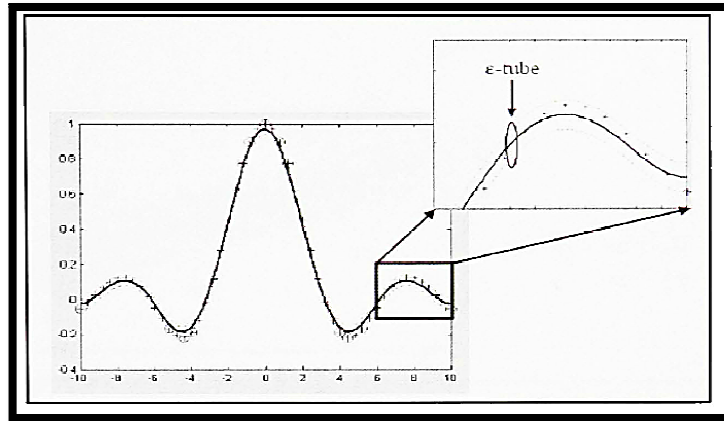


Figure 2.2 : Illustration du $\mathcal{E}$ -Tube pour un cas d'approximation

Ces deux conditions peuvent être obtenues en transformant l'espace des entrées X de dimension d à un espace de redescription de plus grande dimension tel que :

$$\phi(x) \in R^{d'} \quad (d' > d).$$

Cette transformation a pour but de lisser au maximum la fonction $\hat{g}[x]$ et, par conséquent, de l'approximer à une façon linéaire comme suit :

$$\hat{g}[x] = w^* \cdot \phi(x) + b^* \quad (2.1)$$

Où $w^* \in X$ et $b^* \in R$

D'après Vapnik (1999), la fonction linéaire optimale dans l'espace de re-description est celle qui minimise la fonction de perte suivante :

$$\psi(w, \xi) = \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^N (\xi_i, \xi_i^*) \quad (2.2)$$

Sujette aux contraintes:

$$\begin{cases} |((w \cdot \phi(x_i)) + b) - y_i| \leq \varepsilon + \xi_i^*, \forall i = 1, \dots, N \\ \xi_i, \xi_i^* \geq 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

Où (ξ, ξ^*) sont des variables d'écart introduites pour les échantillons qui ne se trouvent pas dans ε - tube (Figure 2.3).

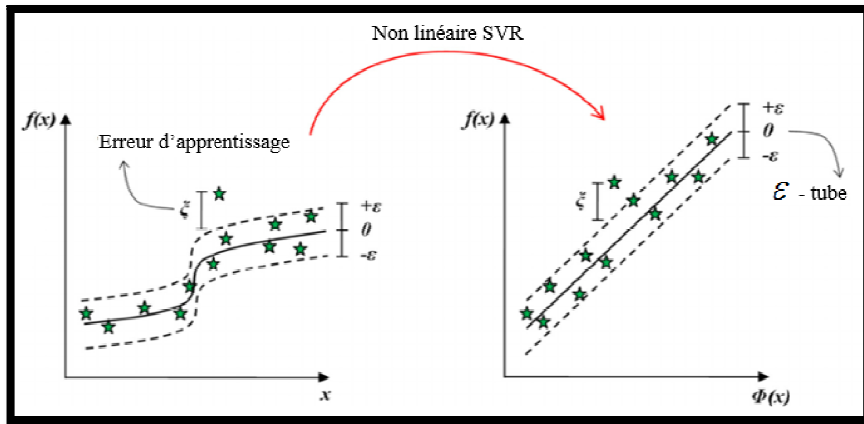


Figure 2.3 : Illustration du principe des variables d'écart dans le cas d'une Régression non-linéaire

La constante C est un paramètre d'équilibrage qui permet de contrôler implicitement le niveau de bruit du problème et la régularité de la solution donc elle règle le compromis entre la complexité du modèle (planéité de f) et le degré de tolérance pour la déviation des échantillons par rapport à ε .

D'après la théorie de l'optimisation, tout problème d'optimisation possède une forme duale dans le cas où la fonction objective et les contraintes seraient strictement convexes. Dans ces conditions, la résolution de l'expression duale du problème est équivalente à la solution du problème original. Pour résoudre ces types de problèmes, on utilise une fonction que l'on appelle *Lagrangien* qui incorpore les informations sur la fonction objective et les fonctions contraintes et dont le caractère stationnaire peut être utilisé pour détecter les solutions.

Plus précisément, le *Lagrangien* est défini comme étant la somme de la fonction objective et d'une combinaison linéaire des contraintes dont les coefficients $\alpha_i > 0$ sont appelées des multiplicateurs de *Lagrange* ou encore variables duales.

En introduisant les multiplicateurs de *Lagrange* ($\alpha_i, \alpha_i^*, \mu_i, \mu_i^* \geq 0$), le *Lagrangien* associé au nouveau problème d'optimisation devient :

$$\begin{aligned}
 L = & \frac{1}{2} \|w\|^2 + \sum_{i=1}^N C(\xi_i + \xi_i^*) - \sum_{i=1}^N (\mu_i \xi_i + \mu_i^* \xi_i^*) \\
 & - \sum_{i=1}^N \alpha_i (\varepsilon + \xi_i - y_i + < w, x_i > + b) \\
 & - \sum_{i=1}^N \alpha_i^* (\varepsilon + \xi_i^* - y_i + < w, x_i > - b)
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

Dans notre cas, on passe du problème primaire au problème dual (2.4) en introduisant des Multiplicateurs de Lagrange (α_i) pour chaque contrainte. Ici, on a une contrainte par exemple d'apprentissage (Smola et al. (2003)), notre problème d'optimisation (4) se ramène à une forme duale dont la solution est l'estimation de la régression qui prend la forme suivante :

$$g[x] = \sum_{i=1}^{N_{\text{sup}}} (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x_i, x) + b^* \tag{2.5}$$

Avec :

$$w = \sum_{i=1}^{N_{\text{sup}}} (\alpha_i, \alpha_i^*) \phi(x_i) \tag{2.6}$$

Où :

- α_i, α_i^* sont les multiplicateurs de Lagrange. Seules les valeurs non nulles des multiplicateurs de Lagrange sont utiles pour la détermination de la courbe de Régression. Les points de données associés à ces coefficients (qui se trouvent sur ou à l'extérieur du tube $\pm\varepsilon$) sont appelés les vecteurs de support. Le fait d'ajouter des variables d'écart et de manipuler le paramètre de régularisation C donne aux SVR un aspect flexible et rigoureux à la fois.
- W est sous ensemble des échantillons correspondant aux multiplicateurs de Lagrange non-nuls. Ces échantillons de la base d'apprentissage dont les poids (Multiplicateurs de Lagrange sont non-nuls (α_i, α_i^*)), représentent les vecteurs de support.
- $K(.,.)$ est appelée fonction noyau. Elle représente un produit scalaire dans l'espace de description. Le type de cette fonction influence sur la façon de modéliser la fonction de Régression.

III.3. Choix de la fonction noyau

Une fonction est considérée comme un noyau admissible si elle satisfait la condition de Mercer [Wan07]. A partir de cette condition, plusieurs noyaux ont été présentés dans la littérature. On peut notamment citer les noyaux de polynômes, les noyaux RBF ou encore les noyaux de fonctions B-Spline. Une propriété intéressante des fonctions noyaux est qu'une combinaison linéaire de noyaux est un noyau. Cette propriété a conduit par exemple Qiu et Lane [Qiu05] à utiliser une combinaison linéaire des noyaux classiques et à intégrer les coefficients comme paramètres du problème d'optimisation. Mais, dans la plupart des applications de la méthode SVR, le noyau gaussien est utilisé. Le tableau suivant énumère quelques types de noyaux.

Noyau Gaussien	$K(x, x') = e^{-\frac{ x-x' ^2}{2\sigma^2}}$	Le paramètre étant sa largeur σ
Noyau RBF	$K(x, x') = e^{-\gamma x-x' ^2}$	Le paramètre étant sa largeur λ
Noyau Polynomial	$K(x, x') = (1 + x \cdot x')^d$	Le paramètre étant son degré d

Tableau 2.1 : Quelques types de noyaux des SVR et leurs fonctions mathématiques

III.4. Réglage des paramètres SVR

Pour construire un modèle SVR efficace, plusieurs auteurs sont tout à fait favorables à l'hypothèse suivante : *bien choisir ces paramètres cruciaux* et plusieurs travaux ont été élaboré en ce sens et il est bien évident que la précision de l'estimation et la performance de ces SVR dépendent de la bonne initialisation des paramètres ou hyper-paramètres des SVR, à savoir C , $\mathcal{E}$, et le type de la fonction noyau K et ses paramètres.

III.4.1. Facteur de pénalité C

Le paramètre C détermine un compromis entre la complexité du modèle et les erreurs supérieures à $\mathcal{E}$ tolérées sur l'échantillon d'apprentissage. Il a été introduit pour permettre à la méthode SVR de fournir un résultat acceptable dans le cas où l'approximation précise de l'échantillon est impossible. Cherkassky et Ma [Che02], tout comme Mattera et Haykin [Mat99], proposent de choisir C égal à la taille de l'intervalle des sorties recherchées, tout en précisant qu'avec un bon choix du paramètre $\mathcal{E}$, la valeur de C n'a que peu d'influence sur les performances de généralisation, tant qu'elle est suffisamment grande. Par ailleurs, Shawe-Taylor et Christianini [Sha04] ont choisi de faire varier ce paramètre dans un intervalle donné et de déterminer le meilleur choix par validation croisée.

III.4.2. Largeur de la zone insensible $\mathcal{E}$

Le paramètre $\mathcal{E}$ détermine la largeur de l'intervalle autour des points de l'échantillon dans lequel l'approximation est considérée comme exacte. Ce paramètre rend la fonction produite par le modèle plus ou moins lisse, et influe sur la complexité du modèle construit. Un $\mathcal{E}$ fort nuit à la précision du modèle mais permet d'obtenir un modèle plus lisse. A contrario, réduire la largeur de la zone conduit à un modèle complexe, mais qui approche précisément la fonction sur l'échantillon d'apprentissage. Pour de nombreux auteurs [Che02], [Wan07], [Sha04], le choix de ce paramètre est lié au niveau de bruit en entrée. Ils proposent alors une méthode pour déterminer la valeur de $\mathcal{E}$ dans le cas où ce niveau est connu, en reliant linéairement $\mathcal{E}$ et la variance du bruit gaussien. Mattera et Haykin [MH99] proposent de choisir ce paramètre de telle sorte que le nombre de vecteurs de support (SV) du modèle alors produit soit d'environ 50% de la taille de l'échantillon d'apprentissage.

III.4.3. Le paramètre du noyau

Le choix du paramètre du noyau est important. Si ce paramètre est choisi trop petit, alors le modèle produit sera trop local : il n'aura aucun mal à coller à l'échantillon

d'apprentissage, mais donnera de mauvais résultats pour les points qui en sont éloignés. Si, par contre, il est choisi trop grand, alors il y a un risque de surdéterminer le modèle, alors incapable d'approcher précisément l'échantillon d'apprentissage. Cristianini et al. [CCST99] proposent une méthode pour adapter dynamiquement la valeur de ce paramètre aux données par observation d'une borne sur l'erreur de généralisation. Wang et al. [Wan03] donnent une méthode de calcul du paramètre optimal et démontrent l'existence d'un intervalle à l'intérieur duquel les performances de généralisation sont stables.

III.5. Optimisation des paramètres des modèles SVR

Le choix des paramètres des différents modèles est donc un problème complexe. Quelle que soit la méthode, il n'existe pas dans la littérature de règle empirique qui permettrait de choisir les bons paramètres indépendamment du problème considéré. A l'inverse, il a été montré qu'un mauvais choix de paramètres peut détériorer très fortement les performances d'un modèle donnée. Pour chaque modèle, on a vu que plusieurs auteurs ont finalement proposé de déterminer la valeur optimale des paramètres par des algorithmes d'optimisation. C'est une approche de ce type que nous allons maintenant présenter. Elle nécessite de formuler un critère qui permet de quantifier, pour une valeur des paramètres, la qualité d'approximation du modèle [Che02].

L'analyse de sensibilité de cette technique consiste à faire varier ces paramètres et à évaluer la réponse du modèle. Il y a plusieurs façons d'approcher la question : par intervalles (valeur basse et valeur haute du paramètre en cause), par la méthode de *Monte Carlo*, la Validation-croisée, etc...

Plusieurs travaux ont été élaborés pour détermination des paramètres des SVR Citons, par exemple, le travail de [Kee02] qui utilise la technique de minimisation de marge, ou celui de [Caw06] qui propose la sélection de ces paramètres par la technique de validation croisées, ou (cross-validation), qui nécessite de larges bases de données ainsi qu'un long temps de calcul. [Che03] proposent une approche analytique pour la sélection des valeurs des paramètres C et ϵ , en utilisant un noyau gaussien. [Lin05] développent une méthode de sélection systématique des paramètres de SVR et la largeur de son noyau. D'autres auteurs, comme [Pin05], ont eu recours aux méthodes heuristiques pour la sélection de ces paramètres et ont utilisé le recuit simulé pour trouver les deux paramètres C et ϵ . Il a été clairement démontré qu'on ne dispose pas de règles (*ou recettes*) pour la sélection de tels paramètres. En effet, chaque cas est unique puisque sa base de données est unique.

IV. Modes Glissants

IV.1. Principe de commande par Modes Glissants

L'utilisation de la commande non linéaire ne cesse d'accumuler des succès dans ces dernières années, grâce à l'augmentation du nombre des procédés industriels ainsi que la plupart des systèmes réels ont un aspect non linéaire. Cependant, la majorité des approches de la commande non linéaire exige la disponibilité d'un modèle mathématique du système à commander. Or, les systèmes réels ont très souvent un comportement différent des modèles mathématiques, à cause de variations de paramètres, de dynamiques négligées, de perturbations extérieures,... Les contrôleurs par modes glissants sont conçus pour conduire les états du système sur une surface particulière dans l'espace d'état, nommée surface de glissement, c'est le mode de convergence. Une fois la surface de glissement est atteinte, la

commande maintient les états sur le voisinage proche de la surface de glissement avec une certaine dynamique jusqu'au point d'équilibre, c'est le mode de glissement (Figure 2.3). Le système commandé est dit alors en régime glissant et sa dynamique devient moins sensible aux variations paramétriques, aux erreurs de modélisation et à certaines perturbations externes. La mise en œuvre d'une telle commande est relativement simple et ne nécessite pas une représentation exacte du processus, ce qui est un avantage considérable[Per02] [Sht13].

Cependant, l'utilisation de cette approche a longtemps été limitée par les vibrations résiduelles en hautes fréquences qui se manifestent sur les grandeurs asservies et les variables de commandes. Sur le plan expérimental, ce phénomène connu sous le nom de réticence (*chattering* en Anglais), demeure donc le problème principal des commandes par modes glissants, car il peut causer une perte de précision en influençant sur les grandeurs asservies et les variables de commandes[Utk06].

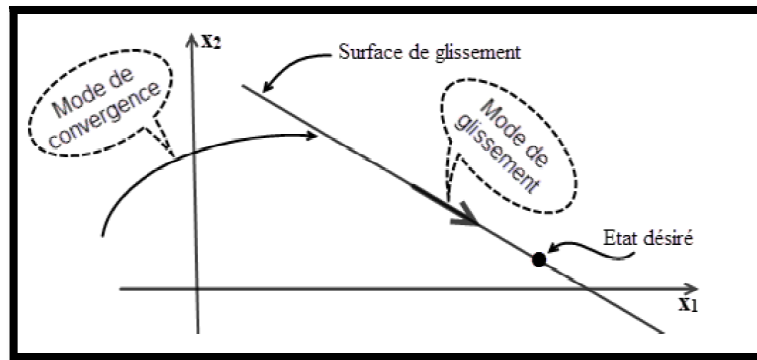


Figure 2.3 : Différents mode de convergence pour la trajectoire d'état

En général, La conception de l'algorithme de commande par modes glissants prend en compte les problèmes de stabilité et de bonnes performances de façon systématique dans son approche, qui s'effectue principalement en trois étapes complémentaires définies par :

- Choix de la surface de glissement.
- Détermination des conditions d'existence.
- Synthèse de la loi de commande.

Avant d'étudier ces étapes, nous considérons le système non linéaire incertain et affine en commande, ayant un comportement non linéaire, mono-entrée mono-sortie (SISO) exprimé sous forme canonique décrite par l'équation dynamique suivante[Bou13] :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \dots \\ \dot{x}_n = f(x_i) + g(x_i)U \\ y = x_1 \end{cases} \quad (2.7)$$

Ou équivalent :

$$\begin{cases} \dot{x}^{(n)} = f(x, t) + g(x, t)U(t) + \xi(x, t) \\ y = x \end{cases} \quad (2.8)$$

Où :

$x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T = [x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}]^T \in R^n$ représente le vecteur d'état mesurable du système.

$U(t) \in R$ et $y(t) \in R$ sont respectivement l'entrée et sortie du système.

$\xi(x, t)$ Représente le terme incertain qui regroupe les erreurs de modélisation, les dynamiques négligées et les perturbations externes, supposé borné.

$f(x, t)$ et $g(x, t)$ sont deux fonctions nominale à vecteurs dans R , décrivant respectivement le comportement dynamique du système et le gain de commande. Avec $g(x, t) \neq 0$ pour tout x dans une région de contrôlabilité.

L'objectif de notre étude est d'assurer par la technique des modes glissants la stabilité et la poursuite en boucle fermée du système (2.7), vis-à-vis des incertitudes et des perturbations.

IV.2. Conditions d'existence des Modes Glissants

Considérons une classe de systèmes non-linéaire affine en commande, c'est-à-dire des systèmes dont l'évolution est décrite par l'équation différentielle suivante :

$$\dot{x} = f(x, t) + g(x, t)U \quad (2.9)$$

Où : $x = (x_1, \dots, x_n)^T$ appartient à X de R^n , est le vecteur d'état. $U : R^m \rightarrow R$ est l'entrée de commande qui est une fonction éventuellement discontinue. $f(x, t)$ et $g(x, t)$ sont des champs de vecteurs suffisamment différentiables, définis sur X .

Soit σ une fonction continue, $\sigma : X \times R^+ \rightarrow R$.

L'ensemble $S = \{x \in X / \sigma(x, t) = 0\}$ définit une sous variété de dimension $(n-1)$, appelée hyper-surface de glissement ou de commutation. La fonction $\sigma(x, t)$ est appelée fonction de glissement ou fonction de commutation. Elle sépare l'espace d'état en deux parties disjointes $\sigma(x, t) > 0$ et $\sigma(x, t) < 0$.

La commande U est une commande à structure variable, qui change la structure du système en utilisant des commandes différentes dans chacune des parties de l'espace d'état du système.

$$U = \begin{cases} U^+(x) si \sigma(x, t) > 0 \\ U^-(x) si \sigma(x, t) < 0 \end{cases} \quad (2.10)$$

Où U^+ et U^- sont des fonctions continues, avec $U^+ \neq U^-$.

Cette commande U de nature discontinue consiste à amener les trajectoires d'état du système à atteindre et ensuite rester sur la surface de glissement malgré la présence de perturbations. En d'autres termes, la commande doit rendre cette surface de glissement localement attractive. Pour déterminer la condition d'attractivité, considérons la fonction de *Lyapunov* classique de type quadratique suivante:

$$V(\sigma) = \frac{1}{2} \sigma^2 \quad (2.11)$$

Une condition nécessaire et suffisante, appelée condition d'attractivité, pour qu'une variable de glissement $\sigma(x, t)$ tende vers 0 est que la dérivée temporelle de V soit définie négative.

Un régime glissant existe alors à chaque fois que :

$$\sigma \dot{\sigma} < 0 \quad (2.12)$$

L'inégalité (2.12) est appelée condition d'attractivité. Cette condition garantit seulement une convergence asymptotique vers la surface de glissement. Pour assurer une convergence $\sigma(x, t)$ vers zéro en temps fini on utilise souvent la condition d'attractivité non-linéaire dite condition de η -attractivité et donnée par [Slo91] [Bou05] :

$$\sigma \dot{\sigma} < -\eta |\sigma| \quad (2.13)$$

Où η est une constante strictement positive.

Cette condition assure à la fois l'existence du régime glissant et la condition de stabilité selon *Lyapunov*.

Remarque :

Il existe d'autres systèmes qui sont de conception naturellement discontinus, à titre d'exemples les circuits électroniques contenant des commutateurs et les systèmes mécaniques contenant un frottement sec [Utk92]. Qu'ils soient à discontinuité artificielle ou naturelle, les systèmes à structure variable de type (2.7) peuvent tous se ramener à la forme (2.8).

IV.3. Choix de la surface de glissement

L'erreur de poursuite est définie comme étant $e(t) = y(t) - y_r(t)$, où $y(t)$ est la sortie du système et $y_r(t)$ est le signal de référence. Supposons que l'objectif de commande est d'assurer une poursuite de trajectoire d'un signal de référence par la sortie du système, donc de faire tendre l'erreur vers zéro. La surface de glissement est synthétisée à partir de l'erreur de poursuite et du degré relatif du système.

Définition 1 [BEN'12] :

Le degré relatif est le nombre « r » de la première dérivée totale où le contrôle apparaît explicitement avec un coefficient non nul c.à.d. le nombre minimum de fois qu'il faut dériver la sortie $y(t)$ par rapport au temps pour faire apparaître la commande d'une manière explicite.

$$\sigma^{(r)} = f(x,t) + g(x,t)U \quad (2.14)$$

Et

$$\frac{\partial \sigma^{(r)}}{\partial u} = g \neq 0 \quad (2.15)$$

Pour le système (2.7), la fonction de glissement peut être choisie comme un opérateur différentiel linéaire d'ordre (r-1), agissant sur l'erreur de poursuite:

$$e(t) = y(t) - y_r(t) \quad (2.16)$$

En tant que:

$$\sigma(x) = e^{(n-1)} + \dots + c_2 \ddot{e} + c_1 \dot{e} + c_0 e \quad (2.17)$$

Où les coefficients $c_i (0 \leq i \leq n-2)$ sont choisis tels que le polynôme $\lambda^{n-1} + \sum_{i=0}^{n-2} c_i \lambda^i = 0$ (2.18) soit un polynôme d'Hurwitz, c.à.d. que le système réduit soit stable, puisque l'équation différentielle associée est :

$$e^{(n-1)} + \dots + c_2 \ddot{e} + c_1 \dot{e} + c_0 e = 0 \quad (2.19)$$

La synthèse de la surface de glissement repose sur la définition de la variable de glissement, lorsque la variable de glissement $\sigma(x,t)$ converge vers zéro, l'erreur de poursuite $e(t)$ converge asymptotiquement vers zéro, avec une dynamique imposée par le choix des coefficients c_i . Cette dynamique peut être réglée par n'importe quelle méthode de placement de pôles appropriée.

De plus, $\sigma(x,t)$ satisfait la condition sur le degré relatif du système puisque la commande U apparaît dans l'expression de sa première dérivée par rapport au temps :

$$\dot{\sigma} = e^{(n)} + c_{n-2} e^{(n-1)} + \dots + c_2 \ddot{e} + c_1 \dot{e} + c_0 e \quad (2.20)$$

$$\dot{\sigma} = y_r^{(n)} - f(x_i) - g(x_i)u + c_{n-2} e^{(n-1)} + \dots + c_1 \ddot{e} + c_0 \dot{e} \quad (2.21)$$

Une fois la surface de glissement (c.à.d. la dynamique du système réduit) sera choisie, la seconde étape consiste à établir une loi de commande stabilisante en zéro le système (2.7) en temps fini, malgré les incertitudes et les perturbations.

IV.4. Synthèse de la loi de commande

La structure d'un contrôleur en modes glissants comporte deux parties : La première concerne la linéarisation exacte U_{eq} et la deuxième est stabilisante U_s . Cette dernière est très importante dans le réglage par modes glissants. Elle permet d'éliminer les effets d'imprécisions du modèle et de rejeter les perturbations extérieures.

Nous avons donc :

$$U = U_{eq} + U_s \quad (2.22)$$

Où :

- U_{eq} est la commande équivalente, elle sert à maintenir la variable à contrôler sur la surface de glissement $\sigma(x,t)=0$ et elle est déduite, en considérant que la dérivée de la surface est nulle $\dot{\sigma}=0$. Physiquement, elle peut être interprétée comme étant une valeur moyenne que prend la commande lors de la commutation rapide entre les valeurs U_{max} et U_{min} (Figure 2.4).

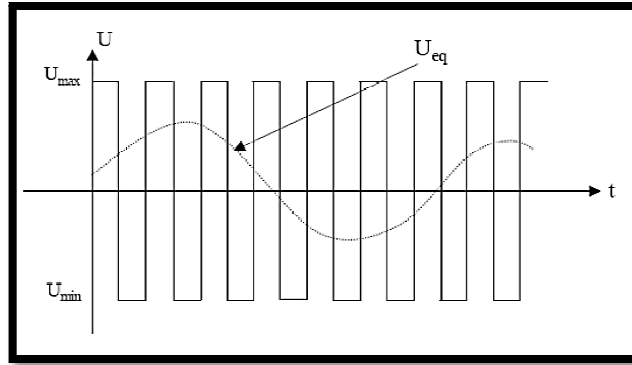


Figure 2.4: Interprétation de U_{eq}

- U_s : Le terme de robustesse permet de compenser l'écart dynamique entre le système réel et sa référence, et d'éliminer les perturbations externes. Il est obtenu afin de satisfaire la condition d'existence, il représente la commande discrète, discontinue assurant la convergence du système vers la surface de glissement.

$$U_s = -K \cdot \text{sign}(\sigma) \quad (2.23)$$

Avec K est une constante positive qui représente le gain de la commande, appelée gain de commutation, choisi de manière à être suffisamment grand pour compenser les perturbations et les incertitudes du système.

Le symbole sign désigne la fonction suivante :

$$\text{sign}(\sigma) = \begin{cases} 1 \rightarrow \text{si } \sigma > 0 \\ 0 \rightarrow \text{si } \sigma = 0 \\ -1 \rightarrow \text{si } \sigma < 0 \end{cases} \quad (2.24)$$

A partir de (2.24) on peut noter que le terme discontinu de la loi de commande permet d'assurer la convergence en temps fini, ainsi que la robustesse du système vis-à-vis des perturbations externes. La Figure 2.5 représente la fonction de la commande discrète :

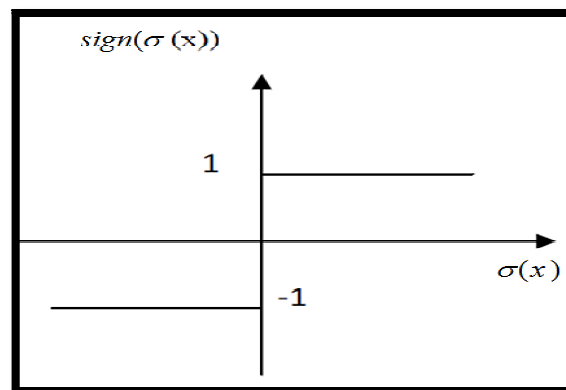


Figure 2.5 : Interprétation de U_s (avec fonction $sign$)

Il est à noter que c'est ce caractère discontinu de la loi de commande qui permet d'assurer la convergence en temps fini ainsi que la robustesse vis-à-vis des perturbations externes. Cependant, la présence de la fonction $sign$, dans cette commande, produit le phénomène de la *réticence*.

IV.5. Phénomène de réticence ou « *chattering* »

Un régime glissant idéal requiert une commande pouvant commuter à une fréquence infinie. Ainsi, durant le régime glissant, les discontinuités appliquées à la commande peuvent entraîner un phénomène de broutement, appelé réticence. Celui-ci se caractérise par de fortes oscillations des trajectoires du système autour de la surface de glissement (Figure 2.6). Les principales raisons à l'origine de ce phénomène sont les limitations des actionneurs ou les retards de commutation au niveau de la commande. Ces commutations détériorent la précision de la commande et peuvent s'avérer néfastes pour l'organe de commande en provoquant une détérioration prématurée des systèmes mécaniques et une élévation de température dans les systèmes électriques (perte d'énergie non négligeable).

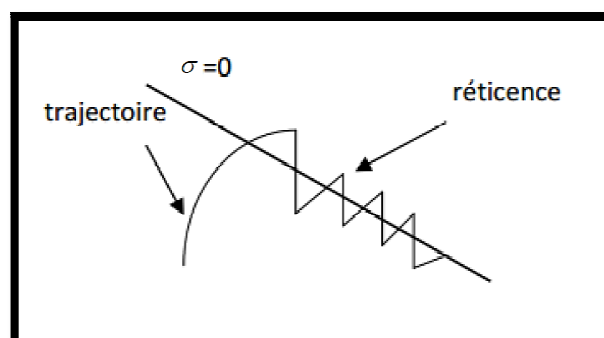


Figure 2.6 : Phénomène de la réticence

Dans le but de réduire ou d'éliminer ce phénomène, de nombreuses solutions ont été proposées, comme la solution de couche limite, fuzzysliding mode, modes glissants d'ordre supérieur, etc...

