

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Electrotechnique

Spécialité : Commandes électriques

Par : KEBBAS Nouredine

Sujet :

Etude et simulation d'une turbine d'un aérogénérateur avec différents régulateurs

Soutenu publiquement, le 28 / 06 / 2018, devant le jury composé de :

Mr M.C.BENHABIB	MCA	Univ. Tlemcen	Président
Mr M.A.BRIKCI NIGASSA	MAA	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
Mr M.A.BENBOUZIANE	Cadre	NAFTAL Remchi	Co-Directeur de mémoire
Mr S.M.MELIANI	MCA	Univ. Tlemcen	Examineur 1
Mr M. LOUCIF	MCB	Univ. Tlemcen	Examineur 2

Année universitaire 2017/2018

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A mes parents : Grâce à leurs grands sacrifices, ils n'ont jamais cessé de prier pour moi. Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers eux. Je prie le bon Dieu de les bénir et les protéger, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.

A mon épouse, pour leurs soutiens et sacrifices

A tous mes enfants,

A mes chers frère et sœurs

A tous les membres de la famille KEBBAS et BETTIQUI.

A toutes mes amis de la promotion master 2 Génie électrique, option Commande électrique : session 2018.

Enfin à tous ceux et celles qui m'ont encouragé et m'ont soutenu.

Remerciements

Je tiens à remercier Monsieur Mohammed Amine BRIKCI NIGASSA, Maître assistant à l'université de Tlemcen, d'avoir accepté de diriger mon travail. Je le remercie également pour ses qualités humaines et ses conseils précieux durant toutes les phases de mon travail, qu'il trouve ici ma grande reconnaissance.

Je tiens à remercier également Monsieur M. A. BENBOUZIANE Cadre à NAFTAL, d'avoir accepté de participer à l'encadrement de mon travail.

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur M.C. BENTHABIB, Maître de conférences à L'université de Tlemcen, pour l'honneur qui m'a fait en acceptant de présider le jury.

Mes remerciements vont également aux membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en participant à l'évaluation de mon travail, Messieurs, S. M. MELIANI et M. LOUCIF Maître de conférences à L'université Tlemcen.

Mes vifs remerciements vont également à :

Dr. M. BENNOUN, Dr. D. BENNACER, Mr. O. BENDERA, Mr. H. BOUREGBA, pour leurs aides, réconfort et soutiens.

*KEBBAS Noureddine
Tlemcen, le 26 juin 2018*

Liste des Figures

Figure I. 1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent	3
Figure I. 2 : Installation de C. Brush à la une du magazine « Scientific American ».....	4
Figure I. 3 : Résultats d'essais sur la performance de différents types de rotor en fonction des vitesses de vent et de rotation obtenus dans le laboratoire Eiffel [1].....	5
Figure I. 4 : 1 ^{ère} éolienne Darrieus avec rotor de 8 m [44].....	5
Figure I. 5 : Éolienne de conception Lykkegaard	6
Figure I. 6 : Éolienne Z.A.H.I D-30 DE 100 kw à Balaklava [44].	6
Figure I. 7 : Vues des prototypes MOD 0 en 1975 et MOD 1 en 1979 (photos : NASA) [1].....	7
Figure I. 8 : Growian, l'éolienne bipale downwind allemande de 3 MW [1].	8
Figure I. 9 : Représentation schématique de l'évolution des prototypes en fonction de leurs puissances, diamètre et masse de l'ensemble nacelle/rotor [1].	8
Figure I. 10 : Evolution du marché mondial et l'ajout annuel de l'énergie éolienne [45] [46].	9
Figure I. 11 : Potentiels par pays des années 2011 et 2015 [45] [46].....	9
Figure I. 12 : Part de marché des dix premiers constructeurs d'éoliennes en 2011 et 2015 [44].	10
Figure I. 13 : Rang des puissances éoliennes installées en Afrique fin juin 2016 [8].	11
Figure I. 14 : Première éolienne installée en Algérie [14].....	11
Figure I. 15 : La ferme éolienne à Adrar [14].	12
Figure I. 16 : les régions ventées en Algérie [32].	13
Figure I. 17 : Comparaison entre les vitesses moyennes de sites ventés [32].....	13
Figure I. 18 : Élément constitution d'une éolienne [10].	14
Figure I. 19 : Petites éoliennes à axe vertical [6] [15] [17].....	16
Figure I. 20 : Éolienne type Savonius [6] [30].....	16
Figure I. 21 : Éoliennes type Darrieus [6].	17
Figure I. 22 : Eoliennes à axe horizontal [15] [6].....	18
Figure I. 23 : types d'éoliennes à axe horizontal [30].	18
Figure I. 24 : Eolienne lente [6].	19
Figure I. 25 : Eolienne rapide [6].	19
Figure II. 1 : Éléments constituant le profil aérodynamique d'une pale [6].	22
Figure II. 2 : Schéma d'une éolienne [8].	22
Figure II. 3 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne [8].	23
Figure II. 4 : Coefficient de la puissance en fonction de la vitesse relative de la turbine.....	25
Figure II. 5 : Principaux composants d'une éolienne [17].....	26
Figure II. 6 : Modèle mécanique de la turbine éolienne [8].	26
Figure II. 7 : Modèle rigide de l'éolienne	28
Figure II. 8 : Schéma blocs du modèle rigide de l'éolienne.....	29
Figure II. 9 : Modèle souple de l'éolienne.....	29
Figure II. 10 : Schéma blocs du modèle souple de l'éolienne [7].....	30
Figure II. 11 : Modèle de l'actionneur de l'angle de calage.	31
Figure II. 12 : Répartition du vent [28].	31
Figure II. 13 : Schéma d'un anémomètre et d'une girouette [26].	32
Figure II. 14 : La vitesse de vent en fonction de temps suivant l'expression de Van Der Hoven avec $V_0 = 12$	35
Figure II. 15 : Schéma bloc de la vitesse de vent suivant l'expression de NICHITA [7].....	36
Figure II. 16 : Génération de vents de différentes natures par la méthode de Nichita [7].	36
Figure II. 17 : Zone de fonctionnement d'une éolienne [10].....	37

Figure II. 18 : Flux d'air sur un profil de pale " stall "[12].	38
Figure II. 19 : Variation de l'angle de calage des pales [8].	39
Figure II. 20 : Caractéristique puissance vitesse de rotation d'une éolienne [33].	39
Figure II. 21 : Courbes puissances /vitesse de rotation de la turbine pour déférente valeurs de la vitesse du vent [14].	40
Figure II. 22 : Principe de Maximisation de puissance d'une éolienne sans connaissance courbe Cp [6].	42
Figure II. 23 : Principe de fonctionnement de MPPT à vitesse de vent variable [6].	42
Figure II. 24 : Schéma bloc de la maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse [9] ...	44
Figure II. 25 : Schéma bloc de la maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse [9] ..	45
Figure II. 26 : <i>Vitesse de vent [m/s]</i>	46
Figure II. 27 : Coefficient de puissance Cp	46
Figure II. 28 : Vitesse mécanique.	46
Figure II. 29 : Couple mécanique (W)	47
Figure II. 30 : Couple aérodynamique (W)	47
Figure II. 31 : Vitesse relative (m/s)	47
Figure II. 32 : Schéma fonctionnel d'un processus réglé [8].	48
Figure II. 33 : Boucle de régulation de la vitesse mécanique avec PI [8].	49
Figure II. 34 : Coefficient de puissance	50
Figure II. 35 : Vitesse mécanique (tr/min)	50
Figure II. 36 : Vitesse mécanique (rad/sec)	51
Figure II. 37 : Vitesse de vent (m/s)	51
Figure II. 38 : Couple mécanique (N.m)	51
Figure II. 39 : Couple aérodynamique (N.m)	51
Figure II. 40 : Vitesse relative (m/s)	52
Figure II. 41 : Modèle du neurone formel de Mac Culloch et Pitts avec biais [38][39].	53
Figure II. 42 : Représentation d'un Réseau de neurones non bouclés [40].	55
Figure II. 43 : Représentation d'un Réseaux de neurones bouclés [40]	55
Figure II. 44 : Principe de l'identification directe par un réseau de neurones [39]	56
Figure II. 45 : Principe de l'identification directe par modèle série-parallèle [39].	57
Figure II. 46 : Principe de l'identification directe par modèle parallèle [39].	57
Figure II. 47 : Principe de l'identification du modèle inverse par un réseau de neurones [39].	58
Figure II. 48 : Coefficient de puissance	58
Figure II. 49 : Vitesse mécanique [tr/min]	58
Figure II. 50 : Vitesse mécanique (rad/sec).	58
Figure II. 51 : Couple mécanique [Nm]	59
Figure II. 52 : Couple aérodynamique [Nm]	59
Figure II. 53 : Vitesse relative [m/s]	59
Figure II. 54 : Le problème H_{∞} [34].	61
Figure II. 55 : Diagramme simplifié de plant augmenté [34].	61
Figure II. 56 : Objet de la commande [34].	62
Figure II. 57 : Spécifications de Loop shaping [35].	63
Figure II. 58 : Coefficient de puissance	64
Figure II. 59 : Vitesse mécanique [tr/min]	64
Figure II. 60 : Vitesse mécanique [rad/sec]	64
Figure II. 61 : Couple mécanique [Nm]	65
Figure II. 62 : Couple aérodynamique [Nm]	65
Figure II. 63 : Vitesse relative [m/s]	65

Figure II. 64 : Vitesse mécanique avec zoom [rad/sec].....	65
Figure II. 65 : Comparaison d'un ensemble classique et d'un ensemble flou [43].	67
Figure II. 66 : Fonction caractéristique [43] Figure II. 67 : Fonction d'appartenance [43].	68
Figure II. 68 : Fonctions d'appartenance linéaires par morceaux. [43].	68
Figure II. 69 : Fonction d'appartenance singleton [43].	69
Figure II. 70 : Fuzzification [43].	69
Figure II. 71 : Traitement flou [43].	71
Figure II. 72 : Défuzzification par centre de gravité [43].	71
Figure II. 73 : Coefficient de puissance	73
Figure II. 74 : Vitesse mécanique [tr/min]	73
Figure II. 75 : Vitesse mécanique [rad/sec].....	73
Figure II. 76 : Couple mécanique [Nm]	74
Figure II. 77 : Couple aérodynamique [Nm].....	74
Figure II. 78 : Vitesse relative [m/s]	74
Figure II. 79 : Vitesse mécanique avec zoom [rad/sec].....	74
Figure II. 80 : Vitesse mécanique (tous les régulateurs) [rad/sec].....	75
Figure II. 81 : Vitesse mécanique avec zoom (tous les régulateurs) [rad/sec]	76
Figure III. 1 : Structure du rotor d'une MADA [10].	78
Figure III. 2 : La MADA dans le contexte éolien [25].	78
Figure III. 3 : Modes opérationnels caractéristiques de la MADA [14].	79
Figure III. 4 : Position des axes statoriques et rotoriques dans l'espace électrique [8].	81
Figure III. 5 : Position spatiale des différents référentiels [14].	84
Figure III. 6 : Orientation du repère de Park [8].	85
Figure III. 7 : L'ensemble convertisseur machine [47]	90
Figure III. 8 : Représentation du redresseur triphasé à diodes [47]	91
Figure III. 9 : Représentation d'un filtre passe-bas	92
Figure III. 10 : Onduleur de tension triphasé à deux niveaux [47].	93
Figure III. 11 : principe de la commande MLI- sinus-triangle [8]	96
Figure III. 12 : Principe de la commande du CCM [24].	97
Figure III. 13 : Orientations de l'axe d sur le flux statorique [8]	98
Figure III. 14 : Schéma bloc de la MADA [8].	100
Figure III. 15 : Modèle réduit des puissances statorique de la MADA [47].	102
Figure III. 16 : Contrôle des puissances statorique de la GADA ou MADA [47].	102
Figure III. 17 : Système régulé par un PI classique [47].	103
Figure III. 18 : Schéma bloc de la commande directe d'une MADA [47].	104
Figure III. 19 : Schéma bloc de la commande directe d'une éolienne à la base d'une MADA.	104
Figure III. 21 : <i>Vitesse mécanique</i>	108
Figure III. 22 : Couple électromécanique	109
Figure III. 23 : Courant rotorique.	109
Figure III. 24 : Courant statorique.	109
Figure III. 25 : Puissance active.	109
Figure III. 26 : Puissance réactive.	110
Figure III. 27 : Tension statorique	110
Figure III. 28 : Tension statorique avec zoom	110
Figure III. 29 : Tension de bus continu.	110
Figure III. 30 : Courant rotorique avec Zoom. (a) : hyper vers hypo, (b) inversement	111
Figure III. 31 : Courant statorique avec Zoom.	111

Figure III. 32 : Puissance active et réactive avec zoom, (a) : active, (b) réactive :	111
Figure II. 1 : Eléments constituant le profil aérodynamique d'une pale.....	22
Figure II. 2 : Schéma d'une éolienne	22
Figure II. 3 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne	23
Figure II. 4 : Coefficient de la puissance en fonction de la vitesse relative de la turbine	25
Figure II. 5 : Principaux composants d'une éolienne	26
Figure II. 6 : Modèle mécanique de la turbine éolienne	26
Figure II. 7 : Modèle rigide de l'éolienne	28
Figure II. 8 : Schéma blocs du modèle rigide de l'éolienne.....	29
Figure II. 9 : Modèle souple de l'éolienne.....	29
Figure II. 10 : Schéma blocs du modèle souple de l'éolienne	30
Figure II. 11 : Modèle de l'actionneur de l'angle de calage	31
Figure II. 12 : Répartition du vent	31
Figure II. 13 : Schéma d'un anémomètre et d'une girouette	32
Figure II. 14 : La vitesse de vent en fonction de temps suivant l'expression de Van Der Hoven	35
Figure II. 15 : Schéma bloc de la vitesse de vent suivant l'expression de NICHITA	36
Figure II. 16 : Génération de vents de différentes natures par la méthode de Nichita	36
Figure II. 17 : Zone de fonctionnement d'une éolienne	37
Figure II. 18 : Flux d'air sur un profil de pale " stall "	38
Figure II. 19 : Variation de l'angle de calage des pales.	39
Figure II. 20 : Caractéristique puissance vitesse de rotation d'une éolienne	39
Figure II. 21 : Courbes puissances /vitesse de rotation de la turbine pour différentes valeurs de la vitesse du vent.	40
Figure II. 22 : Principe de Maximisation de puissance d'une éolienne sans connaissance courbe Cp [16].	42
Figure II. 23 : Principe de fonctionnement de MPPT à vitesse de vent variable	42
Figure II. 24 : Schéma bloc de la maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse	44
Figure II. 25 : Schéma bloc de la maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse	45
Figure II. 26 : Vitesse de vent [m/s].....	46
Figure II. 27 : Coefficient de puissance Cp	46
Figure II. 28 : Vitesse mécanique.	46
Figure II. 29 : Couple mécanique (W).....	47
Figure II. 30 : Couple aérodynamique (W).....	47
Figure II. 31 : Vitesse relative (m/s)	47
Figure II. 32 : Schéma fonctionnel d'un processus réglé.	48
Figure II. 33 : Boucle de régulation de la vitesse mécanique avec PI	49
Figure II. 34 : Coefficient de puissance	50
Figure II. 35 : Vitesse mécanique (tr/min).....	50
Figure II. 36 : Vitesse mécanique (rad/sec).....	51
Figure II. 37 : Vitesse de vent (m/s)	51
Figure II. 38 : Couple mécanique (N.m)	51
Figure II. 39 : Couple aérodynamique (N.m).....	51
Figure II. 40 : Vitesse relative (m/s)	52
Figure II. 41 : Modèle du neurone formel de Mac Culloch et Pitts avec biais	53
Figure II. 42 : Représentation d'un Réseau de neurones non bouclés	55
Figure II. 43 : Représentation d'un Réseaux de neurones bouclés	55
Figure II. 44 : Principe de l'identification directe par un réseau de neurones	56