- **Solution de couche limite**

Cette solution, connue aussi sous le nom de « Boundary layer solution », consiste à remplacer la fonction *sign* par une approximation continue, de type grand gain, uniquement dans un voisinage de la surface. Parmi les fonctions utilisées nous citerons la fonction de saturation *sat*(Figure 2.7), cette fonction de saturation peut être exprimée par :

$$sat(\sigma) = \begin{cases} \sigma / L \rightarrow si \|\sigma\| < L \\ sign(\sigma) \rightarrow ailleurs \end{cases} \quad (2.25)$$

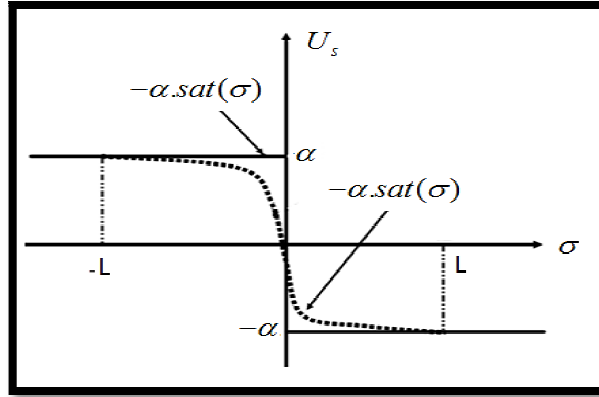


Figure 2.7 : Représentation de la commande U_s en fonction de la variable de glissement

La loi de commande discontinue donnée par (2.23) devient alors :

$$U_s = -\alpha \cdot sat(\sigma) \quad (2.26)$$

D'autres fonctions existent telles que les fonctions, $\tanh(\sigma)$ (Figure 2.8):

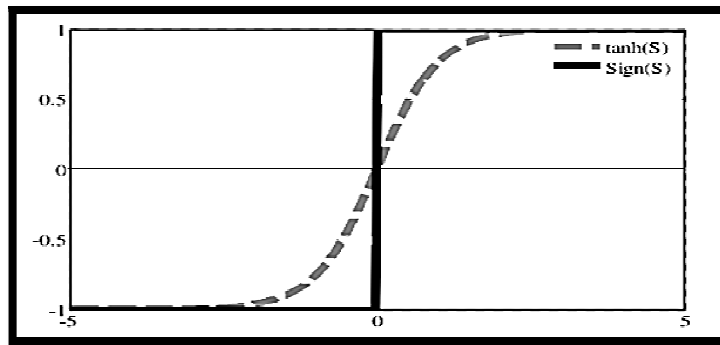


Figure 2.8: Représentation de la fonction hyperbolique

Le système ne converge plus vers la valeur désirée, mais vers un voisinage de cette dernière dans ce cas, le système est dit en régime *pseudo-glissant*. Bien que cela permis d'atténuer le phénomène de réticence, la précision par rapport à l'objectif fixé, la robustesse de la commande et le temps de réponse s'en trouvent dépréciés. Cette méthode est paramétrée par une constante positive $\mathcal{E}$ réglée pour avoir un bon compromis entre réduction de phénomène de réticence et conservation de la robustesse. Dans les méthodes présentées ici, plus $\mathcal{E}$ est petit, plus l'approximation tend vers la fonction *sign*, et donc meilleure robustesse, au

détriment de la réduction de réticence. Alors C'est pourquoi dans cette thèse, nous nous envisageons de combiner les deux approches explicitées à savoir la couche limite et la commande équivalente.

V. Commande avec la technique Backstepping

V.1. Historique

Depuis quelques années, beaucoup de progrès ont été faits dans le domaine de la commande des systèmes non linéaires. La technique du Backstepping fait partie de ces nouvelles percées dans ce domaine. L'arrivée de la commande par Backstepping a donné un nouveau souffle à la commande des systèmes non linéaires, qui malgré les grands progrès réalisés, il manquait des approches générales. L'origine du Backstepping n'est pas tout à fait claire, ceci est dû à l'apparition simultanée et souvent implicite dans les articles publiés dès 1980. Cependant, il est juste de dire que le Backstepping a reçue beaucoup d'attention, grâce aux travaux de professeur V. Kokotovic et ses collaborateurs [Kok99] [Kok12]. Ils présentaient un outil mathématique "toolkits" pour concevoir des lois de contrôle pour une variété des systèmes non linéaires utilisant la méthode du Backstepping. Durant les années suivantes, des manuels édités sont apparus [Hua08].

Cette technique est une méthode systématique et récursive de synthèse de lois de commande non linéaires, elle est basée sur la décomposition du système entier de commande, qui est généralement multi-variable et d'ordre élevé en une cascade de sous-systèmes de commande du premier ordre. Cette technique se base sur le principe de stabilité de *Lyapunov* qui peut s'appliquer à un grand nombre de systèmes non linéaires.

L'idée de base de la commande par Backstepping est de rendre les systèmes bouclés équivalents à des sous-systèmes d'ordre un en cascade stable au sens de *Lyapunov*, ce qui leur confère des qualités de robustesse et une stabilité globale asymptotique. En d'autres termes, c'est une méthode multi étapes. A chaque étape du processus, une commande virtuelle est ainsi générée pour assurer la convergence du système vers son état d'équilibre. Cela peut être atteint à partir des fonctions de *Lyapunov* qui assurent pas à pas la stabilisation de chaque étape de synthèse.

Une chose importante dans le Backstepping est que les non linéarités utiles contribuant dans la stabilisation peuvent être retenus, tandis que les non linéarités non utiles peuvent être remplacés par un contrôle linéaire ; garder les non linéarités au lieu de les éliminer exige un modèle moins précis et un petit effort de contrôle et mieux encore, les lois de contrôle résultant peuvent être considérées comme des lois optimales garantissant une certaine propriété de robustesse[Cha14] [Liu16].

V.2. Notions de stabilité au sens de Lyapunov

La théorie de *Lyapunov* a été pendant longtemps un outil important dans la commande linéaire aussi bien que la commande non-linéaire cependant, son utilisation dans la commande non-linéaire a été entravée par les difficultés pour trouver une fonction de *Lyapunov* pour un système donné mais la tâche de trouver une telle fonction a été souvent laissée à l'imagination et à l'expertise du concepteur.

Même pour des systèmes simples et en l'absence d'incertitudes le choix de la fonction de *Lyapunov*, et de la loi de commande n'est pas toujours facile. Aucune règle générale n'existe à ce jour quant au choix d'une telle fonction. Et quand on sait l'influence de ce choix sur le comportement général du système, on comprend l'intérêt qu'a suscité ce problème ces dernières années.

- **Théorie de Lyapunov [Ben80] :**

Une condition de base sur un système commandé est qu'elle devrait atteindre l'équilibre désiré sans prendre un détour trop grand y arrivant. Formalisons cette condition en termes de propriétés de l'équilibre désiré, d'après [Slo91]. La stabilité au sens de *Lyapunov* est une théorie générale valable pour toute équation différentielle. Cette notion signifie que la solution d'une équation différentielle initialisée au voisinage d'un point d'équilibre en reste suffisamment proche.

Les propriétés de stabilité du point d'équilibre sont caractérisées par les définitions suivantes:

V.2.1. Définition 1 (Stabilité de *Lyapunov*)

Considérons le système invariable suivant:

$$\dot{x} = f(x) \quad (2.27)$$

Commençons à l'état initial $x(0)$. Supposons que x_e est un point d'équilibre du système :

$$f(x_e) = 0 \quad (2.28)$$

Nous disons que le point d'équilibre est :

- Stable, si pour chaque $\varepsilon > 0$ existe $\delta(\varepsilon) > 0$, tel que :

$$\|x(0) - x_e\| < \delta \Rightarrow \|x(t) - x_e\| < \varepsilon \text{ pour tout } t \geq 0 \quad (2.29)$$

- Asymptotiquement stable, s'il est stable et en plus il existe $r > 0$ tels que :

$$\|x(0) - x_e\| < r \Rightarrow x(t) \rightarrow x_e \text{ lorsque } t \rightarrow \infty \quad (2.30)$$

- Globalement asymptotiquement stable (GAS), s'il est asymptotiquement stable pour tous les états initiaux.

V.2.2. Définition 2

Une fonction scalaire $V(x)$ est:

- définie positive si $V(0) = 0$ et $V(x) > 0$, $x \neq 0$. (2.31)

- définie semi-positive si $V(0) = 0$ et $V(x) \geq 0$, $x \neq 0$ (2.32)

- définie semi-négative si le $-V(x)$ est définie semi-positive.
 - radialement illimité si $V(x) \rightarrow \infty$ comme $\|x\| \rightarrow \infty$
- (2.33)

Le théorème principal pour prouver la stabilité sera établi par la suite.

V.2.3. Définition 3 (laSalle-Yoshizawa)

Posons que $x=0$ est un point d'équilibre pour (1), $V(0)=0$ et $V(x)$ est une fonction scalaire continue et différentiable en X définie tel que:

- $V(x)$ est définie positive
 - $V(x)$ est radialement illimitée
 - $\dot{V}(x) = V_x(x)f(x) \leq -W(x)$
- (2.34)

Si $W(x)$ est définie semi-positive alors toutes les solutions de (2.7) sont stables. De plus, si $W(x)$ est définie positive avec le point d'équilibre $x=0$ alors ce point d'équilibre est GAS.

Preuve: Pour montrer la stabilité quand $V(x)$ est seulement définie semi-négative, le corollaire de LaSalle est utilisé [Kri95].

Corolaire 1 (Stabilité asymptotique)

Posons que $x=0$ est un point d'équilibre pour (1), $V(0)=0$ et $V(x)$ est une fonction scalaire continue et différentiable en X définie tel que:

- $V(x)$ est définie positive
- $V(x)$ est radialement illimitée
- $\dot{V}(x)$ est définie semi-négative

Posons que $E=\{x:V(x)=0\}$ et qu'aucune autre solution que $x=0$ ne peut rester pour toujours dans E alors $x=0$ est GAS.

Notons que ces résultats sont non constructifs, dans le sens qu'ils ne donnent aucun indice de la façon de trouver un $V(x)$ satisfaisant toutes les conditions nécessaires pour conclure la GAS. Toutefois nous nous rapporterons à une fonction $V(x)$ satisfaisant les conditions spécifiées dans le théorème 1 comme la fonction de *Lyapunov* pour le système [Kri95].

Remarque :

Ces théorèmes sont une condition suffisante de stabilité mais ne permet pas de guider l'utilisateur dans le choix de la fonction de *Lyapunov*, qui satisfait les conditions de GAS. L'étude des méthodes qui permettent de construire une fonction de *Lyapunov* candidate pour

un système donné a motivé une littérature très abondante, les formes quadratiques sont les plus utilisées notamment les fonctions définies positives qui sont des intégrales premières.

V.3. Principe de la technique de Backstepping

Cette technique met à profit des relations causales successives pour construire de manière itérative et systématique une loi de commande et une fonction de *Lyapunov* stabilisante. De plus, et contrairement au bouclage linéarisé, le Backstepping offre la possibilité de conserver dans le bouclage les non linéarités stabilisantes. Pour qu'elle puisse s'appliquer, le système non linéaire doit être sous la forme paramétrique de boucle de retour stricte. L'étude de la stabilité d'un système caractérisé par un vecteur d'état x consiste alors à chercher une fonction $V(x)$ (représentative de l'énergie) de signe défini, dont la dérivée $\frac{dV}{dt}$ est semi-définie et de signe opposé dans le même domaine.

La forme générale du système à analyser est donnée par :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1) + g_0(x_1)x_2, \\ \dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2) + g_1(x_1, x_2)x_3, \\ \dots \\ \dot{x}_n = f_n(x_1, \dots, x_n) + g_n(x_1, \dots, x_n)U, \\ y = x_1, \\ x_{t=0} = x_0 \end{cases} \quad (2.35)$$

Où :

$x_i = [x_1 x_2 \dots x_n]^T \in \Re^n, u \in \Re, y \in \Re$: sont respectivement vecteurs des états d'entrée, de sortie et de commande. f_i et g_i ($i=1,2, \dots, n-1$) : sont des fonctions non linéaires continues et dérivables.

Le système étant d'ordre n , la mise en œuvre s'effectue en n étapes :

Etape 1 :

On commence par la première équation du système (2.35) La première référence désirée est notée :

$$(x_1)_d = \alpha_0 = y_r \quad (2.36)$$

Ce qui conduit à l'erreur de régulation suivante :

$$e_1 = x_1 - \alpha_0 \quad (2.37)$$

Ainsi sa dérivée est :

$$\dot{e}_1 = \dot{x}_1 - \dot{\alpha}_0 = f_1(x_1) + g_0(x_1)x_2 - \dot{\alpha}_0 \quad (2.38)$$

Pour un tel système, nous construisons d'abord la fonction de *Lyapunov* V_1 sous une forme quadratique :

$$V_1 = \frac{1}{2} e_1^2 \quad (2.39)$$

Sa dérivée temporelle est :

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 = e_1 [f_1(x_1) + g_0(x_1)x_2 - \dot{\alpha}_0] \quad (2.40)$$

Assurait la stabilité pour la dynamique de (2.38). Pour cela, prenons $x_2 = \alpha_1$, telle que :

$$f_1(x_1) + g_0(x_1)x_2 - \alpha_0 = -k_1 e_1 \quad (2.41)$$

Où $k_1 > 0$ est une constante de conception.

Ainsi, la loi de commande pour le système (2.38) sera donnée par :

$$\alpha_1 = \frac{1}{g_0(x_1)} \left[-k_1 e_1 - \dot{\alpha}_0 - f_1(x_1) \right] \quad (2.42)$$

$$\dot{V}_1 = -k_1 e_1^2 \leq 0 \quad (2.43)$$

Etape 2 :

La nouvelle référence désirée sera la variable de commande de sous-système précédent (2.38) :

$$(x_2)_d = \alpha_1 \quad (2.44)$$

L'erreur de régulation c'est :

$$e_2 = x_2 - \alpha_1 \quad (2.45)$$

Sa dérivée est :

$$\dot{e}_2 = \dot{x}_2 - \dot{\alpha}_1 = f_2(x_1, x_2)x_3 - \dot{\alpha}_1 \quad (2.46)$$

La fonction de *Lyapunov* étendue pour le système (2.46) est :

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} e_2^2 = \frac{1}{2} [e_1^2 + e_2^2] \quad (2.47)$$

Dont la dérivée est :

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + e_2 \dot{e}_2 = -k_1 e_1^2 + e_2 \left[f_2(x_1, x_2) + g_1(x_1, x_2)x_3 - \dot{\alpha}_1 \right] \quad (2.48)$$

Pour la stabilité de système dynamiquement en choisie $x_3 = \alpha_2$, telle que :

$$f_2(x_1, x_2) + g_1(x_1, x_2)x_3 - \dot{\alpha}_1 = -k_1 e_2 \quad (2.49)$$

Où $k_1 > 0$ est une constante de conception.

$$\alpha_2 = \frac{1}{g_1(x_1, x_2)} \left[-k_2 e_2 - \dot{\alpha}_1 - f_2(x_1, x_2) \right] \quad (2.50)$$

Avec :

$$\dot{\alpha}_1 = \frac{g_0(x_1) \left[-k_2 \dot{e}_2 + \ddot{\alpha}_0 - f_2(x_1, x_2) \right] - \left[-k_1 e_1 + \dot{\alpha}_0 - f_1(x_1) \right] \dot{g}_1(x_1)}{g_0^2(x_1)} \quad (2.51)$$

Ce choix implique que :

$$\dot{V}_2 = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 \leq 0 \quad (2.52)$$

Etape n :

De la même façon, pour cette étape la référence à suivre sera :

$$(x_n)_d = \alpha_{n-1} \quad (2.53)$$

Où l'erreur de régulation est :

$$e_n = x_n - \alpha_{n-1} \quad (2.54)$$

Sa dérivée est :

$$\dot{e}_n = \dot{x}_n - \dot{\alpha}_{n-1} = f_n(x_1, \dots, x_n) + g_n(x_1, \dots, x_n)U - \dot{\alpha}_{n-1} \quad (2.55)$$

La fonction de *Lyapunov* étendue est :

$$V_n = V_1 + V_2 + \dots + \frac{1}{2} e_n^2 = \frac{1}{2} [e_1^2 + \dots + e_n^2] \quad (2.56)$$

Dont la dérivée est :

$$\dot{V}_n = \dot{V}_1 + \dots + e_n \dot{e}_n = -k_1 e_1^2 + \dots + e_n \left[f_n(x_1, \dots, x_n) + g_n(x_1, \dots, x_n)U - \dot{\alpha}_{n-1} \right] \quad (2.57)$$

Dans cette dernière étape, on est arrivé à déduire la loi de commande pour le système entier.

Un bon choix doit satisfaire :

$$f_n(x_1, \dots, x_n) + g_n(x_1, \dots, x_n)U - \dot{\alpha}_{n-1} = -k_n e_n \quad (2.58)$$

Où $k_n > 0$ est une constante de conception

Ainsi, la loi de commande pour le système entier sera donnée par :

$$U = \frac{1}{g_n(x_1, \dots, x_n)} \left[-k_n e_n - \dot{\alpha}_{n-1} - f_n(x_1, \dots, x_n) \right] \quad (2.59)$$

Ce qui garantit la négativité de la dérivée de la fonction de *Lyapunov* étendue :

$$\dot{V}_n = -k_1 e_1^2 - \dots - k_n e_n^2 \leq 0 \quad (2.60)$$

La méthodologie présentée nous assure une fonction stabilisatrice du sous-système à chaque étape du système global et la dernière fonction stabilisatrice fait référence à la loi de

commande de tout le sous-système, cette technique peut être appliquée à tout système d'ordre n , en fournissant les équations de l'état du système dans la forme correcte.

Nous voyons clairement que cette façon d'obtenir la loi de commande par la méthode de Backstepping, nous permet non seulement de stabiliser le système, mais aussi de garder tous les éléments non linéaires, ceci ne se trouve pas dans les autres méthodes de conception.

Alors le Backstepping offre un outil efficace qui permet, pour les systèmes non linéaires de tout ordre, de construire récursivement, et d'une manière systématique et directe, la loi de commande et la fonction de *Lyapunov* qui assurent la stabilité de la boucle. Dans sa version originelle, le Backstepping aboutit à des commandes par retour d'état.

VI. Optimisation par Essaim Particulaire adaptatif (APSO)

VI.1. Introduction

Il existe de nombreuses méthodes « classiques » d'optimisation pour résoudre de tels problèmes, applicables lorsque certaines conditions mathématiques sont satisfaites, mais, malheureusement, les situations rencontrées en pratique comportent souvent une ou plusieurs complications, qui mettent en défaut ces méthodes. L'arrivée d'une nouvelle classe de méthodes d'optimisation, nommées métaheuristiques (sont souvent inspirées par des systèmes naturels, qu'ils soient pris en physique ou en biologie de l'évolution) marque une grande révolution dans le domaine de l'optimisation. En effet, celles-ci s'appliquent à toutes sortes de problèmes combinatoires, et elles peuvent également s'adapter aux problèmes continus. Ces techniques métaheuristiques contiennent une très grande classe qualifiée de méthodes à population de solutions et connues sous le nom d'algorithmes évolutionnaires comme l'algorithme par essaim particulaire.

Les algorithmes d'optimisation s'utilisent en de nombreux problèmes y compris contrôle optimal, le design optimal et l'identification des paramètres du système. Dans ce genre de problèmes on minimise une fonction dite la « fonction de coût ». Le succès réalisé par ses algorithmes dans la résolution de problèmes d'optimisation complexes, nous a poussé, dans cette thèse, à tirer profit de l'algorithme d'optimisation adaptative par essaim particulaire APSO pour améliorer les lois de commandes utilisées dans les chapitres suivants. Le choix de cet algorithme est justifié par sa rapidité de convergence par comparaison aux autres algorithmes du même type.

L'optimisation par essaim particulaire (Particle Swarm Optimization, PSO), a été proposée par Kennedy et Eberhart en 1995 [Ken-95], c'est un algorithme évolutionnaire qui utilise une population de solutions candidates pour développer une solution optimale au problème. Elle s'inspire du comportement social des animaux évoluant en essaim, tels que les vols groupés d'oiseaux et les bancs de poissons qui ont tendance à imiter les comportements réussis qu'ils observent dans leur entourage, tout en y apportant leurs variations personnelles c.-à-d. que chaque particule prend sa décision en utilisant sa propre expérience et les expériences de son voisinage [Bou14] et [Kou16].

VI.1.1. Principe général

On peut observer chez les animaux évoluant en essaim des dynamiques de déplacement relativement complexes, alors qu'individuellement chaque individu a une intelligence limitée, et ne dispose que d'une connaissance locale de sa situation dans l'essaim.

L'information locale et la mémoire de chaque individu sont utilisées pour décider de son déplacement. Des règles simples, telles que « rester proche des autres individus », « aller dans une même direction » ou « aller à la même vitesse », suffisent pour maintenir la cohésion de l'essaim, et permettent la mise en œuvre des comportements collectifs complexes et adaptatifs.

L'essaim particulaire correspond à une *population* d'agents simples, appelés *particules*. Chaque particule est considérée comme une solution du problème, où elle possède une position (le vecteur solution) et une vitesse. De plus, chaque particule possède une mémoire lui permettant de se souvenir de sa meilleure performance (en position et en valeur) et de la meilleure performance atteinte par les particules voisines (informatrices) : chaque particule dispose en effet d'un groupe d'informatrices, historiquement appelé son *voisinage*. Un essaim particulaire, qui est un ensemble des solutions potentielles au problème d'optimisation, survole l'espace de recherche à la recherche de l'optimum global[Par05] [Cle02].

Le déplacement d'une particule est influencé par les trois composantes suivantes :

- **Une composante d'inertie** : La particule tend à suivre sa direction courante de déplacement ;
- **Une composante cognitive** : La particule tend à se diriger vers le meilleur site par lequel elle est déjà passée ;
- **Une composante sociale** : La particule tend à se fier à l'expérience de ses congénères et, ainsi, à se diriger vers le meilleur site déjà atteint par ses voisins.

La Figure 2.9 illustre la stratégie de déplacement d'une particule.

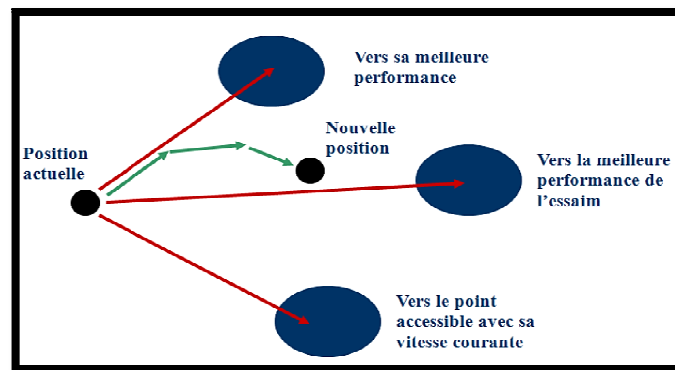


Figure 2.9 : Principe de déplacement d'une particule

VI.1.2. Formalisation mathématique

La méthode PSO démarre le processus d'optimisation par une population des solutions aléatoires qui se déplacent dans l'espace de recherche $\Phi \subset \mathbb{R}^m$ de dimension m et f la fonction objective. chaque particule i de la population $S = \{X_1, X_2, \dots, X_m\} \in \Phi$ est modélisée par son vecteur position $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})$ et également par son vecteur vitesse $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{im})$. Le déplacement de chaque particule dans l'espace de recherche, est basé sur sa position actuelle, elle garde en mémoire la meilleure position par laquelle elle est déjà

passée, que l'on note $P_i = (P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{im})$. La meilleure position atteinte par les particules de l'essaim est notée $P_g = (P_{g1}, P_{g2}, \dots, P_{gm})$.

Au départ de l'algorithme, les particules de l'essaim sont initialisées de manière aléatoire dans l'espace de recherche Φ . Ensuite, à chaque itération, chaque particule se déplace, en combinant linéairement les trois composantes citées ci-dessus. En effet, à l'itération $t+1$, le vecteur vitesse et le vecteur position sont calculés, respectivement selon l'équation (2.46) et l'équation (2.47):

$$v_{id}(t+1) = v_{id}(t) + c_1 \times rand()_1 \times (p_{id}(t) - x_{id}(t)) + c_2 \times rand()_2 \times (p_{gd}(t) - x_{id}(t)) \quad (2.61)$$

$$x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + v_{id}(t+1) \quad (2.62)$$

Où $d \in \{1, 2, \dots, m\}$

C_1 et C_2 sont deux constantes, appelées *coefficients d'accélération*; $rand()_1$ et $rand()_2$ sont deux variables aléatoires uniformes sur $[0, 1]$, à chaque itération t et pour chaque dimension d .

Dans l'équation (2.62), $v_{id}(t)$ correspond à la composante *d'inertie* du déplacement. L'expression $c_1 \times rand()_1 \times (p_{id}(t) - x_{id}(t))$ correspond à la composante *cognitive* du déplacement. Le paramètre C_1 contrôle le comportement cognitif de la particule. L'expression $c_2 \times rand()_2 \times (p_{gd}(t) - x_{id}(t))$ correspond à la composante *sociale* du déplacement. Le paramètre C_2 contrôle l'aptitude sociale de la particule.

Ensuite, La qualité de la position de la particule i est déterminée par la valeur de la fonction de coût choisie en ce point, la mise à jour du vecteur position se fait par l'équation suivante :

$$X_{id}(t+1) = X_{id}(t) + V_{id}(t+1) \quad (2.63)$$

VI.1.3.Algorithme d'optimisation

L'algorithme PSO commence par la création d'une population S de m particules réparties uniformément sur l'espace de recherche. Chaque particule est évaluée à l'aide d'une fonction de *fitness* f mesurant l'adéquation de cette solution potentielle avec le problème. A chaque itération de l'algorithme, chaque particule est déplacée selon les équations (2.61) et (2.62). Une fois le déplacement des particules effectué, les nouvelles positions sont évaluées. Les P_i ainsi que P_g sont alors mis à jour. Cette procédure est décrite par l'algorithme suivant :

Algorithme d'optimisation par essaim particulaire
Initialisation aléatoire des positions et des vitesses de chaque particule
Pour chaque particule i , $P_i = X_i$
Tant que le critère d'arrêt n'est pas satisfait faire

Pour $i=1$ à m faire

Déplacement de la particule à l'aide des équations (61) et (62)

Évaluation des positions

Si $f(X_i) < f(P_i)$ **alors**

$$P_i = X_i$$

Fin Si

Si $f(P_i) < f(P_g)$ **alors**

$$P_g = P_i$$

Fin si

Fin Pour

Fin Tant que

Il est fortement conseillé de doter l'algorithme d'une porte de sortie. Le critère d'arrêt peut être différent selon le problème à résoudre, ce critère peut être notamment un nombre maximum d'itération, une valeur de fitness satisfaisante ou/et une variation de vitesse proche de 0.

VI.1.4. Amélioration de PSO

L'étude de la dynamique des particules au sein de la population a conduit à la recherche de solutions pour éviter la divergence de l'algorithme PSO. De nombreuses études ont été menées sur la dynamique des particules et sur l'analyse des conditions de convergence de l'essaim [Van06]. Des améliorations ont été apportées donc à l'algorithme de base pour limiter la divergence des particules. Il a été démontré dans [Cle02], qu'une bonne convergence peut être assurée en rendant dépendants les paramètres W , C_1 et C_2 , afin de régler l'équilibre entre les phases de diversification et d'intensification du processus de recherche.

Le facteur de pondération W est une constante appelée *coefficient d'inertie*, permet de mieux contrôler la divergence de l'essaim. En introduisant ce facteur dans l'équation (2.46), on obtient:

$$v_{id}(t+1) = W(t+1) \times v_{id}(t) + c_1 \times rand() \times (p_{id}(t) - x_{id}(t)) + c_2 \times rand() \times (p_{gd}(t) - x_{id}(t)) \quad (2.64)$$

Avec :

$$c_2(t+1) = \frac{c_2(t)}{Maxitération} \times t \quad (2.65)$$

$$W(t+1) = W_{\max} - \frac{W_{\max} - W_{\min}}{Maxitération} \times t \quad (2.66)$$

Tel que : $c_2(t)$ et $c_2(t+1)$ sont les valeurs du coefficient c_2 à l'instant t et à l'instant $t+1$ respectivement, $W_{\max}$ est le poids initial, $W_{\min}$ est le poids final, $Maxitération$ est le nombre maximal d'itérations, t est l'itération courante.

Le bon choix de la fonction de pondération W augmente l'efficacité de la méthode pour avoir une solution globale. L'expérience a montré que la diminution linéaire de la valeur de W de 0.9 à 0.4 au cours de la procédure de recherche donne des meilleurs résultats.

VII. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques aspects de la commande non linéaire, voir les méthodes les plus utilisées, en focalisant l'attention sur celles qui seront développées par la suite au cadre de cette thèse. Nous avons rappelé particulièrement les notions de base concernant les outils intelligents : les Supports Vecteurs Machines à Régression (SVR), les Modes Glissants (SMC) et la technique du Backstepping qui seront utilisés dans cette thèse pour l'estimation des parties incertaines du modèle du système réel, après nous avons expliqué la méthode de l'optimisation par essais particuliers adaptatif qui sera utilisé pour optimiser quelques paramètres afin d'améliorer l'approximation et les performances des contrôleurs non linéaires intelligents utilisés. Nous avons donné la représentation mathématique ainsi que la structure décrivant chaque outil.

Ces contrôleurs seront utilisés dans les chapitres qui viennent pour asservir une éolienne à vitesse variable équipée d'une génératrice asynchrone à double alimentation, qui doit répondre à un certain nombre d'exigences : la stabilité, la poursuite et le rejet de perturbations.

Chapitre 3 : Etude et optimisation
des performances d'une turbine
éolienne
à vitesse du vent faible

I. Introduction

Un système de conversion d'énergie éolienne (SCEE) est un ensemble de sous-système, ce qui permet de s'intéresser à chaque partie séparément, avant de faire une synthèse de toutes les parties constituant le système global. C'est pour cette raison que, dans le chapitre 1, nous avons établi les modèles mathématiques de tout le SCEE fonctionnant à vitesse variable afin de réguler la vitesse de rotation du système de sorte à optimiser la puissance extraite, quelque soient les fluctuations du vent.

Ce chapitre est consacré à l'élaboration des lois de commande permettant, lorsque les vents sont faibles, d'atteindre l'objectif de maximiser l'énergie capturée et donc l'énergie produite par l'éolienne sachant que les commandes classique type PI et PID sont les plus utilisées au plan industriel, mais néanmoins elles ne permettent pas d'atteindre les résultats escomptés. Alors tout d'abord, nous allons décrire les stratégies de commande d'une éolienne fonctionnant à vitesse variable, puis nous allons présenter les différents outils intelligents utilisés pour l'estimation des parties incertaines du modèle du système réel et pour optimiser quelques paramètres afin d'améliorer l'approximation et les performances des contrôleurs non linéaires intelligents et cela afin d'obtenir un meilleur fonctionnement de notre système étudié.

Commander une éolienne, c'est déterminer les commandes à lui appliquer afin de lui assurer un comportement désiré en dépit de perturbations et faire améliorer leurs capacités de production d'énergie éolienne y compris la fiabilité, la rentabilité et la qualité de puissance transmise au réseau. Les techniques de l'intelligence artificielle sont connues actuellement pour leur grande potentialité de pouvoir résoudre les problèmes liés aux processus industriels, notamment le contrôle, l'estimation et l'identification des paramètres des systèmes variants. En particulier, les algorithmes de contrôle basés sur la technique MPPT peuvent être utilisés pour capter le maximum d'énergie électrique du vent en maintenant le rapport (vitesse tangentielle de rotation des pales/vitesse du vent) optimal dans la région à charge partielle.

Dans ce chapitre, nous avons recours à deux lois de commande adaptative à vent faible à partir du modèle non linéaire à deux masses du système éolien :

- Une commande à base des Supports Vecteurs Machine à Régression (SVR) combinée à la commande des Modes Glissants Standard (SMC).
- Une commande à base de la technique du Backstepping avec l'Optimisation par Essaims Particulaires (PSO) Adaptatif.