Figure II. 45 : Principe de l'identification directe par modèle série-parallèle	57
Figure II. 46 : Principe de l'identification directe par modèle parallèle	57
Figure II. 47 : Principe de l'identification du modèle inverse par un réseau de neurones	58
Figure II. 50 : Coefficient de puissance	58
Figure II. 51 : Vitesse mécanique [tr/min]	58
Figure II. 52 : Vitesse mécanique (rad/sec)	58
Figure II. 53 : Couple mécanique [Nm]	59
Figure II. 54 : Couple aérodynamique [Nm]	59
Figure II. 55 : Vitesse relative [m/s]	59
Figure II. 56 : Le problème H^∞ [34]	61
Figure II. 57 : Diagramme simplifié de plant augmenté	61
Figure II. 58 : Objet de la commande	62
Figure II. 59 : Spécifications de Loop shaping	63
Figure II. 60 : Coefficient de puissance	64
Figure II. 61 : Vitesse mécanique [tr/min]	64
Figure II. 62 : Vitesse mécanique [rad/sec]	64
Figure II. 63 : Couple mécanique [Nm]	65
Figure II. 64 : Couple aérodynamique [Nm]	65
Figure II. 65 : Vitesse relative [m/s]	65
Figure II. 66 : Vitesse mécanique avec zoom [rad/sec]	65
Figure II. 67 : Comparaison d'un ensemble classique et d'un ensemble flou	67
Figure II. 68 : Fonction caractéristique	Figure II. 69 : Fonction d'appartenance
Figure II. 70 : Fonctions d'appartenance linéaires par morceaux	68
Figure II. 71 : Fonction d'appartenance singleton	69
Figure II. 72 : Fuzzification	69
Figure II. 73 : Traitement flou	71
Figure II. 74 : Défuzzification par centre de gravité	71
Figure II. 75 : Coefficient de puissance	73
Figure II. 76 : Vitesse mécanique [tr/min]	73
Figure II. 77 : Vitesse mécanique [rad/sec]	73
Figure II. 78 : Couple mécanique [Nm]	74
Figure II. 79 : Couple aérodynamique [Nm]	74
Figure II. 80 : Vitesse relative [m/s]	74
Figure II. 81 : Vitesse mécanique avec zoom [rad/sec]	74
Figure II. 82 : Vitesse mécanique (tous les régulateurs) [rad/sec]	75
Figure II. 83 : Vitesse mécanique avec zoom (tous les régulateurs) [rad/sec]	76
Figure III. 1 : Structure du rotor d'une MADA	78
Figure III. 2 : La MADA dans le contexte éolien	78
Figure III. 3 : Modes opérationnels caractéristiques de la MADA	79
Figure III. 4 : Position des axes statoriques et rotoriques dans l'espace électrique	81
Figure III. 5 : Position spatiale des différents référentiels	84
Figure III. 6 : Orientation du repère de Park	85
Figure III. 7 : L'ensemble convertisseur machine	90
Figure III. 8 : Représentation du redresseur triphasé à diodes	91
Figure III. 9 : Représentation d'un filtre passe-bas	92
Figure III. 10 : Onduleur de tension triphasé à deux niveaux	93
Figure III. 11 : principe de la commande MLI- sinus-triangle	96
Figure III. 12 : Principe de la commande du CCM	97

Figure III. 13 : Orientations de l'axe d sur le flux statorique	98
Figure III. 14 : Schéma bloc de la MADA	100
Figure III. 15 : Modèle réduit des puissances statoriques de la MADA	102
Figure III. 16 : Contrôle des puissances statoriques de la GADA ou MADA	102
Figure III. 17 : Système régulé par un PI classique	103
Figure III. 18 : Schéma bloc de la commande directe d'une MADA	104
Figure III. 19 : Schéma bloc de la commande directe d'une éolienne à la base d'une MADA.	104
Figure III.20 : Connexion du CCR au réseau.....	105
Figure III.21 : Commande de Convertisseur coté réseau.....	105
Figure III.22 : Schéma de commande de la tension aux bornes du condensateur.....	107
Figure III.23 : Filtre coté réseau.....	107
Figure III. 24 : Vitesse mécanique.	Error! Bookmark not defined.
Figure III. 25 : Couple électromécanique	1089
Figure III. 26 : Courant rotorique.	1099
Figure III. 27 : Courant statorique.	1099
Figure III. 28 : Puissance active.	109
Figure III. 29 : Puissance réactive.....	110
Figure III. 30 : Tension statorique	110
Figure III. 31 : Tension statorique avec zoom	110
Figure III. 32 : Tension de bus continu.	11011
Figure III. 33 : Courant rotorique avec Zoom. (a) : hyper vers hypo, (b) inversement	11111
Figure III. 34 : Courant statorique avec Zoom.	11111
Figure III. 35 : Puissance active et réactive avec zoom, (a) : active, (b) réactive :	11112

Liste des Tableaux

Tableau I. 1 : Comparatif des gros prototypes pendant et après-guerre	7
Tableau I. 2 : puissance produite par producteur d'éolienne	10
Tableau II. 1 : Paramètre de rugosité en fonction de l'environnement	33
Tableau II. 2 : Vitesses moyenne du vent en fonction de la hauteur	34
Tableau II. 3 : Matrices d'inférences.	72
Tableau III. 1 : Calcul des vecteurs tensions	95

Nomenclatures

Grandeurs électriques et mécaniques

Nom	Symbole	[]
<i>Couple électromagnétique</i>	C_{em}	Nm
<i>Couple résistance</i>	C_r	Nm
<i>Courant</i>	I	A
<i>Facteur de puissance</i>	$\cos\varphi$	/
<i>Fréquence</i>	f	Hz
<i>Flux magnétique</i>	ϕ	W_b
<i>Induction magnétique</i>	B	T
<i>Puissance active statorique</i>	P_s	W
<i>Puissance réactive statorique</i>	Q_s	VAR
<i>Pulsation électrique</i>	ω	rad/s
<i>Pulsation mécanique de rotation</i>		rad/s
<i>Temps</i>	Ω	s
<i>Tension</i>	t	V
	V	

Paramètres de modélisation du machine asynchrone a double alimentation MADA

Nom	Symbole
résistances statorique par phase	R_s
résistances rotorique par phase,	R_r
Inductance cyclique statorique,	L_s
Inductance cyclique rotorique	L_r
Inductance cyclique mutuelle (entre stator et rotor),	M
Inductance de fuite statorique par phase,	L_{fs}
Inductance de fuite rotorique par phase,	L_{fr}
coefficient de dispersion ou (de Blondel),	σ
nombre de paires de pôles,	p
Moment d'inertie (Kg. m ²)	J
Coefficient de frottements visqueux (Nm.s.rad ⁻¹),	f
couple électromagnétique.	C_{em}
Transformation de Park inverse	$P[\theta]^{-1}$
Transformation de Park directe	$P[\theta]$
couple de charge,	C_r
Constante de temps statorique,	T_s
Constante de temps rotorique,	T_r
Coefficients de proportionnalité et d'intégration	K_p, K_i

Repère

Nom	Symbole
Axes liés aux enroulements triphasés statoriques	$\vec{S}_A, \vec{S}_B, \vec{S}_C$
Axes liés aux enroulements triphasés rotoriques	$\vec{R}_A, \vec{R}_B, \vec{R}_C$
Axes de référentiel de Park (tournant à la vitesse de synchronisme)	(d, q)
Axes de référentiel de Park (fixe au stator)	α, β
position angulaire du rotor par rapport au stator,	θ
position angulaire du stator par rapport à l'axe (d)	θ_s
position angulaire du rotor par rapport à l'axe (q)	θ_r

Grandeurs électriques au stator

Nom	Symbole
tensions statoriques triphasées,	V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}
vecteur des tensions statoriques triphasées	$V_{s, abc}$
tensions statoriques diphasées dans le repère (α, β)	$V_{s\alpha}, V_{s\beta}$
Vecteur des tensions statoriques diphasées dans le repère (α, β)	$V_s, \alpha\beta$
Vecteur des tensions statoriques diphasées dans le repère (d.q)	V_{ds}, V_{qs}
courants statoriques triphasés,	I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}
Vecteur des courants statoriques triphasés,	$I_{s, abc}$
Vecteur des courants statoriques diphasés dans le repère	$I_{s\alpha}, I_{s\beta}$
Vecteur des courants statoriques diphasés dans le repère tournant	I_{ds}, I_{qs}

Grandeurs électriques au rotor

Nom	Symbole
tensions rotoriques triphasées,	V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}
Vecteur des tensions rotoriques diphasées dans le repère (α, β)	$V_{r\alpha}, V_{r\beta}$
Vecteur des tensions rotoriques diphasées dans le repère, (q.d)	V_{dr}, V_{qr}
courants rotoriques triphasés,	I_{ra}, I_{rb}, I_{rc}
Vecteur courants rotoriques diphasés dans le repère (α, β)	$I_{r\alpha}, I_{r\beta}$
Vecteur des courants rotoriques diphasés dans le repère tournant	I_{dr}, I_{qr}

Grandeurs magnétiques au stator

Nom	Symbole
Vecteur de flux magnétiques au stator,	$\Phi_{s, abc}$
flux statoriques diphasés dans le repère (α, β)	$\Phi_{s\alpha}, \Phi_{s\beta}$
Vecteur de flux statoriques diphasés dans le repère tournant (d.q)	Φ_{sd}, Φ_{sq}

Grandeurs magnétiques au rotor

Nom	Symbole
Vecteur de flux magnétiques au rotor,	Φ_r, abc
Vecteur de flux rotoriques diphasés dans le repère (α, β)	$\Phi_{r\alpha}, \Phi_{r\beta}$
Vecteur de flux rotoriques diphasés dans le repère tournant	Φ_{rd}, Φ_{rq}

Grandeurs mécaniques de la machine

Nom	Symbole
pulsation électrique correspondante à la vitesse de rotation,	ω
pulsation électrique des grandeurs statoriques,	ω_s
pulsation électrique des grandeurs rotoriques,	ω_r
Pulsation électrique de glissement $\omega_s - \omega$	ω_g
Glissement de la vitesse de rotation $\omega_s - \omega/\omega_s$	g
Fréquence électrique des grandeurs statoriques,	f_s
f Fréquence électrique des grandeurs rotoriques,	f_r
vitesse mécanique de rotation (rad/s),	Ω
vitesse mécanique de rotation (tr/min)	N

Grandeurs mécaniques de la turbine

Nom	Symbole	[]
Angle d'orientation des pales	β	°
Couple aérogénérateur	C_{aer}	Nm
Coefficient de puissance	C_p	-
Coefficient de puissance maximale	C_{pmax}	-
Gain du multiplicateur	G	-
Masse volumique de l'air	σ	-
Puissance aérogénérateur	P_{aer}	W
Rayon de pale	R	m
Vitesse du vent	V_{vent}	m/s
Vitesse relative	λ	-
Vitesse relative optimal	λ_{opt}	-

Glossaire

Acronyme	Signification
CV	Commande Vectorielle
CCM	Convertisseur Côté Machine
CCR	Convertisseur Côté Réseau
DFIG	Doubly Fed Induction Generator
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PI	Régulateur Proportionnel et Intégral
PWM	Pulse Width Modulation
AG	Algorithme Genetique
FTBO	Fonction de Transfert Boucle Ouverte
FTBF	Fonction de Transfert Boucle Fermée

Table des matières

Introduction Générale

1.1	Introduction.....	3
1.2	Définition d'une éolienne.....	3
1.3	L'évolution des énergies éoliennes	4
1.4	Les premières réalisations.....	5
1.5	Développement des éoliennes après le 1 ^{er} choc pétrolier.....	7
1.6	Les perspectives des éoliennes	9
1.7	Evolution du marché mondial	9
1.8	Développement des énergies éoliennes en Afrique	10
1.9	Développement des énergies éoliennes en Algérie.....	11
1.9.1	Répartition régionale de la vitesse du vent en Algérie	12
1.10	Principaux composants d'une éolienne [4] [9].....	13
1.10.1	Le mat ou la tour	14
1.10.2	La nacelle	14
1.10.3	Le rotor	15
1.11	Les différents types d'éoliennes [4] [6]	16
1.11.1	Eoliennes à axe vertical :	16
1.11.2	Éoliennes à axe horizontal.....	17
1.12	Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	19
1.12.1	Avantages de l'énergie éolienne	20
1.12.2	Inconvénients de l'énergie éolienne	20
1.13	Conclusion	20
2.1	Conversion de l'énergie éolienne [6]	21
2.1.1	Principe.....	21
2.1.2	Éléments caractéristiques d'une pale	21
2.2	Modélisation du système éolienne	22
2.2.1	Introduction.....	22
2.2.2	Rendement énergétique d'une éolienne (Théorie de Betz).....	22
2.2.3	Modèle de la turbine	24
2.2.4	Modèle de la partie mécanique	25
2.2.5	Modélisation du système d'orientation des pales	30
2.3	Caractérisation et modélisation du Vent	31
2.3.1	Répartition instantanée de la vitesse du vent.....	31

2.3.2	Mesure de la vitesse du vent.....	32
2.3.3	Modélisation de la vitesse du vent.....	34
2.4	Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable	37
2.4.1	Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne	38
2.4.2	Technique d'extraction de maximum de puissance MPPT	39
2.5	Simulation de la Turbine Sans asservissement	46
2.5.1	Résultats	46
2.5.2	Interprétations	47
2.6	Simulation de la Turbine avec asservissement	48
2.6.1	Historique des régulateurs	48
2.6.2	Généralités sur les régulateurs.....	48
2.6.3	Régulation avec PI classique.....	49
	Régulation avec PI avancé.....	52
2.6.4	Régulateur PI neuronal.....	53
2.6.5	Régulateur H_{∞}	60
2.6.6	Régulateur PI Flou	66
2.7	Etude comparative des techniques de régulations.....	75
2.8	Interprétation générale.....	76
2.9	Conclusion	76
3.1	Modélisation de la MADA	77
3.1.1	Introduction.....	77
3.1.2	Evolution de la MADA.....	77
3.1.3	Structure et principe de fonctionnement d'une MADA.....	78
3.1.4	Modes de fonctionnement d'une MADA	79
3.1.5	Principe de variation de la vitesse de la MADA.....	80
3.1.6	Avantage des éoliennes à base de la MADA	80
3.1.7	Modèle de la MADA	80
3.2	Modélisation et stratégie de commande de la MADA	96
3.2.1	Description du système éolien	96
3.2.2	Commande vectorielle du système éolien	97
3.2.3	Commande vectorielle par orientation du flux statorique	98
3.3	Conclusion	113

Conclusion Générale

Introduction Générale

La demande de plus en plus croissante en énergie électrique dans le monde, a causé une augmentation de la consommation des énergies fossiles (pétrole, charbon et gaz). L'impact grandissant de ces énergies sur l'environnement a poussé les sociétés modernes à rechercher des alternatives durables pour répondre aux besoins et aux exigences industrielles et quotidiennes sans cesse croissante. Cette démarche a favorisée l'implémentation de techniques à base d'énergies renouvelables.

De plus en plus de pays sont sensibilisés au caractère essentiel de l'avancée des énergies renouvelables dans la lutte contre les changements climatiques et à l'accès à l'énergie croissant au profit des populations encore privées de tout service énergétique moderne.

L'énergie éolienne est une des formes d'énergie renouvelable, elle tire son nom d'Eole, le nom donné au dieu du vent dans la Grèce antique. C'est une énergie qui est directement tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur. Le développement et l'exploitation des énergies éoliennes a connu une augmentation ces derniers années surtout dans les pays.

Les énergies éoliennes suscitent aujourd'hui l'intérêt de plusieurs équipes de recherches. Ces systèmes qui produisent de l'énergie électrique à partir du vent peuvent constituer une alternative technologique et économique aux différentes sources d'énergies nuisibles et épuisables à la fois.

Cela nous a encouragé à nous intéresser à ce type d'infrastructures (aérogénérateurs), dans un souci d'une meilleur maîtrise du processus et le fait que notre pays a inscrit un programme très ambitieux de développement de ce secteur avec d'important investissements qui s'étale jusqu'à 2030.

L'objectif de ce travail est d'offrir une expertise sur la pertinence de choix de régulateurs dédiée à la commande de turbines pour aérogénérateurs. De ce fait, on s'est intéressé à analyser les effets de l'emploi de quatre régulateurs dans la commande d'une turbine adossé à un générateur asynchrone à double alimentation dans une perspective de sélectionner le plus performant.

Mon mémoire est organisé en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à l'état de l'art sur l'évolution des éoliennes, leurs avantages, inconvénients, les différents types d'aérogénérateurs, les différents composants d'une éolienne en plus d'un rappel sur la conversion électromécanique à travers les différents types de génératrices utilisées.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de la partie mécanique de l'éolienne (turbine). On a effectué cinq simulations englobant le fonctionnement sans et avec asservissement de la vitesse de rotation. Ce qui va nous permettre d'identifier la plus performante.

Le troisième chapitre traite des performances d'un aérogénérateur constitué d'une MADA soumises à différentes contraintes puissances active, réactive et la vitesse.

Après avoir modélisé notre génératrice, on a procédé à la simulation de notre MADA. Une série de tests nous permettra d'évaluer les performances de régulateur PI.

Etat de l'art

1.1 Introduction

Depuis des lustres, l'homme s'est intéressé aux pouvoirs du vent et a essayé d'exploiter au maximum cette source d'énergie. Il l'a utilisé pour remplacer les rames afin de faire avancer les navires, le pompage d'eau pour abreuver les bêtes dans les fermes, elle fut utilisée aussi pour actionner les meules des moulins.

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des aérogénérateurs n'a cessé d'évoluer surtout au cours des dernières décennies.

1.2 Définition d'une éolienne

Une éolienne est un dispositif qui permet de transformer une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes (*Figure 1.1*) :

- Transformation d'une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, cette opération se fait au niveau de la turbine.
- L'énergie mécanique déjà extraite sera transformée en énergie électrique opérée au niveau de la génératrice.