La commande SMC, apparaît comme une option particulièrement appropriée pour contrôler les SCEE fonctionnant à vitesse variable. Cette technique de contrôle a prouvé une robustesse par rapport aux variations des paramètres du système et aux perturbations externes. Cette approche présente d'intéressantes caractéristiques telles que : la réduction de l'ordre, la simplicité dans la conception et l'implémentation. Néanmoins, il n'y a aucune garantie de robustesse dans le cas où le système est affecté par de larges incertitudes, car dans ce cas le contrôleur a besoin d'un gain de commutation plus élevé qui peut exciter les dynamiques non modélisées du système et produit ainsi le phénomène de réticence, phénomène néfaste dans le cas pratique. Par conséquent, il est impossible d'implémenter cette commande dans le cas des systèmes pratiques.

Afin de palier à ce problème, nous proposons dans cette partie de combiner la commande par Modes Glissants aux Supports Vecteurs Machine à Régression (SVR). Ces derniers sont destinés à approximer les termes incertains du modèle non linéaire afin d'obtenir une meilleure description du processus réel, et donc de permettre l'utilisation d'un gain de commutation assez petit même en présence de perturbations larges. Cette approche donne des meilleures performances en termes de poursuite mais la robustesse n'est pas assez assurée puisque l'entrée de commande est toujours discontinue et le phénomène de réticence persiste toujours.

Ainsi, le recours à la commande du Backstepping connu par sa rapidité extrême et sa simplicité de mise en œuvre. Cette approche permet d'améliorer la connaissance du système dans le but de synthétiser une loi de commande robuste intelligente qui permet de réduire en grande partie le phénomène de réticence. L'utilisation de l'algorithme PSO Adaptatif pour l'optimisation des gains du Backstepping a apporté une amélioration à la commande en termes de vitesse de convergence et en termes de sécurité du système, en comparaison à d'autres algorithmes. Ceci a un intérêt pratique du fait que la commande élaborée sera en temps réel. La stabilité du système en boucle fermée a été démontrée mathématiquement en utilisant la méthode de *Lyapunov*.

II. Objectif de la commande d'une turbine éolienne

Pour augmenter la compétitivité de l'énergie éolienne, il faut :

- Réduire son coût ;
- Augmenter la sécurité et la fiabilité ;
- Produire de l'énergie de qualité ;
- Fournir des services au réseau.

La commande d'éolienne doit contribuer à atteindre ces objectifs. En ce qui concerne la réduction du coût, il faut concevoir des lois de commande maximisant le rendement énergétique des éoliennes. De plus au fur et à mesure que la taille des éoliennes augmente, les fabricants essayent de réduire proportionnellement la masse des composants les plus chers, à savoir les pales, la tour et le train de puissance, pour diminuer leur coût. Ceci rend ces éléments plus flexibles et moins robustes. La conception de nouvelles lois de commande tenant compte de ces flexibilités et permettant de réduire les charges dynamiques subies par ces éléments (et par suite leur fatigue mécanique) est donc nécessaire. La durée de vie des éoliennes, leur fiabilité et donc leur disponibilité sont ainsi augmentées, ce qui réduit aussi le coût de l'énergie produite.

Un autre moyen d'augmenter la sécurité et la fiabilité des éoliennes est de concevoir des commandes robustes. Elles doivent être robustes face aux perturbations mais aussi face aux changements du comportement dynamique de l'éolienne. De plus, le comportement dynamique d'une éolienne n'est pas linéaire et change en fonction du point de fonctionnement. Les lois de commande, surtout celles qui sont linéaires et non adaptatives, doivent par conséquent être robustes en stabilité et en performance sur toute la zone de fonctionnement de l'éolienne[Bou06].

La commande a un impact sur la qualité de la puissance produite, elle doit éviter de transmettre intégralement les fluctuations du vent dans la puissance produite. Et sans oublier que dans la mesure où la part d'énergie éolienne dans un réseau électrique atteint un niveau significatif, les parcs éoliens doivent fournir des services aux réseaux. La commande des

aérogénérateurs doit donc permettre leur participation dans la régulation de tension et de fréquence, en contrôlant les puissances réactives et actives échangées avec le réseau. De plus, cette commande doit permettre de maintenir les éoliennes connectées au réseau lorsque des défauts électriques se produisent.

III. Stratégie de commande de la turbine éolienne

Dans le domaine de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable, on distingue quatre régions pour extraire de manière efficace la puissance du vent. Ces 4 régions, relient la vitesse du vent, la vitesse maximale du rotor admissible et la puissance nominale désirée. Donc il existe trois vitesses de vent séparent le fonctionnement de l'éolienne en quatre zones dont seulement deux d'entre elles sont actives.

- La vitesse de démarrage ($v_{dem} = 3m/s$) est définie comme la vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à générer la puissance. En dessous de cette vitesse, l'éolienne est arrêtée car le vent n'est pas assez fort pour que la production d'énergie soit rentable vis-à-vis de l'énergie de fonctionnement.
- La vitesse nominale ($v_{nom} = 12m/s$) est la vitesse du vent pour laquelle l'éolienne produit sa puissance mécanique nominale $P_{mec-nom}$ et la turbine tourne avec une vitesse nominale ω_{t-nom} .
- La vitesse d'arrêt ($v_{arr} = 25m/s$) est la vitesse maximale du vent à laquelle l'éolienne peut encore fonctionner normalement. Au-delà de cette vitesse, la vitesse de rotation et la puissance mécanique doivent être maintenues à leurs valeurs nominales afin de ne pas détériorer l'éolienne. Une procédure d'arrêt de l'éolienne est effectuée afin d'éviter toute destruction de celle-ci, les pales de la turbine sont mises en drapeaux ($\beta = 90^\circ$).

Alors pour bien commander les systèmes de génération éolienne de moyenne et grande puissance à vitesse variable et à régulation de puissance « pitch », y a plusieurs caractéristiques à connaître qui sont déduites des données aérodynamiques de la turbine :

- Puissance mécanique en fonction de la vitesse du vent.
- Puissance électrique en fonction de la vitesse de rotation de la turbine.
- Puissance transmise de l'aérogénérateur en fonction de la variation de la vitesse du vent.

L'objectif de cette régulation est double, d'une part de protéger l'éolienne par vent fort et d'autre part de délimiter la puissance. En effet, la turbine éolienne est dimensionnée pour fournir une puissance nominale P_{nom} à une vitesse de vent nominale v_{nom} , au-delà de cette vitesse les paramètres de la turbine doivent évoluer afin de fournir la puissance nominale et de ne pas produire au-delà d'une vitesse maximale v_{max} qui pourrait endommager la turbine.

On peut alors définir les zones de fonctionnement d'une éolienne et qui sont illustrées sur la Figure 3.1, qui représente une courbe typique de la puissance extraite en fonction de la vitesse du vent.

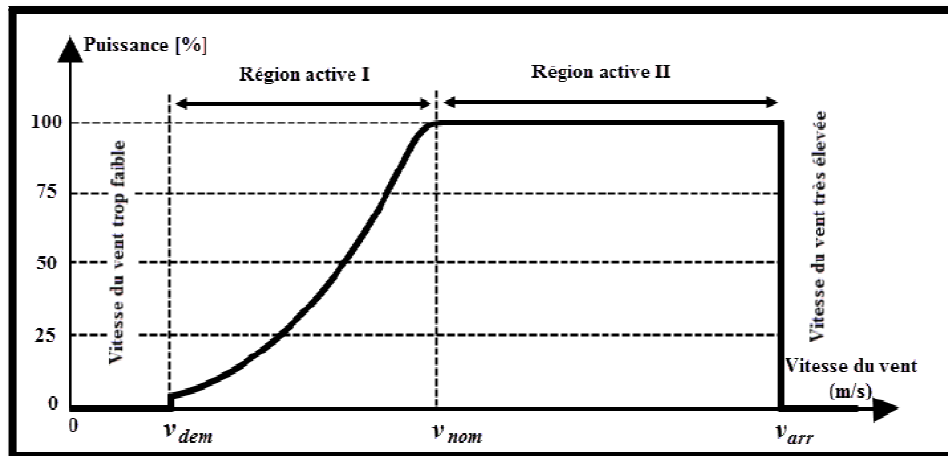


Figure 3.1 : Courbe typique de la puissance extraite par une éolienne en fonction de la vitesse du vent

Région active II : elle correspond au fonctionnement à vent fort ou à pleine charge c'est-à-dire au-dessus de la vitesse nominale du vent, elle couvre la plage de vitesse du vent entre v_{nom} et v_{arr} .

Comme la puissance mécanique générée par le rotor est limitée, la tâche principale du contrôleur dans cette région est de maintenir la production à sa puissance nominale afin de ne pas abîmer le système. Le principe de limitation de la puissance dans cette région consiste essentiellement à diminuer volontairement son efficacité aérodynamique lorsque la puissance nominale est atteinte. Pour ce faire, il existe deux principes de contrôle aérodynamique pour limiter la puissance à sa valeur nominale :

- Système « *pitch* » ou « à pas variable » qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent pour maintenir une puissance sensiblement constante. A ce premier principe est associé un mécanisme d'orientation des pales, permettant la variation de l'angle de calage β au cours du fonctionnement de l'éolienne afin de lui permettre de s'adapter aux différentes conditions de vent.
- Système « *stall* » ou à « décrochage aérodynamique », c'est le plus robuste. En effet, c'est la forme des pales qui conduit à une perte de portance au-delà d'une certaine vitesse du vent, mais la courbe de puissance chute plus vite : il s'agit donc d'une solution passive.

Région active I : elle correspond au fonctionnement à vent faible ou à charge partielle c'est-à-dire en dessous de la vitesse nominale du vent, elle couvre la plage de vitesse du vent entre v_{dem} et v_{nom} .

Les principaux objectifs de contrôle dans cette région sont la maximisation de la capture de l'énergie du vent et la minimisation des efforts subis par le dispositif d'entraînement. Le couple de la génératrice est alors utilisé pour faire varier la vitesse du rotor. Le but étant que le coefficient de puissance soit toujours optimum.

La puissance disponible dans cette région est définie comme étant le produit de la puissance du vent P_{vent} qui passe à travers la surface balayée par le rotor et le coefficient de puissance C_p :

$$P_a = C_p \times P_{vent} = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 C_p v^3 \quad (3.1)$$

Comme indiqué dans le chapitre précédent, le coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$ est une fonction non linéaire de la vitesse spécifique λ et de l'angle de calage β . Cette fonction possède un seul maximum (Figure 3.2) défini au point :

$$C_p(\lambda_{opt}, \beta_{opt}) = C_{pmax} \quad (3.2)$$

Le rotor fournit donc une puissance aérodynamique maximale seulement à la vitesse spécifique :

$$\lambda_{opt} = \frac{\omega_{topt} R}{v} \quad (3.3)$$

Pour maximiser la capture de l'énergie du vent, λ et β doivent être maintenues à leurs valeurs optimales afin d'assurer la valeur maximale de C_p . L'angle de calage est fixé à sa valeur optimale, alors que la vitesse spécifique définie par :

$$\lambda = \frac{\omega_t R}{v} \quad (3.4)$$

dépendant à la fois de la vitesse du vent v et de la vitesse de rotation de la turbine ω_t , comme la vitesse du vent est une entrée non commandable, ω_t doit varier constamment pour suivre les fluctuations du vent afin de maintenir le rapport $\lambda = \frac{\omega_t R}{v}$ à sa valeur optimale. Par conséquent, la vitesse de la rotation du rotor doit être ajustée par le couple de la génératrice pour poursuivre la vitesse optimale donnée par :

$$\omega_{topt} = \frac{\lambda_{opt}}{R} v \quad (3.5)$$

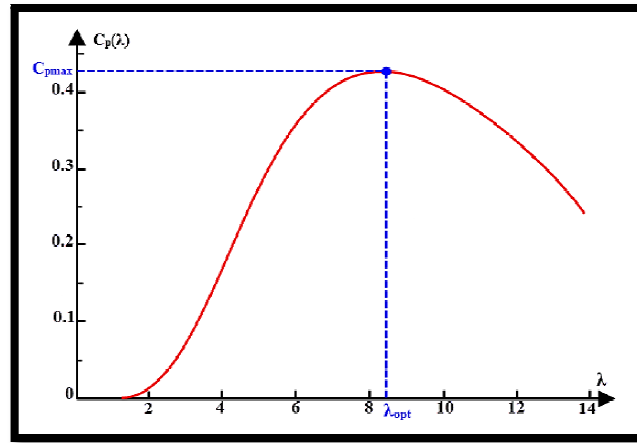


Figure 3.2 : Courbe de coefficient de puissance avec $\beta = \beta_{opt}$

De ce qui précède, on conclut que le fonctionnement idéal du système éolien nécessite un suivi parfait des maxima des courbes de la puissance en fonction de ω_t pour différentes vitesses du vent (Figure 3.3), c'est-à-dire que pour chaque vitesse du vent, le système doit trouver la puissance maximale, ce qui est équivalent à la recherche de la vitesse de rotation optimale. Pour s'approcher de ce but, une commande spécifique connue sous la terminologie: Maximum Power Point Tracking (MPPT) correspond à la zone I, doit être utilisé.

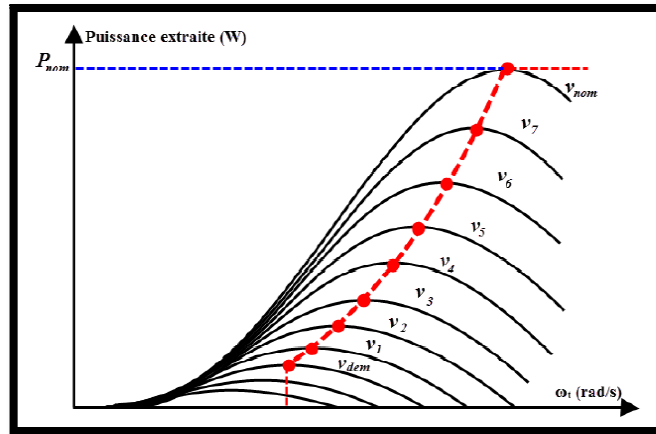


Figure 3.3 : Caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation de la turbine.

La stratégie de cette commande consiste à contrôler le couple électromagnétique afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée.

Il est donc nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser la puissance électrique générée (donc le couple) en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quelle que soit la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice. En régime permanent, la puissance aérodynamique $P_{aér}$ diminuée des pertes (représentées par les frottements visqueux) est convertie directement en puissance électrique (Figure 3.4).

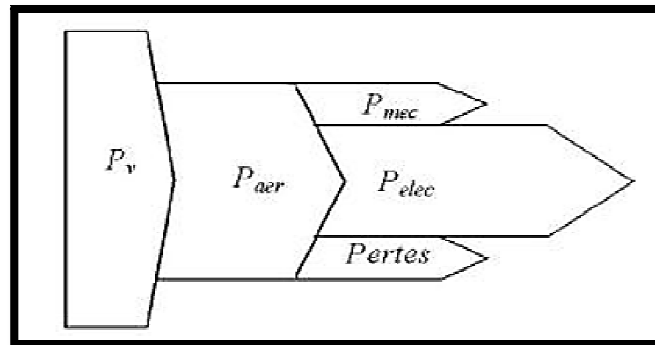


Figure 3.4 :Diagramme de conversion de puissance

Alors l'objectif est de contrôler le couple électromagnétique (et indirectement la puissance électromagnétique convertie) afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée.

L'utilisation de simulations numériques a largement contribué à l'amélioration technologique des éoliennes et en particulier de leur commande. Les modèles de simulation sont des modèles de connaissance. Ils sont basés sur les équations physiques du système. Ainsi, en plus d'être utilisés pour tester de nouvelles lois de commande, ils permettent d'analyser et de mieux connaître le système à commander.

Une éolienne peut être modélisée de façon modulaire. Dans le cas le plus général, le modèle contient les modules et signaux indiqués sur la Figure 3.5. Selon les objectifs de la commande, ce modèle peut être simplifié.

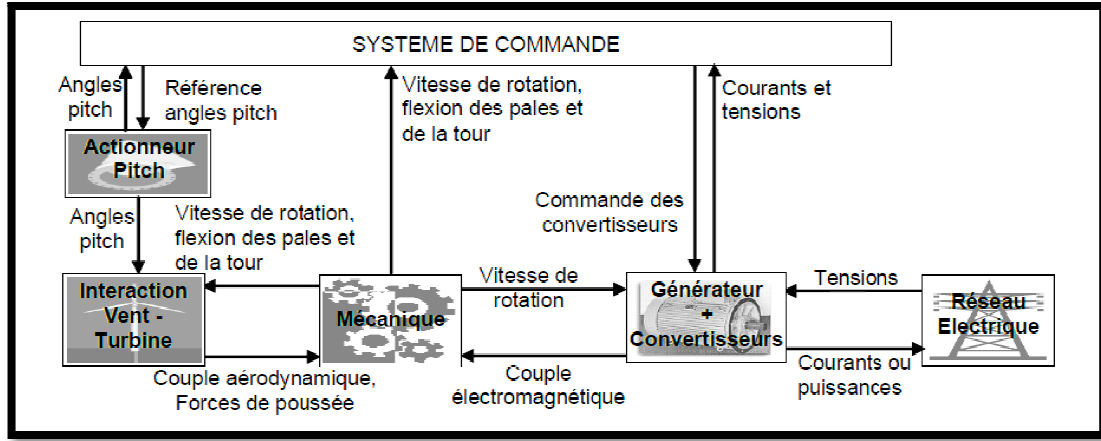


Figure 3.5 : Diagramme général de bloc de la commande du système éolien

Donc, commander une éolienne revient à la contrôler d'une manière à optimiser la puissance extraite du vent où la vitesse de rotation de la turbine est contrôlée par le couple électromagnétique, en présence d'une vitesse de vent inférieure à la vitesse nominale et l'angle de calage est maintenu constant à une valeur optimale.

Le modèle mathématique utilisé est à deux masses, décrit au deuxième chapitre (1.20) :

Pour $\beta = \beta_{opt}$ le modèle à deux masses devient un système à deux entrées : T_{em} qui est une entrée commandable et v qui est une entrée non commandable, et à une sortie, c'est la vitesse de rotor ω_t . On peut schématiser ce modèle comme le montre la Figure 3.6, ce modèle sera utilisé par la suite dans les schémas bloc qui viendront :

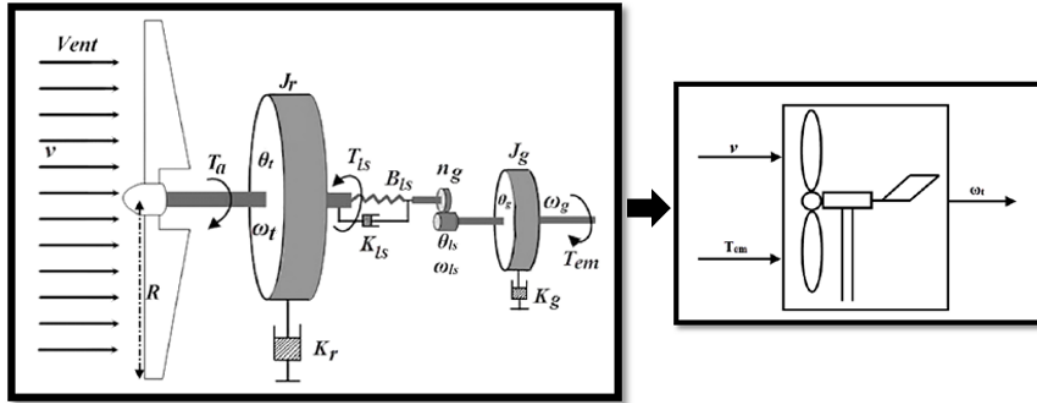


Figure 3.6 : Modèle simplifié de la turbine éolienne

IV. Loi de commande SVR-SMC

D'après les équations dynamiques du système données au chapitre 2, le modèle mathématique nominale du système éolien est donné par :

$$\begin{pmatrix} \dot{\omega}_t \\ \dot{\omega}_g \\ \dot{T}_{ls} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_t \\ \omega_g \\ T_{ls} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} T_a + \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{pmatrix} T_{em} \quad (3.6)$$

Dans ce qui suit, posons $U=T_{em}$, $x_1=\omega$. Le modèle dynamique du système décrit par (3.1) peut être réécrit sous forme canonique dans l'espace d'état de la façon suivante:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2) + bT_{em} + \xi(x, t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (3.7)$$

$U \in \Re$ et $y \in \Re$ sont respectivement l'entrée et la sortie du système. $x = [x_1, x_2]^T \in \Re^2$ est le vecteur d'état du système disponible pour la mesure, $b = -\frac{K_{ls}}{n_g J_r J_g}$ est une constante non nulle et connue, $\xi(x, t)$ est la dynamique inconnue du système qui représente les erreurs de modélisation et les perturbations externes, $f(x_1, x_2)$ est la représentation nominale du système donnée par:

$$f(x_1, x_2) = \left(\left(\frac{K_r}{J_r} \right)^2 - \frac{B_{ls}}{J_r} \right) x_1 + \frac{K_{ls}}{J_r} x_2 + \left(\frac{B_{ls}}{n_g J_r} - \frac{K_{ls} K_g}{n_g J_r J_g} \right) \omega_g + \left(\frac{K_r}{J_r} + \frac{K_{ls}}{n_g^2 J_r J_g} \right) T_{ls} - \frac{K_r}{J_r} T_a + \frac{1}{J_r} \dot{T}_a \quad (3.8)$$

Nous supposons que le système (3.6) satisfait les hypothèses suivantes : Le terme qui représente les perturbations externes soit borné et la vitesse du vent est accessible et mesurable.

IV.1. Synthèse de commande par SMC

Un des avantages de la commande SMC est notamment la robustesse par rapport aux perturbations intervenant de façon colinéaire avec la commande (condition de recouvrement ou *matching condition*) [Bre10] et la stabilité en boucle fermée. Pour tester cette commande vis-à-vis des perturbations, on considère une perturbation $\xi(x, t)$ bornée qui agit sur le système exactement au même niveau que la commande.

Dans ce qui suit, l'erreur de poursuite est définie par l'écart de la vitesse de rotation du rotor ω par rapport à sa référence ω_{topt} et elle est exprimée par :

$$e = \omega_t - \omega_{topt} \quad (3.9)$$

La synthèse de la commande est basée sur le choix de la surface de glissement dont le polynôme caractéristique associé possède ses racines dans le demi-plan gauche du plan complexe. Etant donné que le système (3.1) est de degré relatif $r=2$ ainsi la variable de glissement choisie s'écrit :

$$\sigma_s = \dot{e} + \gamma e = (\dot{x}_2 - \dot{\omega}_{topt}) + \gamma(x_1 - \omega_{topt}) \quad (3.10)$$

Avec $\gamma = cte \neq 0$

La dérivée première de la variable de glissement s'écrit :

$$\dot{\sigma}_s = -\ddot{\omega}_{topt} - \gamma \dot{\omega}_{topt} + f(x_1, x_2) + \gamma x_2 + bT_{em} + \xi(x, t) \quad (3.11)$$

Donc :

$$\dot{\sigma}_s = G(x_1, x_2) + \xi(x, t) + bT_{em} \quad (3.12)$$

Pour rendre la surface de glissement attractive et au même temps assurer l'existence du mode glissant dans le cas $(\mathbf{x}, t) \neq 0$, il suffit de vérifier la condition η -attractivité, avec η une constante strictement positive [Sht13] :

$$\sigma \dot{\sigma} < -\eta |\sigma| \quad (3.13)$$

Qui peut s'écrire sous la forme :

$$\dot{\sigma} < -\eta \frac{|\sigma|}{\sigma} \quad (3.14)$$

En remplaçant l'expression $|\sigma|$ par $sign(\sigma)$ donnée par :

$$sign(\sigma) = \begin{cases} 1 \Rightarrow Si \sigma > 0 \\ 0 \Rightarrow Si \sigma = 0 \\ -1 \Rightarrow Si \sigma < 0 \end{cases} \quad (3.15)$$

La commande totale qui assure le mode de convergence et de glissement est liée à l'existence d'une constante positive α appelée gain de commutation ou de commande :

$$bT_{em} + G(x_1, x_2) + \xi(x, t) = -\alpha sign(\sigma) \quad (3.16)$$

Le gain de commutation ou de commande est choisie de façon à compenser les incertitudes tel que $\alpha > \chi$. Avec χ est la borne supérieure des incertitudes donnée par $\|\xi(x, t)\| < \chi$

Enfin la loi de commande utilisant le concept des modes glissants est donné par :

$$T_{em} = -\frac{G(x_1, x_2) + \xi(x, t)}{b} - \frac{\alpha}{b} sign(\sigma) \quad (3.17)$$

Malgré les différents avantages de la commande par modes glissants, son utilisation a été entravée par un inconvénient majeur lié au phénomène de réticence. Ce phénomène est susceptible d'exciter des modes de hautes fréquences qui n'ont pas été pris en compte lors de la modélisation du système. Ceci peut dégrader les performances et même conduire au problème d'instabilité [Utk99].

La réticence implique également d'importantes oscillations mécaniques au niveau des actionneurs, pouvant provoquer leur usure rapide, ainsi que des pertes énergétiques non négligeables au niveau des circuits de puissance électrique.

La solution de la couche limite [Sef12][Lev03], présente une solution efficace au phénomène de réticence dans le cas où les trajectoires des états du système ne s'éloignent pas beaucoup de la surface de glissement et se trouvent à l'intérieur d'une bande de largeur $2L$ autour de la surface de glissement, ce qui permet d'effectuer une approximation continue des discontinuités dans la commande. Ceci est réalisable par le remplacement de la fonction discontinue $sign(\cdot)$ par une fonction plus lisse telle que la fonction saturation, définie par :

$$sat(\sigma) = \begin{cases} \sigma / L \Rightarrow Si |\sigma| < L \\ sign(\sigma) \Rightarrow Ailleurs \end{cases} \quad (3.18)$$

Alors, la loi de commande (3.17) devient :

$$T_{em} = -\frac{G(x_1, x_2) + \xi(x, t)}{b} - \frac{\alpha sat(\sigma)}{b} \quad (3.19)$$

Cette méthode peut résoudre le problème des systèmes avec de petites incertitudes. Toutefois, lorsque ces incertitudes deviennent larges, le phénomène de réticence persiste toujours et peut conduire à une divergence. Pour résoudre ce problème, nous proposons d'utiliser la technique des Supports Vecteurs Machines à Régression pour estimer la partie inconnue du système, de sorte que ces incertitudes peuvent être maintenues petites. Cette méthode proposée fera l'objet du paragraphe suivant.

IV.2. Amélioration de la connaissance du système par SVR

Dans ce paragraphe la méthode utilisée pour l'estimation de la partie inconnue du système est basée sur les SVR qui ont été développés dans les années 90 à partir des considérations théoriques de Vladimir Vapnik sur le développement d'une théorie statistique de l'apprentissage : la théorie de Vapnik-Chervonenkis. Ils ont rapidement été adoptés pour leur capacité à travailler avec des données de grandes dimensions, le faible nombre d'hyper-paramètres, leurs garanties théoriques, leur capacité d'apprentissage et leurs bons résultats en pratique.

Les SVR, étant un outil intelligent fondé sur la théorie de l'apprentissage statistique, sont utilisées dans ce travail en vue d'approximer le terme incertain de l'expression suivante :

$$T_{em-eq} = -\frac{G(x_1, x_2) + \xi(x, t)}{b} \quad (3.20)$$

L'algorithme d'apprentissage SVR est particulièrement avantageux en raison de sa capacité de généralisation intéressante même avec un nombre réduit d'échantillons d'apprentissage, et aussi de manipulation facile de la non-linéarité du système éolien et pour atteindre la meilleure configuration possible de notre outil, à savoir la structure qui nous donne le résultat le plus précis, faut bien choisir les hyper-paramètres des SVR : le type du noyau et les paramètres de réglage: $\mathcal{E}$ et C [Zhu09].

IV.2.1. Structure de SVR utilisés

Le processus d'estimation avec SVR se fait selon les étapes suivantes :

a. Détermination des paramètres de SVR :

Le noyau utilisé pour l'apprentissage est le noyau gaussien qui est le plus adapté aux données réelles bruitées et perturbées grâce à sa grande capacité d'apprentissage, donc On calcul la distribution normale centrée sur chaque échantillon d'apprentissage utilisant la gaussienne suivante :

$$K(x, x') = e^{\frac{-\|x-x'\|^2}{2\sigma^2}} \quad (3.21)$$

Où x' est le centre de la gaussienne et σ représente la valeur de l'écart-type de la gaussienne qui détermine l'influence des points éloignés sur la variable cible.

Un bon réglage des paramètres d'apprentissage de SVR évite le sur-apprentissage. L'approche essai-test a été adoptée dans cette partie. Elle consiste à réaliser plusieurs essais avec différentes valeurs des paramètres $\mathcal{E}$ et C et de les tester sur un ensemble de données.

b. Vecteurs des entrées :

$x = [x_1, x_2]^T$, avec $x_1 = v$ (vitesse du vent) et $x_2 = \omega - \omega_{opt}$ (vitesse optimale de rotation de la turbine).

• Phase d'apprentissage et de calcul :

Une fois la structure de SVR est fixée, on dispose d'un ensemble représentatif contenant N échantillons d'apprentissage qui est un ensemble de couples (entrées/sortie désirée). Avant d'incorporer le SVR dans notre stratégie de contrôle, le réseau est formé hors ligne [Bau10].

L'objectif de l'apprentissage est de laisser le réseau apprendre les non-linéarités fonctionnelles à un certain degré de précision avant sa mise en œuvre dans le contrôleur, et ainsi l'adaptation en ligne de ses paramètres sera plus rapidement que possible. L'apprentissage commence par un choix initial aléatoire des valeurs initiales des C, σ et $\mathcal{E}$. A chaque étape d'apprentissage, les échantillons sont présentés à l'entrée du réseau, après l'étape de calcul, la sortie du contrôleur SVR et son erreur de prédiction notée

$e_\xi = \xi(x, t) - \hat{\xi}(x, t)$ sont disponible.

c. Synthèse de la loi de commande SVR-SMC

La procédure de conception du contrôleur SVR-SMC basé sur la combinaison des modes glissants et les SVR se fait en deux étapes ; la première, consiste en l'amélioration de la connaissance des dynamiques du système en estimant la partie inconnue du modèle en utilisant les SVR, la deuxième étape consiste en l'incorporation de la fonction estimée dans le modèle dynamique du système dans le but d'élaborer une commande équivalente intelligente et robuste basée sur les modes glissants standards. Ceci est réalisable par le remplacement du terme $\xi(x, t)$ par $\hat{\xi}(x, t)$ dans l'expression de T_{em-eq}^* .