Figure 1.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

1.3 L'évolution des énergies éoliennes

Dès la fin du XIXe siècle, l'idée d'utiliser l'énergie extraite du vent pour produire de l'électricité est évoquée. Des premiers essais pour l'application du moulin à vent sont tentés par le Belge Nollet (1841), le britannique James Blyth (1891) et surtout par l'américain Charles Brush (1888), grand industriel en électricité, avec un moulin en bois pour alimenter sa résidence de Cleveland dans l'Ohio [1] (Figure I.2)

Le diamètre de rotor de ce moulin faisait 17 m, il est composé de 144 lames en cèdre, la longueur de gouvernail utilisé pour l'orientation est de 18 m. Une dynamo Brush de 12 kW peut charger 12 batteries de 34 accumulateurs pour alimenter quotidiennement 100 lampes à incandescence, 2 à arc et 3 moteurs électriques. Cette installation a fonctionné pendant 20 ans.

Suite à cet exploit, l'utilisation des aéromoteurs ou aérogénérateurs (appelés windchargers) aux états unis n'a pas connu d'évolution majeure parce que les machines proposées pour produire de l'électricité sont les mêmes que celles utilisées pour le pompage, c'est-à-dire multi-pales lentes.

Au Danemark à partir 1891[1], Poul La Cour, électricien connu par des travaux portés sur l'efficacité aérodynamique du rotor, proposa la construction d'un moulin particulier à seulement 4 pales. Ses travaux ont conclu qu'une réduction du nombre de pales améliorerait la vitesse de rotation et par conséquent le rendement énergétique. En 1897, il a conçu une installation de production d'électricité, dotée d'une éolienne, capable d'éclairer la bourgade d'Askov (300 lampes à incandescence et 12 lampes à arc). En 1903 il mit au point un modèle simple et robuste, la Klapsejler à 6 pales, qui sera très populaire dans son pays [1].

La conception des éoliennes a beaucoup bénéficié de l'essor de l'aéronautique. En particulier, de nombreuses expérimentations ont eu lieu sur des profils d'ailes ou d'hélices en Allemagne pendant la Première Guerre mondiale avec Prandtl (soufflerie de Göttingen) et en France dès 1910 avec A. Rateau et G. Eiffel (soufflerie du Laboratoire Eiffel à Auteuil [1] [2] (Figure I.3).

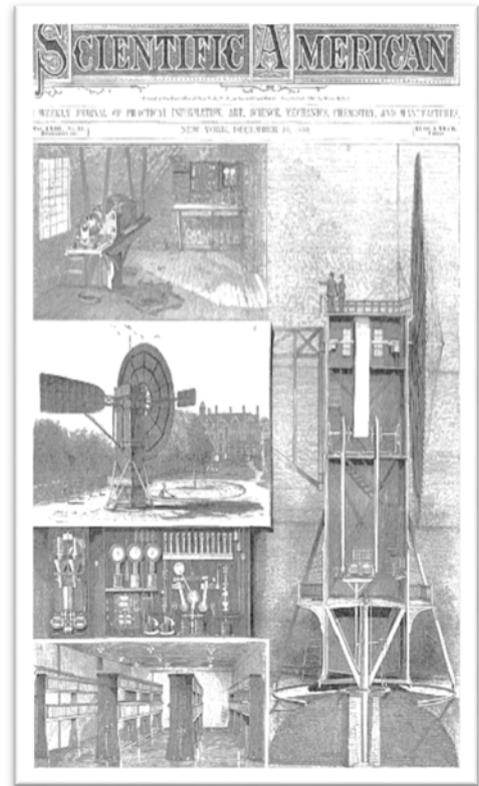


Figure I. 2 : Installation de C. Brush à la une du magazine « Scientific American » du 20 décembre 1890 [1].

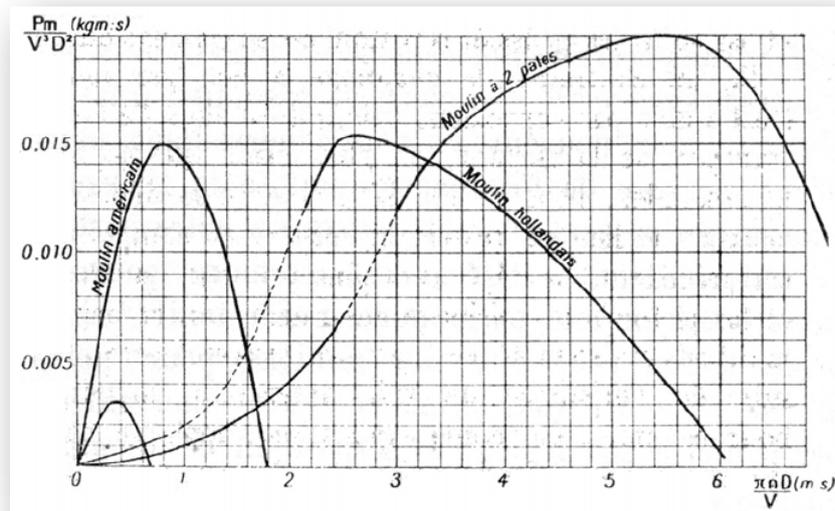


Figure 1.3 : Résultats d'essais sur la performance de différents types de rotor en fonction des vitesses de vent et de rotation obtenus dans le laboratoire Eiffel [1]

La recherche aéronautique entreprise par Louis Constantin innovera, par la suite, avec la réalisation d'une première éolienne. En exploitant ces connaissances en mécanique des fluides, il eut l'idée, entre autre, d'appliquer les développements faits sur les hélices et formula dès juin 1924, dans un article dans la revue "la Nature", quelques principes des machines modernes (nombre de pales, vitesse périphérique...) et proposa même un schéma d'interconnexion pour une ferme éolienne.

Il commença en 1926 par manque de soutien des essais sur une éolienne de 8 m de diamètre qu'il testa dans le massif central puis en Camargue. La particularité de ce prototype est son rotor à deux pales métalliques et profilées, inspirées des hélices Levasseur [1]. Le système d'orientation est constitué de surfaces métalliques en aval du rotor.

1.4 Les premières réalisations

G. Darrieus, dépose en 1925 un brevet en France concernant les éoliennes à axe vertical. C'est sur les terrains proches de l'usine du Bourget qu'il fût construire en 1927 une première éolienne de 8 m de diamètre (Figure I.4) [1] [44].

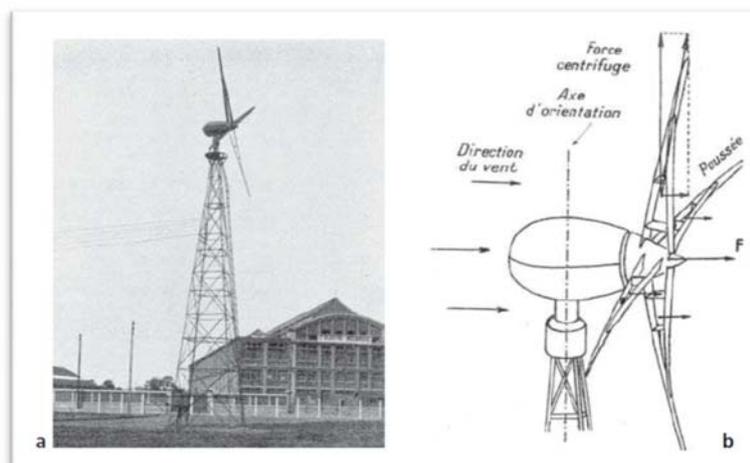


Figure 1.4 : 1^{ère} éolienne Darrieus avec rotor de 8 m [44].

D'autres réalisations ont vues le jour à travers le monde, par exemple aux États-Unis avec des petites unités de 1 à 3 kW. A la fin de la Première guerre mondiale le Danemark, possédait plus d'une centaine d'unités allant jusqu'à 35 kW [1] [44] (*Figure I.5*).

Figure I. 5 : Éolienne de conception Lykkegaard (avec éléments de pale mis en drapeau) [44].



En Russie, afin de produire une puissance unitaire plus importante, ils arrivent à installer en 1930 une éolienne de 30m de diamètre à Balaklava (Crimée), construite par l'Institut Central de l'Énergie du Vent (ZAHV) de Moscou (*Figure I.6*), sa puissance nominale atteinte est 100 kW à une vitesse de vent de 10.5m/s [1] [44].



Figure I. 6 : Éolienne Z.A.H.V D-30 DE 100 kw à Balaklava [44].

La croissance de l'utilisation des énergies fossiles avec des prix attractifs aura comme conséquence le ralentissement des activités de recherche et ce développement dans l'éolien. A la suite de la seconde guerre mondiale, un second souffle a été donné à l'éolien avec de nouvelles recherches et réalisations, à titre d'exemple nous citerons, les développements entrepris par F.L. Smidth (Danemark) avec les machines de 50 et 70 kW, ainsi que d'autres recherches entreprises par Ulrich Hütter pour le compte de la compagnie Ventimotor (Allemagne).

Dans le tableau suivant, on trouve les caractéristiques comparées des gros prototypes pendant et après-guerre mondiale [1].

Machine	Ø [m]	Architecture	Régulation Génératrice	Puissance nominale [KW]	Vitesse de rotation [tr/mn]	Prod (MWh/années)
Z.a.H.I.D -30	30	Tripale upwind	Calage + ailerons	100 à 10.5 m/s	30	200 (1933) 1931-1942
Smith Putnam	53	Bipale downwind	Calage Asynchrone	1250 à 7.5m/s	29	200 entre 1941 et 1945
Gedser	13	Tripale upwind	Décrochage + freins extrémités Asynchrone 8 pôles	45 à 15m/s	20	80/an 1953-1960
Gedser	24	Tripale upwind	Décrochage + freins extrémités Asynchrone 8 pôles	200 à 15m/s	30,2	450/an 1957-1966

Tableau I. 1 : Comparatif des gros prototypes pendant et après-guerre [1].

Suite au faible prix du baril de pétrole dans les années 1960, le développement et la technologie d'utilisation des éoliennes vont connaître un sérieux ralentissement, jusqu'aux années 1970 et le premier choc pétrolier. Vu le prix du pétrole à l'époque, l'estimation du coût du kW a encouragé la reprise des activités dans les installations d'éoliennes et a permis sa relance de nouveau

1.5 Développement des éoliennes après le 1^{er} choc pétrolier

Dès 1974, en profitant des connaissances du milieu aéronautique, les États-Unis ont lancé un grand programme de recherche et de développement dans la filière éolienne. Ce programme est basé sur l'association avec des partenaires qui provient des industries aéronautiques pour la fabrication des pales (Lockheed, Boeing et Hamilton) et industries électriques (General Electric et Westing-house) [1] [23].

Une équipe de la NASA a commencé par l'étude des anciennes réalisations tant américaines qu'européennes. Après plusieurs années de recherche, ces réflexions aboutirent à plusieurs réalisations, toutes basées sur une configuration bipale downwind : un prototype MOD 0 de 100 kW en 1975 suivi par quatre autre MOD 0A de 200 kW à partir de 1977 et un MOD 1 de 2 MW en 1979 [1] [11] (Figure I.7).



Figure I. 7 : Vues des prototypes MOD 0 en 1975 et MOD 1 en 1979 (photos : NASA) [1].

Malheureusement tous ces prototypes ont eu des problèmes soit dans leurs rotors construits en alliage d'aluminium ou en acier pour le MOD 1, soit dans les pales à cause des oscillations qui entraînent une fatigue accélérée du premier jeu pour le MOD 0. Pour pallier à ces problèmes et après plusieurs études, l'ensemble des rotors fut donc modifié. Par la suite, de nouveaux prototypes, plus grands, ont été réalisés, avec une configuration bipale upwind.

En Allemagne, l'erreur fut commise à cette période est le passage emblée vers une énorme machine. En 1982, a été réalisé une machine bipale downwind de 3 MW pour 100 m de diamètre (*Figure I.8*). Cette machine en engloutissant 55 millions de dollars, n'a fonctionné que 420 heures en 5 ans (source M. Heymann) [1] [11].



Figure I. 8 : Growian, l'éolienne bipale downwind allemande de 3 MW [1].

Les expériences, en Grande-Bretagne, sur de gros prototypes ont conduit à des résultats plus ou moins concluant (WEG LS-1 de 3 MW en 1987) ou en Suède (Näsudden 3 MW en 1983). Le concept bipale resté toujours le plus ravissant pour les concepteurs malgré tous les échecs, que ce soit pour des petites ou des grandes machines [1].

Afin de synthétiser le développement des éoliennes, la partie droite de la (*Figure I.9*) schématise l'évolution du diamètre en fonction de la puissance et de l'année d'arrivée des prototypes.

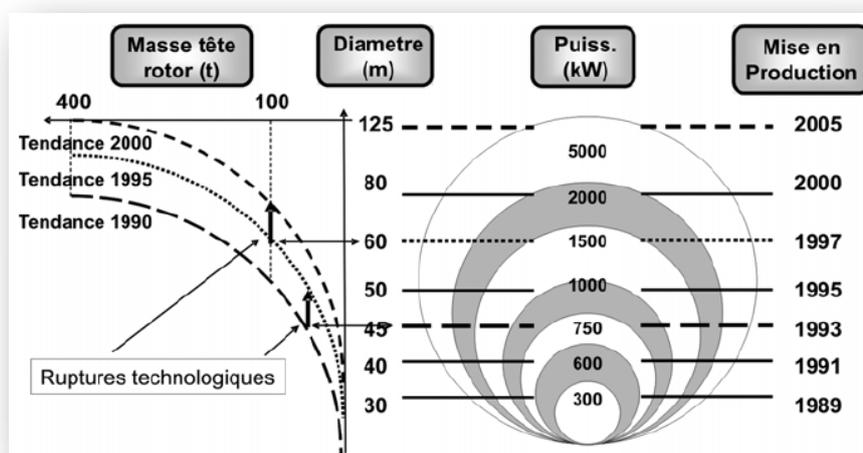


Figure I. 9 : Représentation schématique de l'évolution des prototypes en fonction de leurs puissances, diamètre et masse de l'ensemble nacelle/rotor [1].

1.6 Les perspectives des éoliennes

Sur la (Figure I.9) est schématisée une représentation de l'évolution des prototypes, proposés par la suite sur le marché, en fonction de leurs puissances, diamètre et masse de l'ensemble nacelle/rotor.

On remarque dans la partie droite de cette figure, indiquant l'évolution du diamètre en fonction de la puissance et de l'année d'arrivée des prototypes, qu'à partir de l'année 1989 jusqu'à 2000 (environ 10ans), la puissance des machines passe de 300 KW à 2MW [1].

1.7 Evolution du marché mondial

Comme il a été souligné précédemment, la promotion de l'éolien s'est toujours vue boostée par des politiques locales ou régionales, réglementaires et financières, accompagnatrices voir incitatrice.

La Figure I.10 atteste de la croissance de la capacité et l'apport annuel mondiale totale entre 1996 et 2015 [1].

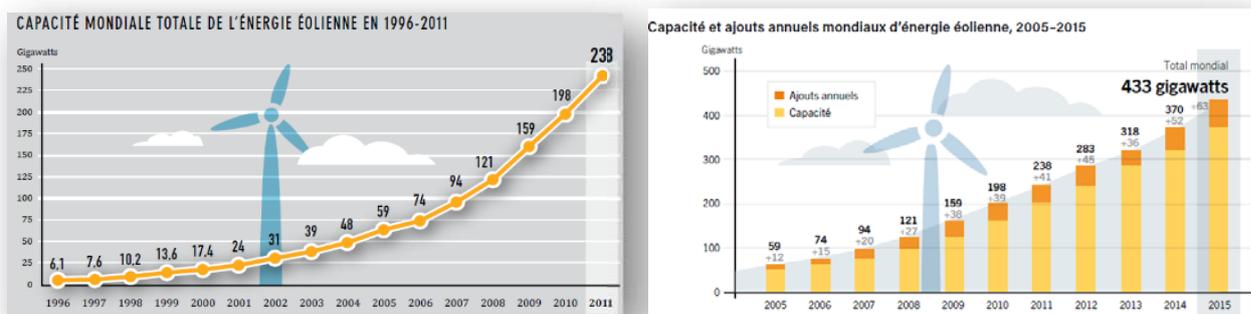


Figure I. 10 : Evolution du marché mondial et l'ajout annuel de l'énergie éolienne [45] [46].

Il est à ce titre révélateur d'observer sur la Figure I.11 les changements de répartition du potentiel éolien à travers plusieurs pays dans le monde des années 2011 et 2015.

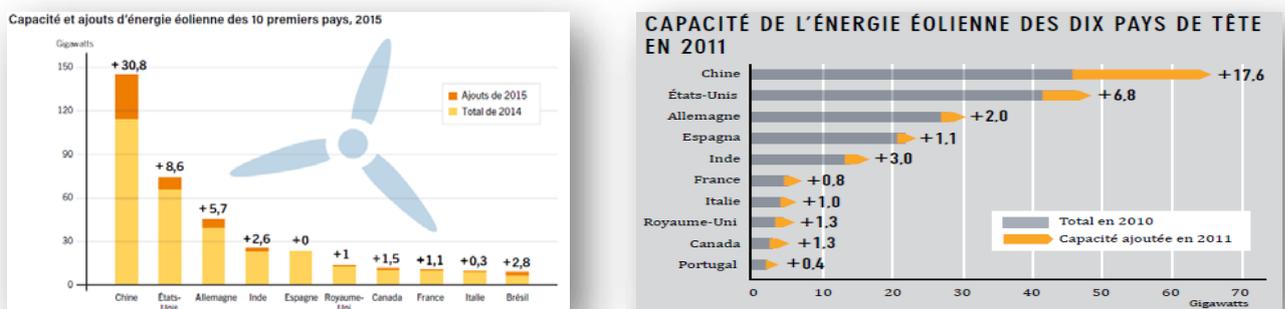


Figure I. 11 : Potentiels par pays des années 2011 et 2015 [45] [46].

Sur la Figure I.12 on observe la partition de marché des dix (10) premiers fabricants d'éoliennes en 2011 et 2015.

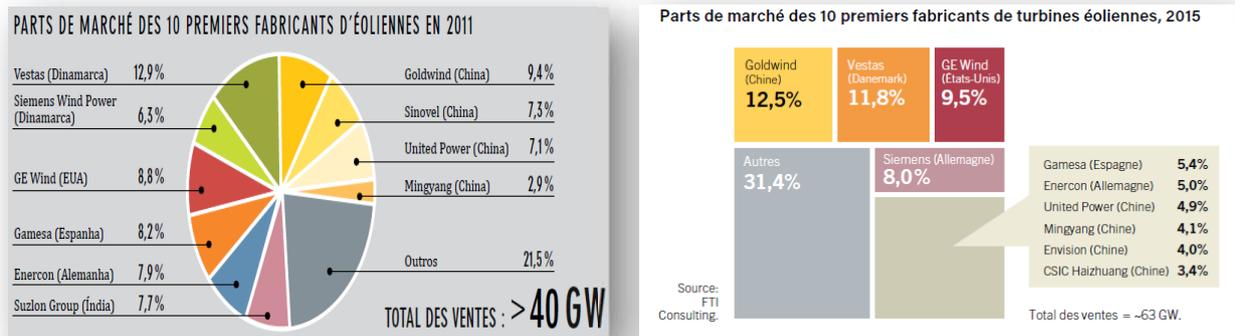


Figure 1.12 : Part de marché des dix premiers constructeurs d'éoliennes en 2011 et 2015 [44].

Le tableau ci-dessous illustre les différents constructeurs des éoliennes avec leurs puissances durant l'année 2004.

Fabricants	Pays	Chiffres 2004
Bonus	DK	600 KW à 2,3 MW
Dewind	DE	600 KW à 3 MW
Enercon	DE	300 KW à 4,5 MW
Fuhrlander	DE	30 KW à 2,7MW
Gamesa	SP	660 KW à 2 MW
Gewind	USA	1,5 MW à 3,6 MW
Jeumont industrie	F	750 KW à (1,5 MW Projet)
Made sistemas electricos	SP	600 KW à 2 MW
Negmicon	DK	750 KW à 4,2 MW
Nordex	DK	600 KW à 2,5 MW (5MW en projet)
Re power	DE	600 KW à 5 MW
Vergnet	FR	5 KW à 275 KW
Vestas	DK	660 KW à 3 MW
Windwind	FI	1 à 3 MW

Tableau 1.2 : puissance produite par producteur d'éolienne [1].

1.8 Développement des énergies éoliennes en Afrique

La majorité des pays africain se situent dans --les zones équatoriales et tropicales du globe, seules les régions du nord et de sud bénéficient du régime des vents d'ouest ce qui l'aide à disposer des meilleurs potentiels éoliens de la région. Les vitesses de vent sont généralement faibles dans beaucoup de pays de l'Afrique subsaharienne, particulièrement dans les pays enclavés. L'Afrique du Sud, l'Afrique du Nord et le littoral de la mer disposent de certains des meilleurs potentiels éoliens du continent. Cependant, il est à noter que la capacité éolienne en exploitation au niveau du continent africain reste très faible de l'ordre de 3,7 GW[8], en comparaison avec la puissance installée au niveau mondial à l'exception de l'Afrique du Nord et l'Afrique du Sud qui détient à elle seul le tiers de la puissance installée en éolienne, voir figure I.13 [4].

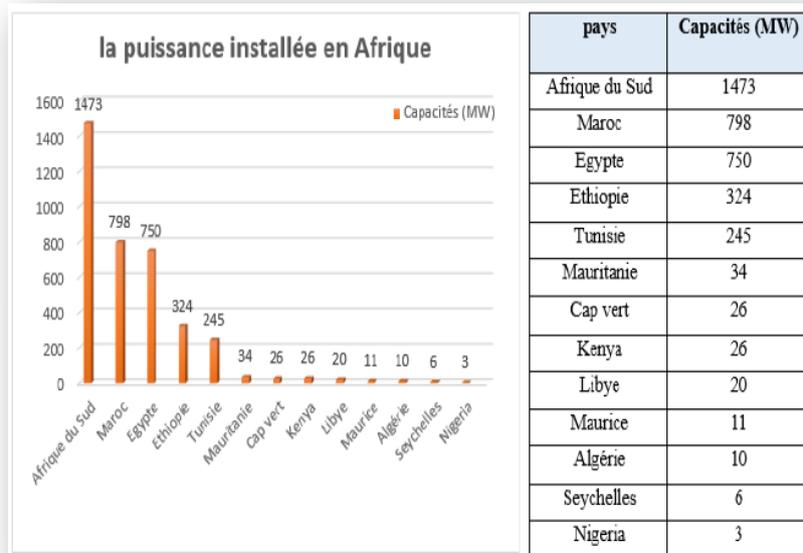


Figure I. 13 : Rang des puissances éoliennes installées en Afrique fin juin 2016 [8].

1.9 Développement des énergies éoliennes en Algérie

Selon le site international des énergies renouvelables, l'Algérie occupe la 11^{ème} place parmi les pays africains qui utilise l'énergie éolienne avec une capacité de production d'environ 10 MW à la fin de l'année 2016 [8]. La première éolienne installée en Algérie revient à la période coloniale, en 1953 par "le Service de la colonisation et de l'Hydraulique" relevant des militaires. Ce service a comme rôle le contrôle des territoires du sud algérien. Actuellement, elle appartient à la station de l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA) d'Adrar. Constitué d'un mat de 24 m surmonté d'une hélice à trois pales d'un diamètre de 15 m (Figure I.14)



Figure I. 14 : Première éolienne installée en Algérie [14].

En 1957 un autre aérogénérateur de 100KW, conçu par l'ingénieur français ANDREAU, de type bipale pneumatique à pas variable de 30m de hauteur et 25m de diamètre, a été installé au premier temps à St-Alban en Angleterre puis rachetée par l'entreprise d'électricité et du gaz d'Algérie et implanté sur le site des grands vents d'Alger [8].

En 2014, le premier parc éolien implanté dans l'Algérie indépendante est celle de Kaberten à la wilaya d'Adrar d'une puissance de 10.2 MW (*Figure I.15*). Cette installation composée de 12 éoliennes, a été mise en service début juin 2014. Chaque éolienne est d'une capacité de 850 KW avec un diamètre de 52m et une hauteur de 55m. La superficie de ce parc est d'environ 33 hectares. Le taux de pénétration de l'énergie est de 5% par rapport au réseau local.

L'Algérie s'est fixée comme objectif d'atteindre près de 40% de la production nationale d'électricité en sources renouvelable à l'horizon 2030. Les prévisions fixent la capacité de l'énergie éolienne à installer pour la période s'étalant de 2015 à 2020 à 5010 MW pour atteindre une puissance de 1 GW vers l'année 2030. Parmi les projets programmés et en plus de la réalisation de deux fermes éoliennes à Adrar, l'ONM a mis en évidence d'autres sites dans le sud soit à Tamanrasset ou à Djanet et Ain Salah [8] [29].

Figure I. 15 : La ferme éolienne à Adrar [14].



1.9.1 Répartition régionale de la vitesse du vent en Algérie

Pour installer une éolienne il faut bien choisir le site où la vitesse du vent fournirait l'énergie nécessaire, Pour sélectionner cet endroit il faut faire des mesures de la vitesse du vent dans plusieurs sites. La Figure I.16 montre un exemple des régions ventées en Algérie d'après les données satellitaires du Laboratoire d'Energie Eolienne du Centre de Recherche en Energies Renouvelables (CDER, Algérie) [7] [26]

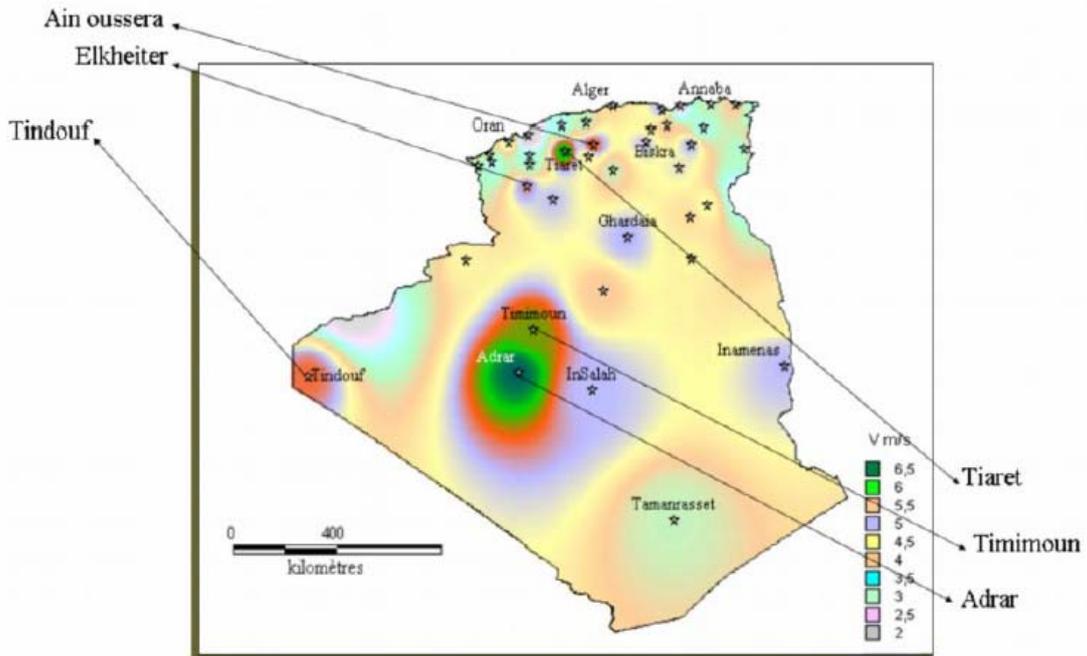


Figure I. 16 : les régions ventées en Algérie [32].

La figure I.17 indique les vitesses moyennes des vents pour différents sites situés en Algérie d’après toujours le même centre de recherche.

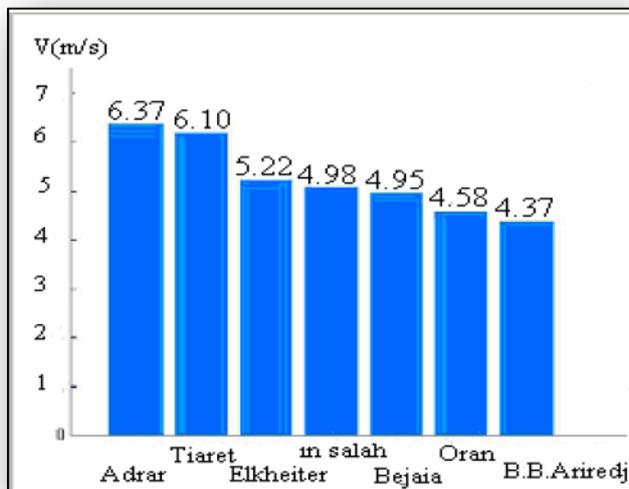
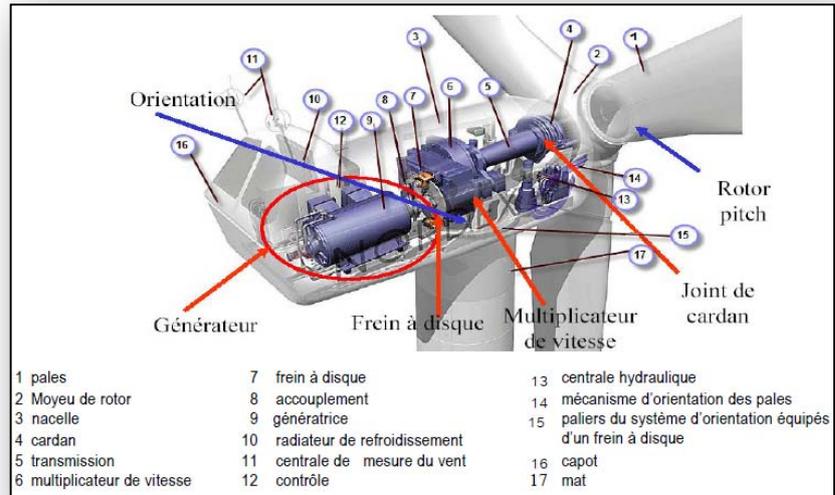


Figure I. 17 : Comparaison entre les vitesses moyennes de sites ventés [32].

1.10 Principaux composants d’une éolienne [4] [9]

Plusieurs configurations d’aérogénérateurs sont disponibles, néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux Figure I.18 :

Figure I. 18 : Elément constitution d'une éolienne [10].



1.10.1 Le mat ou la tour

C'est un tube d'acier, il doit être le plus haut possible pour bénéficier du maximum de l'énergie cinétique du vent et d'éviter les perturbations près du sol.

Il sert à supporter l'ensemble (rotor et nacelle) pour éviter tout contact possible entre les pales et le sol, aussi il aide à placer le rotor à une hauteur suffisante d'une part pour le faire sortir autant que possible du gradient de vent existant à proximité du sol et d'autre part pour améliorer ainsi la captation de l'énergie du vent.

Pour s'adapter au mieux à différents sites d'implantation, certains constructeurs proposent différentes hauteurs de tour pour un même ensemble (rotor plus nacelle) [8].

1.10.2 La nacelle

Il se trouve au sommet du mat, il regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler la génératrice électrique au rotor éolienne, elle est constituée de :

1.10.2.1 Le multiplicateur de vitesse

Son rôle est d'élever la vitesse de rotation de l'arbre secondaire entraînant la génératrice électrique par rapport à l'arbre primaire et cela pour mieux bénéficier de l'énergie cinétique du vent.

1.10.2.2 Le frein mécanique

C'est un système qui permet d'immobiliser le rotor soit pour les opérations de maintenance ou bien pour éviter la défaillance de la machine si la vitesse de rotation dépasse celle maximale.

1.10.2.3 La génératrice

C'est une machine qui assure la conversion de l'énergie mécanique extraite du vent en énergie électrique.

1.10.2.4 Le système de contrôle

C'est un moyen servant en permanence à surveiller, régler et adapter le bon fonctionnement de l'éolienne [9].

1.10.2.5 Unité de refroidissement

Elle est composée fréquemment d'un ventilateur électrique servant pour le refroidissement de la génératrice et d'un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur.

1.10.2.6 Arbre

Il est utilisé pour relier le moyeu au multiplicateur, il contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin [7].

1.10.2.7 Système d'orientation des pâles

Permettant l'ajustement des pales pour éviter tout emballement de rotor si la vitesse du vent dépasse la vitesse nominale [1].

1.10.3 Le rotor

C'est une structure tournante soumise à différentes sollicitations d'origine aérodynamique ou élastique, il est constitué des pales et de l'arbre primaire, ces éléments liés par un moyeu. Le nombre de pales varie généralement de 1 à 3 pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le rotor tripale étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, l'impact visuel et le bruit [1] [9].

Il existe deux types de rotor, les rotors à vitesse fixe et les rotors à vitesse variable.

1.10.3.1 Les rotors à vitesse fixe :

Ils sont généralement munis d'un système d'orientation des pales permettant à la génératrice de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif intermédiaire. Ce système est connu par sa simplicité et son faible coût [33].

1.10.3.2 Les rotors à vitesse variable :

Ils sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie [33].

1.11 Les différents types d'éoliennes [4] [6]

Dans le monde deux grandes familles des éoliennes sont disponibles : Les aérogénérateurs à axe vertical (VAWT) et à axe horizontal (HAWT).

1.11.1 Eoliennes à axe vertical :

Ce sont les premières structures qui ont été développées pour produire de l'électricité. Leur avantage c'est d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol ce qui facilite tout accès pour éventuelle maintenance et contrôle (*Figure I.19*).



Figure I. 19 : Petites éoliennes à axe vertical [6] [15] [17].

Depuis les années 1920 plusieurs variantes ont été testés de nombreuses variantes ont été testé dont la majorité sans succès sauf deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation à savoir :

1.11.1.1 Le rotor de Savonius

Du nom de son inventeur, breveté en 1925, son principe de fonctionnement est basé sur la différence d'intensité entre les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux, qui résulte un couple moteur provoquant l'entraînement et la rotation de l'éolienne *Figure I.20* [12].