L'expression du contrôleur SVM-SMC ainsi synthétisé est la suivante :

$$T_{em-eq}^* = -\frac{G(x_1, x_2) + \hat{\xi}(x, t)}{b} \quad (3.22)$$

Ce contrôleur est conçu dans le but de converger l'erreur de sortie du système donnée par (4.6) vers 0 en un temps fini.

IV.2.2. Structure de la commande intelligente SVR-SMC

Le regroupement des différents composants détaillés ci-dessus permet de déduire l'architecture, en boucle fermée, du contrôleur SVM-SMC illustrée sur la Figure suivante :

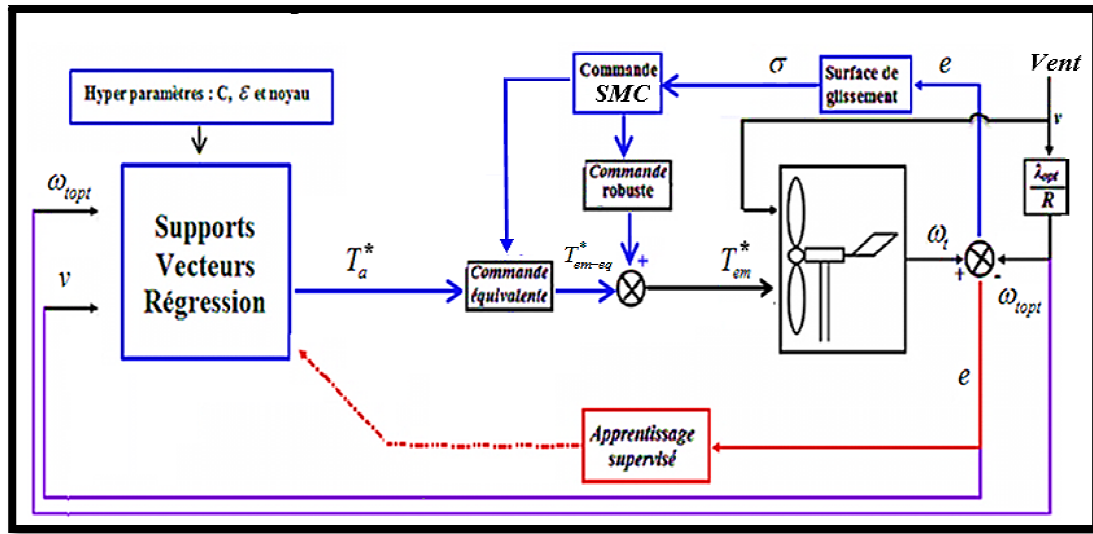


Figure 3.7: Architecture du contrôleur SVR-SMC

Le contrôleur SVR sera investi pour estimer la source de complexité et des non linéarités du système éolien à savoir la fonction contenant le couple aérodynamique T_a . L'estimation de la fonction contenant ce couple permet de surmonter la difficulté de modélisation de divers facteurs qui sont liés à T_a et de s'en passer de la mesure de la vitesse du vent car celle-ci peut être déduite de la vitesse de rotation après estimation du couple aérodynamique. Ce couple est lié d'une part au cube de la vitesse du vent qui est une entrée fluctuante et non commandable, et d'autre part au coefficient de puissance qui est lui-même une grandeur non linéaire. Donc la procédure de conception de notre contrôleur SVR-SMC peut être décrite par les deux phases suivantes :

- Prédiction de la partie inconnue du modèle en utilisant les SVR.
- Utilisation de la dynamique estimée par SVR pour synthétiser la commande équivalente et l'ajout d'un terme de robustesse via la technique des modes glissants.

IV.2.3. Résultats de simulation

Pour mettre en évidence l'efficacité de l'approche proposée, cette dernière est testée avec le modèle à deux masses d'une éolienne à vitesse variable représentée par (3.6).

Les simulations sont effectuées en présence de:

- une perturbation constante additive de $10KN.m$:
- une surface de glissement donnée par : $\gamma=1$
- des paramètres numériques de l'éolienne données par :

$$R = 21.65m, \rho = 1.29 \text{ kg/m}^3, n_g = 43.165, K_g = 0.2N.m/rad/s,$$

$$K_{ls} = 9500N.m/rad/s, J_g = 34.4kg.m^3, B_{ls} = 2.691 \times 10^5 N.m/rad,$$

$$K_r = 27.36N.m/rad/s, J_r = 3.25 \times 10^5 \text{ kg.m}^2.$$

La performance de l'approche proposée est comparée à celle de la commande par modes glissants standard, en présence d'un profil du vent de vitesse moyenne de 7 m/s. Dans cette étude, nous avons représenté l'évolution de la vitesse du vent de façon déterministe, par une somme de plusieurs harmoniques [Mir07][Tra10][Hon14]:

$$v(t) = 7 + 0,2 \sin(0,1047t) + 2 \sin(0,2665t) + \sin(1,2930t) + 0,2 \sin(3,6645t)$$

L'évolution temporelle de ce profil est tracée dans la Figure suivante :

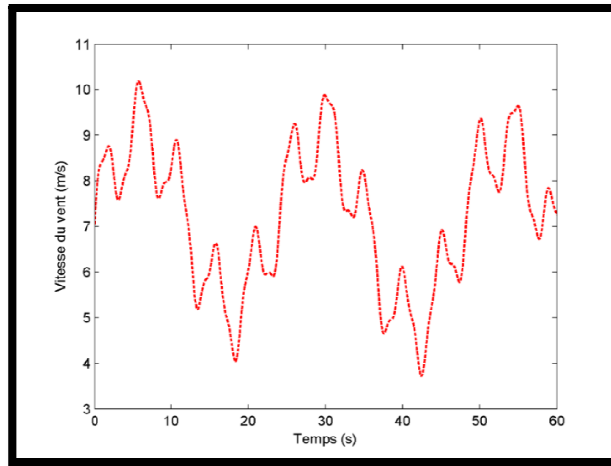


Figure 3.8 : Profil du vent variable avec une vitesse moyenne de 7 m.s^{-1}

a. Phase d'apprentissage des SVR :

Pour l'apprentissage des SVR, il faut définir le vecteur d'entrée x . Le choix de ce vecteur peut provenir des connaissances a priori sur le procédé. Ainsi, on va chercher la solution dans une direction bien précise ou dans un domaine plus restreint ce qui permet d'obtenir un bon modèle de Régression.

1^{ère} étape : Concerne l'utilisation d'une séquence de vitesse du vent, un prélèvement de 7000 valeurs de la vitesse de rotation de la turbine (v, ω_t) comme entrée, nous donne 7000 valeurs du couple aérodynamique T_a^* . La valeur de ω_{topt} est bien déterminée pour calculer le résidu qui est la différence entre le signal mesuré et celui estimé donné par $e = \omega_t - \omega_{topt}$.

2^{ème} étape : Concerne le choix des paramètres des SVR : Le noyau utilisé dans cette étude est le noyau gaussien qui est le mieux approprié à manipuler avec les données réelles incluant les

bruits et les perturbations, avec un écart type $\sigma = 0.0012$. Une grande valeur de $\mathcal{E}$ signifie que le comportement non linéaire du noyau est fort, donc elle permet de gouverner le degré de non linéarité. Dans la conception du modèle de décision SVR, $\mathcal{E}$ est choisi entre 2 et 17 et la constante de régulation C qui contrôle le sur-apprentissage du modèle est choisie entre 7 et 30 par la méthode traditionnelle d'essai-erreur.

L'approche essai-test a été adoptée dans cette application et consiste à réaliser plusieurs essais avec différentes valeurs des paramètres C , $\mathcal{E}$ et σ .

3^{ème} étape : Concerne le calcul du couple aérodynamique estimé avec les SVR. Cette approche permet d'estimer la source de complexité et les non-linéarités du système éolien à savoir la fonction contenant le couple aérodynamique T_a . Ce dernier est lié d'une part au cube de la vitesse du vent qui est une entrée aléatoire et non commandable, et d'autre part au coefficient de puissance qui est lui-même une grandeur non linéaire.

La Figure suivante donne l'allure du couple aérodynamique:

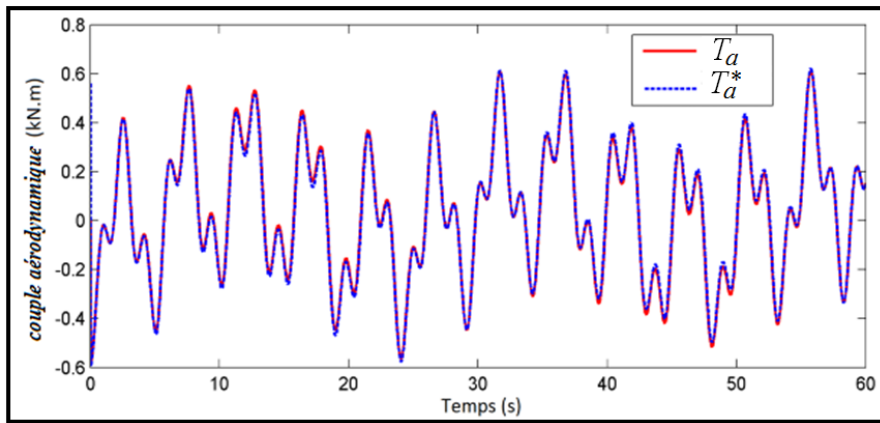


Figure 3.9: Couple aérodynamique estimé avec SVR

b. Phase de calcul du contrôleur SVR-SMC :

Afin d'assurer l'obtention de la valeur optimale de la commande, nous avons incorporé la valeur du couple aérodynamique T_a^* estimée avec le contrôleur SVR-SMC dans l'expression du couple électromagnétique (3.20).

Les Figures suivantes montrent les trajectoires réelles et optimales de la vitesse du rotor ainsi que leurs commandes en couple via l'approche proposée et celle des modes glissants standards, pour différentes valeurs du gain de commutation de SMC.

- **Pour une valeur de $\alpha = 0.8$:**

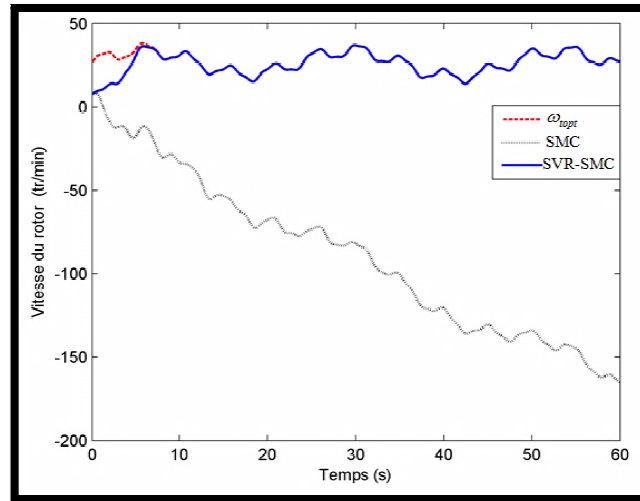


Figure 3.10: Vitesse du rotor pour $\alpha = 0.8$

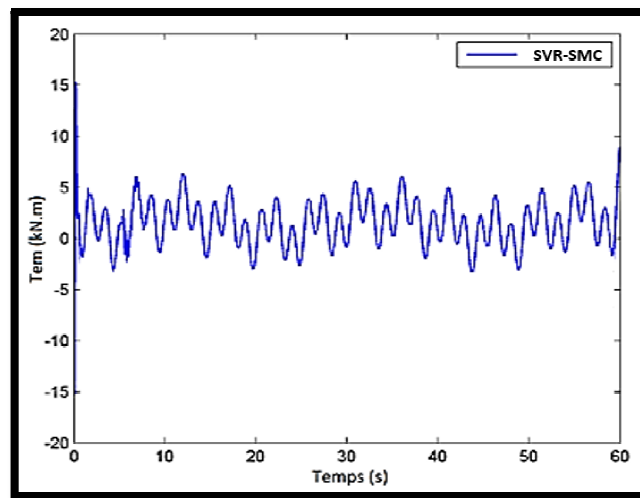


Figure 3.11: Commande T_e pour $\alpha = 0.8$ avec SVR-SMC

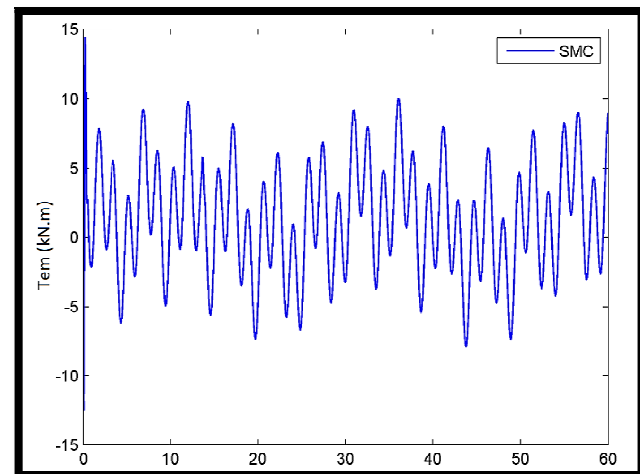


Figure 3.12 : Commande T_e pour $\alpha = 0.8$ avec SMC

- Pour une valeur de $\alpha = 1.98$:

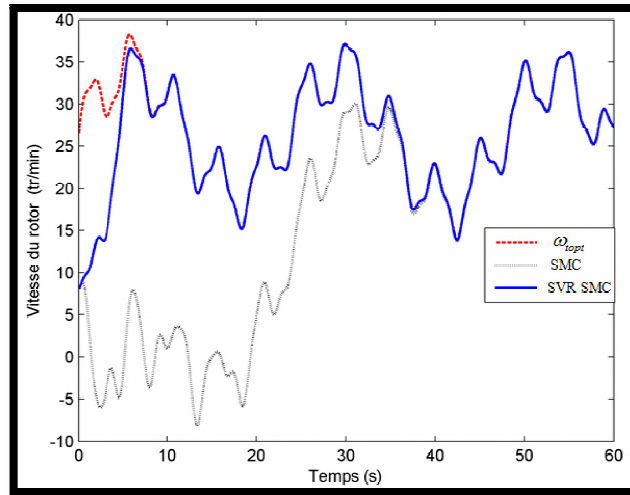


Figure 3.13: Vitesse du rotor pour $\alpha = 1.98$

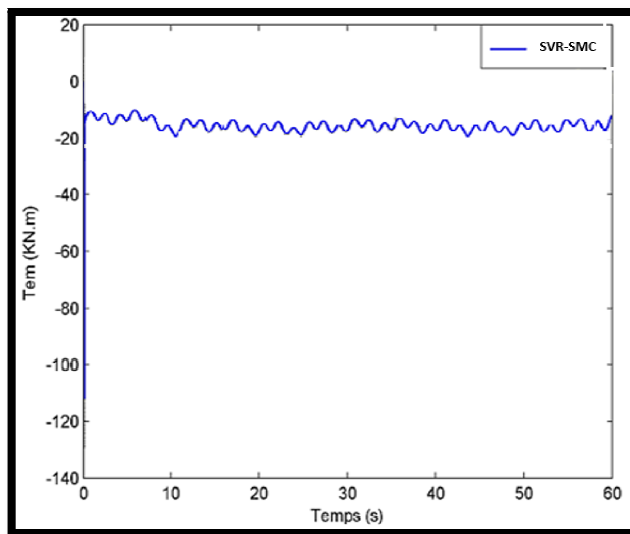


Figure 3.14: Commande T_{em} pour $\alpha = 1.98$ avec SVR-SMC

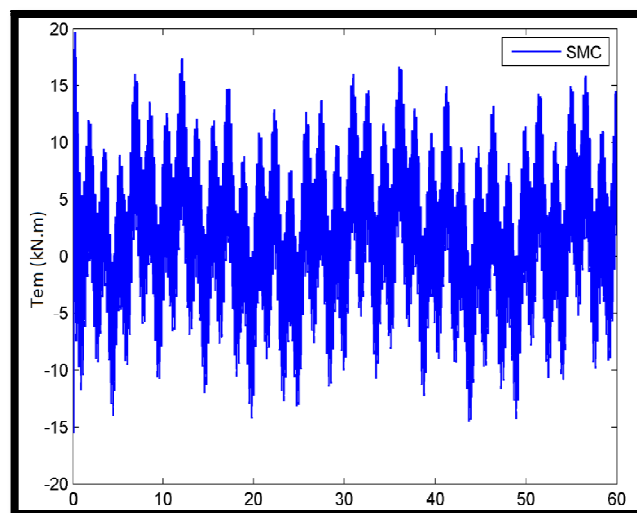


Figure 3.15 : Commande T_{em} pour $\alpha = 1.98$ avec SMC

- **Interprétation**

La comparaison des deux contrôleurs utilisés SVR-SMC et SMC standards est utilisée sous les mêmes gains de commutation avec deux valeurs différentes : $\alpha = 0.8$ et $\alpha = 1.98$ en présence d'un même profil de vent variable avec une vitesse moyenne de 7 m.s^{-1} .

Pour $\alpha = 0.8$:

On remarque qu'en termes de poursuite (maximisation de l'énergie convertie) le contrôleur SVR-SMC proposé permet une bonne poursuite de la trajectoire désirée. Tandis que le contrôleur classique SMC diverge (Figure 3.10).

D'autre part le contrôleur SVR-SMC génère des oscillations moins fluctuantes que le SMC standards (Figure 3.11 et Figure 3.12).

Pour $\alpha = 1.98$:

On remarque que la poursuite (maximisation de l'énergie convertie) est toujours assurée lors de l'application du contrôleur SVR-SMC. En comparaison au contrôleur SMC, on remarque que malgré la poursuite de la trajectoire désirée, le temps de convergence reste inquiétant. (Figure 3.13).

En termes de stabilité du système, il y a une amélioration de la commande en couple avec le contrôleur SVR-SMC (Figure 3.14), cependant il y a l'apparition du phénomène de réticence donc la perte de la stabilité du système avec le contrôleur SMC (Figure 3.15).

D'une façon générale, nous remarquons que la poursuite aussi que le temps de convergence peuvent être amélioré par l'incorporation de la technique SVR au SMC malgré la présence des perturbations aussi que le caractère non linéaire du rotor dû au profil aléatoire du vent. Cependant le phénomène de réticence reste un inconvénient à résoudre.

Dans la partie suivante, nous allons améliorer le contrôleur par l'utilisation de la technique de commande du Backstepping. Cette approche permet l'amélioration de la connaissance des dynamiques du système dans le but de synthétiser une commande robuste et intelligente, puis, nous proposons d'appliquer l'algorithme APSO pour estimer les gains du contrôleur Backstepping et par conséquent augmenter les performances en termes de poursuite.

V.1. Motivation et Performances de la technique de Backstepping

Les chercheurs se sont intéressés à des nouvelles techniques de commande des systèmes non linéaires, permettant d'aborder les systèmes de grande dimension avec une approche systématique [Far12]. Parmi ces méthodes, on trouve la méthode de la commande par Backstepping, qui a été introduite pendant les années 90 par plusieurs chercheurs, on cite entre autre Kokotovic et Khalil [Cha14]. La technique du Backstepping est une méthode systématique pour la conception d'un contrôleur pour les systèmes non linéaires, elle peut être appliquée pour une classe générale de systèmes. Son nom se reporte à la nature récursive de la conception de la procédure. En premier, un petit sous système est considéré pour lequel une loi de commande virtuelle est conçue, puis la conception est étendue sur plusieurs étapes jusqu'à ce que la loi de commande finale pour le système globale est construite. L'idée consiste à calculer une loi de commande afin de garantir, pour une certaine fonction (de

Lyapunov) définie positive, une dérivée toujours négative. La méthode consiste à fragmenter le système en un ensemble de sous-systèmes imbriqués d'ordre décroissant. Le calcul de la fonction de *Lyapunov* s'effectue, ensuite, récursivement en partant de l'intérieur de la boucle. Cette technique possède l'avantage majeur de la flexibilité d'éviter les annulations des non-linéarités utiles [Liu16].

Les paramètres de la technique de commande du Backstepping ont une influence significative sur les performances du système; Choisir ces paramètres très petit ou très grand peut ne pas être favorable à la convergence de l'algorithme. Afin de résoudre ce problème, on propose donc d'utiliser l'algorithme PSO adaptatif pour améliorer les performances du système en termes de vitesse de la convergence [Zha07]. Ensuite, on va utiliser cette combinaison de ces deux outils intelligents pour faire la synthèse de la commande globale du système.

V.2. Conception de la loi de commande basée sur le Backstepping

Hypothèse 1: on suppose que tous les états du système sont mesurés.

Hypothèse 2: on suppose que tous les trajectoires désirées et leurs dérivées successives sont bornées.

Hypothèse 3: on suppose que toutes les perturbations externes qui affectent le système, sont bornées.

Objectifs :

1. Assurer une bonne poursuite pour les sorties en dépit des incertitudes et des perturbations (on impose des trajectoires désirées).
2. Assurer la robustesse en dépit des incertitudes paramétriques et non paramétriques de la stabilité de la boucle fermée globale et garder les performances tout en respectant le dilemme connu, robustesse-performance.

Présentation du système :

Le modèle mathématique du système peut s'écrire dans l'espace d'état sous la forme suivante :

$$\begin{cases} y = \omega_t \\ \dot{y} = \dot{\omega}_t = a_{11}\omega_t + a_{13}T_{ls} + b_1T_a \\ \ddot{y} = \ddot{\omega}_t = a_{11}\dot{\omega}_t + a_{13}\dot{T}_{ls} + b_1\dot{T}_a = f(\omega_t, \dot{\omega}_t) + gU \end{cases} \quad (3.23)$$

Avec :

$U = T_{em}$ est la commande de notre système.

a_{11} , a_{13} et b_1 sont des constantes données dans le chapitre 1.

L'idée est de concevoir un contrôleur récursivement en considérant des variables d'état comme des commandes virtuelles et concevant pour elles des lois de commande intermédiaire qui stabilise asymptotiquement l'origine. Notre système est de deuxième ordre alors la conception de la commande va être faite en deux étapes [Far12] [Cha14].

1^{ère} étape :

On définit la variable d'état $y_{ref} = \omega_{topt}$ (3.24) que l'on considère une variable de commande, et on définit une loi de commande virtuelle $\alpha_0 = y_{ref}$ (3.25), et définissons e_1 comme variable d'erreur représentant la différence entre l'actuelle et la virtuelle commande donnée comme suit :

$$e_1 = y - \alpha_0 \quad (3.26)$$

Puis en dérive la dynamique de l'erreur on trouve :

$$\dot{e}_1 = \dot{y} - \dot{\alpha}_0 \quad (3.27)$$

La stabilité de variable d'erreur peut être obtenue en introduisant la commande virtuelle α_1 égale à :

$$\alpha_1 = \dot{e}_1 = \dot{y} - \dot{\alpha}_0 \quad (3.28)$$

L'objectif dans cette étape est de concevoir la loi de commande virtuelle α_1 qui permet d'achever la tâche de poursuite c'est-à-dire $e_1 \rightarrow 0$, par la considération de la fonction de *Lyapunov* suivante définit positive:

$$V_1 = \frac{1}{2} e_1^2 \quad (3.29)$$

Alors la dérivée par rapport au temps qui doit être négative est:

$$\dot{V} = e_1 \dot{e}_1 \quad (3.30)$$

On peut maintenant choisir la commande virtuelle α_1 appropriée qui rendra le système du premier ordre stabilisable, on donne :

$$\alpha_1 = -K_1 e_1 \quad (3.31)$$

Avec $K_1 = cte > 0$ c'est le premier gain de la commande du Backstepping.

2^{ème} étape :

Définissons e_2 comme une variable d'erreur représentant la différence entre l'actuelle et la virtuelle commande en prenant en considération la loi de commande virtuelle α_1 :

$$e_2 = \dot{y} - \alpha_1 \quad (3.32)$$

On calcule la dérivée par rapport au temps de cette erreur, on trouve :

$$\dot{e}_2 = \ddot{y} - \dot{\alpha}_1 \quad (3.33)$$

La stabilité de variable d'erreur peut être obtenue en introduisant la commande virtuelle α_2 égale à :

$$\alpha_2 = \dot{e}_2 \quad (3.34)$$

L'objectif dans cette étape est de concevoir une loi de commande virtuelle α_2 qui permet d'achever la tâche de poursuite c'est-à-dire $e_2 \rightarrow 0$, par la considération de la fonction de *Lyapunov* globale permettant de stabiliser le système étudié (défini positive):

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}e_2^2 \quad (3.35)$$

Sa dérivée au temps donne :

$$\dot{V}_2 = -K_1 e_1^2 + e_1 e_2 + e_2 \dot{e}_2 = -K_1 e_1^2 + e_2 (e_1 + \dot{e}_2) \quad (3.36)$$

Remplaçant chaque terme par sa valeur, on trouve :

$$\alpha_2 = \dot{e}_2 = f + gU - \dot{\alpha}_1 \quad (3.37)$$

Et si on remplace $\dot{y} = e_2 + \alpha_1$ dans l'équation (3.27), et on trouve les deux expressions de la dérivée temporelle de e_1 et V_1 donné dans la première étape :

On a :

$$\dot{e}_1 = e_2 + \alpha_1 - \dot{\alpha}_0 = e_2 + \alpha_1 \quad (3.38)$$

Avec $\dot{\alpha}_0 = 0$ et $\alpha_1 = -K_1 e_1$

On obtient :

$$\dot{e}_1 = e_2 - K_1 e_1 \quad (3.39)$$

On remplace $\dot{e}_1$ dans l'expression de $\dot{V}_1$ on trouve :

$$\dot{V}_1 = -K_1 e_1^2 + e_1 e_2 \quad (3.40)$$

Donc la dérivée de la fonction de *Lyapunov* globale de notre système à commander devient :

$$\dot{V}_2 = -K_1 e_1^2 + e_1 e_2 + e_2 \dot{e}_2 = -K_1 e_1^2 + e_2 (e_1 + \dot{e}_2) \quad (3.41)$$

Or

$$\dot{e}_2 = f + gU - \dot{\alpha}_1 = f + gU - K_1 e_1 \quad (3.42)$$

Par conséquent :

$$\dot{V}_2 = -K_1 e_1^2 + e_2 (e_1 + f + gU - K_1 e_1) \quad (3.43)$$

Cette dérivée temporelle doit être négative pour vérifier les conditions du théorème de Lyapunov. Par conséquent on pose :

$$e_1 + f + gU - K_1 e_1 = -K_2 e_2 \quad (3.44)$$

Avec $K_2 = cte > 0$ c'est le deuxième gain de la commande Backstepping.

On est finalement dans la position de concevoir la loi de commande U :

$$U = \frac{\alpha_2 - \alpha_1 - e_1 - f}{g} \quad (3.45)$$

$$U = \frac{-K_2 e_2 + K_1 e_1 - (\omega_t - \omega_{topt}) - f(\omega_t, \omega_{topt})}{g} \quad (3.46)$$

Avec $\alpha_1 = -K_1 e_1$ et $\alpha_2 = -K_2 e_2$

Et

$$f(\omega_t, \dot{\omega}_{topt}) = a_{11} \dot{\omega}_t + a_{13} (a_{31} \omega_t + a_{32} \omega_g + a_{33} T_{ls} + b_3 T_a) + b_1 \dot{T}_a$$

$$g = a_{13} d_3$$

▪ Discussion

La dynamique de la fonction de Lyapunov globale du système calculée avec la technique du Backstepping est égale à : $\dot{V}_2 = -K_1 e_1^2 - K_2 e_2^2 < 0$. En effet les erreurs e_1 et e_2 convergent asymptotiquement vers l'origine et par conséquent cette technique assure la poursuite et la stabilité du système avec la condition de bien déterminer ces deux gains K_1 et K_2 .

Lors de la simulation on remarque que lorsqu'on donne des valeurs petites à ses gains, le temps de réponse du système est long, par contre lorsqu'on donne des valeurs grandes on tombe dans la divergence et la non-stabilité du système ; donc il y a un dilemme à respecter.

Alors pour une amélioration des performances et de la robustesse de la technique de commande Backstepping on propose faire une combinaison avec un algorithme d'optimisation par essaims particuliers adaptatif (APSO) afin d'estimer les gains de Backstepping qui ont une influence significative sur la stabilité du système; Pratiquement, leurs valeurs sont choisies généralement entre 0,5 et 1 en respectant le compromis entre la vitesse de convergence et la précision des résultats.