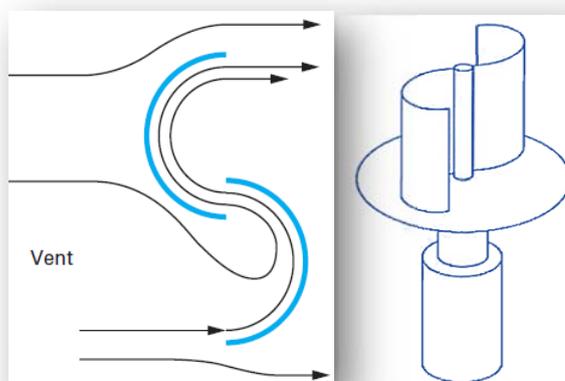


Figure I. 20 : Éolienne type Savonius [6] [30].

1.11.1.2 Les éoliennes à variation cyclique d'incidence

La structure la plus répandue dans cette structure est celle de Darrieus (*Figure I.20*) (ingénieur français qui déposa le brevet au début des années 1930). Leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas se déclencher d'elle-même. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur).

Ces genres d'éoliennes ne sont quasiment plus utilisées, à cause des contraintes mécaniques au niveau du sol et occupent plus d'espace.

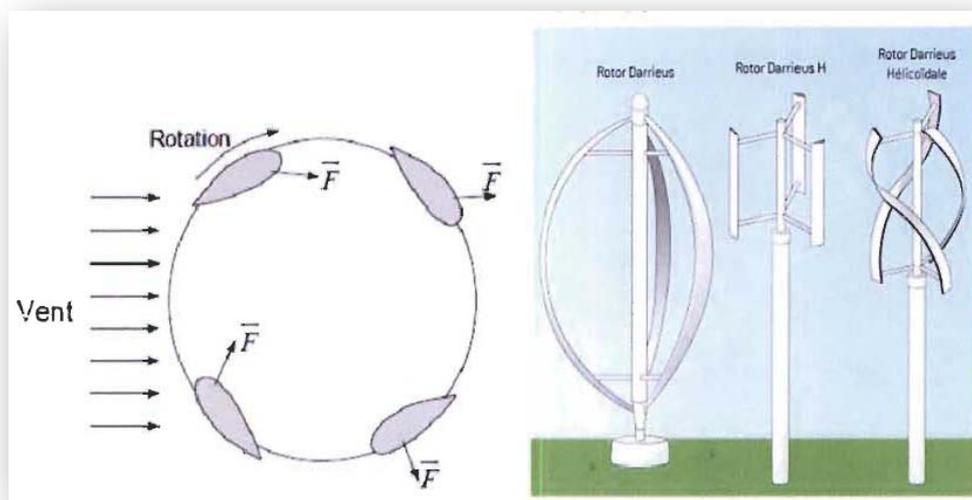


Figure I. 21 : Éoliennes type Darrieus [6].

Néanmoins elles restent marginales et peu utilisées voir abandonnées actuellement à cause de sa faible vitesse, des turbulences qui affectent le capteur d'énergie situé auprès du sol, et de la surface importante qu'elles occupent au sol pour les éoliennes de grande puissance [7].

1.11.2 Éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal (*Figure I.22*) sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées de façon aérodynamique à la manière des ailes d'avion servant pour générer le couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation d'éolien. La portance de ces pales sert à générer un couple moteur destiné à entraîner une génératrice électrique.



Figure I. 22 : Eoliennes à axe horizontal [15] [6].

Deux types de configuration peuvent être rencontrés :

- les éoliennes **amont**, sur lesquelles les pales sont situées du côté de la tour exposé au vent et les éoliens **avals** (Figure I.23)

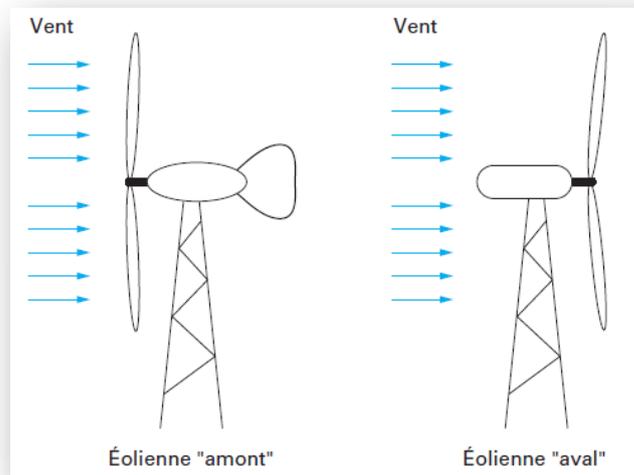


Figure I. 23 : types d'éoliennes à axe horizontal [30].

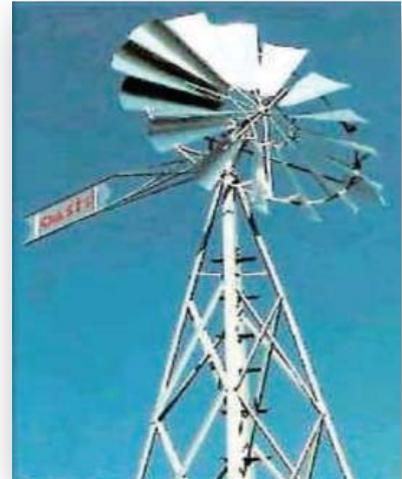
Les éoliennes à axe horizontal sont les plus utilisées car elles représentent un coût moins important et elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques (la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol) [4].

Les éoliennes à axe horizontal peuvent être classifiées aussi en deux catégories :

1.11.2.1 Eoliennes lentes

Ils sont munis d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40). Les pales couvrent presque toute la surface de la roue, elles sont utilisées généralement dans le pompage pour alimenter du bétail en eau dans les vastes plains, elles sont adaptées aux vents de faible vitesse (Figure I.24).

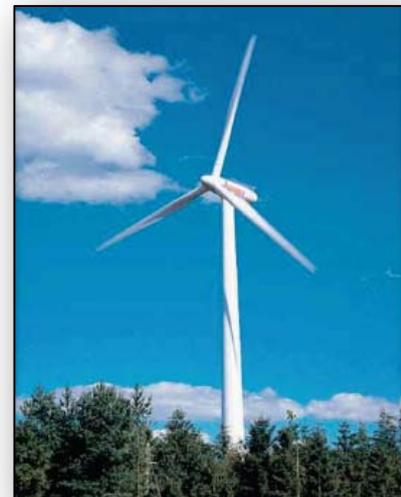
Figure I. 24 : Eolienne lente [6].



1.11.2.2 Eoliennes rapides

Les éoliennes rapides ont un nombre de pales assez réduit, qui varie généralement entre 2 et 4 pales. Elles sont les plus utilisées dans la production d'électricité en raison de leur efficacité, de leur poids (moins lourdes comparées à une éolienne lente de même puissance) et de leur rendement élevé. Elles présentent, par contre, l'inconvénient leur difficulté en démarrage Figure I.25

Figure I. 25 : Eolienne rapide [6].



1.12 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

Le taux de croissance de l'énergie éolienne est sûrement lié aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Malheureusement ce type d'énergie présente des inconvénients qu'il faut les connaître pour essayer au maximum de les corriger, afin que ceux-ci ne deviennent pas une entrave à son développement [4] [7].

1.12.1 Avantages de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne présente plusieurs avantages motivant leur utilisation à l'échelle mondiale à savoir :

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, écologique, fiable, économique, et inépuisable, c'est une énergie qui respecte l'environnement on participant à long terme au maintien de la biodiversité des milieux naturels.
- L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple ;
- La durée de vie des éoliennes modernes s'étalant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à des nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles ;
- Son cout d'investissement et d'exploitation est le moins chère par rapport aux autres énergies renouvelables et traditionnelles ;
- Ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique déjà existant.

1.12.2 Inconvénients de l'énergie éolienne

Malgré les avantages cités précédemment l'énergie éolienne présente des inconvénients à savoir :

- L'impact visuel ;
- Les bruits mécaniques ou aérodynamiques et les interférences électromagnétiques ;
- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux ;
- C'est une source d'énergie intermittente, elle dépend de la topographie, de la météo et de l'environnement.

Il est à noter qu'il a fallu plusieurs décennies pour réaliser des éoliennes silencieuses,

1.13 Conclusion

Motivé par la croissance de la puissance éolienne installée dans le monde et afin d'essayer de participer aux efforts national dans la recherche et le développement de cette énergie ainsi que leur intégration aux réseaux électriques, on va essayer dans le chapitre suivant, de l'étudier en détail.

On va commencer par une modélisation du système mécanique de l'éolienne (turbine, multiplicateur et vitesse de vent), ensuite sélectionner un régulateur, sur la base de ses performances pour extraire le maximum de la puissance venant du vent, on utilisant la stratégie MPPT.

Etude, Modélisation et Simulation d'une turbine d'un aérogénérateur

Comme déjà vu précédemment, il existe actuellement dans le monde deux grandes familles d'éoliennes : celle à axe vertical et celle à axe horizontal. Pour des raisons économiques liées à leur fabrication et à leur installation, les éoliennes à axe horizontal sont les plus utilisées. A partir des éoliennes à axe horizontal, on distingue aussi deux sous famille, celles à vitesse fixe et celles à vitesse variable. Dans le domaine de la production d'énergie électrique, les éoliennes à vitesse variable sont les plus utilisées sur le réseau électrique vu leurs fonctionnent sur une.

Dans ce chapitre, on va présenter la modélisation des différents composants constituant d'une turbine éolienne, un multiplicateur de vitesse et un arbre de transmission [3][8].

2.1 Conversion de l'énergie éolienne

2.1.1 Principe

La partie tournante de la turbine éolienne qui est le rotor pitch transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, en utilisant le flux d'air créé autour du profil aérodynamique. Ce profil se composera en poussée entraînant le rotor et en traînée parasite. La puissance mécanique est ensuite transformée en puissance électrique [6].

2.1.2 Eléments caractéristiques d'une pale

Les éléments constituant le profil aérodynamique d'une pale sont (voir Figure II.1) :

- Corde : d'une longueur l du profil du bord d'attaque au bord de fuite.
- Angle de calage β (inclinaison de l'axe de référence par rapport au plan de rotation).
- Extradados : dessus des pales
- Intrados : dessous des pales

Généralement les profils aérodynamiques sont soit de type plan-convexe (l'intrados est plan et l'extrados est convexe) soit biconvexe (l'intrados et l'extrados sont convexes). [7]

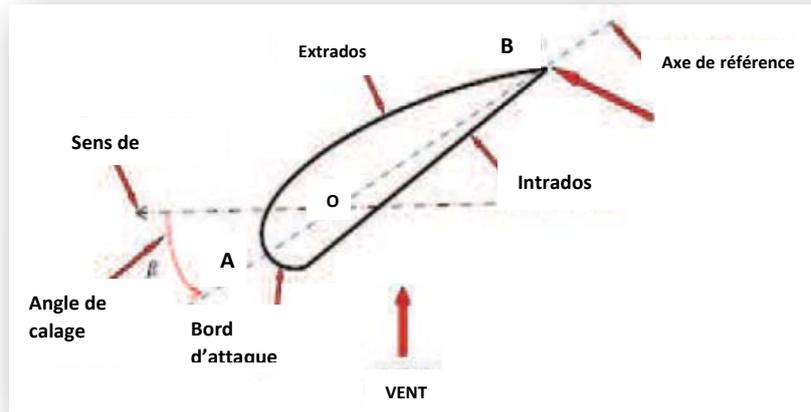


Figure II. 1 : Eléments constituant le profil aérodynamique d'une pale [6].

2.2 Modélisation du système éolienne

2.2.1 Introduction

La conversion d'énergie cinétique du vent en énergie électrique par une éolienne est caractérisée par trois éléments principaux qui sont : la turbine (le moyeu et les pales), le multiplicateur et le générateur comme le montre la Figure II.2

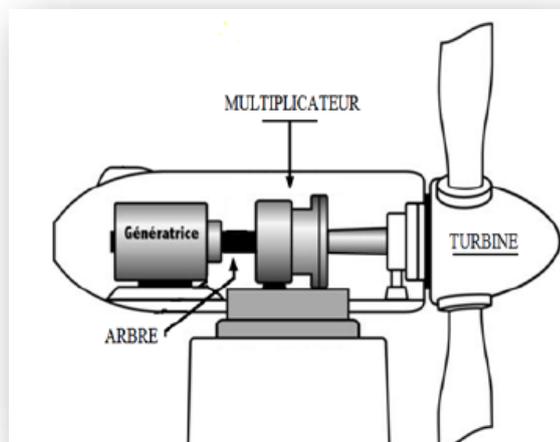


Figure II. 2 : Schéma d'une éolienne [8].

2.2.2 Rendement énergétique d'une éolienne (Théorie de Betz)

L'énergie récupérée par une éolienne est inférieure à l'énergie cinétique de l'air situé en amont (une éolienne ne récupère qu'une partie de l'énergie cinétique du vent), puisque l'air doit conserver une énergie cinétique résiduelle pour qu'il subsiste un écoulement. D'après Albert Betz, physicien allemand, une éolienne ne pourra convertir en maximal que $16/27$ soit 59% de l'énergie cinétique contenue dans le vent en énergie mécanique. Il a déterminé cette limite en considérant les hypothèses suivantes [5] :

- L'écoulement est incompressible et stationnaire, et on raisonne en une dimension (1D) par tranches uniformes.
- Le disque hélice de l'éolienne est constitué d'un cylindre à l'infini amont, et d'un cylindre à l'infini aval.
- La négligence de l'interaction du vent environnant avec le sillage ainsi défini.

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure II-3 sur laquelle on a représenté la vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur V_1 et V_2 en aval. [8] [4] [7].

V : la vitesse du vent au niveau des pales de l'éolienne.

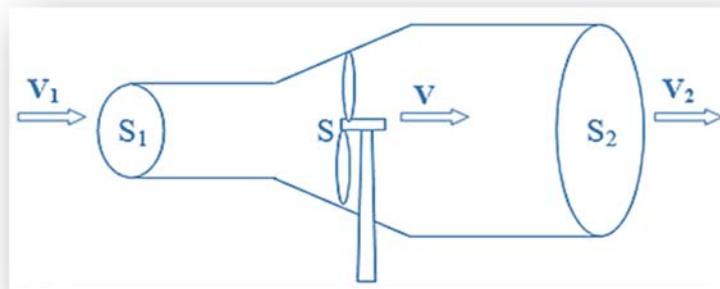


Figure II. 3 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne [8].

En appliquant la loi de conservation de la masse on obtient :

$$V_1 S_1 = VS = V_2 S_2 \quad \text{II. 1}$$

La force de portance au rotor de la turbine est donnée par :

$$F = \rho S_1 V_1^2 - \rho S_2 V_2^2 \quad \text{II. 2}$$

Avec ρ la densité de l'air (1.22 kg/ m3) à la pression atmosphérique à 150°C.

Tenons compte de l'équation II.1 alors :

$$F = \rho SV(V_1 - V_2) \quad \text{II. 3}$$

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

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad \text{II. 4}$$

Si on définit le facteur fractionnaire de diminution dans la vitesse du vent entre la position S_1 et la position S par :

$$a = \frac{V_1 - V}{V_1} \quad \text{II. 5}$$

Tenons compte des équations II.3 et II.4 alors :

$$F = \frac{1}{2} \rho S V_1^2 4a(1 - a) \quad \text{II. 6}$$

La puissance extraite du vent par le rotor égale le produit de la portance et la vitesse du vent au plan du rotor V

$$P_{aero} = FV = \frac{1}{2}\rho S V_1^2 4a(1-a)V = \frac{1}{2}\rho S V_1^3 4a(1-a)^2 \quad II.7$$

La puissance totale P de ce vent théoriquement non perturbé qui traverse cette surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , est donnée par :

$$P = \frac{1}{2}\rho S V_1^3 \quad II.8$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent P_{aero} et la puissance totale P théoriquement disponible qui est appelé le coefficient de puissance est alors :

$$C_p = \frac{P_{aero}}{P} = 4a(1-a)^2 \quad II.9$$

Afin de trouver la valeur maximale de ce coefficient il faut dériver l'équation II.9, on obtiendra alors :

$$\frac{\partial C_p}{\partial a} = 4(3a^2 - 4a + 4) = 0 \Rightarrow a = \frac{1}{3}$$

En remplaçons la valeur de a dans II.9 on aura :

$$C_{pmax} = \frac{16}{27} \approx 0,593$$

Cette limite est appelée la limite de Betz, elle fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée elle est théorique, en réalité on ne pourra jamais atteindre cette valeur. Dans l'industrie, chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance.

A partir de C_{pmax} , on peut définir la valeur de la puissance aérodynamique maximale comme suite :

$$P_{aero}(max) = C_{pmax} \cdot P = \frac{16}{27} \frac{1}{2} \rho S V_1^3$$

2.2.3 Modèle de la turbine

Comme déjà déclaré précédemment, une éolienne ne récupère qu'une partie de la puissance du vent qui est déterminée par le coefficient de puissance C_p . Chaque éolienne a son propre coefficient de puissance qui est exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{\Omega_T R_T}{V_V} \quad II.10$$

Avec :

V_V [m/s]: La vitesse du vent ;

R_T [m] : Le rayon de la turbine ;

Ω_T : La vitesse angulaire de la turbine ;

Le coefficient de puissance $C_p = f(\lambda, \beta)$, qui est une fonction non linéaire de λ et de l'angle d'orientation des pales β , est donné par plusieurs expressions approchées à savoir :

a.	$C_p(\lambda, \beta) = [0.5 - 0.00167(\beta - 2)] \sin \frac{\pi(\lambda-3)}{18.05-0.3(\beta-2)} - 0.00814 (\lambda - 3)(\beta - 2)$
b.	$C_p(\lambda, \beta) = \left(C_1 \left(C_2 \left(\frac{1}{\lambda+0.08\beta} - \frac{0.0035}{(\beta+1)} \right) C_3 \beta - C_4 \right) e^{-C_5 \left(\frac{1}{\lambda+0.08\beta} - \frac{0.0035}{(\beta+1)} \right)} + C_6 \lambda \right)$ Où : $C_1 = 0.519 ; C_2 = 116 ; C_3 = 0.4 ; C_4 = 5 ; C_5 = 21 ; C_6 = 0.0068 ;$
c.	$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda'} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda'}} \text{ et } \lambda' = \left(\frac{1}{\lambda+0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta+1} \right)$
d.	$C_p(\lambda, \beta) = 7.95633 \cdot 10^{-5} \lambda^5 - 17.375 \cdot 10^{-4} \lambda^4 + 9.86 \cdot 10^{-3} \lambda^3 - 9.4 \cdot 10^{-3} \lambda^2 + 6.38 \cdot 10^{-2} \lambda + 0.001$

La Figure II.4 représente la variation de ce coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative λ pour différents angles d'orientation de pale β .

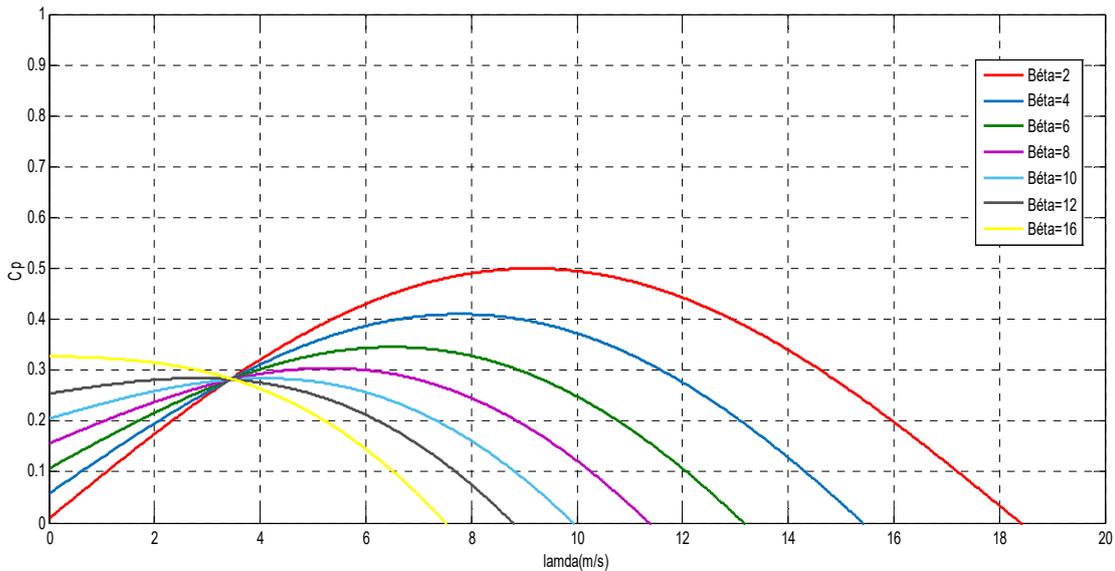


Figure II. 4 : Coefficient de la puissance en fonction de la vitesse relative de la turbine

La puissance aérodynamique extraite à partir du vent peut être exprimé comme suit :

$$P_{aero} = C_p \cdot P_v = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho S V_1^3}{2} \tag{II. 11}$$

Le couple aérodynamique extrait par la turbine est défini par l'équation suivante :

$$C_{aero} = \frac{P_{aero}}{\Omega_T} = \frac{\rho S R_T V_1^2}{2\lambda} C_p(\lambda, \beta) \tag{II. 12}$$

2.2.4 Modèle de la partie mécanique

La partie mécanique de la turbine comprend les pales orientables de longueur R , fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse de rotation Ω_t . En effet, quand le diamètre du rotor est grand, les vitesses de rotation de l'éolienne sont trop faibles. Pour résoudre ce problème et afin d'obtenir une puissance considérable à partir de la vitesse de vent, un multiplicateur de gain G_g est installé entre la turbine et la génératrice voir Figure II.5

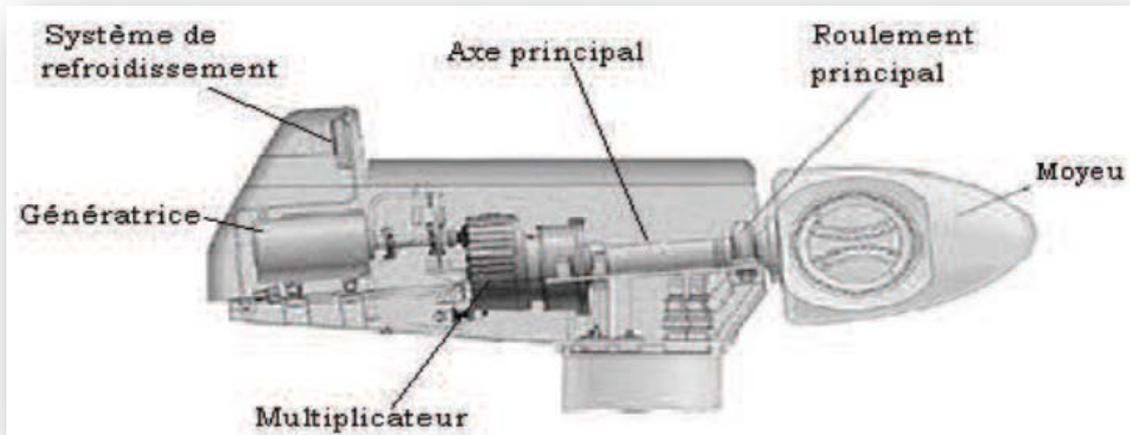


Figure II. 5 : Principaux composants d'une éolienne [17].

Si on considère les hypothèses suivantes [3] [8] [17]

- les pales identiques
- la répartition de la vitesse du vent sur toutes les pales est uniforme (une égalité de toutes les forces de poussée)
- l'ensemble des pales comme un seul et même système mécanique, caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques
- le coefficient de frottement des pales par rapport à l'air négligeable
- la vitesse de la turbine étant très faible
- les pertes par frottement seront considérées négligeables devant les pertes par frottement du côté de la génératrice

On obtient alors un modèle mécanique constitué de deux masses comme l'illustre la Figure II.6

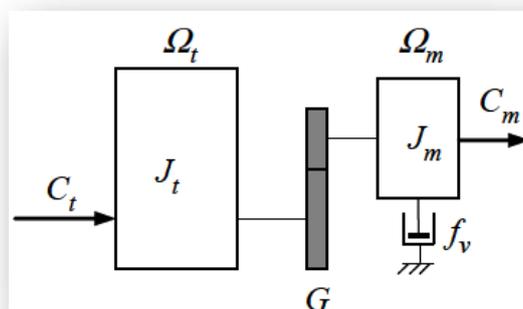


Figure II. 6 : Modèle mécanique de la turbine éolienne [8].

Avec :

- J_t : Le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des trois pales de l'éolienne,
- J_g : Le moment d'inertie de la génératrice,
- f_v : Le coefficient dû aux frottements visqueux de la génératrice,
- C_m : Le couple mécanique sur l'arbre de la génératrice,
- Ω_m : La vitesse de rotation de la génératrice.

2.2.4.1 Modèle du multiplicateur

En considérant que le multiplicateur est idéal, c'est-à-dire que les pertes mécaniques sont négligeables, il est alors modélisé par les deux équations suivantes :

$$C_m = \frac{C_t}{G_g} \quad \text{II. 13}$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega_m}{G_g} \quad \text{II. 14}$$

Avec :

- C_m : Couple mécanique de la génératrice (Nm).
- C_t : Couple de la turbine (Nm)
- Ω_m : Vitesse mécanique de la génératrice (rad/s).
- Ω_t : Vitesse de la turbine (rad/s).
- $G_g = G_m = G$: Le gain de multiplicateur

2.2.4.2 Equation dynamique de l'arbre

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie J_t comprenant la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de la turbine reportée sur le rotor et l'inertie de la génératrice J_g . Cette inertie est donnée par :

$$J = \frac{J_t}{G_g^2} + J_g$$

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

$$J \cdot \frac{d\Omega_m}{dt} = C_m$$

Le couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{visc} et le couple issu du multiplicateur C_g et il est donné par :

$$C_m = C_g - C_{em} - C_{visc}$$

Le couple des frottements visqueux C_{visc} est donné par la relation :

$$C_{visc} = f \cdot C_m$$

Où f : Le coefficient de frottements visqueux

Alors, nous pouvons écrire l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre de la génératrice (MADA) par :

$$\left(\frac{J_t}{G_g^2} + J_g \right) \frac{d\Omega_m}{dt} + f_v \cdot \Omega_m = C_m - C_{em} \quad II. 15$$

Avec :

- C_{em} : Le couple électromagnétique de la génératrice
- J_t : Moment d'inertie de la turbine (Nm)
- J_g : Moment d'inertie du moteur (Nm)

Selon la nature de la transmission entre la turbine et la génératrice on peut distinguer deux cas pour la modélisation du système éolienne présente :

- ✓ **Rigide** : Dont l'accouplement entre la turbine et la génératrice est assuré seulement par un multiplicateur de vitesse.
- ✓ **Souple** : Si l'accouplement est assuré par un multiplicateur et un système amortisseur-ressort.

2.2.4.2.1 Modèle de transmission rigide

La modélisation en transmission rigide Figure II.7, ne considère que l'inertie totale J constituée de l'inertie J_t de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et celle de la génératrice J_g

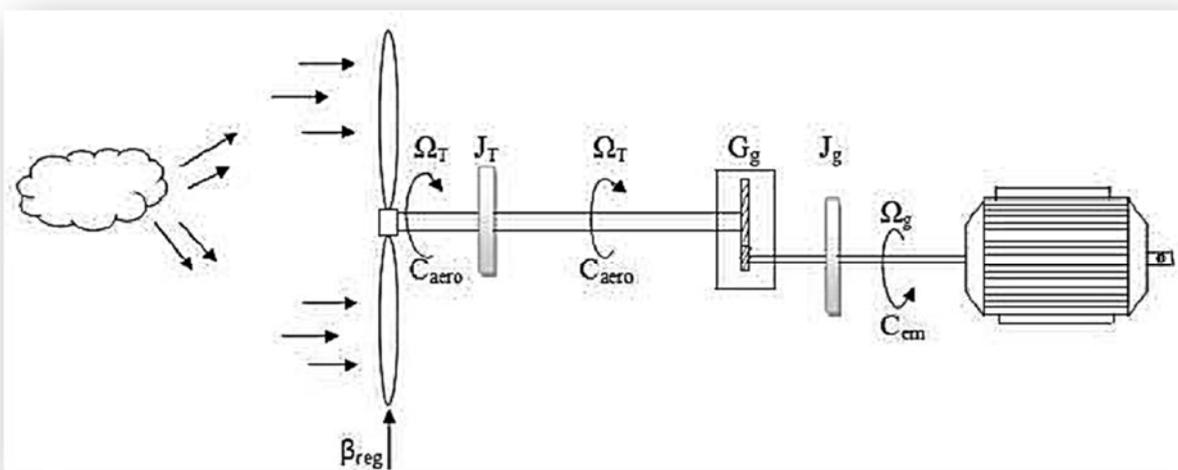


Figure II. 7 : Modèle rigide de l'éolienne

L'inertie totale est donnée par :

$$J = \frac{J_t}{G_g^2} + J_g \tag{II.16}$$

Le modèle de la partie mécanique en transmission rigide est donné par l'équation :

$$J \frac{d\Omega_t}{dt} = C_{aero} - G_g C_{em} \tag{II.17}$$

La représentation du modèle rigide est donnée par le schéma blocs de la Figure II.8

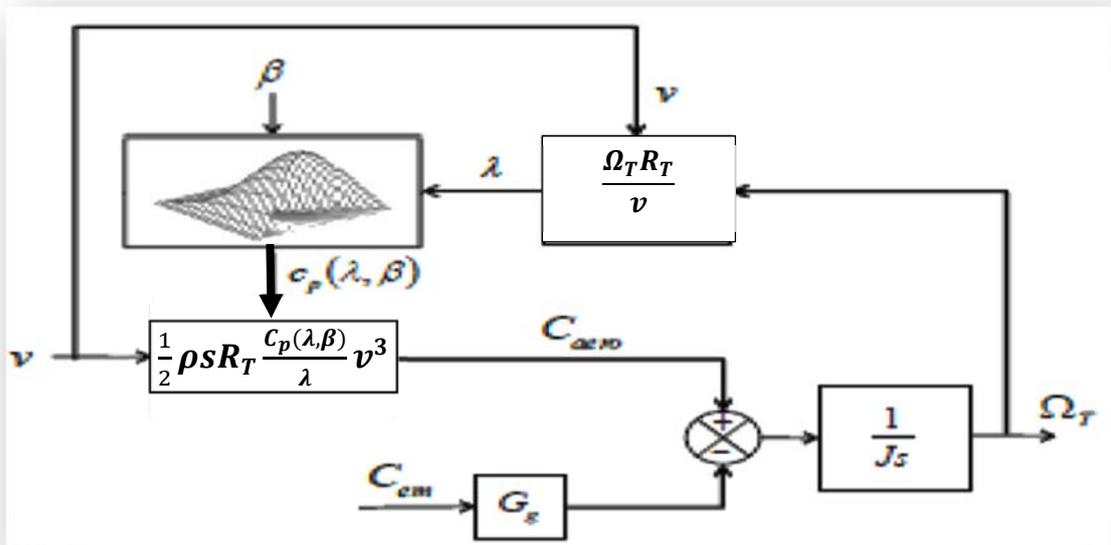


Figure II. 8 : Schéma blocs du modèle rigide de l'éolienne.

2.2.4.2.2 Modèle de transmission souple

On peut présenter le model de couplage mécanique en transmission souple sur la Figure II.9, dont les deux masses sont connectées à un arbre souple caractérisé par un coefficient d'élasticité de l'arbre d'entraînement des pales (k) et un coefficient de frottement (d) de l'arbre par rapport au multiplicateur.

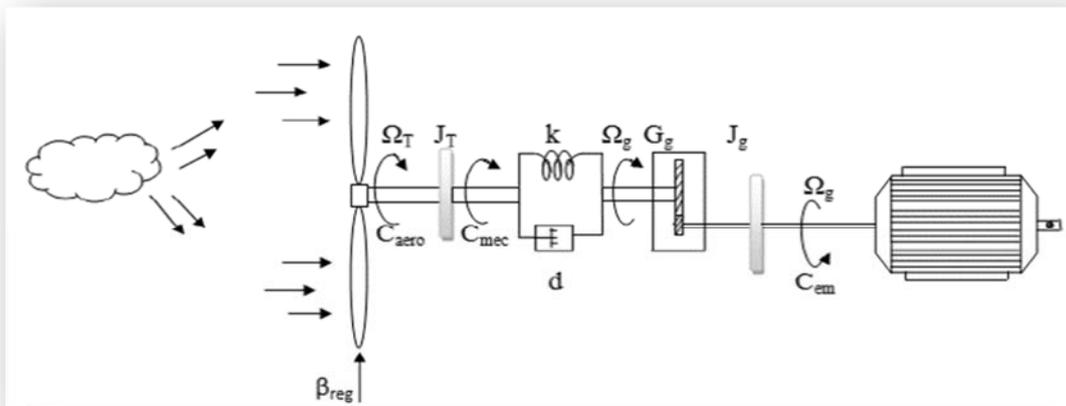


Figure II. 9 : Modèle souple de l'éolienne

A partir de ce Figure on peut écrire les équations suivantes :

$$J \frac{d\Omega_t}{dt} = C_{aero} - C_{em} \quad II. 18$$

$$J_{g-BV} \frac{d\Omega_{g-BV}}{dt} = C_m - G_g C_{em} \quad II. 19$$

$$J_{g-BV} \frac{d\Omega_{g-BV}}{dt} = C_m - G_g C_{em} \quad II. 20$$

$$\frac{d\Omega_m}{dt} = k \left(\Omega_t - \Omega_{g-BV} \right) + d \left(\frac{d\Omega_t}{dt} - \frac{d\Omega_{g-BV}}{dt} \right) \quad II. 21$$

Où Ω_{g-BV} et J_{g-BV} étant respectivement la vitesse de rotation et l'inertie de la génératrice ramenées à l'arbre de la génératrice données par :

$$\Omega_{g-BV} = \frac{\Omega_g}{G_g} \quad II. 22$$

$$J_{g-BV} = G_g^2 J_g \quad II. 23$$

A partir des équations précédentes le modèle souple est alors représenté par le schéma blocs de la Figure II.10.