V.3. Amélioration de la commande du Backstepping avec l'algorithme APSO

La loi de commande suivante garantit la poursuite et la stabilité du système (3.5) en boucle fermée, en un temps fini est donnée par :

$$U = \frac{-K_2 e_2 + K_1 e_1 - (\omega_t - \omega_{topt}) - f(\omega_t, \omega_{topt})}{g} \quad (3.47)$$

Ceci en présence d'incertitudes dans l'expression de $f(\omega_t, \omega_{topt})$. L'objectif ici, est trouver les valeurs optimales des paramètres du Backstepping K_1 et K_2 afin de garantir une stabilité du système. En appliquant l'algorithme APSO détaillé dans le chapitre 3, avec une population aléatoire de 20 particules, un nombre maximal d'itérations égal à 25 et le coefficient d'accélération $c_1 = 1.8$. On trouve alors les résultats détaillés sur le tableau suivant :

Itérations	K1	K2
1	0.5948	0.9634
2	0.6101	0.9562
3	0.5854	0.9831
4	0.5507	0.8753
5	0.5243	0.7822
6	0.5222	0.7363
7	0.5419	0.7146
8	0.5600	0.8145
9	0.5688	0.8823
10	0.5600	0.9178
11	0.5510	0.9157
12	0.5487	0.8965
13	0.5523	0.8729
14	0.5557	0.8553
15	0.5564	0.8507
16	0.5558	0.8523
17	0.5549	0.8584
18	0.5545	0.8620
19	0.5544	0.8621
20	0.5545	0.8604
21	0.5546	0.8604
22	0.5546	0.8606
23	0.5546	0.8606
24	0.5546	0.8606
25	0.5546	0.8606

Tableau 3.1 : Estimation des gains K_1 , K_2 avec l'algorithme APSO

Le schéma bloc du système de commande en boucle fermée par la commande Backstepping combinée avec celle de PSO adaptatif est illustré selon la Figure suivante :

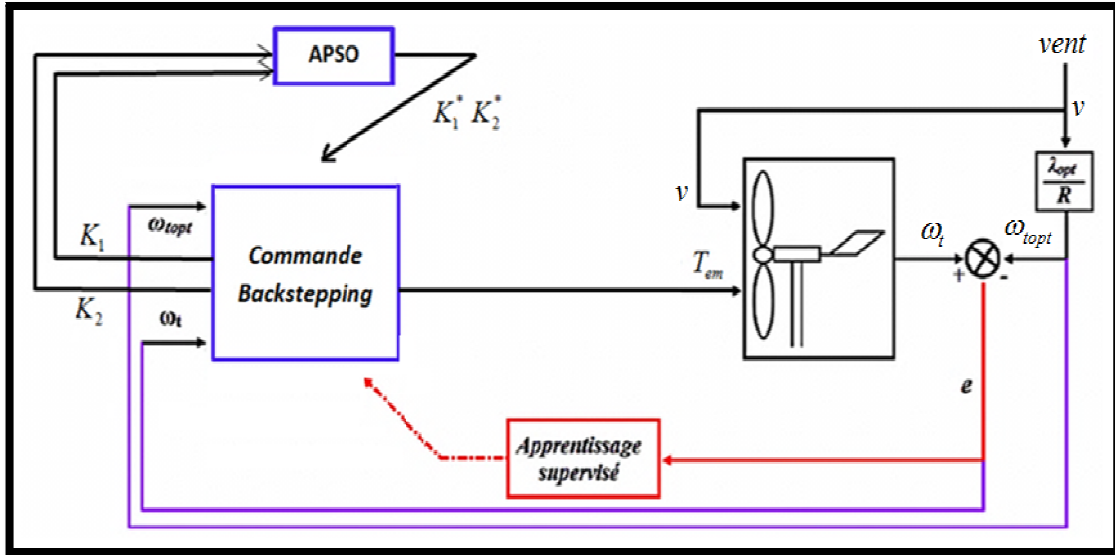


Figure 3.16 : Architecture du contrôleur Backstepping-APSO

V.4. Résultats de simulation

Afin d'établir une comparaison entre les stratégies de contrôle proposées, différentes simulations sont prises en compte pour le modèle à deux masses de l'éolienne avec la présence d'un profil du vent fluctuant de vitesse moyenne 7m/s généré à partir d'une sommation d'harmoniques, dont l'expression est donnée par l'équation :

$$v(t) = 7 + 0,2 \sin(0,1047t) + 2 \sin(0,2665t) + \sin(1,2930t) + 0,2 \sin(3,6645t)$$

L'évolution temporelle de ce profil est tracée dans la Figure suivante :

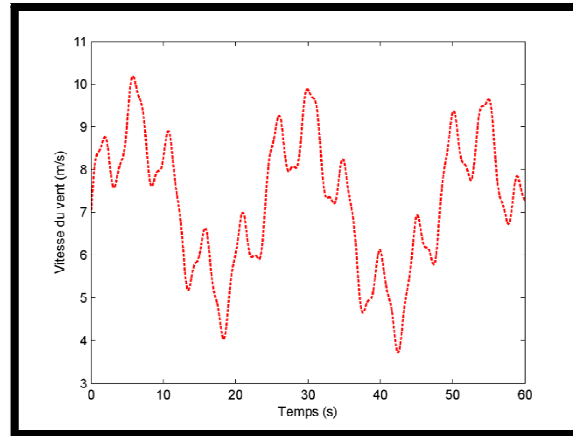


Figure 3.17: Profil du vent variable avec une vitesse moyenne de 7 m.s⁻¹

Les paramètres du modèle à deux masses sont les mêmes utilisés précédemment.

Pour les simulations nous avons considéré deux cas :

- **Cas 1 :** Utilisation de la commande Backstepping avec un choix aléatoire des gains de la commande.

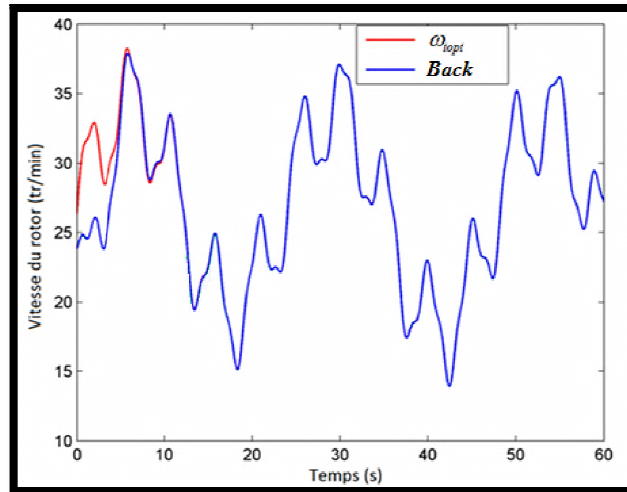


Figure 3.18: Vitesse du rotor avec la commande Back.

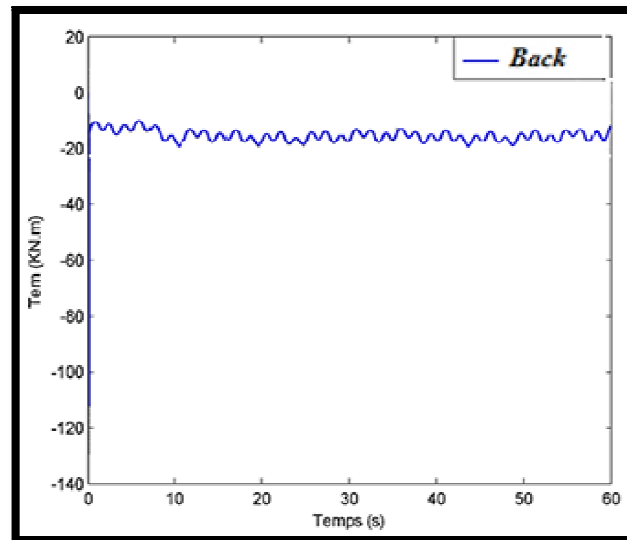


Figure 3.19 : Commande T_{em} avec la commande Back.

- **Cas 2 :** Amélioration de la commande Backstepping avec l'algorithme APSO.

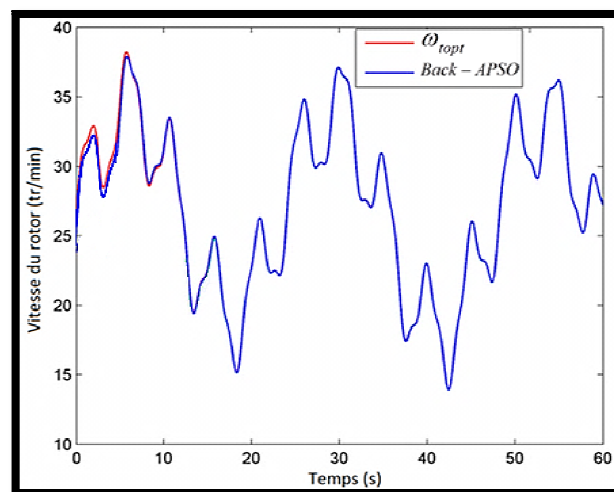


Figure 3.20 : Vitesse du rotor avec la commande Back-APSO

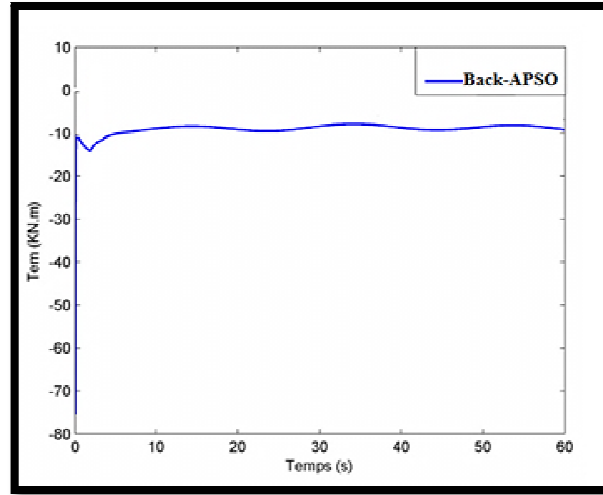


Figure 3.21: Commande avec Back-APSO

▪ Interprétation

La comparaison des deux contrôleurs Back. Et Back-APSO est donnée sur les Figures (3.18, 3.19, 3.20 et 3.21). L'utilisation de l'algorithme pour l'optimisation des paramètres montre une nette amélioration en termes d'oscillation et par conséquent réduit la consommation énergétique.

Une bonne initialisation de l'algorithme APSO permet de réduire le temps de calcul et par conséquent le temps de convergence.

VI. Etude comparative des différentes techniques de commande utilisées

Afin de bien défendre la technique de commande la plus performante en terme de la poursuite des références et la sécurité du système étudié, nous avons recourt à une comparaison globale entre le contrôleur Back-APSO ; le contrôleur Back ; le contrôleur SVR-SMC et le contrôleur SMC, en se basant sur les objectifs principaux suivants :

- La maximisation de l'énergie capturée est évaluée par le rendement aérodynamique calculée par l'équation suivante :

$$\eta_{aer}(\%) = \frac{\int_{t-init}^{t-fin} C_p(t) v^3(t) dt}{C_{p\max} \int_{t-init}^{t-fin} v^3(t) dt} \quad (3.48)$$

- Le maintien de la sécurité du système éolien est évalué par :
 - Les valeurs maximales du couple électromagnétique.
 - Le calcul de coefficient "Standard deviation" (STD) : c'est une mesure statistique de dispersion d'une valeur par rapport à sa valeur moyenne ; un STD élevé signifie une

forte volatilité. Les données s'éloignent de leur valeur moyenne de façon significative. De la même manière, un STD faible traduit une faible dispersion des valeurs analysées.

On le calcule par l'équation suivante :

$$STD \% = \frac{\sigma}{\mu} * 100 \% \quad (3.49)$$

Avec σ l'écart type et μ la moyenne.

Le tableau suivant donne des résultats numériques :

	SMC	SVR-SMC	Back	Back-APSO
Max (T_{em}) (KN.m)	22.53	21.08	20.65	15.25
STD (T_{em}) (KN.m)	8.30	7.56	6.56	4.02
η_{aer} (%)	95.36	95.96	96.52	97.20
Temps de réponse de la vitesse du rotor (sec)	$\alpha = 0,8$: Pas de convergence $\alpha = 1,98$: 36 sec	$\alpha = 0,8$: 7 sec $\alpha = 1,98$: 9 sec	4 sec	1 sec

Tableau 3.2 : Comparaison des résultats obtenus par les différents contrôleurs

En ce qui concerne les objectifs de contrôle, le tableau montre que l'efficacité aérodynamique obtenue par la technique Back-APSO (97.20%) est supérieure à celle obtenue par les autres techniques de commande utilisées dans cette partie.

En ce qui concerne la sécurité du système évaluée par STD(Tem) et Max(Tem), le même tableau montre que la technique proposé Back-APSO fournit des valeurs inférieures pour ces paramètres par rapport aux autres techniques utilisées.

Par conséquent, on peut déduire que les résultats obtenus montrent que la commande par la technique Back-APSO est en mesure d'assurer la sécurité et une meilleure convergence du système malgré son caractère hautement non linéaire et en présence des perturbations.

VII. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié et élaboré deux lois de commandes robustes et intelligentes permettant d'optimiser le fonctionnement de la partie mécanique du système de conversion d'énergie éolienne. Les deux contrôleurs étaient destinés à chercher le couple électromagnétique (couple résistant pour la partie mécanique) que la génératrice doit établir, qui sera exploité ensuite pour réguler la vitesse du rotor à la référence désirée, en se servant de la technique MPPT [Bou16] [Kou17] pour garantir un rendement énergétique optimal du système à savoir la maximisation de l'extraction d'énergie du vent qui est basée sur la convergence de la vitesse de rotor vers sa référence, et le maintien de la sécurité du système

qui est basée sur les caractéristiques de la loi de commande (Présence ou non du phénomène de réticence, STD et sa valeur maximale).

Les deux lois de commande proposées dans ce chapitre sont SVR-SMC et Back-APSO, ces deux approches permettent de donner des bons résultats en termes de poursuite (maximisation de l'énergie transformée) et stabilité (sécurité du système) mais le contrôleur Back-APSO a prouvé une surperformance au niveau de la robustesse vis-à-vis les perturbations et les non linéarités en éliminant tout phénomène de réticence et oscillations qui peut apparaître au niveau de la commande en couple par rapport au contrôleur SVR-SMC. La stabilité de notre commande en boucle fermée est démontrée théoriquement via le critère de *Lyapunov*.

Les deux approches proposées ont été testées sur le système de conversion d'énergie éolienne à vent faible. Les résultats obtenus de simulation montrent les bonnes performances en stabilité et en poursuite.

Dans ce chapitre, nous ne sommes intéressés qu'à la partie mécanique de l'éolienne. Le chapitre suivant est destiné à la commande de la partie électrique à savoir la GADA dans deux zones de vitesses du vent : à vitesse du vent faible et du vent fort.

Chapitre 4 : Commande avancée **d'un système éolien à base de la GADA**

I. Introduction

Ce chapitre traite une commande non linéaire qualifiée d'intelligente, robuste et optimale, destinée pour optimiser le fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable équipée d'une GADA. En effet, la GADA est une machine à induction est de construction simple, robuste, supporte les surcharges et nécessite peu d'entretien, qualités que ne possède pas la machine à courant continu. En revanche, la commande de cette machine est difficile, cette difficulté vient du fait que dans cette machine le couple électromagnétique résulte de l'interaction entre les courants imposés dans les enroulements du stator et les courants induits dans le rotor. Par conséquent, toute variation du couple induite par augmentation ou diminution du courant statorique se traduit aussi par une évolution du flux induit dans le rotor. Donc pour obtenir un contrôle dynamique performant du couple, il faut, par un système de commande extérieur à la machine, réaliser un découplage des grandeurs du couple et du flux. Ce découplage des armatures statorique et rotorique de la machine est réalisé en lui appliquant la théorie de la commande par flux orienté, théorie dite de commande vectorielle. Cette dernière consiste à séparer la commande du flux de celle du couple en orientant le flux selon l'axe directe du repère choisi. Cette méthode fait deux choix, le premier concerne les variables d'états, le second le choix du repère. Cela permet d'avoir une structure de commande découplée.

Les objectifs du système de commande pour une éolienne à vitesse variable se diffèrent selon les zones de fonctionnement. En zone II, nous cherchons à faire varier la vitesse de rotation de la turbine (par l'intermédiaire de celle de la génératrice) pour garantir un rendement énergétique optimal du système. L'angle de calage est maintenu à sa valeur optimale tout le long de la zone. En zone III, nous cherchons à réguler la puissance captée par la turbine et sa vitesse de rotation autour de leurs valeurs nominales. Dans ce chapitre, nous développerons deux lois de commande robuste multivariable pour le système éolien :

- Une commande optimale robuste à base des Modes Glissants à action Proportionnelle Intégrale PISMIC, appliquée à une GADA en présence d'incertitudes larges dans la zone de vitesse du vent faible.
- La même loi de commande soit appliquée au modèle à une masse d'une éolienne à vitesse variable dans la zone de vitesse du vent fort avec l'angle de calage fixe et variable.

Dans la première partie de ce chapitre, nous allons nous intéresser à la partie électrique d'un système éolien équipée d'une GADA. L'objectif de commande de la GADA permet l'optimisation de la puissance pour les vents faibles et moyens. La commande proposée pour cette génératrice, consiste à combiner la commande par modes glissants et le régulateur proportionnel intégral. Dans cette étude, nous allons les utiliser pour l'estimation des parties incertaines du modèle de la GADA. La technique PISMIC a une capacité limitée dans la recherche de la convergence et la stabilité du système dû à l'existence du phénomène de réticence au niveau de la commande. Afin de résoudre ce problème et améliorer les performances de cette technique, nous proposons d'utiliser l'algorithme APSO dont le rôle est à la fois l'optimisation du gain de la commande afin d'assurer la robustesse et d'autre part, chercher les gains optimaux du régulateur PI qui reste largement utilisé dans le contrôle de la partie électrique.

La deuxième partie de ce chapitre, est consacrée à la commande d'une éolienne à vitesse variable dans la zone de fonctionnement à vitesse du vent fort. Dans cette zone, le système de commande a pour objectif de réguler la puissance et la vitesse de rotation, autour de leurs

valeurs nominales. Pour commander ce système, deux moyens sont possibles : le calage des pales et le couple de la génératrice. Les structures de commande qui agissent seulement sur le couple et maintiennent l'angle de calage fixe [Bou16], conduisent bien à des résultats acceptables pour la régulation de la vitesse du rotor mais avec de faibles performances en régulation de puissance. Pour tenter d'apporter une amélioration, nous avons alors proposé une commande robuste optimale en couple et en pitch.

II. Commande intelligente robuste d'un SCEE équipée d'une GADA

II.1. Topologie et stratégie de commande d'un SCEE équipée d'une GADA

- **Topologie :**

Une topologie simplifiée du SCEE complet est représentée sur la Figure 4.1, celle-ci est composée d'une turbine éolienne, un multiplicateur de vitesses et une GADA couplée au réseau triphasé par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance.

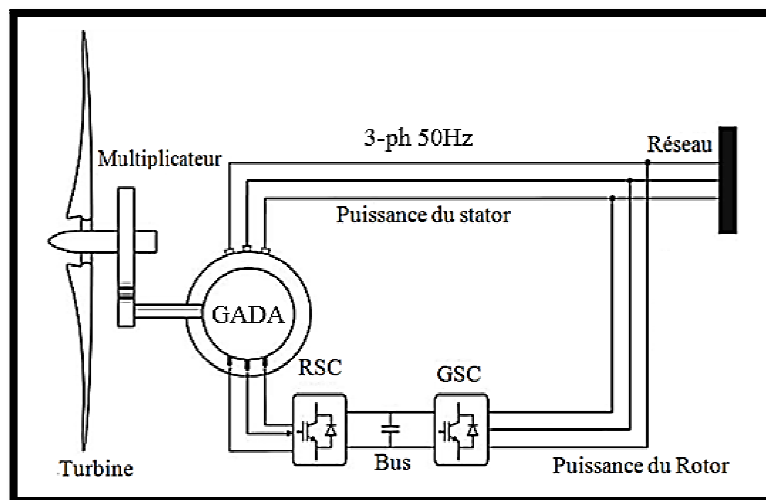


Figure 4.1: Topologie d'un SCEE à base de la GADA

Dans cette topologie, les enroulements du stator de la GADA sont reliés directement au réseau, tandis que les bobinages du rotor sont alimentés par les convertisseurs. Dans le mode de fonctionnement hyper-synchronisme qui nous intéresse dans cette thèse, le contrôleur côté rotor, règle la puissance débitée par la GADA dans le réseau en contrôlant les courants rotoriques.

- **Stratégie de commande :**

Pour commander la machine asynchrone à double alimentation, comme bien d'autres procédés, il nous faut disposer de son modèle avec une connaissance plus ou moins précise des éléments constitutifs. Mathématiquement, à partir de ce modèle, on peut faire la conception et la simulation des algorithmes de commande ; ainsi que l'étude et l'analyse des régimes transitoires. De ce fait, il est réaliste de poser des conditions et des hypothèses pour écrire le modèle comportemental. Une première difficulté réside dans la commande de cette

machine à cause du couplage du flux magnétique et du couple électromagnétique ; la deuxième est liée à l'identification des paramètres.

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

La génératrice fournit de l'énergie électrique à fréquence variable et il est nécessaire d'ajouter une interface d'électronique de puissance entre celle-ci et le réseau. Cette interface est classiquement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue. L'onduleur coté réseau est alors découplé de la machine via le bus continu et il n'y a pas de lien direct entre la fréquence du réseau et celle délivrée par la machine. Un tel dispositif doit cependant être conçu et commandé de façon à limiter les perturbations qu'il est susceptible de générer sur le réseau. En effet, la tension délivrée n'est pas sinusoïdale et peut contenir des harmoniques indésirables.

- **Modèle de la GADA avec orientation du flux**

Dans cette partie, nous expliquons la commande vectorielle d'une GADA à rotor bobiné alimenté par un onduleur de tension. Dans notre étude, la fréquence et la tension sont constantes. Nous approximations son modèle à celui de la machine à courant continu qui a l'avantage d'avoir un découplage naturel entre les flux et les courants. Pour cela, nous appliquons cette commande aussi appelée commande par orientation du flux. Les stratégies de commande de la GADA reposent sur deux approches différentes : le contrôle du flux en boucle fermée, où la fréquence et la tension sont considérées variables (réseau instable) et le contrôle du flux en boucle ouverte lorsque la tension et la fréquence sont constantes (réseau stable).

Le principe du contrôle vectoriel permet donc de modéliser la machine asynchrone comme une machine à courant continu, c'est-à-dire réaliser un contrôle similaire à celui des machines à courant continu à excitation séparée. A cet effet, il est nécessaire d'orienter le flux avec le couple. Il est utile de rappeler que le découplage peut être réalisé par orientation du flux statorique ou du flux d'entrefer ou du flux rotorique.

Dans ce chapitre, nous choisissons un référentiel diphasé d-q lié au stator. Le flux statorique ϕ_s est orienté suivant l'axe d. Nous considérons que la GADA fonctionne en mode hyper synchrone, ce qui permet un transfert optimal de puissance en utilisant la commande vectorielle directe avec orientation du flux statorique. A cet effet nous allons, donc déterminer les équations qui lient les puissances actives et réactives statoriques aux grandeurs rotoriques sur lesquelles nous agissons pour commander la machine.

L'orientation du flux statorique exige que :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = \phi_s \\ \phi_{qs} = 0 \end{cases} \quad (4.1)$$

La Figure suivante 4.2 illustre cette stratégie de flux orienté :

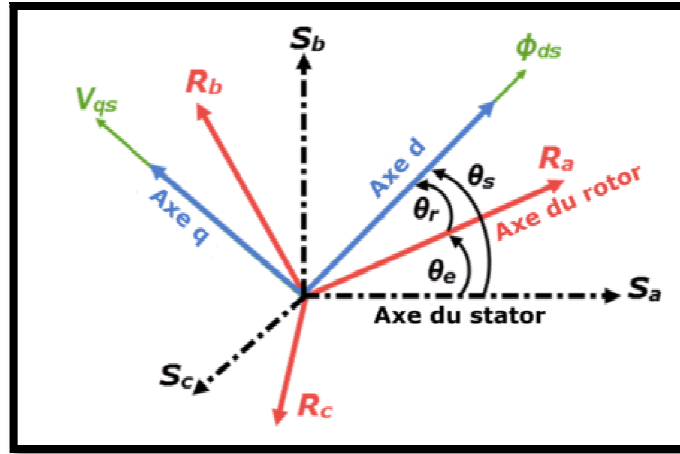


Figure 4.2: Orientation de flux statorique sur l'axe d

On a les équations électriques dans le repère biphasé de la GADA sont données comme suit :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d}{dt} \phi_{sd} - \omega_s \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d}{dt} \phi_{sq} + \omega_s \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt} \phi_{rd} - \omega_r \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d}{dt} \phi_{rq} - \omega_r \phi_{rd} \end{cases} \quad (4.2)$$

Comme la résistance du stator R_s est souvent négligée et le réseau est supposé stable avec une tension V_s et une pulsation ω_s constantes, les tensions statoriques et les équations du flux peuvent être simplifiées dans le régime permanent comme suit :

$$\begin{cases} V_{sd} = \frac{d\phi_{sd}}{dt} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \phi_s \end{cases} \quad (4.3)$$

$$\begin{cases} \phi_s = L_s I_{sd} + L_m I_{rd} \\ 0 = L_s I_{sq} + L_m I_{rq} \end{cases} \quad (4.4)$$

De l'équation (4.4) on déduit les expressions des courants statoriques en fonction des courants rotoriques.

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{\phi_s}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} I_{rd} \\ I_{sq} = -\frac{L_m}{L_s} I_{rq} \end{cases} \quad (4.5)$$

Ainsi, les équations des tensions sont données par :

$$\begin{cases} V_{sd} = -\frac{R_s}{L_s} L_m I_{rd} + \frac{R_s}{L_s} \phi_s \\ V_{sq} = -\frac{R_s}{L_s} L_m I_{rq} + \omega_s \phi_s \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \sigma L_r \frac{dI_{rd}}{dt} + u_{rd} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \sigma L_r \frac{dI_{rq}}{dt} + u_{rq} + u_g \end{cases} \quad (4.6)$$

Avec :

$$\begin{cases} u_{rd} = -\sigma L_r \omega_r I_{rq} \\ u_{rq} = \sigma L_r \omega_r I_{rd} \\ u_g = \omega_r \frac{L_m}{L_s} \phi_s \\ \sigma = 1 - \left(\frac{L_m}{\sqrt{L_s L_r}} \right)^2 \end{cases} \quad (4.7)$$

En utilisant les équations (4.4) et (4.6), les puissances statoriques actives et réactive peuvent être écrites comme suit :

$$\begin{cases} P_s = -\frac{V_s}{L_s} L_m I_{rq} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} - \frac{V_s}{L_s} L_m I_{rd} \end{cases} \quad (4.8)$$

L'expression simplifiée du couple électromagnétique est donnée comme suit :

$$T_{em} = p \phi_s \frac{L_m}{L_s} I_{rq} \quad (4.9)$$

La présence d'un réseau stable ($\frac{V_s^2}{L_s \omega_s} = cte$) et l'alignement du flux ϕ_{ds} sur l'axe d ($\phi_{ds} = \phi_s = cte$) rendent le couple électromagnétique T_{em} produit par la machine et par conséquent la puissance active, dépendants uniquement du courant rotorique I_{rq} .

II.2. Commande intelligente robuste PISMIC à vitesse du vent faible

▪ Reformulation du problème

D'après les équations électriques du système éolien données au chapitre 2, le modèle mathématique nominal de la GADA est donné par :

$$\begin{cases} \frac{dI_{rd}}{dt} = \frac{1}{\sigma_r L_r} (V_{rd} - R_r I_{rd} + g \omega_s \sigma_r L_r I_{rq} - \frac{L_m}{L_s} \frac{d\phi_s}{dt}) \\ \frac{dI_{rq}}{dt} = \frac{1}{\sigma_r L_r} (V_{rq} - R_r I_{rq} - g \omega_s \sigma_r L_r I_{rd} - \frac{L_m}{L_s} \phi_s) \\ T_{em} = p \phi_s \frac{L_m}{L_s} I_{rq} \end{cases} \quad (4.10)$$

L'objectif principal de commande de la GADA de l'éolienne, est de maximiser la capture de l'énergie pour les vents faibles et moyens. Au point λ_{opt} , $C_p = C_{popt}$. De ce fait, la puissance aérodynamique optimale P_{aopt} peut être extraite lorsque le coefficient C_p est maintenu à sa valeur maximale. A cet effet, la turbine doit toujours fonctionner à λ_{opt} .

D'après le chapitre 2, les expressions de la puissance active et réactive sont données par :

$$\begin{cases} P_s = -\frac{L_m V_s}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{L_m V_s}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad (4.11)$$

La consigne de puissance réactive optimale sera maintenue nulle $Q_{sref} = 0$, de façon à garder un facteur de puissance unitaire côté stator. Alors qu'en négligeant les pertes, la consigne de puissance active optimale P_{sref} peut être écrite comme suit : $P_{sref} = P_{aopt}$

Afin d'assurer la convergence des puissances active et réactive statoriques, les références des courants rotoriques dans les axes choisis d-q, sont reliées aux puissances actives et réactives optimales comme suit :

$$\begin{cases} I_{rqref} = -\frac{L_s}{L_m V_s} P_{sref} \\ I_{rdref} = \frac{V_s}{\omega_s L_m} \end{cases} \quad (4.12)$$

Le modèle dynamique du système décrit par (4.10) peut être réécrit de la façon suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f_n(x) + g_u(x)U(t) + \xi(x,t) \\ y = x \end{cases} \quad (4.13)$$

Avec :

$U = [V_{rd} \ V_{rq}]^T$ et $x = [I_{rd} \ I_{rq}]^T$ sont respectivement les vecteurs d'entrée et de sortie du système.

$$f_n(x) = \begin{pmatrix} f_{nd}(x) \\ f_{nq}(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma L_r} (-R_r I_{rd} + g \omega_s \sigma_r L_r I_{rq}) \\ \frac{1}{\sigma L_r} (-R_r I_{rq} - g \omega_s \sigma_r L_r I_{rd} - g \omega_s \frac{L_m}{L_s} \phi_{sd}) \end{pmatrix} \quad (4.14)$$

$$g_u(x) = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma_r L_r} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_r L_r} \end{pmatrix} \quad (4.15)$$

Et

$$\xi(x, t) = [\xi_d(x, t) \quad \xi_q(x, t)]^T$$

$f_{nd}(t)$ et $f_{nq}(t)$ sont les représentations nominales de la GADA. $\xi_d(t)$ et $\xi_q(t)$ représentent les incertitudes sur le système[Kas13].

a. Commande par Modes Glissant standard : SMC

Pour concevoir le contrôleur SMC, il y a deux étapes : trouver la surface de glissement et ensuite développer la loi de commande[Bou15].

La surface de glissement est définie comme :

$$\sigma(t) = \left(\gamma + \frac{d}{dt} \right)^{r-1} e(t) \quad (4.16)$$

Avec r est le rang du système, γ est une constante positive et $e(t)$ est l'erreur de poursuite donnée comme suit :

$e = [e_d \quad e_q]^T$, avec :

$$\begin{aligned} e_d &= I_{rd} - I_{rdref} \\ e_q &= I_{rq} - I_{rqref} \end{aligned} \quad (4.17)$$

L'équation de la surface de glissement est alors définie par $\sigma = [\sigma_d \quad \sigma_q]^T$, où :

$$\begin{aligned} \sigma_d &= I_{rd} - I_{rdref} \\ \sigma_q &= I_{rq} - I_{rqref} \end{aligned} \quad (4.18)$$

La dérivée par rapport au temps de la surface de glissement s'écrit :

$$\dot{\sigma} = f_n(x) + g_u(x)U + \xi(x, t) - \begin{pmatrix} \dot{I}_{rdref} \\ \dot{I}_{rqref} \end{pmatrix} \quad (4.19)$$

Pour assurer l'existence du mode de glissement sur la surface de commutation, il suffit de vérifier la condition d'Utkin[Utk92] suivante :

$$\sigma_i \dot{\sigma}_i < 0 ; i=d, q \quad (4.20)$$

La loi de commande qui satisfait la condition (4.20) est donnée par :

$$U = g_u^{-1}(x) \left(-f_n(x) + \begin{pmatrix} \dot{I}_{rdref} \\ \dot{I}_{rqref} \end{pmatrix} - Ksat(\sigma) \right) \quad (4.21)$$

Où K est une constante positive qui représente le gain de glissement, choisie de façon à compenser les incertitudes tel que $K < B$. Avec B la borne supérieure des incertitudes donnée par $\|\xi(x,t)\| < B$; et $sat(\cdot)$ est la fonction de saturation donnée par :

$$sat(\sigma) = \begin{cases} \frac{\sigma}{L} \rightarrow Si \|\sigma\| < L \\ sign(\sigma) \rightarrow ailleurs \end{cases} \quad (4.22)$$

L est l'épaisseur de la couche limite.