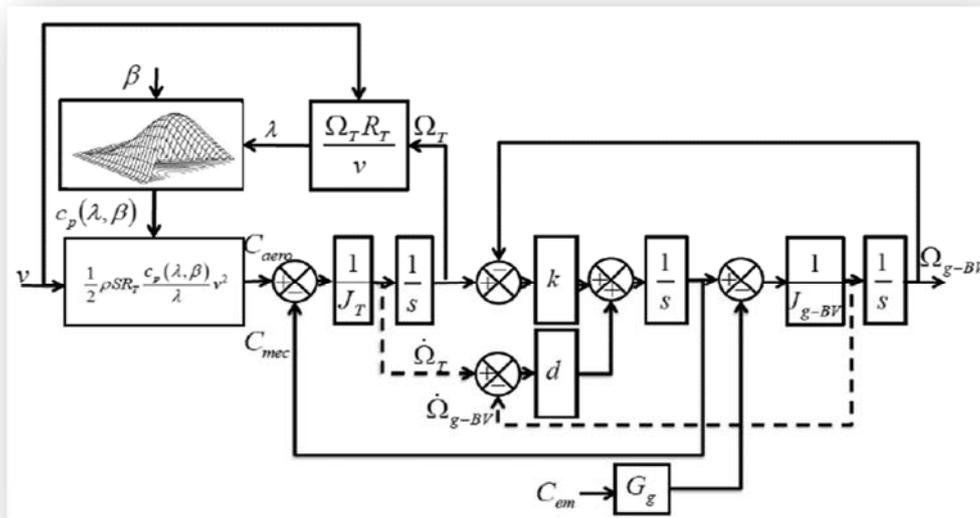


Figure II. 10 : Schéma blocs du modèle souple de l'éolienne [7].

Ce schéma bloc montre que la vitesse de rotation Ω_m de la génératrice (MADA), donc de la turbine, peut être contrôlée par action, soit sur l'angle de calage des pales β , soit sur le couple électromagnétique C_{em} de la MADA. La vitesse du vent v est considérée comme une entrée perturbatrice au système.

2.2.5 Modélisation du système d'orientation des pales

Afin de permettre le maintien de la puissance de la machine à une valeur constante pour une vitesse de vent supérieure à sa valeur nominale v_n un moyen de régulation appelé système d'orientation des pales (**pitch**) est utilisé. Son principe de fonctionnement est basé sur l'ajustement de la portance

des pales (variation de l'angle de calage β). En agissant sur cet angle β , on peut régler les performances de l'éolienne suite à la variation du coefficient de puissance.

La commande du système d'orientation des pales est basée sur un angle de calage de référence qu'on note β_{reg} [7] [4].

La dynamique de l'actionneur pitch est généralement décrite par la fonction de transfert de premier ordre suivante :

$$\beta = \frac{1}{1+\tau_\beta s} \beta_{reg} \quad \text{II. 24}$$

Avec τ_β : La constante de temps du système de premier ordre de l'actionneur pitch. Lors de la modélisation du système d'orientation de pales, il est très important de modéliser la vitesse de variation de l'angle de calage β . En effet, compte tenu des efforts subis par les pales, la variation de cet angle doit être limitée à $10^\circ/\text{s}$. La valeur de saturation de l'angle de calage en position est de 45° . Le modèle de l'actionneur de l'angle de calage est représenté sur la Figure II.11

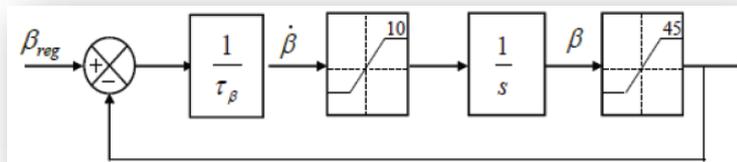


Figure II. 11 : Modèle de l'actionneur de l'angle de calage.

2.3 Caractérisation et modélisation du Vent

2.3.1 Répartition instantanée de la vitesse du vent

Le vent souffle là où existe une différence de température et de pression de l'air et il se dirige toujours des hautes vers les basses pressions. Si la terre ne tournait pas, l'air se déplacerait directement (en ligne droite) des centres de haute pression (anticyclone) vers les centres de basse pression (cyclone) mais à cause de cette rotation du globe, l'air est forcé de suivre une trajectoire courbe, légèrement infléchi vers la basse pression (force de Coriolis) Figure II.12. Dans l'hémisphère Nord, l'air circule dans le sens des aiguilles d'une montre autour des centres de haute pression et dans le sens contraire autour des centres de basse pression et dans l'hémisphère Sud, la situation s'inverse [28].

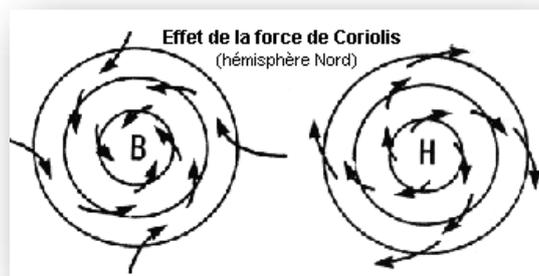


Figure II. 12 : Répartition du vent [28].

Le choix géographique d'un site pour l'implantation d'un aérogénérateur est important pour tout projet de production d'énergie éolienne. Pour pouvoir calculer l'énergie qui pourra être effectivement extraite du gisement éolien il faudrait connaître les caractéristiques du vent dans ce site. Pour cela des mesures de la vitesse du vent ainsi que de sa direction, sur une grande période du temps et sur plusieurs sites est indispensable.

2.3.2 Mesure de la vitesse du vent

La composante horizontale du déplacement de l'air en un point et à un instant donnée se dispose selon une certaine direction. Elle atteint en outre une vitesse déterminée appelée (vitesse du vent). Elle est mesurée généralement en mètres par seconde (m/s), en kilomètres par heure (km/h), mais aussi en nœud ou miles par heure.

La mesure de la vitesse du vent se fait le plus souvent par l'emploi d'un anémomètre à coupelles Figure II.13. Un tel anémomètre est muni d'un rotor de trois coupelles qui, sous l'effet du vent, se met à tourner autour d'un axe vertical. La vitesse de rotation est enregistrée électroniquement. En général, l'anémomètre est également doté d'une girouette indiquant la direction du vent. Au lieu de coupelles, l'anémomètre peut être muni d'une hélice, une solution qui est assez rare.

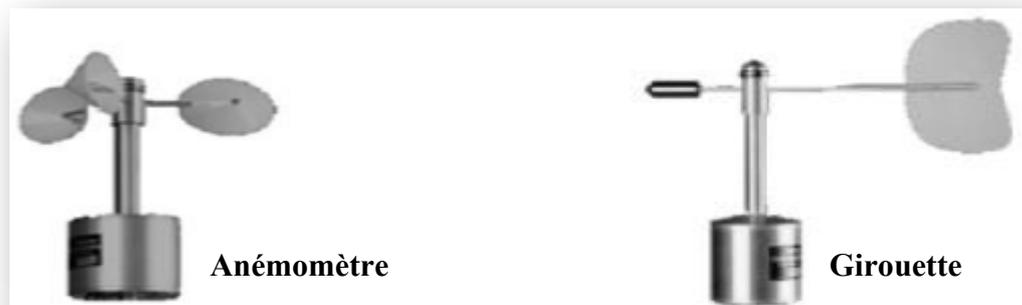


Figure II. 13 : Schéma d'un anémomètre et d'une girouette [26].

2.3.2.1 Distribution de Weibull [26]

La fonction de répartition du vent $F(V)$ est la probabilité que la vitesse du vent soit inférieure à une certaine valeur V et que la densité de probabilité $f(v)$ est la dérivée de cette fonction :

$$f(v) = \frac{dF(V)}{dV}$$

Parmi les distributions utilisées dans les modèles statistiques, la distribution de Weibull s'est avérée appropriée pour la description des propriétés statistiques du vent. Cette fonction avec deux paramètres c et k s'écrit :

$$f(v) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{V}{c} \right)^k \right]$$

Avec :

- k paramètre de forme caractérise la répartition du vent,

- c paramètre d'échelle caractérise la vitesse du vent (plus c est élevé plus l'énergie se trouve dans les hautes vitesses)
- V vitesse du vent "instantanée" (moyennée sur 10 mn)

2.3.2.2 Influence de la hauteur

Pour définir les caractéristiques d'un site éolien, il est impératif de connaître la hauteur sur laquelle les mesures sont prises et ensuite adapter les résultats à la hauteur de mat de l'éolienne. En effet, la vitesse du vent V augmente selon la hauteur h . L'expression suivante donne la méthode de ce calcul et on précise que h est la hauteur du mat, h_{mes} est la hauteur des appareils de mesure et α la valeur de rugosité.

$$V_V(h) = V_V(h_{mes}) \cdot \frac{\ln\left(\frac{h}{\alpha}\right)}{\ln\left(\frac{h_{mes}}{\alpha}\right)}$$

Le Tableau suivant donne les valeurs de rugosité α en fonction du caractère des obstacles dans l'environnement.

Nature du sol	Paramètre de rugosité
Surface d'un plan d'eau	0.002
Terrain vague avec surface lisse (piste de décollage, gazon entretenu,...)	0.0024
Zone agricole sans barrière ni haie, parsemée d'habitations éparses sur un relief de collines douces.	0.003
Zone agricole avec quelques maisons et hautes haies (d'une hauteur de huit mètres maximum) espacées d'environ 1250 m.	0.055
Zone agricole avec quelques maisons et hautes haies (d'une hauteur de huit mètres maximum) espacées d'environ 500 m.	0.1
Zone agricole avec de nombreux bâtiments, ou des haies de 8 mètres espacées de 250 m.	0.2
Grandes villes avec bâtiments hauts	0.8
Très grandes villes avec de grands immeubles et gratte-ciel.	1.6

Tableau II. 1 : Paramètre de rugosité en fonction de l'environnement [28].

Le tableau ci-dessous donne un exemple de l'évolution du vent en fonction de la hauteur dans une région ventée par un « vent orographique » (vent existant au niveau d'une région indépendamment des effets de rugosité).

Hauteur	Vitesse moyenne estimée
90 m (vent orographique)	6,8 m/s
80 m	6,5 m/s
70 m	6,3 m/s
60 m	6,0 m/s
50 m	5,7 m/s
40 m	5,3 m/s
30 m	4,9 m/s
20 m	4,3 m/s
10 m	3,5 m/s

Tableau II. 2 : Vitesses moyenne du vent en fonction de la hauteur [26]

2.3.3 Modélisation de la vitesse du vent

Dans le but de reproduire les caractéristiques de la vitesse du vent, il existe deux méthodes qui sont les mesures expérimentales à partir d'un site bien déterminé et la modélisation analytique à partir d'un modèle mathématique. Dans notre cas d'étude, on utilisera la deuxième méthode pour sa flexibilité à envisager plusieurs scénarios [5].

Pour cette méthode, les expressions les plus répandue sont celle qui utilise la caractéristique spectrale de Van Der Hoven et l'autre de *C. Nichita*. [19] :

- **L'expression de Van Der Hoven** : La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps, $V_V = f(t)$. Cette fonction peut être décomposée en une composante moyenne, variant lentement, et des fluctuations [19], [24]

$$V_{vent} = V_0 + \sum_{i=1}^n A_i \sin(w_i + \varphi_i)$$

Avec :

- V_0 : est la composante moyenne.
- A_i , w_i et φ_i sont respectivement l'amplitude, la pulsation et la phase initiale de chaque composante spectrale fluctuante.

L'expression de Van Der Hoven est exprimée par la relation suivante :

- $V_{vent} = V_0 + 0,2 \sin(0,1047t) + 2 \sin(0,2665t) + \sin(1,2930t) + 0,2 \sin(3,6645t)$ [16]

Une représentation graphique de cette expression, pour une valeur moyenne $V_0 = 12$ est schématisée sur la Figure II.15

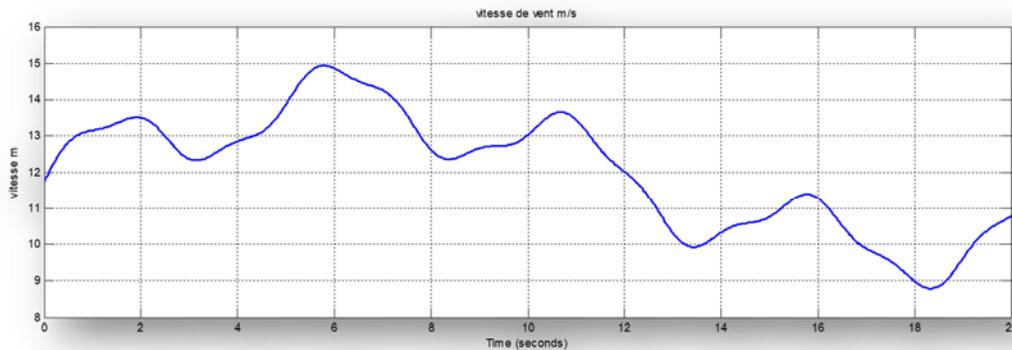


Figure II. 14 : La vitesse de vent en fonction de temps suivant l'expression de Van Der Hoven avec $V_0 = 12$.

- **L'expression de C. Nichita :** La modélisation de cette expression approchée est basée sur la génération de l'allure temporelle du vent à partir d'un bruit blanc sur lequel on applique une fonction du filtre non rationnel de Von Karman dont les paramètres dépendent des caractéristiques du site et de la nature du vent [7].

$$H_F = K_F \frac{(m_1 T_F S + 1)}{(T_F S + 1)(m_2 T_F S + 1)}$$

Avec :

- m_1 et m_2 étant les paramètres de Nichita :
- $m_1 = 0,4$ et $m_2 = 0,25$.

Les paramètres mathématiques K_F et T_F sont calculés selon les expressions suivantes :

$$T_F = \frac{L_F}{V}$$

Où :

- L_F : longueur d'échelle de la turbulence du vent $V_t(t)$. Cette valeur dépend des caractéristiques du site, et varie de 100 en mer à 500 dans les zones turbulences.
- V : La valeur moyenne de la vitesse du vent qui dépend de la nature du vent (faible, moyen ou fort)

$$K_F = \sqrt{\frac{\pi}{T_S \Delta w S_F}}$$

Avec

- T_S : la période d'échantillonnage.
- $\Delta w = 0.002 \text{ rad/s}$.

$$S_F = \sum_{k=0}^{\frac{\pi}{T_S \Delta w}} \frac{(m_1 T_F k \Delta w)^2 + 1}{[(T_F k \Delta w)^2 + 1][(m_2 T_F k \Delta w)^2 + 1]}$$

L'expression $V_0(t)$ de la vitesse du vent en un point fixe peut être représentée par [7] :

$$V_0(t) = V + v_t(t)$$

La composante représentant la turbulence $v_t(t)$ est caractérisée par la longueur d'échelle L_F et aussi par l'écart type σ_v de cette turbulence qui dépend de la valeur moyenne de la vitesse du vent V par la relation :

$$\sigma_v = K_\sigma V$$

Où K_σ représente l'intensité de la turbulence. La valeur de ce coefficient varie de 0,1 en mer à 0,25 dans une zone turbulente.

Ainsi, la vitesse du vent est construite selon le schéma bloc de la Figure II.16

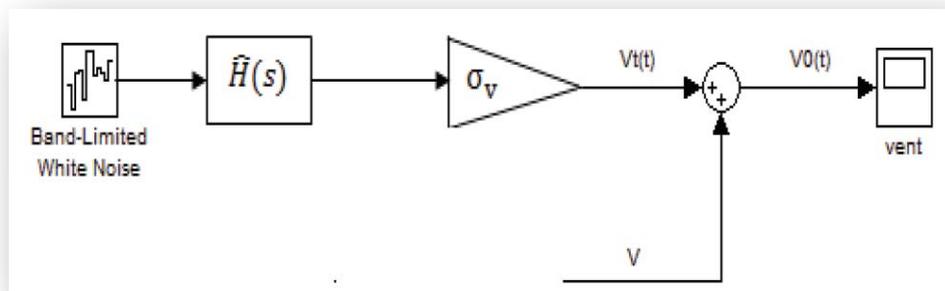


Figure II. 15 : Schéma bloc de la vitesse de vent suivant l'expression de NICHITA [7]

Le modèle de la Figure II.16 est simulé sur Matlab Simulink avec les paramètres suivants : $T_s = 1s$, et $T_F = 195$, on obtient les courbes suivantes Figure II.17

La figure II.17 représente la génération du vent suivant par la méthode de Nichita pour trois valeurs de vitesses moyennes : 7m/s (vent faible), 12 m/s (vent moyen) et 18 m/s (vent violent)

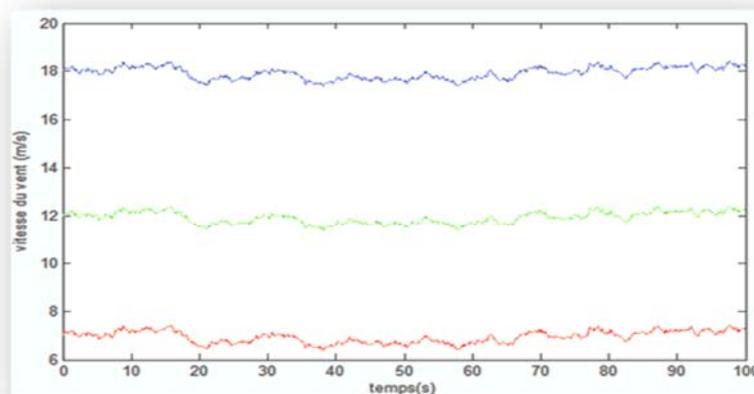


Figure II. 16 : Génération de vents de différentes natures par la méthode de Nichita [7].