La couche limite (*boundary layer*) est une technique utilisée pour effectuer une approximation continue de discontinuités existantes dans la loi de commande au voisinage de la surface de glissement. Elle a été proposée par les auteurs dans [Slo84] [Slo91]. Cette approche permet de remplacer la fonction $sign(\cdot)$ dans la loi de commande discontinue par une fonction plus lisse à l'intérieure de la couche limite de $\sigma(x,t) = 0$.

La commande par mode glissant à couche limite n'est efficace que si les incertitudes affectant le système sont faibles. Cependant, dans le cas où les incertitudes sont importantes, le phénomène de réticence persiste toujours et peut conduire à une divergence.

b. Commande par Intégrale Mode Glissant : ISMC

Pour améliorer la surface de glissement et éviter l'erreur de poursuite, l'action intégrale peut être introduite dans la surface de glissement. En effet, la nouvelle surface de glissement peut être définie comme [Lai18]:

$$\sigma(t) = \left(\gamma + \frac{d}{dt} \right)^{r-1} e(t) + K_i \int_0^\infty e(t) dt \quad (4.23)$$

Avec K_i est un gain de glissement.

L'ordre du système étant $r = 1$, la nouvelle surface de glissement est donnée par:

$$\sigma(t) = e(t) + K_i \int_0^\infty e(t) dt \quad (4.24)$$

En dérivant l'équation (4.24) par rapport au temps, on trouve :

$$\dot{\sigma} = f_n(x) + g_u(x)U + K_i e - \begin{pmatrix} \dot{I}_{rdref} \\ \dot{I}_{rqref} \end{pmatrix} \quad (4.25)$$

On trouve l'expression de la commande du système :

$$U = g_u^{-1}(x) \left(-f_n(x) - K_i e + \begin{pmatrix} \dot{I}_{rdref} \\ \dot{I}_{rqref} \end{pmatrix} - K sat(\sigma) \right) \quad (4.26)$$

La réponse du contrôleur ISMC reste lente, ce qui peut entraîner un gain élevé et par conséquent un comportement de réticence. Dans le paragraphe suivant, on propose de résoudre ce problème par une autre manière, à savoir combiner les contrôleurs Proportionnel Intégral à notre commande par mode glissant (PISMIC) pour l'estimation de la partie inconnue du système donné en (4.4) et en améliorant les performances de ce contrôleur en utilisant cette fois-ci, l'algorithme PSO, qui sera utilisé pour bien estimer les gains des PI et SMC.

c. Commande par Proportionnel Intégral Mode Glissant: PISMIC

Le régulateur Proportionnel Intégral PI reste le plus communément utilisé pour la commande de la GADA en génératrice [Abo17]. Ceci est particulièrement dû à sa simplicité et sa rapidité de mise en œuvre tout en offrant des performances acceptables [Bou14] [Kou17] [Lai18].

La relation entre la sortie $U(t)$ et le signal d'erreur $e(t)$ est :

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (4.27)$$

Où K_p et K_i sont des gains de glissement.

Donc, pour améliorer la réponse transitoire avec une erreur minimale en régime permanent, l'action Proportionnelle Intégrale est incluse dans la surface de glissement. Ainsi, le temps nécessaire pour atteindre cette surface de glissement peut être réduit en optimisant les paramètres de contrôleur PI et SMC en utilisant l'algorithme PSO. Dans cette partie, le principe du SMC optimisé basé sur PI est proposé.

La nouvelle surface de glissement peut être définie comme suit:

$$\sigma(t) = \left(\gamma + \frac{d}{dt} \right)^{r-1} e(t) + K_p e(t) + K_i \int_0^\infty e(t) dt \quad (4.28)$$

Donc, la surface de glissement est modifiée et elle peut être écrite comme suit:

$$\sigma(t) = e(t) + K_p e(t) + K_i \int_0^\infty e(t) dt \quad (4.29)$$

La dynamique de la surface de glissement est donnée par :

$$\dot{\sigma} = f_n(x) + g_u(x)U + K_i e + K_p \dot{e} - \begin{pmatrix} \dot{I}_{rdref} \\ \dot{I}_{rqref} \end{pmatrix} \quad (4.30)$$

Théorème 5.1 [Bou15] [Kou17]:

Considérons le modèle dynamique de la GADA décrit par (4.4) en présence d'incertitudes larges. Si la loi de commande désignée pour ce système est de la forme :

$$U = g_u^{-1}(x) \left(-f_n(x) - K_i e - K_p \dot{e} + \begin{pmatrix} \dot{I}_{rdref} \\ \dot{I}_{rqref} \end{pmatrix} - K_{sat}(\sigma) \right) \quad (4.31)$$

Où les valeurs des K_i , K_p et K sont données par l'algorithme PSO.

Alors, la commande proposée force les erreurs de poursuite vers L -voisinage de zéro en un temps fini.

Démonstration:

Considérons la fonction de *Lyapunov* suivante :

$$V = \frac{1}{2} \sigma^T \sigma$$

Sa dérivée par rapport au temps est donnée par:

$$\dot{V} = \sigma^T \dot{\sigma}$$

$$\dot{V} = \sigma^T \left(f_n(x) + g_u(x)U + K_i e + K_p \dot{e} - \begin{pmatrix} \dot{i}_{rdref} \\ \dot{i}_{rqref} \end{pmatrix} \right)$$

Remplaçons la loi de commande proposée dans le théorème, on trouve :

$$\dot{V} = -K \sigma^T \text{sat}(\sigma)$$

Pour tout $L > 0$, si $\|\sigma\| > L$, $\text{sat}(\sigma) = \text{sign}(\sigma)$.

La dérivée de la fonction de *Lyapunov* devient : $\dot{V} = -K \|\sigma\| < 0$

Si $\|\sigma\| < L$, on a $\text{sat}(\sigma) = \frac{\sigma}{L}$ est continue et les trajectoires du système restent à l'intérieur d'une zone d'épaisseur $2L$ (avec L petit) autour de la surface de glissement $\sigma = 0$ appelée couche limite.

d. Amélioration de la commande PISMCMC avec PSO

L'optimisation des paramètres de contrôleur PI et SMC est souvent considérée comme un défi. La majorité de ces paramètres de contrôle sont ajustés par des méthodes conventionnelles ou manuellement, qui restent difficiles et prennent beaucoup de temps. Afin de surmonter ce problème, nous allons introduire dans chapitre une méthode utilisant l'intelligence en essaim pour optimiser les paramètres de contrôleur SMC basés sur PI en temps réel. Les valeurs optimales de ces coefficients sont l'objet de recherche des particules assignées aléatoirement dans la procédure de l'algorithme PSO. La recherche est basée sur la minimisation de l'erreur quadratique des courants rotoriques en respectant les étapes standards de cet algorithme déjà expliqué[Ebe95] [Zha07].

Dans la section suivante, l'algorithme évolutif basé sur l'optimisation d'essaims de particules PSO a été étudié. Dans l'algorithme PSO, il existe m particules qui traversent un espace de recherche de n dimension. Chaque particule i est définie par deux vecteurs : le vecteur de vitesse V_i et le vecteur de position X_i (voir chapitre 3). Semblables aux essaims d'animaux, les particules sont mises à jour en fonction de leur meilleure position à l'instant t et de leur meilleure position à l'intérieur de l'essaim entier. Cela signifie que la particule i adapte sa vitesse V et sa position X à chaque génération en fonction des équations ci-dessous :

$$\begin{aligned} v_{id}(t+1) &= w \times v_{id}(t) + c_1 \times rand \times (p_{id} - x_{id}) + c_2 \times rand \times (p_{gd} - x_{id}) \\ x_{id}(t+1) &= x_{id}(t) + v_{id}(t+1) \end{aligned} \quad (4.32)$$

Avec : w est le coefficient de pondération ou d'inertie, donnée par :

$$w = w(\max) - \frac{w(\max) - w(\min)}{MaxIteration} \times t \quad (4.33)$$

c_1 est le facteur de confiance de particule, définie par :

$$c_1 = w(\max) - \frac{c_1(\max) - c_1(\min)}{MaxIteration} \times t \quad (4.34)$$

c_2 est le facteur de confiance de l'essaim, définie par :

$$c_2 = w(\max) - \frac{c_2(\max) - c_2(\min)}{MaxIteration} \times t \quad (4.35)$$

$w(\max)$ et $w(\min)$ sont les valeurs maximales et minimales de w , $MaxIteration$ est le nombre maximum d'itérations autorisées, t est le numéro d'itération actuel.

L'algorithme PSO commence par la création d'une population S de n particules réparties uniformément sur l'espace de recherche. Chaque particule est évaluée à l'aide d'une fonction objective à minimiser qui est choisie dans ce travail en tant qu'erreur carrée intégrale, c'est la fonction de *fitness* définie par: $f = (ISE) = \int e^2 dt$, mesurant l'adéquation de cette solution potentielle avec le problème, elle reflète la constante de temps du système, qui détermine les performances de tout système non linéaire. A chaque itération de l'algorithme, chaque particule est déplacée selon les équations (4.31). Chaque particule i se déplace dans l'espace de recherche et stocke sa meilleure position $P_{id}(K_p, K_i, K)$, Une fois le déplacement des particules est effectué, les nouvelles positions sont évaluées. Les P_{id} ainsi que P_{gd} sont alors mis à jour. Ensuite, il compare toutes ces positions pour finalement extraire les valeurs optimales de K_p, K_i et K qui donnent la valeur minimale de la fonction *fitness* [Ebe95]. Cette procédure est bien décrite dans le chapitre 3.

Le principe de commande proposée en boucle fermée peut être illustré selon le schéma suivant :

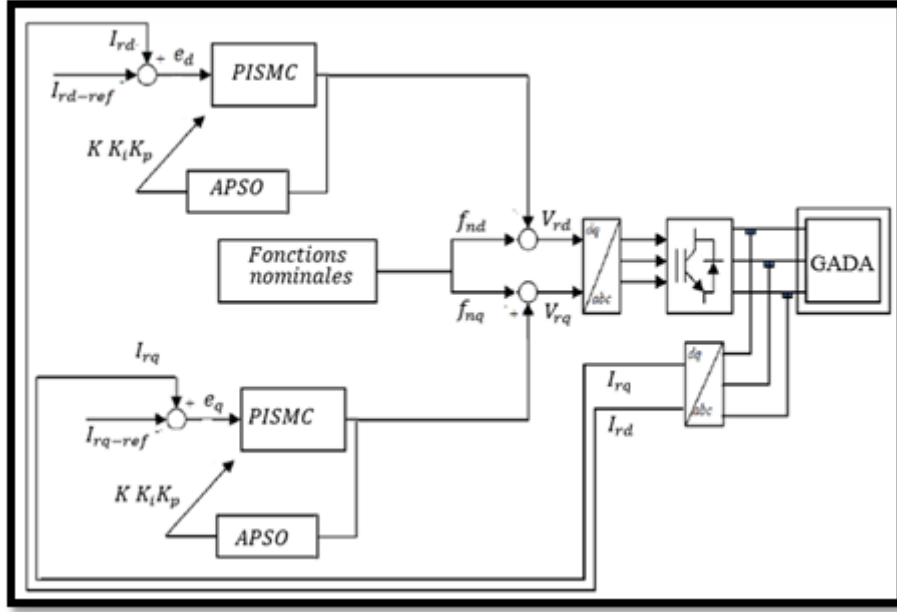


Figure 4.3 : Schéma du système de commande PISMIC

e. Résultats de simulation

La loi de commande proposée est testée sur à l'aide de MATLAB Simulink, en présence d'une perturbation additive égale à $\xi(t) = 2 + rand(1,t)$.

Les paramètres de l'algorithme PSO sont :

-Une population aléatoire de 20 particules.

-Nombre maximal d'itérations $MaxIteration = 40$

$$c_1(\max) = 2, c_1(\min) = 0.1, c_2(\max) = 2, c_2(\min) = 0.1, w(\max) = 0.9, w(\min) = 0.4$$

Les paramètres numériques de la GADA d'une puissance de 7.5kW, connecté à un réseau triphasé 220 V/50 Hz sont :

$$R_s = 0.455\Omega; R_r = 0.62\Omega; L_s = 0.084H; L_r = 0.081H; M = 0.078H; P_{nom} = 7.5kW; p=4;$$

$$J_t = 0.3125 kg.m^2; K_t = 6.73.10^{-3} N.m.rad^{-1}.s$$

Les résultats d'estimation des gains du contrôleur proposé sont donnés dans le tableau suivant[Lai18] :

Iterations	K_p	K_i	K	Iterations	K_p	K_i	K
1	0.5948	0.9634	1.7856	31	0.6500	0.2800	1.400
2	0.5101	0.9562	1.8922	32	0.6500	0.2800	1.400
3	0.5854	0.9831	1.0254	33	0.6500	0.2800	1.400
4	0.5507	0.8753	1.2354	34	0.6500	0.2800	1.400
5	0.5243	0.7822	1.2699	35	0.6500	0.2800	1.400
6	0.5922	0.7363	1.2457	36	0.6500	0.2800	1.400
7	0.5919	0.7146	1.3258	37	0.6500	0.2800	1.400
....				38	0.6500	0.2800	1.400
				39	0.6500	0.2800	1.400
				40	0.6500	0.2800	1.400

Tableau 4.1 : Convergence des gains de PISMIC vers leurs valeurs optimales

Les performances du contrôleur proposé sont évaluées à travers une comparaison entre les contrôleurs PSO-PISMIC, PSO-ISMC et conventionnels PSO-SMC avec un profil du vent, de vitesse moyenne de 7 m/s.

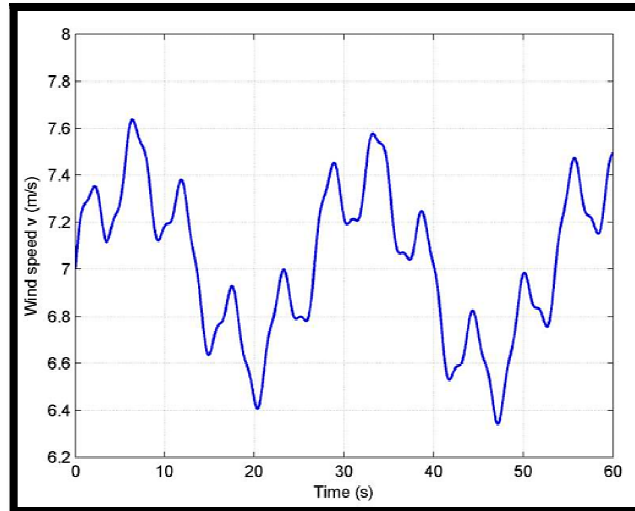


Figure 4.4 : Profil du vent avec moyenne de 7m/s

Les Figures suivantes présentent les sorties de la puissance active (P_s et P_{sref}) et les sorties de la puissance réactive (Q_s et Q_{sref}), ainsi que leurs commandes par l'approche proposée.

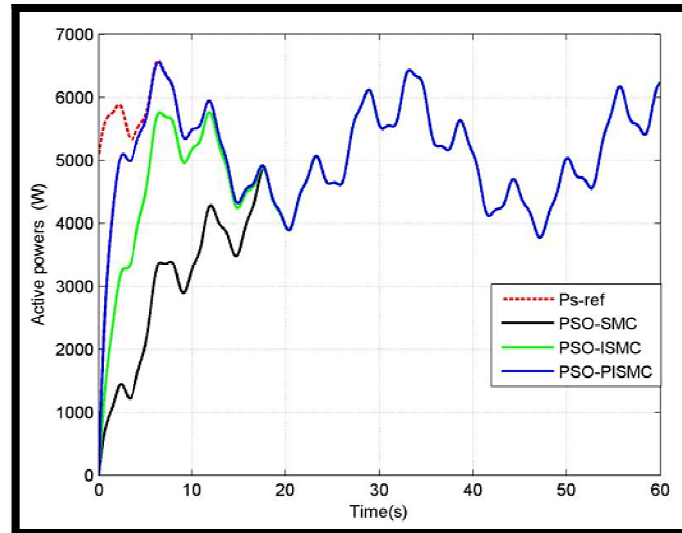


Figure 4.5 : Sorties réelle et désirée de la puissance active statorique

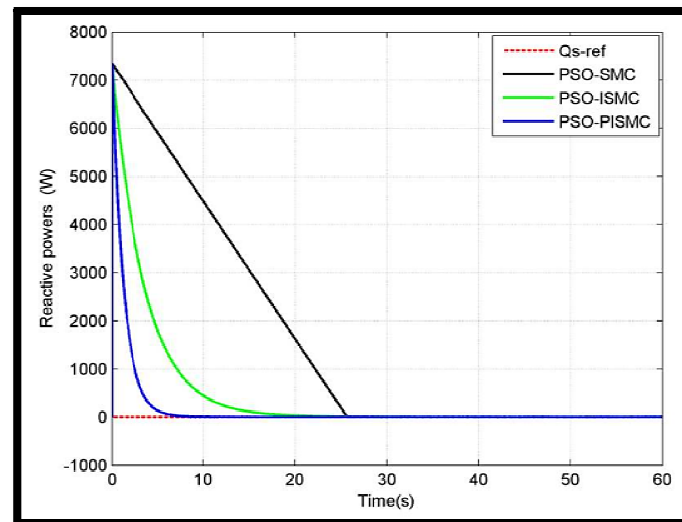


Figure 4.6 : Sorties réelle et désirée de la puissance réactive statorique

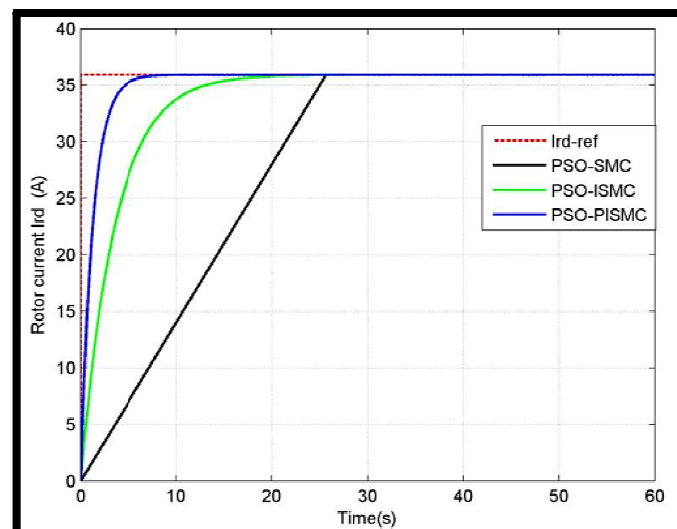


Figure 4.7 : Courant rotorique selon l'axe d

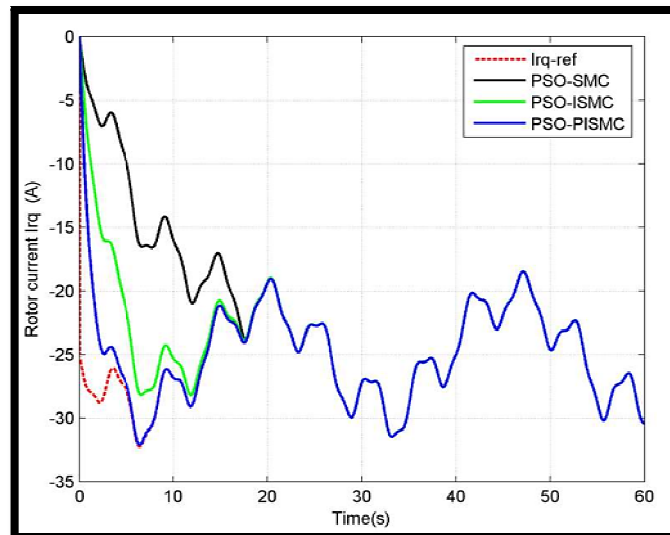


Figure 4.8 : Courant rotorique selon l'axe q

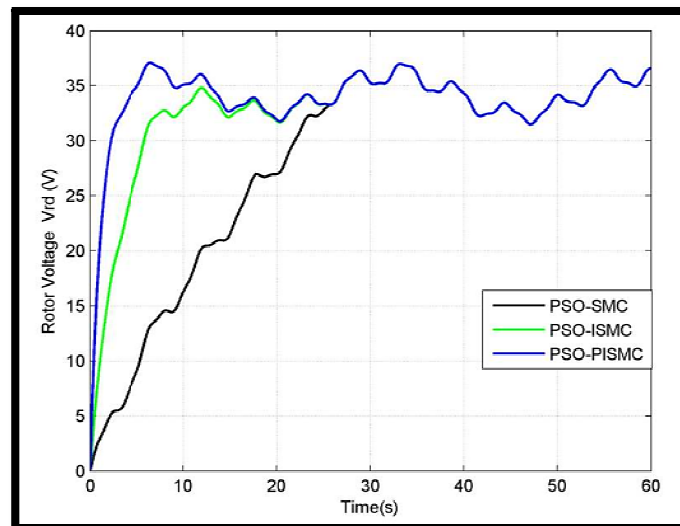


Figure 4.9 : Commande en tension rotorique selon l'axe d

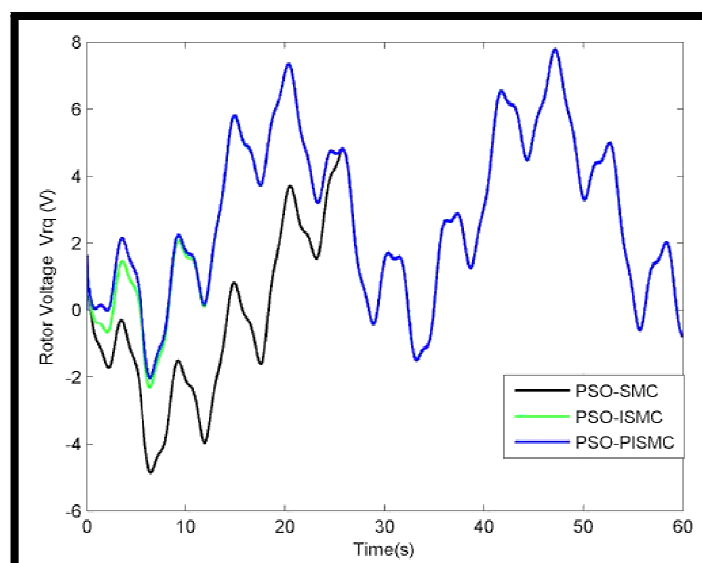


Figure 4.10: Commande en tension rotorique selon l'axe q

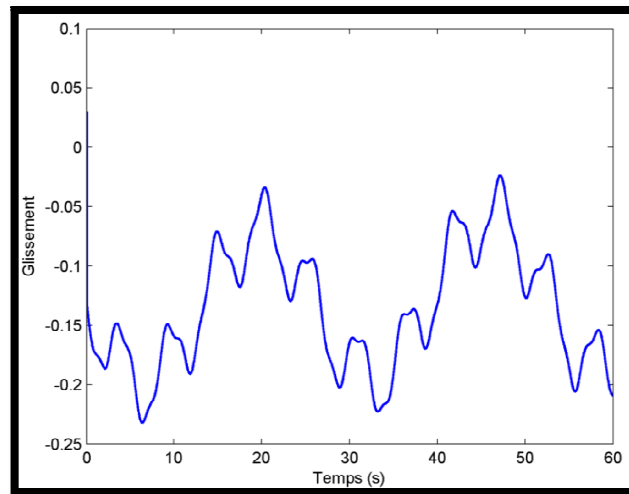


Figure 4.11 : Glissement de la GADA

■ Interprétation et Discussion :

On remarque d'après la Figure 4.5 que la puissance active statorique suit sa référence et la Figure 4.6, montre la convergence rapide de la puissance réactive statorique et maintient ainsi la puissance réactive à zéro afin de garantir un facteur de puissance unitaire du côté du stator.

D'après les Figures 4.7 et 4.8, on remarque une convergence rapide des courants rotoriques vers leurs valeurs de références.

Les deux Figures 4.9 et 4.10 le comportement des lois de commande des tensions rotoriques selon les axes d-q respectivement et montrent que la tension rotorique selon les axes q-d, ne subit pas de phénomène de réticence limitant ainsi la charge sur l'ensemble de la transmission de l'éolienne.

Le fonctionnement de la GADA en mode Génératrice est bien assuré parce que le glissement est négatif (Figure 4.11).

L'approche proposée a montré alors, une bonne performance de ce type de commande en termes de stabilité et de rapidité de convergence, malgré la présence des incertitudes et des fortes variations de la vitesse du vent.

La méthode conçue repose sur une combinaison du contrôleur Proportionnel Intégral (PI), du mode de glissement (SMC) et d'optimisation par essais particuliers (PSO). Pour cette approche, l'action PI est incluse dans la surface de glissement afin d'améliorer les performances du SMC standard. Ainsi, l'utilisation de l'algorithme évolutif PSO a pour but d'améliorer les performances du contrôleur proposé en optimisant les gains PI et SMC. La stabilité du système en boucle fermée est étudiée par la théorie de *Lyapunov* [Lai18].

Les performances du contrôleur proposé sont déterminées par les paramètres K_i , K_p et K : une augmentation de K_p accélère la réponse du système, provoque une diminution de l'écart résiduel (erreur statique), mais rend la mesure de plus en plus oscillatoire. La valeur optimale de K_p est celle qui donne la réponse la plus rapide, avec un bon amortissement. Le rôle de l'action intégrale est d'éliminer l'erreur du système de contrôle en régime permanent. Comme dans le cas de l'action proportionnelle, une augmentation excessive de l'action intégrale K_i peut être une source d'instabilité. La valeur optimale du gain des modes glissants K garantit la stabilité du système en évitant bien sur le phénomène de réticence.

Les résultats de simulation de la méthode PISMIC basée sur PSO sont comparés à ceux des contrôleurs en modes glissants intégral ISMC ainsi que les modes glissants standards. Ces résultats révèlent que le contrôleur proposé présente une erreur de poursuite faible par rapport à la référence, de plus, une plus grande robustesse vis-à-vis des incertitudes et une réponse en mode transitoire plus rapide. Par conséquent, on peut déduire que les performances obtenues par l'approche proposée PSO-PISMIC sont très satisfaisantes en comparaison à celles des PSO-SMC, PSO-ISMC.

II.3. Commande intelligente robuste PISMIC à vitesse du vent fort

En charge totale (Zone III), la puissance électrique produite par l'éolienne doit être maintenue constante. Dans cette zone de fonctionnement, le système de commande a pour objectif de réduire les fluctuations de la puissance de sortie et la vitesse du rotor, tout en réduisant les efforts de la commande, afin d'améliorer la qualité de l'énergie produite par l'éolienne[Raj15] [Jen15] [Bou15].

Pour commander une éolienne à vitesse variable et à calage variable dans la zone à vitesse du vent fort, nous allons utiliser la commande robuste PISMIC-PSO dans les deux cas suivants :

- Commande en couple de la génératrice avec l'angle de calage fixe.
- Commande en couple de la génératrice avec l'angle de calage variable (en pitch).

Le modèle de turbine éolienne utilisé dans cette partie est à une masse ramené sur l'arbre rapide donnée sur la Figure 4.12 suivante :

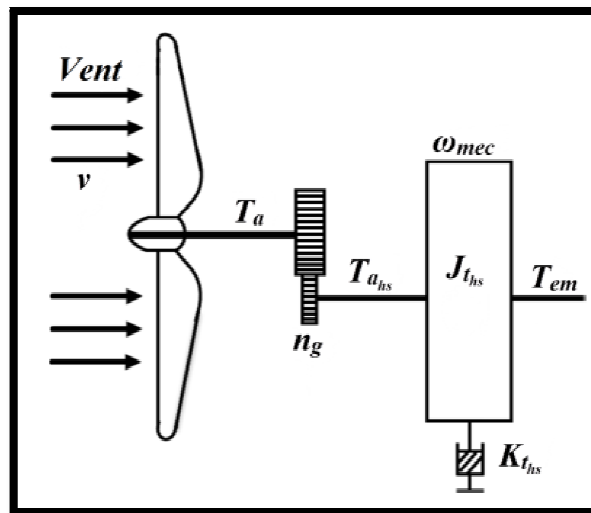


Figure 4.12 : Modèle à une masse de l'éolienne

Reprenons l'équation différentielle qui décrit l'évolution du modèle à une masse :

$$J_{ths}\dot{\omega}_{mec} = T_{ahs} - K_{ths}\omega_{mec} - T_{em} \quad (4.36)$$

Où J_{ths} , K_{ths} et T_{ahs} sont respectivement l'inertie, le coefficient de frottement extérieur à la turbine et le couple aérodynamique ramené sur le côté générateur. Ces paramètres sont donnés comme suit :

$$J_{ths} = J_g + \frac{J_r}{n_g^2}, T_{ahs} = \frac{T_a}{n_g}, K_{ths} = K_g + \frac{K_r}{n_g^2}$$

a. Commande optimale en couple

Soit l'erreur de poursuite en puissance définit comme suit :

$$e_p = P_{nom} - P_g \quad (4.37)$$

La dérivée temporelle de l'erreur de poursuite de la puissance est :

$$\dot{e}_p = \dot{P}_{nom} - \dot{P}_g \quad (4.38)$$

Si on néglige les pertes au niveau de la génératrice, la puissance électrique peut s'écrire:

$$P_g = \omega_{mec} T_{em} \quad (4.39)$$

L'équation de la surface de glissement est donné alors par :

$$\sigma(t) = \left(\gamma + \frac{d}{dt} \right)^{r-1} e_p(t) + K_p e_p(t) + K_i \int_0^\infty e_p(t) dt \quad (4.40)$$

Le degré relatif du système est $r=1$, la surface de glissement modifiée peut être écrite comme suit:

$$\sigma(t) = e_p(t) + K_p e_p(t) + K_i \int_0^\infty e_p(t) dt \quad (4.41)$$

La dynamique de la surface de glissement est donnée par :

$$\dot{\sigma} = (1 + K_p) \dot{e}_p + K_i e_p(t) \quad (4.42)$$

$$\dot{\sigma} = (1 + K_p) (-\dot{\omega}_{mec} T_{em} - \omega_{mec} \dot{T}_{em}) + K_i e_p(t) \quad (4.43)$$

Pour assurer l'existence du mode de glissement sur la surface de commutation, il suffit de vérifier la condition d'Utkin[Utk-92] suivante :

$$\sigma \dot{\sigma} < 0 \quad (4.44)$$

La loi de commande qui satisfait la condition (4.18), est donnée par [Bou15]:

$$\dot{T}_{em} = -\frac{1}{\omega_{mec}} \left[\frac{(1+K_p)}{J_{ths}} (T_{ahs} T_{em} - K_{ths} \omega_{mec} T_{em} - T_{em}^2) - K_i e(t) - K_{sat}(\sigma) \right] \quad (4.45)$$

Où K_i , K_p et α sont les gains de la commande à déterminer leurs valeurs optimales via l'algorithme PSO adaptatif. L'algorithme APSO est utilisé *hors-ligne* afin de minimiser l'erreur de poursuite en puissance.

Démonstration :

Considérons la fonction de *Lyapunov* suivante : $V = \frac{1}{2} \sigma^2$

Sa dérivée par rapport au temps est donnée par: $\dot{V} = \sigma \dot{\sigma}$

En substituant (4.17) dans la dérivée temporelle de la fonction de *Lyapunov* on obtient :

$$\dot{V} = \sigma(1 + K_p)(-\dot{\omega}_{mec}T_{em} - \omega_{mec}\dot{T}_{em}) + K_i e_p(t)$$

Remplaçons la loi de commande proposée (4.17) dans (4.19), on trouve :

$$\dot{V} = -K\sigma \text{ sat}(\sigma)$$

Pour tout $L > 0$, si $\|\sigma\| > L$, $\text{sat}(\sigma) = \text{sign}(\sigma)$

La dérivée de la fonction de *Lyapunov* devient : $\dot{V} = -K \|\sigma\| < 0$

Si $\|\sigma\| < L$, on a $\text{sat}(\sigma) = \frac{\sigma}{L}$ est continue et les trajectoires du système restent à l'intérieur d'une zone d'épaisseur $2L$ (avec L petit) autour de la surface de glissement $\sigma = 0$ appelée couche limite.

Par conséquent, l'erreur de poursuite en puissance converge vers L-voisinage zéro.

▪ Résultats de simulation

Pour tester la performance de la loi de commande proposée, on a réalisé des simulations sur le modèle à une masse de l'éolienne. Les tests ont été effectués avec un profil du vent fortement variable d'une vitesse moyenne de 20 m/s, et en présence d'une perturbation additive sur la commande de 10 KN.m. L'angle de calage est maintenu à sa valeur nominale, soit environ 12°.

Les paramètres numériques de l'éolienne à une masse sont :

$$R = 21.65m, \rho = 1.29kg/m^3, J_{ths} = 3.92 \times 10^5 kg.m^2, K_{ths} = 400 N.m/rad/s,$$

$$P_{nom} = 600kW, \omega_{mec-nom} = 42 tr/mn.$$

Le tableau suivant donne les valeurs optimales des gains de commande calculé à l'aide de l'algorithme APSO :

Iterations	K_p	K_i	K	Iterations	K_p	K_i	K
1	-19.6001	-24.93	0.0010	31	-19.9479	-26.12	0.0061
2	-19.5969	-24.86	0.0020	32	-19.9989	-26.21	0.0067
3	-19.4599	-23.70	0.0016	33	-20.6611	-26.3	0.0070
4	-19.6053	-25.35	0.0030	34	-20.6623	-26.75	0.0070
5	-19.5989	-25.86	0.0035	35	-20.6700	-26.74	0.0070
6	-19.6089	-25.33	0.0041	36	-20.6700	-26.74	0.0070
7	-19.8379	-25.86	0.0055	37	-20.6700	-26.74	0.0070
....				38	-20.6700	-26.74	0.0070
				39	-20.6700	-26.74	0.0070
				40	-20.6700	-26.74	0.0070

Tableau 4.2 : Convergence des gains de commande en couple

Les figures suivantes montrent les trajectoires réelles et nominales, d'une part, de la vitesse du rotor, et d'autre part de la puissance électrique ainsi que leur commande en couple.

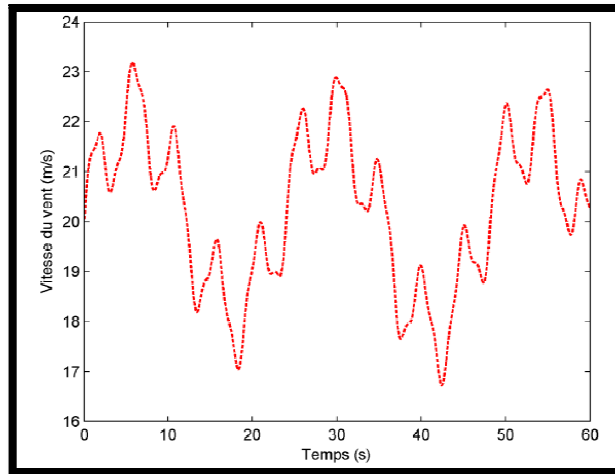


Figure 4.13: Profil du vent fortement variable avec une vitesse moyenne de 20 m/s

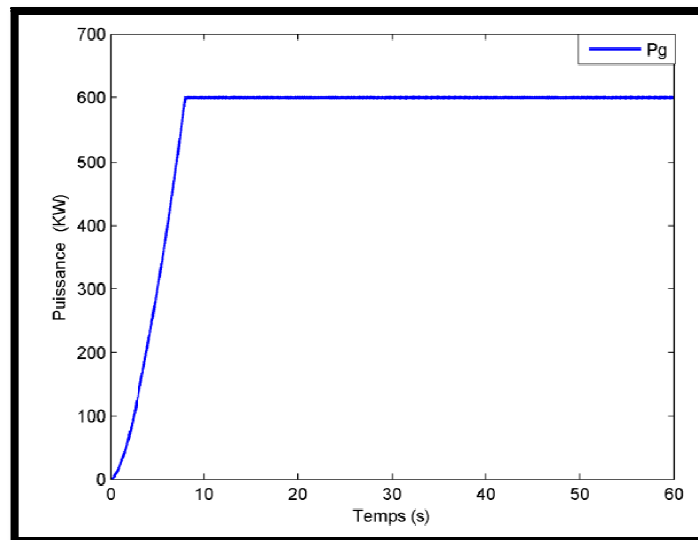


Figure 4.14: Puissance électrique de la génératrice

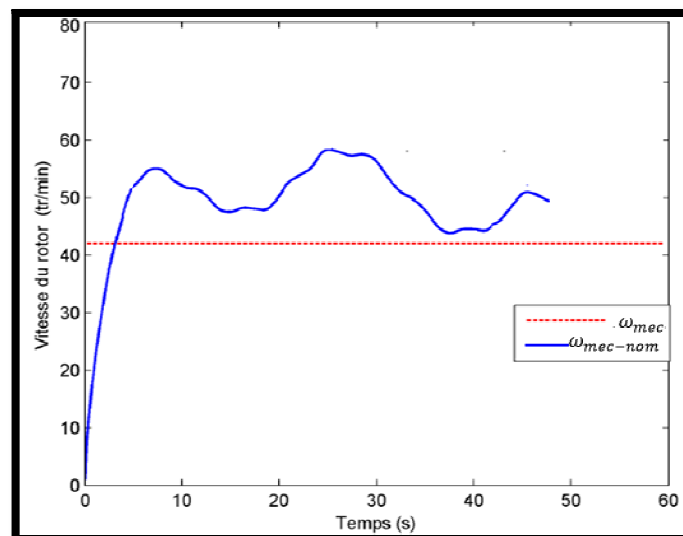


Figure 4.15: Vitesse du rotor

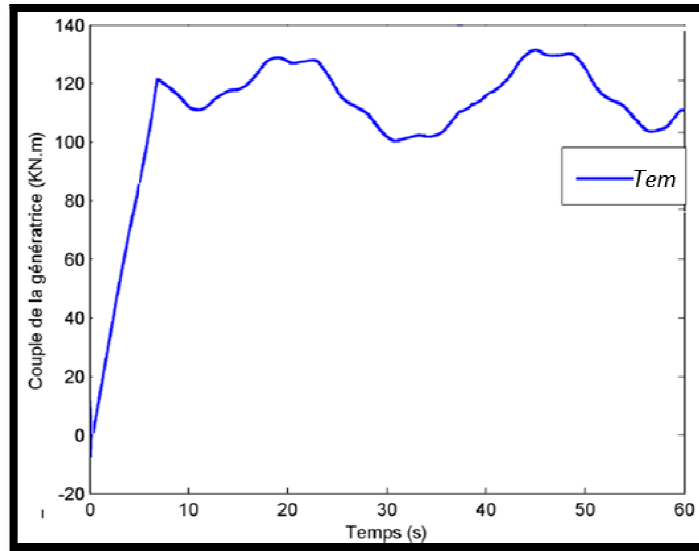


Figure 4.16 : Commande en couple

• Interprétation

La commande en couple par Mode Glissants à action Proportionnelle Intégrale réalise une bonne régulation de la puissance électrique autour de sa valeur nominale (Figure 4.14). Cependant, l'action sur le couple engendre la variation de la vitesse du rotor. Comme indiqué sur la Figure 4.15, la vitesse ω_{mec} dépasse largement sa valeur nominale en atteignant 59 tr/min. En dépit de cette variation de ω_{mec} , la commande T_{em} reste en-dessous de la limite acceptable (Figure 4.16). Donc afin de combler les lacunes de la commande en couple avec un calage fixe, nous proposons dans ce qui suit de commander l'angle de calage.

b. Commande optimale en Pitch

Pour réguler la vitesse du rotor, la commande en couple nécessite une aide de l'action de calage. La commande en pitch permet de maintenir la vitesse du rotor dans des limites acceptables. Pour cette raison, nous allons réaliser une action Proportionnelle Intégrale (PI) en pitch sur l'erreur de régulation en vitesse.

Soit l'erreur de poursuite en vitesse définie par :

$$e_{\omega} = \omega_{mec-nom} - \omega_{mec} \quad (4.46)$$

La loi de commande ainsi proposée est donnée par [Bou15] :

$$\beta = K'_p e_{\omega}(t) + K'_i \int_0^{\infty} e_{\omega}(t) dt \quad (4.47)$$

Où K'_p et K'_i les gains et sont optimisés via l'algorithme PSO adaptatif, en minimisant l'erreur de poursuite en vitesse.

▪ Résultats de simulation

L'approche proposée sera testée sur le même exemple que celui décrit par le paragraphe qui précède :

Le tableau suivant donne les valeurs optimales des gains de commande en Pitch:

Iterations	K'_p	K'_i	Iterations	K'_p	K'_i
1	-18.6001	-20.93	31	-19.9479	-26.12
2	-18.5969	-20.86	32	-20.6680	-26.21
3	-19.4599	-23.70	33	-20.6700	-26.30
4	-18.6053	-22.35	34	-20.6723	-26.75
5	-17.5989	-20.86	35	-21.5600	-29.01
6	-19.6089	-25.33	36	-21.5600	-29.01
7	-19.8379	-26.86	37	-21.5600	-29.01
....			38	-21.5600	-29.01
			39	-21.5600	-29.01
			40	-21.5600	-29.01

Tableau 4.3 : Convergence des gains de commande en Pitch

Les Figures suivantes donnent les résultats de simulation :

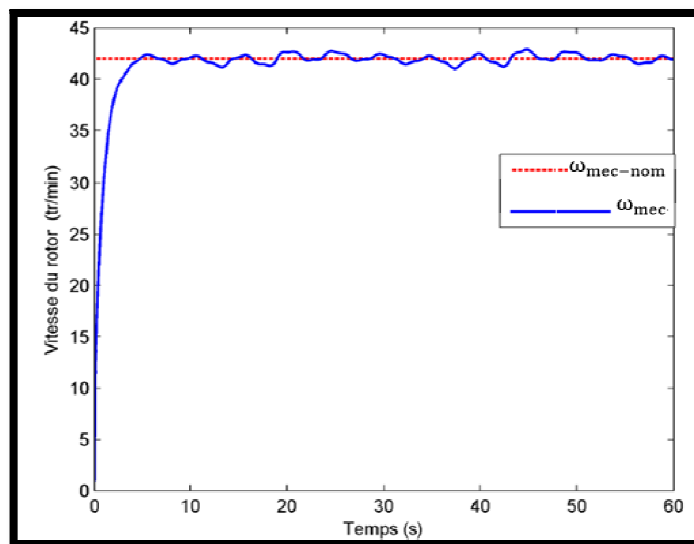


Figure 4.17: Vitesse du rotor

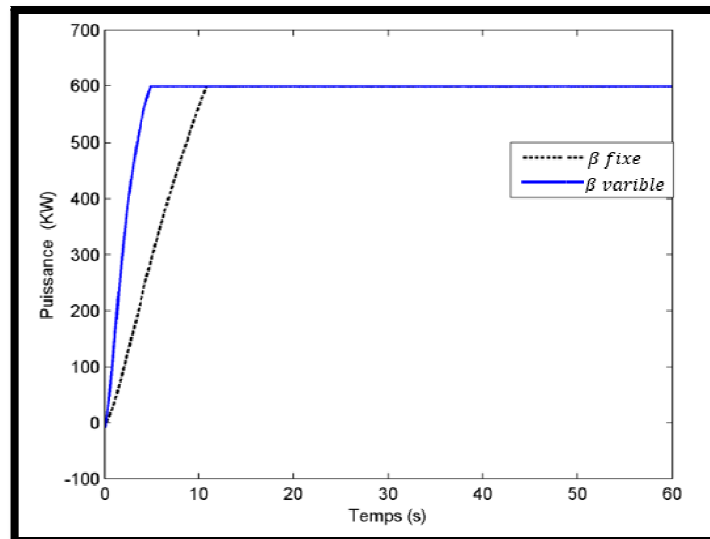


Figure 4.18: Puissance électrique

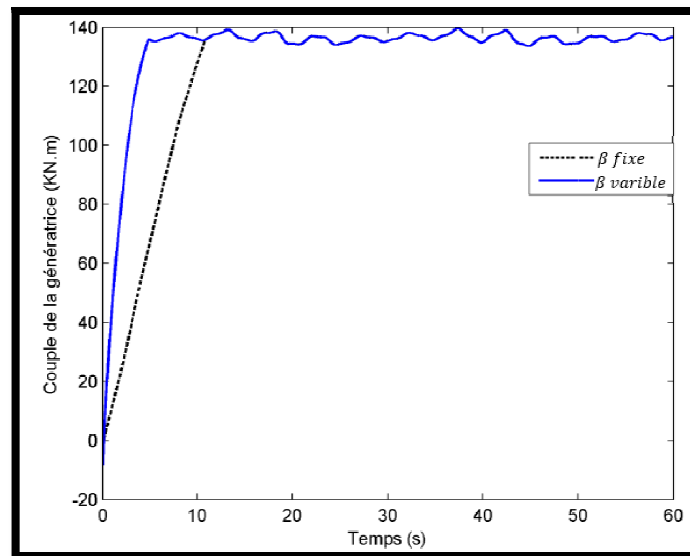


Figure 4.19: Couple de la génératrice

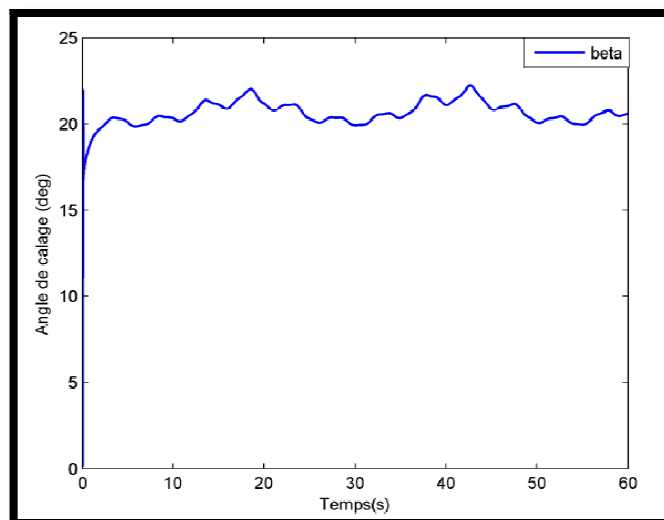


Figure 4.20: Commande en Pitch

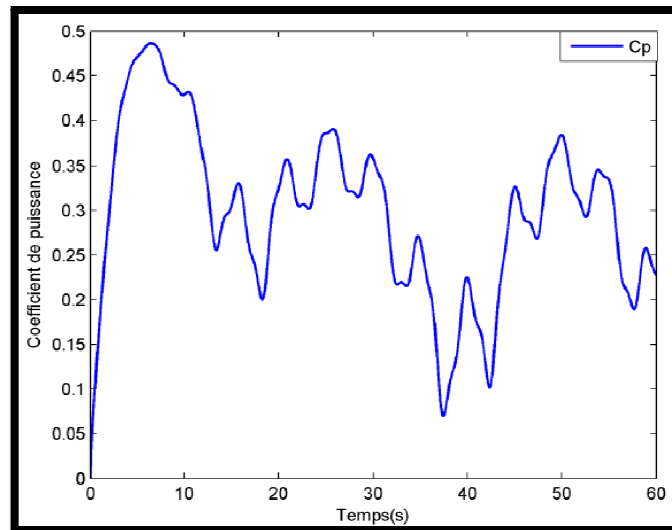


Figure 4.21: Coefficient de rendement

▪ Interprétations

La commande PISMIC réalise un bon compromis entre la régulation de la puissance et la vitesse du rotor. Comme on peut le remarquer sur la Figure 4.17, la vitesse du rotor est bien régulée autour de sa valeur nominale.

La régulation de la puissance électrique autour de sa valeur nominale est aussi assurée et sa convergence vers sa référence est réalisée en un temps de réponse minimal par le contrôleur PISMIC avec angle de calage variable, comparée à celle de PISMIC à calage fixe, ce qui permet une meilleure régulation de la puissance générée par l'éolienne comme la montre la Figure 4.18.

Du fait de la présence de la commande en pitch (Figure 4.20), les fluctuations du couple sont réduites (Figure 4.19). La Figure 4.21 présente l'évolution du coefficient de puissance tout en restant en dessous de la limite acceptable. L'utilisation de la commande en couple et en pitch, a montré alors, qu'on peut à la fois réaliser une bonne poursuite de référence de puissance tout en maintenant la vitesse du rotor proche de sa valeur nominale.

L'approche proposée a montré alors, une bonne performance de ce type de commande en termes de stabilité et de rapidité de convergence, malgré la présence des incertitudes et des fortes variations de la vitesse du vent.

III. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé deux lois de commande robustes optimales pour le système éolien, la première loi de commande adaptative robuste à base des Modes Glissants à action Proportionnelle Intégrale PISMIC, appliquée à une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) en présence d'incertitudes larges dans la zone de vitesse du vent faible et la même loi de commande soit appliquée au modèle à une masse d'une éolienne à vitesse variable dans la zone de vitesse du vent fort avec l'angle de calage fixe et variable.

Dans la première partie de ce chapitre, l'objectif principal de commande de la GADA est d'optimiser l'extraction de l'énergie pour les vents faibles. A cet effet nous avons utilisé un

contrôleur intelligent de type PISM-PSO pour estimer les dynamiques incertaines basées sur l'orientation du flux statorique de la génératrice.

Dans la deuxième partie, nous avons utilisé le même contrôleur mais dans la zone des vitesses du vent fort à calage fixe et variable dans l'objectif de réguler la puissance électrique produite et la vitesse de rotation de la génératrice autour de leurs valeurs nominales.

La simulation est sur le logiciel Matlab/Simulink. Ils montrent que les différents contrôleurs proposés présentent l'avantage d'être intelligents, robustes et donnent de bonnes performances en termes d'efficacité, de stabilité et de poursuite.

Conclusion générale

Dans le cadre de la réalisation du mémoire de doctorat, nous avons choisi de travailler sur le thème de la conversion et production de l'énergie éolienne. Pour cela, nous avons pris pour objectif l'étude et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne constitué d'une turbine de moyenne puissance associée à une génératrice asynchrone à double alimentation.

Les travaux de recherche présentés dans cette thèse se placent dans le cadre de l'optimisation de l'énergie extraite du vent. Cette optimisation se fait à travers le développement des systèmes de commande non linéaires robustes avec la réduction des charges subies par les différents éléments de la machine éolienne. Après avoir modélisé le système de conversion de l'énergie éolienne composé de pales, de pièces mécaniques et d'un générateur à induction, nous avons élaboré des lois de commande intelligentes permettant de répondre au mieux à des exigences spécifiques à chaque zone de fonctionnement des éoliennes à vitesse variable.

Les différents outils intelligents exploités tout au long de ce travail sont introduit essentiellement pour estimer les parties incertaines du modèle mathématique du système afin d'assurer une bonne convergence avec un rejet des perturbations et une robustesse vis-à-vis les incertitudes, deuxièmement pour optimiser des paramètres et des gains dans le but d'avoir une réponse rapide et une poursuite du système.

Ce travail est divisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre donne un rappel de notions fondamentales nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne mené d'une machine asynchrone à double alimentation (GADA), différents types d'éoliennes et leurs modes de fonctionnement ont été décrits, une étude théorique sur la GADA concernant ces modes de fonctionnement, ses avantages et inconvénients. Et par la suite les modèles mathématiques issus des lois de la mécanique et de l'aérodynamique qui en découlent, avec la présentation d'un modèle à deux masses d'une éolienne à vitesse variable, la modélisation de la GADA fonctionnant en génératrice en se basant sur quelques hypothèses simplificatrices.

Le deuxième chapitre donne des généralités et des formulations mathématiques des techniques des commandes avancées utilisés dans ce mémoire à savoir les Modes Glissants, les Supports Vecteurs Machines à Régression, le Backstepping et l'algorithme d'Optimisation des Essais Particulaires.

Le troisième chapitre donne une étude détaillée du SCEE, à savoir les zones de fonctionnements ainsi les objectifs souhaités de la commande. Ce chapitre est consacré à l'élaboration des lois de commande permettant, lorsque les vents sont faibles, d'atteindre l'objectif de maximiser l'énergie capturée et donc l'énergie produite par l'éolienne tout en assurant la sécurité du système vis-à-vis les incertitudes.

Dans cette partie, nous avons présentés deux lois de commande adaptative à vent faible à partir du modèle non linéaire à deux masses du système éolien ; une commande à base des Supports Vecteurs Machine à Régression (SVR) combinée à la commande des Modes

Glissants Standard (SMC) et une commande à base de la technique du Backstepping avec l'Optimisation par Essaims Particulaires (PSO) Adaptatif. L'objectif de ces deux outils intelligents est ajuster la vitesse du rotor et la faire converger vers sa référence afin de tirer le maximum de la puissance et l'estimation de la dynamique inconnue en vue d'assurer une bonne robustesse et une stabilité en boucle fermée via le critère de *Lyapunov*. La technique des SMC a prouvé une robustesse par rapport aux variations des paramètres du système et aux perturbations externes mais lorsque le système est fortement instable il y a l'apparition de phénomène de réticence, c'est pour cela que nous avons combiné les SVR au Modes Glissants. Cette approche donne de meilleures performances, mais l'entrée de commande est toujours discontinue et le phénomène de réticence persiste toujours. Ainsi, le recours à la commande avec Backstepping connu par sa rapidité extrême et sa simplicité de mise en œuvre. Cette approche permet d'améliorer la connaissance du système dans le but de synthétiser une loi de commande robuste intelligente qui permet de réduire en grande partie le phénomène de réticence. L'utilisation de l'algorithme PSO adaptatif pour l'optimisation des gains de Backstepping a apporté une amélioration à la commande en termes de vitesse de convergence et en termes de sécurité du système, en comparaison au contrôleur SVR-SMC.

Une étude comparative des méthodes de commande utilisées est exposée à la fin de ce chapitre, pour positionner chaque technique de point de vue performances dynamiques et statiques.

Dans le dernier chapitre, notre objectif s'est orienté vers l'analyse et la synthèse d'une commande robuste de la GADA. Ce chapitre est divisé en deux parties :

Dans la première partie, nous avons concentré notre recherche sur l'utilisation d'une commande vectorielle à orientation du flux statorique. Donc cette partie est réservée au développement d'un modèle pour le contrôle indépendant des puissances active et réactive statorique en partant de la commande vectorielle de la GADA à flux statorique orienté, dans le but est l'amélioration de la qualité de la puissance produite et transmise et aussi le maintien de la sécurité du système. L'évaluation de cet objectif est basée sur l'annulation de la puissance réactive et la détermination de la loi de commande du couple. Nous avons élaborés le contrôleur PISMC qui est une commande de modes glissants à action Proportionnelle Intégrale amélioré avec l'algorithme PSO. La technique des modes glissants est utilisée pour assurer une bonne robustesse. La loi de commande synthétisée permet de remédier aux inconvénients des modes glissants standards comme le phénomène de réticence. PSO est utilisé afin d'estimer les gains du contrôleur et donner les valeurs optimales. Cette commande présente l'avantage de réaliser un contrôle découplé des grandeurs réelles de la machine (couple et vitesse), à l'instar de la commande de la machine à courant continu où le découplage est naturel.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons travaillé dans la zone de fonctionnement à vitesse du vent fort. Dans cette zone, le système de commande a pour objectif de réguler la puissance et la vitesse de rotation, autour de leurs valeurs nominales. Pour commander ce système, deux moyens sont possibles : le calage des pales et le couple de la génératrice. Nous avons utilisé la même loi de commande PISMC pour la commande en couple avec angle de calage fixe, cette stratégie de commande qui agit seulement sur le couple et maintient l'angle de calage fixe, conduit bien à des résultats acceptables pour la régulation de la vitesse du rotor mais avec de faibles performances en régulation de puissance. Alors pour apporter une amélioration à notre loi de commande nous avons utilisé une commande robuste optimale en

pitch à action Proportionnelle Intégrale. Donc nous avons utilisé la même loi de commande PISMIC appliquée au modèle à une masse d'une éolienne à vitesse variable dans la zone de vitesse du vent fort avec l'angle de calage variable afin de réguler la puissance électrique produite et la vitesse de rotation de la génératrice, autour de leurs valeurs nominales.

Les simulations sont réalisées sur le logiciel Matlab/Simulink, montrent que les différents contrôleurs proposés, qualifiés d'intelligents, robustes et optimales donnent de bonnes performances en termes d'efficacité, de stabilité

Perspectives

Les résultats obtenus au cours de cette thèse sont encourageants. Les avantages potentiels des contrôleurs pour les systèmes de conversion d'énergie éolienne ont été analysés; il semble que ces approches de commande permettent un bon fonctionnement de l'éolienne. Cependant :

- Cette étude est limitée aux données disponibles, une validation plus poussée du modèle avec d'autres éoliennes, d'autres points de fonctionnement, différentes perturbations réelles, et l'adaptation de la commande proposée dans la zone de transition (entre II et III) serait intéressantes.
- La validation des contrôleurs développés avec une mise en œuvre expérimentale sur une turbine réelle serait très utile.
- Il serait aussi intéressant d'étudier la robustesse et la stabilité de ces contrôleurs lorsque l'éolienne est intégrée au réseau électrique(par rapport aux contraintes du réseau, creux de tension), ou bien à un parc éolien que ce soit autonome ou dans un site hybride.

Références

- [Abd00] E.S. Abdin and W. Xu. "Control design and dynamic performance analysis of a wind turbine-induction unit". IEEE Transaction on Energy Conversion, 15(1), pp. 91-96, 2000.
- [Abo17] S. Aboulem, E-M. Boufounas, I. Boumhidi. (2017) "Optimal tracking and robust intelligent based PI power controller of the wind turbine systems." Intelligent Systems and Computer Vision, Fez, Morocco. DOI: 10.1109/ISACV.2017.8054981
- [Abu08] N. Abu-Tabak «Stabilité dynamique des systèmes électriques multi machines: modélisation, commande, observation et simulation », Thèse de Doctorat de l'école centrale de LYON 19 Novembre 2008.
- [Ack00] Ackermann, T., &Söder, L. (2000) "Wind energy technology and current status: a review," Renewable and sustainable energy reviews, 4(4), 315-374.
- [Aim04] S. Al Aimani, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse de doctorat, École Centrale de Lille, 2004.
- [Asl16] H. J. Asl, and J. Yoon, "Power capture optimization of variable-speed wind turbines using an output feedback controller", Renewable Energy, Vol. 86, pp. 517-525, 2016.
- [Bau10] Bauer, S., Köhler, S., Doll, K., &Brunsmann, U. (2010, June). FPGA-GPU architecture for kernel SVM pedestrian detection. In Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), 2010 IEEE Computer Society Conference on (pp. 61-68). IEEE.
- [Bel09] Beltran, B., Ahmed-Ali, T., &Benbouzid, M. E. H. (2009). High-order sliding-mode control of variable-speed wind turbines. IEEE Transactions on Industrialelectronics, 56(9), 3314-3321.
- [Bel10] B. Beltran, « Contribution à la Commande Robuste des Eoliennes à Base de Génératrices Asynchrones Double Alimentation: Du Mode Glissant Classique au Mode Glissant D'ordre Supérieur » Thèse de Doctorat Université de Bretagne Occidentale 2010.
- [Ben80] Benettin, G., Galgani, L., Giorgilli, A., &Strelcyn, J. M. (1980). "Lyapunov characteristic exponents for smooth dynamical systems and for Hamiltonian systems"; a method for computing all of them. Part 1: Theory. Meccanica, 15(1), 9-20.
- [Bou05] J. Boumhidi, « Commande robuste par modes glissants de premier ordre et d'ordre supérieur : Application aux systèmes robotisés », Thèse de doctorat national en automatique, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, 2005.
- [Bou06] B. Boukhezzar, « Sur les Stratégies de Commande pour l'Optimisation et la Régulation de Puissance des Eoliennes à Vitesse Variable », Thèse de doctorat, Université de Paris XI, France, 2006.
- [Bou13] E-M. Boufounas, J. Boumhidi, N. Farhane and I. Boumhidi, "Neural network sliding mode controller for a variable speed wind turbine", Control and Intelligent Systems, vol. 41, no. 4, pp. 251-258, 2013.
- [Bou14] E-M. Boufounas, J. Boumhidi and I. Boumhidi, "Optimal neural network sliding mode control for a variable speed wind turbine based on APSO algorithm", Second IEEE World Conference on Complex Systems (WCCS'14), Agadir, Morocco, November 10-12, pp. 419-424, 2014.
- [Bou15] Boufounas, E. M. (2015). Contribution à la commande robuste d'une éolienne à vitesse variable à base d'algorithmes d'apprentissage automatique.
- [Bre10] V. Bregeault, « Quelques contributions à la théorie de la commande par modes glissants », Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 2010.
- [Cam04] H. Camblong. V. Rodriguez, and J. R. Puiggoli. "Principles of a simulation model for a variable- speed pitch-regulated wind turbine", Wind Engineering, 28(2), pp. 157 – 175, 2004.
- [Can04] J.M. Canini. « Les différentes technologies pour les générateurs éoliens ». In Production décentralisée état et perspectives, Paris-Nord Villepinte, Club 15 : Réseau d'énergie

- électrique, 2004.
- [Caw06] Cawley, G. C., Talbot, N. L., &Chapelle, O. (2006). Estimating predictive variances with kernel ridge regression. In Machine Learning Challenges. Evaluating Predictive Uncertainty, Visual Object Classification, and RecognisingTextual Entailment (pp. 56-77). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [CCST99] Cristianini, N., Campbell, C., &Shawe-Taylor, J. (1999). “Dynamically adapting kernels in support vector machines”. In Advances in neural information processing systems (pp. 204-210).
- [Cha00] Chapelle, O., &Vapnik, V. (2000). “Model selection for support vector machines”. In Advances in neural information processing systems (pp. 230-236).
- [Cha02] Chapelle, O., Vapnik, V., Bousquet, O., &Mukherjee, S. (2002). “Choosing multiple parameters for support vector machines”. Machine learning, 46(1-3), 131-159.
- [Cha14] Charfeddine, M., Jouili, K., &BenhadjBraiek, N. (2014). “Cascade control for nonlinear non minimum phase system based on Backstepping approach and input output linearization”. International Journal of Control Energy and Electrical Engineering, 1, 43-49.
- [Che02] Cherkassky, V., & Ma, Y. (2002, August). “Selection of meta-parameters for support vector regression”. In International Conference on Artificial Neural Networks (pp. 687-693). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [Che03] Cherkassky, V., & Ma, Y. (2003). Comparison of model selection for regression. Neural computation, 15(7), 1691-1714.
- [Cle02] M. Clerc and J. Kennedy. “The particle swarm: explosion, stability, and convergence in multi-dimensional complex space”. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 6, pp. 58–73, 2002.
- [Cun01] G. Cuntz, « Eoliennes et aérogénérateurs, guide de l'énergieéolienne », Edisud, pp. 11–13, 2001.
- [Dub07] C. Dubois, livre « guide de l'éolien, technique et pratique », Département de Génie Electrique Spécialité Electrotechnique, 2007.
- [Ebe95] R. C. Eberhart, and J. Kennedy, (1995) “A new optimizer using particles swarm theory”. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro-Machine and Human Science, Nagoya: 39-43.
- [Eol1] <http://www.ammonit.com/fr/windinfo/informations-eolien>
- [Eol2] http://tpe.samron.free.fr/TPESamRon/I__Histoire_et_fonctionnement_de_leolienne.html
- [Eol3] <http://www.info-eolien.com/historique.html>
- [Eol4] https://www.huffpostmaghreb.com/2016/04/20/maroc-energie-eolienne-afriquemoyen-orient_n_9736234.html
- [Eol5] <http://www.nordex-online.com>
- [Ern85] J. Ernst and W. Leonhard. “Optimisation of wind energy output of variable speed wind turbines”. In Wind Power, San Francisco, CA, 1985.
- [Far12] F. Farivar, M. A. Shoorehdeli, M.A. Nekoui, M. Teshnehlab, “Chaos control and modified projective synchronization of unknown heavy symmetric chaotic gyroscope systems via Gaussian radial basis adaptive backstepping control”, Nonlinear Dyn. 67 (2012) 1913-1941.
- [Fra05] B. Francois, B. Robyns, E. De Jaeger, F. Minne, “Technologies d'éolienne de forte puissance connectée au réseau de moyenne tension”, Revue REE, no. 5, pp. 65-74, 2005.
- [Gai10] A. Gaillard, « 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 en génie électrique, Université de Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2010.
- [GMEC] https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdfactualites/gwec_global_wind_2016_report_fr.pdf
- [Gon11] Gong, L. F., & Zhang, Y. (2011). “PSO-SVR evaluation model for power systems reliability

- evaluation". Computer Simulation, 7, 048.
- [Gos14] Gosens, J., & Lu, Y. (2014) "Prospects for global market expansion of China's wind turbine manufacturing industry," Energy Policy, 67, 301-318.
- [Han00] Hand, M. M., & Balas, M. J. (2000) "Systematic controller design methodology for variable-speed wind turbines," Wind Engineering, 24(3), 169-187.
- [Hei98] S. Heier. "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems". John Wiley & Sons Ltd, 1998.
- [Hon14] C-M. Hong, F-S. Cheng, & C-H. Chen, "Optimal control for variable-speed wind generation systems using general regression neural network", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 60, pp. 14-23, 2014.
- [Hua08] Hua, C., Feng, G., & Guan, X. (2008). "Robust controller design of a class of nonlinear time delay systems via Backstepping method". Automatica, 44(2), 567-573.
- [Jen15] D. Jena, S. Rajendran. "A review of estimation of effective wind speed based on control of wind turbines". Renew Sust Energy Rev, vol. 43, pp.1046–1052, 2015.
- [Joh06] Johnson, K. E., Pao, L. Y., Balas, M. J., &Fingersh, L. J. (2006) "Control of variable-speed wind turbines: standard and adaptive techniques for maximizing energy capture," IEEE control systems, 26(3), 70-81.
- [Kai16] Kaivo-oja, J., Vehmas, J. and Luukkanen, J. (2016) "Trend analysis of energy and climate policy environment: Comparative electricity production and consumption benchmark analyses of China, Euro area, European Union, and United States," Renewable and Sustainable Energy Reviews, 60, 464–74.
- [Kas13] A.M. Kassem, K.M. Hasaneen, and A.M. Yousef. (2013) "Dynamic modeling and robust power control of DFIG driven by wind turbine at finite grid." Electric Power Systems Research 44: 375–382.
- [Keer02] Keerthi, S. S. (2002). Efficient tuning of SVM hyperparameters using radius/margin bound and iterative algorithms. IEEE Transactions on Neural Networks, 13(5), 1225-1229.
- [Kok12] Sepulchre, R., Jankovic, M., &Kokotovic, P. V. (2012). "Constructive nonlinear control. Springer Science & Business Media".
- [Kok99] Kokotovic, P., Khali, H. K., &O'reilly, J. (1999). "Singular perturbation methods in control: analysis and design" (Vol. 25). Siam.
- [Kou15] Kousksou, T., Allouhi, A., Belattar, M., Jamil, A., El Rhafiki, T. and Zeraouli, Y. (2015) "Morocco's strategy for energy security and low-carbon growth", Energy, 84, 98–105.
- [Kou16] M. Koumir, A. E. Bakri, and I. Boumhidi, "Optimal control for a variable speed wind turbine based on extreme learning machine and adaptive Particle Swarm Optimization", 5th International Conference on Systems and Control, ICSC'2016, Marrakech, Morocco, pp. 151-156, 25-27 May 2016.
- [Kou17] M. Koumir, A. E. Bakri, and I. Boumhidi, "Integral Sliding Mode Control Based on Extreme Learning Machine for a Wind Turbine", Control and Intelligent Systems, 45(3), 2017.
- [Koum17] Koumir, M. (2017). Commande intelligente d'une éolienne à vitesse variable.
- [Kri95] Kritic, M., Kanellakopoulos, I., &Kokotovic, P. (1995). "Nonlinear and Adaptive Control Design. Adaptive and Learning systems for signal processing, communications and control". John Wiley and Sons, 605, 10158-0012.
- [Lar00] A. Larson, "The Power Quality of Wind Turbines ", PhD Thesis, Chalmers University of Technology, Sweden, 2000.
- [Lev03] A. Levant, "Universal Higher-order Sliding Modes, differentiation and Output feedback control", International Journal of control, 76(9/10), pp. 924–941,2003.
- [Lin05] XIAO, J. H., LIN, J., & LIU, J. (2005). Short-term Forecasting Model of Regional Economy Based on SVR [J]. Acta SimulataSystematicaSinica, 12, 004.
- [Lis11] M. Liserre, R. Cárdenas, M. Molinas, J. Rodríguez, "Overview of Multi-MW Wind

- Turbines and Wind Parks,” IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 58, no. 4, pp. 1081–1095, April 2011.
- [Liu16] Liu, Y. J., Gao, Y., Tong, S., & Li, Y. (2016). “Fuzzy approximation-based adaptive backstepping optimal control for a class of nonlinear discrete-time systems with dead-zone”. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 24(1), 16-28.
- [Lou10] L. Louze, « Production décentralisée de l'énergie électrique : Modélisation et contrôle d'une génératrice asynchrone auto excitée », Thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine, 2010.
- [Man10] Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2010). “Wind energy explained: theory, design and application”. John Wiley & Sons.
- [Man16] Mansouri, M. M., Nayeripour, M. & Negnevitsky, M. (2016) “Internal electrical protection of wind turbine with doubly fed induction generator”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 55, 840-855.
- [Mat99] Mattera, D., & Haykin, S. (1999, February). “Support vector machines for dynamic reconstruction of a chaotic system”. In Advances in kernel methods (pp. 211-241). MIT Press.
- [Men18] Menezes, E. J. N., Araújo, A. M. & da Silva, N. S. B. (2018) “A review on wind turbine control and its associated methods,” Journal of Cleaner Production, 174, 945-953.
- [Mer07] F. Merrahi, « Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne) », Mémoire de Magister en Automatique, Ecole Nationale Polytechnique, 2007.
- [Mir07] A. Mirecki, X. Roboam, F. Richardeau, “Architecture Complexity and Energy Efficiency of Small Wind Turbines”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 54, no. 1, pp. 660-670, 2007.
- [Mul08] B. Multon, «Energie électrique : les enjeux». Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2008.
- [ONE17] Office National d'Electricité ONE: Branche Electricité / Rapport d'Activités 2016. <http://www.one.org.ma> accessed Dec. 21, 2017.
- [Par05] J. B. Park et al, “A Particle Swarm Optimization for Economic Dispatch with Non smooth Cost Function”, IEEE Transactions On Power System, 20(1), pp. 34–42, 2005.
- [Per02] Perruquetti, W., & Barbot, J. P. (Eds.). (2002). “Sliding mode control in engineering” (Vol. 11). M. Dekker.
- [Pin05] Yang, J. F., Zhai, Y. J., Wang, D. F., & Xu, D. P. (2005). Time series prediction based on support vector regression. PROCEEDINGS-CHINESE SOCIETY OF ELECTRICAL ENGINEERING, 25(17), 110.
- [Pro10] Prowind Converter Data Sheet. accessed October 2010, Available: www.converteam.com/majic/dl/4/doc/.../5520_prowind_en_ansicht.pdf.
- [Qiu05] Qiu, S., & Lane, T. (2005). “Multiple kernel learning for support vector regression. Computer Science Department”, The University of New Mexico, Albuquerque, NM, USA, Tech. Rep, 1.
- [Raj15] Rajendran S, Jena D. “Validation of an integral sliding mode control for optimal control of a three blade variable speed variable pitch wind turbine”. Electrical Power and Energy Systems, vol. 69, pp. 421–429, 2015.
- [Sef12] S. Sefriti, J. Boumhidi, R. Naoual and I. Boumhidi, “Adaptive Neural Network Sliding Mode Control for Electrically-Driven Robot Manipulators”, Journal of Control Engineering and Applied Informatics, 14(4), pp. 27-32, 2012.
- [Sel09] Selvam, K., Kanev, S., van Wingerden, J. W., van Engelen, T., & Verhaegen, M. (2009). Feedback-feedforward individual pitch control for wind turbine load reduction. International Journal of Robust and Nonlinear Control: IFAC Affiliated Journal, 19(1), 72-91.
- [Sha04] Shawe-Taylor, J., & Cristianini, N. (2004). “Kernel methods for pattern analysis”. Cambridge university press.

- [Sht13] Y. Shtessel, C. Edwards, C. Fridman, and A. Levant, “Sliding mode control and observation,” *Control engineering*, Boston: Birkhäuser, vol. 10, pp. 978-980, 2013.
- [Slo11] [Sloth, C., Esbensen, T., &Stoustrup, J. (2011). Robust and fault-tolerant linear parameter-varying control of wind turbines. *Mechatronics*, 21(4), 645-659.
- [Slo83] J.J. Slotine and S.S. Sastry, “Tracking control of nonlinear system using sliding Surface, with application to robotic manipulators”, *Int. Jour. of Control*, vol. 38, pp. 465-492, 1983.
- [Slo84] J.J.E. Slotine, “Sliding controller design for nonlinear systems”, *Int.Jour. of Cont.*, vol. 40, no. 2, pp. 421-434, 1984.
- [Slo91] J.J.E. Slotine and W. Li. “Applied nonlinear control”, Prentice-Hall Englewood Cliffs, New Jersey, vol. 461. 1991.
- [Smo02] Schölkopf, B., Smola, A. J., & Bach, F. (2002). “Learning with kernels: support vector machines, regularization, optimization, and beyond”. MIT press.
- [Smo04] Smola A.J et Scholkopf B.2004. “A tutorial on support vector regression”. *Statistics and Computing*, vol. 14, p. 199-222.
- [Sto04] Stol, K. A. (2004). “Geometry and Structural Properties for the Controls Advanced Research Turbine (CART) from Model Tuning”: August 25, 2003--November 30, 2003 (No. NREL/SR-500-32087). National Renewable Energy Lab., Golden, CO (US).
- [Toh15] Tohidi, A., Hajieghrary, H., & Hsieh, M. A. (2016). “Adaptive disturbance rejection control scheme for DFIG-based wind turbine: Theory and experiments”. *IEEE Transaction Power Electronic*, 52(3), 2006-2015.
- [Ton10] Tong, W. (2010). “Wind power generation and wind turbine design”. WIT press.
- [Tra10] D-H. Tran, « Conception Optimale Intégrée d’une chaîne éolienne « passive » : Analyse de robustesse, validation expérimentale », Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2010.
- [Un98] Gunn, S. R. (1998). “Support vector machines for classification and regression”. *ISIS technical report*, 14(1), 5-16.
- [Utk06] V. Utkin and Hoon Lee, “Chattering problem in Sliding Modes Control Systems”, *VSS’06*, Alghero Italy, pp. 346-350, 2006.
- [Utk92] V. Utkin. “Sliding modes in control optimization”. Springer Verlag, USA 1992.
- [Utk99] V. Utkin, J. Guldner and J. Shi, “Sliding Mode Control”, *Electromechanical Systems*, 1999.
- [Van02] G.Vankuik, “Is Research Ready? What Drives the Developments?”, *Global Wind Power Conference Proceedings*, Paris, 2002.
- [Van06] Van den Bergh, F., &Engelbrecht, A. P. (2006). “A study of particle swarm optimization particle trajectories. *Information sciences*”, 176(8), 937-971.
- [Vap00] Vapnik, V., & Mukherjee, S. (2000). « Support vector method for multivariate density estimation”. In *Advances in neural information processing systems* (pp. 659-665).
- [Vap99] Vapnik, V. N. (1999). “An overview of statistical learning theory”. *IEEE transactions on neural networks*, 10(5), 988-999.
- [Voj01] Vojislav, Kecman (2001). *Learning and soft computing: support vector machines, neural networks, and fuzzy logic models*. MIT press.
- [Vri83] O. D. Vries, “On the theory of the horizontal axis wind turbine”, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 15(1), pp. 77-96, 1983.
- [Wan05] Wang, L. (Ed.). (2005). “Support vector machines: theory and applications” (Vol. 177). Springer Science & Business Media.
- [Wan07] H.Wang, D. Pi, and Y. Sun. “Online SVM regression algorithm-based adaptive inverse control”. *Neuro computing*, 70(4-6):952–959, 2007.
- [Win 83] J. R. Winkelman and S. H. David, “Control design and performance analysis of a 6 MW wind turbine generator”, *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, 102(5), pp. 1340-1347, 1983.
- [WWEA17] World Wind Energy Association (WWEA). Statistics, June 8, 2017, available online: <http://www.wwindea.org>, accessed Dec. 21, 2017

- [Yan12] Yang, L., Xu, Z., Ostergaard, J., Dong, Z. Y., & Wong, K. P. (2012). “Advanced control strategy of DFIG wind turbines for power system fault ride through”. *IEEE Transactions on power systems*, 27(2), 713-722.
- [Zha07] J-R. Zhang, J. Zhang, T-M. Lok, and M. R. Lyu. (2007) “A hybrid particle swarm optimization back-propagation algorithm for feedforward neural network training.” *Applied Mathematics and Computation* 185: 1026–1037.
- [Zhu09] Zhu, Z. A., Chen, W., Wang, G., Zhu, C., & Chen, Z. (2009, December). “P-pack SVM: Parallel primal gradient descent kernel SVM. In *Data Mining*”, 2009. ICDM'09. Ninth IEEE International Conference on (pp. 677-686). IEEE.

Annexe A

Caractéristique de l'éolienne utilisée

1. Paramètres de la turbine éolienne

Dans cette thèse, nous avons testé nos algorithmes sur une éolienne à vitesse variable de type CART (Controls Advanced Research Turbine) qui est installée sur le site du NWTC (National Wind Technology Center). Elle est à axe horizontal avec un mât de 35 m et possède deux pales [Bou06][Sto04].



Figure A.1 : Eolienne CART au NWTC, Golden, Co [Sto04]

PARAMETRE	SIGNIFICATION
Diamètre du rotor	43.3 m
Rapport de transmission	43.165
Hauteur du moyeu	36.6 m
Puissance électrique nominale	600 kW
Vitesse nominale du rotor	42 tr/min
Couple maximal du générateur	162 kN.m
Vitesse maximale du rotor	53 tr/min
Vitesse maximale du système de calage	19 °/s
Maximum de l'angle de calage	30 °
Minimum de l'angle de calage	-5 °

Tableau 1 : Caractéristiques de l'éolienne

2. Coefficients de puissance et de couple de la turbine éolienne [Bou 06] et [Sto04]

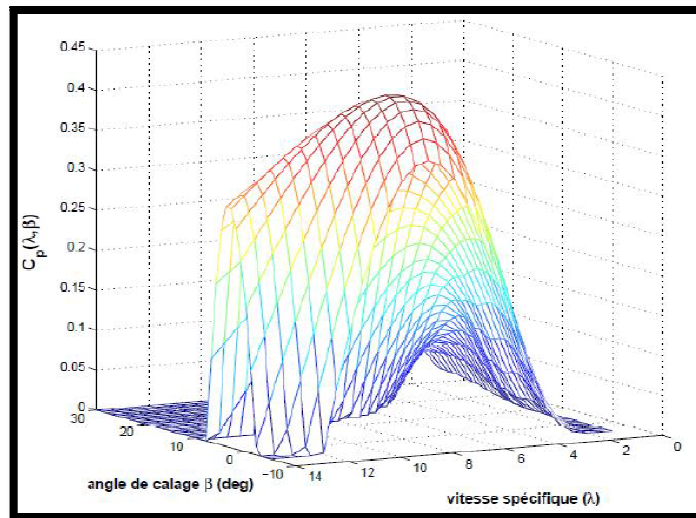


Figure A.2 : Coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$

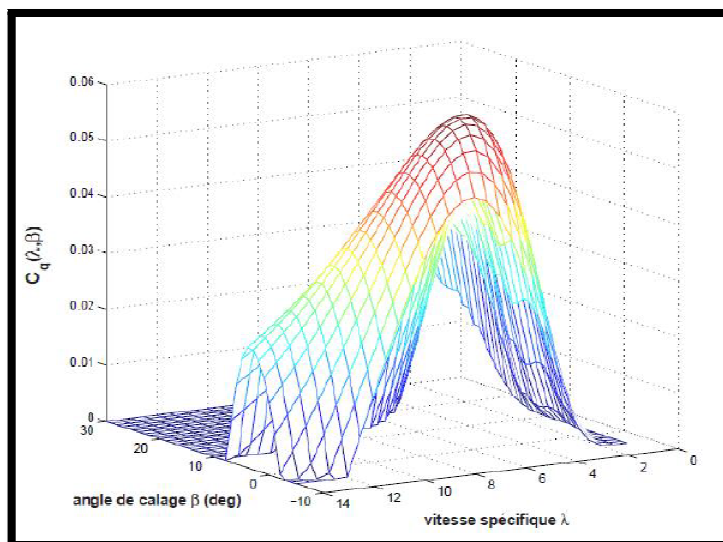


Figure A.3 : Coefficient de puissance $C_q(\lambda, \beta)$

3. Modèle de la turbine éolienne à deux masses [Sto04]

PARAMETRE	SIGNIFICATION
$R = 21.65 \text{ m}$	Rayon du rotor
$\rho = 1.29 \text{ kg/m}^3$	Masse volumique de l'air
$J_r = 3.25 * 10^5 \text{ kg. m}^2$	Inertie des masses du côté rotor
$J_g = 34.4 \text{ kg. m}^2$	Inertie des masses du côté de la génératrice
$K_r = 27.36 \text{ N. m /rad/s}$	Coefficient de frottements visqueux externes du rotor
$K_g = 0.2 \text{ N. m /rad/s}$	Coefficient de frottements visqueux externes de la génératrice
$K_{ls} = 9500 \text{ N. m /rad/s}$	Coefficient de frottements visqueux internes de l'arbre lent
$B_{ls} = 2.691 * 10^5 \text{ N. m /rad/s}$	Coefficient de torsion de l'arbre lent
$n_g = 43.165$	Rapport de transmission du multiplicateur

Tableau 2 : Paramètres du modèle à deux masses

4. Modèle de la turbine éolienne à une masse [Sto04]

PARAMETRE	SIGNIFICATION
$R = 21.65 \text{ m}$	Rayon du rotor
$\rho = 1.29 \text{ kg/m}^3$	Masse volumique de l'air
$n_g = 43.165 \text{ m}^2$	Rapport de transmission du multiplicateur
$J_{ths} = 1000 \text{ kg. m}^2$	Inertie de la turbine
$K_{ths} = 0.0024 \text{ N. m /rad/s}$	Coefficient de frottement visqueux

Tableau 3 : Paramètres du modèle à une masse

5. Caractéristique de la GADA [Sto04]

PARAMETRE	SIGNIFICATION
$R_s = 0.455 \Omega$	Résistance des enroulements statoriques
$R_r = 0.62 \Omega$	Résistance des enroulements rotoriques
$L_s = 0.084 \text{ H}$	Inductance des enroulements statoriques
$L_r = 0.081 \text{ H}$	Inductance des enroulements rotoriques
$M = 0.078 \text{ H}$	Mutuelle
$p = 4$	Nombre de paires de pôles
$P_{nom} = 600 \text{ kW}$	Puissance nominale
$\omega_{mec-nom} = 42 \text{ tr/min}$	Vitesse de rotation nominale

Tableau 4 : Paramètres de la GADA

Annexe B

1. Puissance aérodynamique

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure B.1 on considère une colonne d'air de longueur dl , de section S , de masse volumique ρ animée d'une vitesse v :

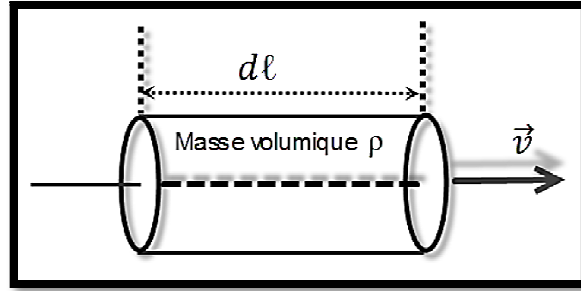


Figure B.1: Colonne d'air

- Energie disponible :

L'énergie cinétique de cette colonne d'air est :

$$dE_c = \frac{1}{2} dm v^2 \quad (B.1)$$

Avec:

$$dm = \rho S dl \quad (B.2)$$

D'où

$$dE_c = \frac{1}{2} \rho S v^3 dt \quad (B.3)$$

On en déduit la puissance aérodynamique disponible :

$$P_d = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (B.4)$$

- Energie récupérable :

Il est impossible d'extraire toute l'énergie disponible, pour cela on définit un coefficient de performance C_p sans dimension qui exprime la capacité de la turbine à extraire de l'énergie du vent. Ce paramètre est une fonction de la vitesse spécifique λ et de l'angle de calage β ; avec

$$\lambda = \frac{R \omega_t}{v} \quad (B.5)$$

Où $R \omega_t$ désigne la vitesse tangentielle du bout de la pale, R étant le rayon de l'aire balayée par le rotor (Figure B.2).

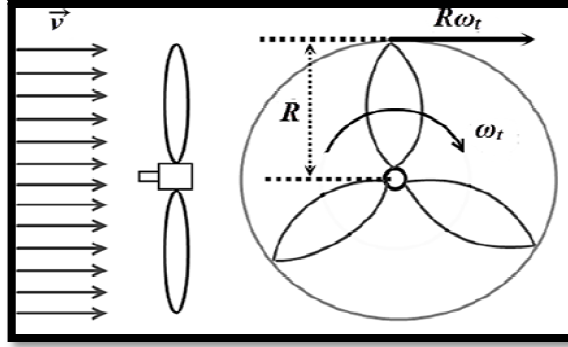


Figure B.2: Vitesse tangentielle et angulaire

Le coefficient $C_p(\lambda, \beta)$ est propre à chaque éolienne du fait qu'il dépend du nombre de pâles du rotor et de leurs formes géométriques et aérodynamiques (longueur, profil des sections) [Cam04]. Celles-ci sont conçues en fonction des caractéristiques d'un site, puissance nominale souhaitée, type de régulation (en pitch ou par décrochage) et du type du fonctionnement (à vitesse fixe ou variable).

La puissance aérodynamique extraite P_a est ainsi une fonction non linéaire de la vitesse du vent, de la vitesse du rotor et de l'angle de calage. Elle est donnée par l'expression suivante :

$$P_a = C_p P_d = \frac{1}{2} \rho S v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (\text{B.6})$$

Ou par :

$$P_a = C_p P_d = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (\text{B.7})$$

2. Théorie et limite de BETZ

Soit un tube de courant d'air de vecteurs de vitesse axiale suivants : initial $\vec{v}_0$, dans le plan du rotor $\vec{v}_1$ et à l'aval du rotor $\vec{v}_2$. Et soit S_0 la surface à l'entrée du tube de courant, S_1 la surface balayée par le rotor et S_2 la surface à l'aval du rotor (Figure B.3).

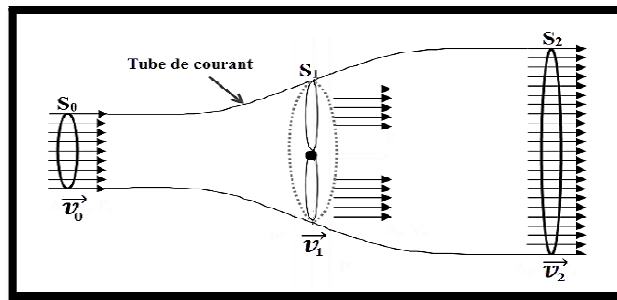


Figure B.3 : Tube de courant du vent à travers une éolienne

La production d'énergie se fait par prélèvement d'énergie cinétique à la traversée de l'aéromoteur. On supposera l'air est incompressible, ce qui permettra d'écrire la conservation du débit volumique :

$$S_0 v_0 = S_1 v_1 = S_2 v_2 \quad (\text{B.8})$$

Le théorème d'Euler (variation de la quantité de mouvement de courant du vent entre l'amant et l'aval de l'hélice) permet d'écrire que le module de la force $\vec{F}$ s'exerçant sur les pales de l'aéromoteur est donné par l'expression :

$$F = \rho S_1 v_1 (v_0 - v_2) \quad (\text{B.9})$$

Ainsi l'expression de la puissance mécanique fournie à l'aéromoteur :

$$P_m = F v_1 = \rho S_1 v_1^2 (v_0 - v_2) \quad (\text{B.10})$$

De plus, la masse d'air élémentaire dm traversant l'éolienne pendant le temps dt est donné par:

$$dm = \rho S_1 v_1 dt \quad (\text{B.11})$$

Ainsi, la variation d'énergie cinétique de cette masse d'air dm lorsque sa vitesse passe de la valeur v_0 à la valeur v_2 est donnée par :

$$dE_c = \frac{1}{2} dm (v_0^2 - v_2^2) \quad (\text{B.12})$$

La puissance transportée par cette masse est :

$$P_m = \rho S_1 v_1 (v_0^2 - v_2^2) \quad (\text{B.13})$$

En égalisant les puissances :

$$P_m = P_d \quad (\text{B.14})$$

On trouve :

$$v_1 = \frac{v_0 + v_2}{2} \quad (\text{B.15})$$

Ainsi la puissance récupérable selon la théorie de BETZ s'écrit :

$$P_a = \frac{1}{4} \rho S_1 (v_0 + v_2)^2 (v_0 - v_2) \quad (\text{B.16})$$

- **Limite de BETZ**

Pour trouver le maximum de la puissance aérodynamique récupérable, on annule la dérivée de P_a par rapport à v_2 et on trouve la relation qui doit exister entre v_0 et v_2 :

$$v_0 = 3v_2 \quad (\text{B.17})$$

Ainsi, on obtient la puissance maximale récupérable :

$$P_{amax} = \frac{16}{27} \left(\frac{1}{2} \rho S_1 v_0^3 \right) = \frac{16}{27} P_a \quad (\text{B.18})$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{P_{amax}}{P_a} = \frac{16}{27} \quad (B.19)$$

La théorie de BETZ est une approche simplificatrice découverte en 1920 par le physicien Allemand ALBERT BETZ. Elle donne la quantité maximale d'énergie cinétique pouvant être recueillie par une éolienne. Cette quantité est définie par la limite de BETZ [Lou10]:

$$C_{pmax} = \frac{16}{27} \cong 0.5926 \quad (B.20)$$

Cette formule montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut en aucun cas dépasser 59% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde. Cette quantité exprime le rendement aérodynamique de l'éolienne.

En pratique, les frottements et la force de traînée réduisent cette valeur à environ 0.5 pour les éoliennes de grande taille. On peut aussi calculer une expression analytique de $C_p(\lambda)$ pour différentes valeurs de β . Une seule interpolation par rapport à β est alors suffisante.

Pour un angle de calage β donné, l'expression analytique généralement utilisée est une régression polynomiale de la forme suivante :

$$C_p = \sum_{i=0}^n a_i \lambda^i \quad (B.21)$$

D'autres formes de (λ) ont été proposées que ce soit sinusoïdale par Winkelman [Win 83], Abidin [Abd 00] et El Aïmani [Aim 04] ou sous une forme plus complexe proposée par Heier [Hei 98] :

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) \exp \left(-\frac{C_5}{\lambda_i} \right) + C_6 \lambda \quad (B.22)$$

Où :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (B.23)$$

Et avec :

$$C_1 = 0.5109 ; C_2 = 116 ; C_3 = 0.4 ; C_4 = 5 ; C_5 = 21 ; C_6 = 0.0068$$