2.4 Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable

Les phases de fonctionnement d'une éolienne varient selon la vitesse variable du vent et l'angle d'orientation des pales. Pour les différentes éoliennes à vitesse variable on peut définir quatre zones de fonctionnement qui sont illustrées sur la Figure II.18 [8] [10] :

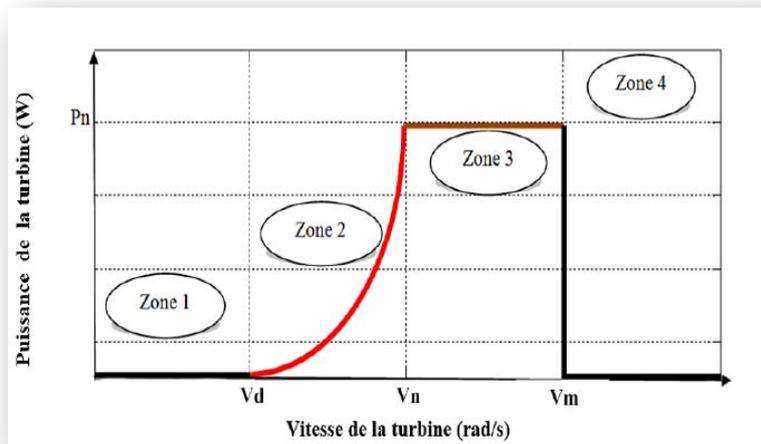


Figure II. 17 : Zone de fonctionnement d'une éolienne [10].

- **Zone 1** : Correspond aux vitesses très faibles du vent (inférieure à la vitesse de démarrage V_d insuffisantes pour entraîner l'éolienne et produire de la puissance.
- **Zone 2** : MPPT : Dans cette zone la vitesse de vent est supérieure à la vitesse de démarrage et inférieure à la vitesse nominale V_n de l'éolienne. Dans cette partie qui est caractérisée par une puissance proportionnelle au cube de la vitesse du vent, l'angle de calage est maintenu constant, et c'est le contrôle du couple électromagnétique de la génératrice qui va être mis en œuvre. Ceci se fait en gardant le coefficient de puissance $C_p = C_{pmax}$ de manière à tirer le maximum de profit de la vitesse du vent et générer le maximum d'énergie électrique possible. Dans cette zone, la courbe de puissance de la génératrice suit une progression rapide.
- **Zone 3** : Dans cette zone la vitesse de vent est supérieure à la vitesse nominale et inférieure à la vitesse maximale V_{max} ou de déclenchement. Durant cette partie et afin de limiter la puissance électrique à la puissance nominale du générateur électrique utilisé, le coefficient de puissance C_p doit être contrôlé. L'augmentation de la vitesse de vent va s'accompagner d'une décroissance du coefficient C_p et d'une augmentation moins rapide de la puissance récupérée. Arrivée à la puissance maximum de la génératrice, l'angle des pales (pitch) est modifié afin de dégrader encore plus le coefficient C_p .
- **Zone 4** : Dans cette zone, lorsque la vitesse de vent atteint la vitesse de déclenchement ou maximale V_{max} et afin de sécuriser le système électrique et celui mécanique et éviter tout dégât, un dispositif d'urgence permet d'arrêter l'éolienne (production d'énergie électrique nulle).

2.4.1 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

Pour contrôler la puissance aérodynamique capturée et la limiter lorsque la vitesse, du vent est très élevée (fonctionnement en (Zone 3), deux techniques de contrôle connues sont utilisées surtout dans les grandes turbines, le système d'orientation des pales (Pitch Control) et système à décrochage aérodynamique (Stall Control).

➤ Système d'orientation des pales "Stall"

Si la vitesse du vent dépasse la vitesse maximal, zone 4, et afin de protéger notre turbine, un système de securiter est installé au niveau de la turbine, qui comme tache la limitation de la vitesse. Cette limitation est appelée Stall, elle utilise le phénomène de décrochage aerodynamique. Ce système est très fiable mais son inconvinient est la manque de précision Figure II.19

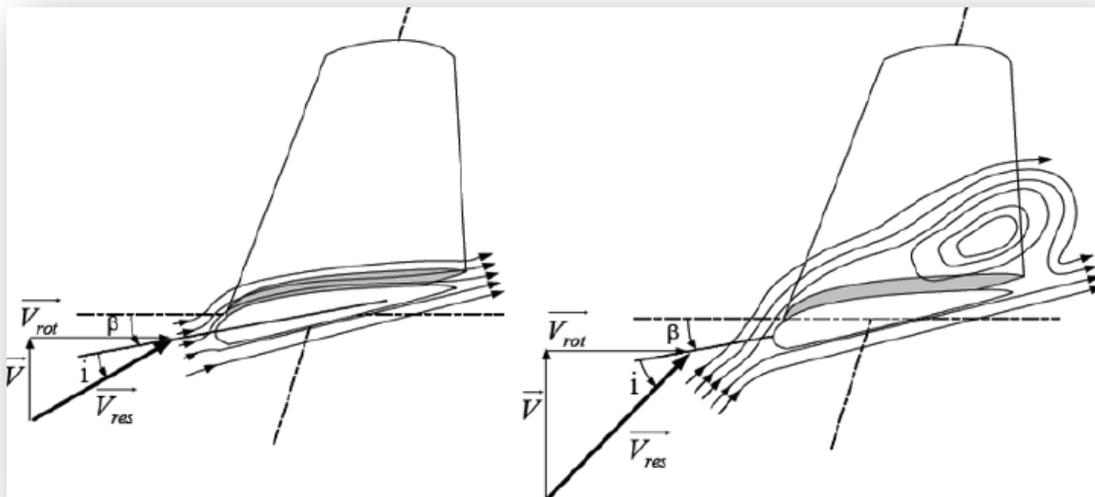


Figure II. 18 : Flux d'air sur un profil de pale " stall "[12].

➤ Système d'orientation des pales "Pitch"

Dans ce système de régulation le principe est basé sur le changement de l'angle d'incidence de la pale. Afin de maintenir une vitesse de rotation de la turbine constante, on fait varier le rapport entre les composantes de portance et de traînage côté vent. Ce système permet la variation de la position de la pale, jusqu'à ce qu'elle prenne une position angulaire, favorable à chaque variation de vent permettant de profiter au maximum du vent instantané.

Ce système permet aussi le contrôle de la puissance dans le cas de dépassement de la vitesse de vent nominale afin de protéger l'éolienne contre les vents trop violents, par la mise en « drapeau » des pales de l'hélice Figure II.20

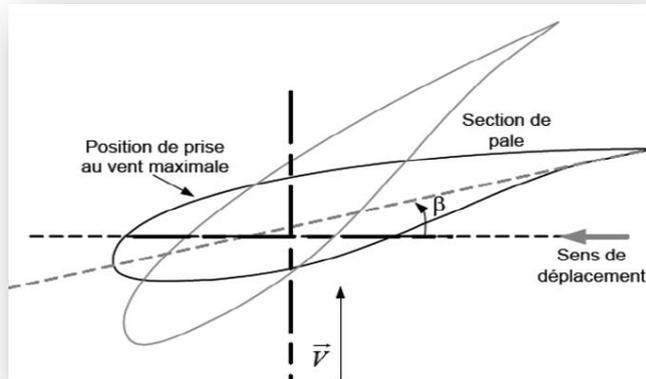


Figure II. 19 : Variation de l'angle de calage des pales [8].

Le système de régulation de la puissance par orientation des pales possède les avantages suivants [22] :

- Il offre une production d'énergie plus importante que les éoliennes à décrochage STALL pour la plage de fonctionnement correspondant aux fortes vitesses de vent.
- Il facilite le freinage de l'éolienne, en réduisant la prise du vent des pales, ce qui limite l'utilisation de freins puissants.
- Ce type de régulation réduit les efforts mécaniques lors des fonctionnements sous puissance nominale et sous grandes vitesses.

Certains aérogénérateurs utilisent un système hybride nommé le Stall Actif qui combine les avantages des deux systèmes où le décrochage aérodynamique est obtenu progressivement grâce à une orientation minimale des pales nécessitant des moyens de réglage plus économiques et plus robustes que dans le cas du système de Pitch Control

2.4.2 Technique d'extraction de maximum de puissance MPPT

2.4.2.1 Intérêt de la vitesse variable

On donne sur la Figure II.21 la caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent.

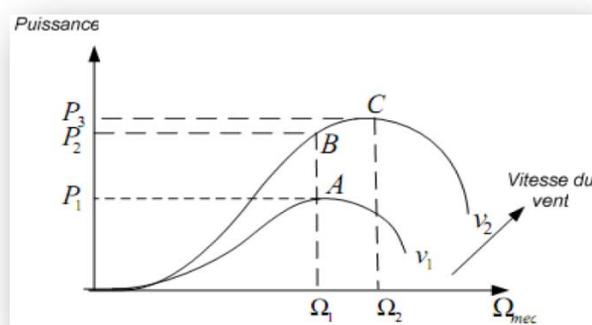


Figure II. 20 : Caractéristique puissance vitesse de rotation d'une éolienne [33]

Pour une vitesse du vent v_1 et une vitesse de la génératrice Ω_1 , on obtient une puissance nominale P_1 (point A). Si la vitesse du vent passe de v_1 à v_2 , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance P_2 se trouve sur la 2^{ème} caractéristique (point B) et ne correspond pas à la puissance maximale qui se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de ramener la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieur Ω_2 , pour cela il faut varier la vitesse mécanique en fonction de la vitesse du vent. [33]

2.4.2.2 Action à charge partielle

Cette commande est utilisée dans la deuxième zone du fonctionnement de l'éolienne afin de capter le maximum d'énergie possible quel que soit la valeur de vitesse du vent.

On remarque sur la Figure II.22 donnant la puissance extraite en fonction de la vitesse de rotation de la génératrice, pour différentes vitesses de vent s'étalant de 10 à 14m/s, que chaque courbe passe par un point maximum qui est la puissance maximal.

Afin que l'éolienne puisse avoir cette puissance en permanent, une technique de contrôle et de commande a été développer appelée MPPT (Maximum Power Point Tracking) [19], [20], [21].

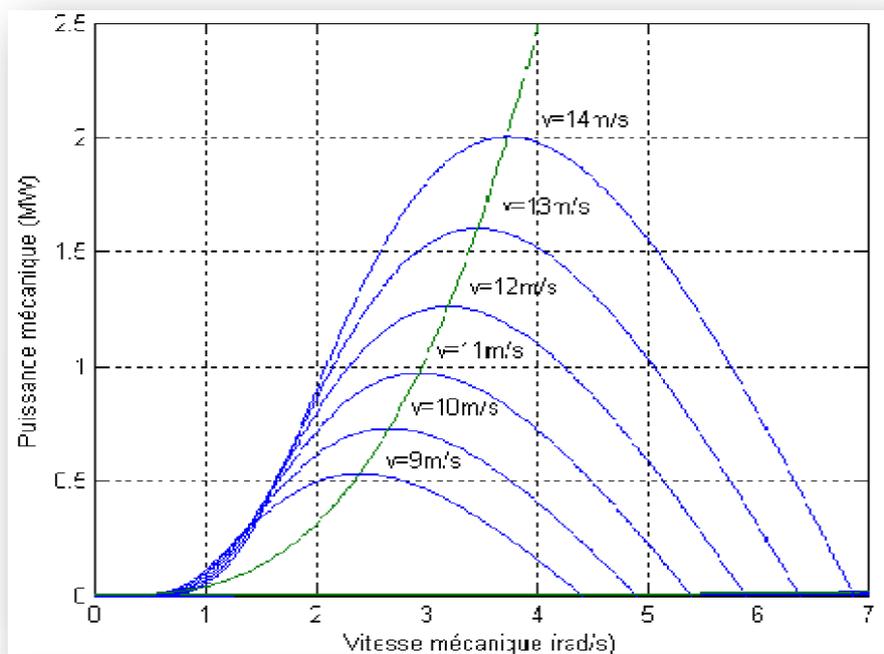


Figure II. 21 : Courbes puissances /vitesse de rotation de la turbine pour différentes valeurs de la vitesse du vent [14].

2.4.2.3 Principe de MPPT

Le principe de la stratégie **MPPT** (Maximum Power Point Tracking) consiste, pour un angle de calage des pales donné, à ajuster la vitesse de rotation de la turbine éolienne à une valeur de référence Ω_{tur}^* en fonction de la vitesse du vent V_V , afin de maintenir une vitesse relative optimale et donc un coefficient de puissance maximal C_{pmax} . [16].

Afin de pouvoir ajuster la vitesse de la turbine à une vitesse de référence Ω_{tur}^* et ainsi maximiser la puissance extraite du vent avec le maintien de coefficient de puissance à la valeur maximale C_{pmax} il faut actionner sur le couple électromagnétique et donc sur la puissance convertie par la génératrice.

Il existe plusieurs techniques pour poursuivre le MPPT. Ces techniques diffèrent selon le type d'informations dont elles ont besoin pour délivrer la référence de vitesse. On peut classer ces techniques en deux familles, selon que la vitesse du vent est nécessaire pour générer $\Omega_{turréf}$ (commande de rapport de vitesse, commande en puissance) ou elle n'est pas nécessaire pour générer $\Omega_{turréf}$ (méthode du gradient). Les commandes utilisant la logique floue ne sont que le prolongement de ces différentes stratégies.

2.4.2.3.1 Les différents types de MPPT pour les éoliennes

La puissance capturée par la turbine éolienne peut être maximisée en ajustant le coefficient C_p , Ce coefficient étant dépendant de la vitesse de la génératrice. L'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet de maximiser cette puissance. Il est donc nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser la puissance générée 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. Pour cela, on peut distinguer deux approches possibles [18]

➤ *Maximisation de la puissance sans connaissance de la courbe C_p*

A l'absence de toute connaissance des caractéristiques de voilure, des algorithmes de comportement sont à tenir afin de converger vers le point optimal. Ces algorithmes dépendent des variations de puissance ΔP et de vitesse $\Delta \Omega$. Par exemple : si on mesure une augmentation de puissance ($\Delta P > 0$) suite à un incrément positif de vitesse, on doit continuer à accélérer la voilure ($\Delta \Omega_{réf} > 0$). On se situe alors sur la partie gauche de la cloche $P(\Omega)$ Figure II.22. L'utilisation d'un dispositif MPPT basé sur le principe des ensembles flous peut être réalisable. Le dispositif MPPT à base de mesure de changement de puissance électrique du bus DC (ΔP) et de vitesse de rotation ($\Delta \Omega$) propose un changement ($\Delta \Omega_{réf}$) de la consigne de vitesse de rotation de l'éolienne $\Omega_{réf}$ selon les équations suivantes : [2]

$$\begin{aligned}\Delta P &= P[K] - P[K - 1] \\ \Delta \Omega &= \Omega[K] - \Omega[K - 1] \\ \Omega_{réf}[k] &= \Delta \Omega_{réf} + \Omega_{réf}[K - 1]\end{aligned}$$

La Figure II.23 donne un exemple d'une recherche dans le plan puissance - vitesse de rotation, pour une vitesse du vent donnée.

Si $\Delta P > 0$ et $\Delta \Omega > 0$ alors $\Delta \Omega_{réf} > 0$

Si $\Delta P < 0$ et $\Delta \Omega > 0$ alors $\Delta \Omega_{réf} < 0$

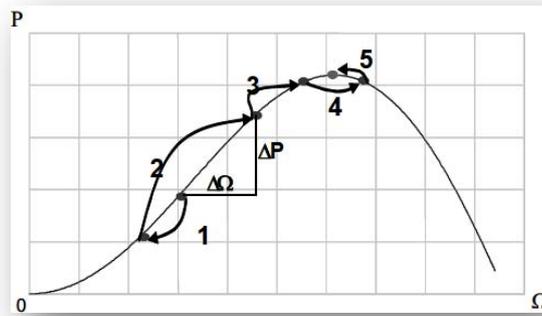


Figure II. 22 : Principe de Maximisation de puissance d'une éolienne sans connaissance courbe Cp [6].

Ainsi, le changement de ΔP résultant de la variation de la vitesse de rotation est soit dans le sens positif soit dans le sens négatif. La valeur de ΔP peut aussi être petite ou au contraire grande. A partir de ce jugement la valeur de la consigne de vitesse est augmentée ou diminuée de façon petite ou respectivement grande dans le sens qui permet d'augmenter la puissance. Cette commande permet la recherche du point optimum en se basant sur les observations de l'expert.

Dans le cas d'un changement de la vitesse du vent, la recherche du point maximal de puissance s'effectue de la manière présentée sur la Figure II.23 pour trois vitesses, on constate que le même type de règles s'applique. [2]

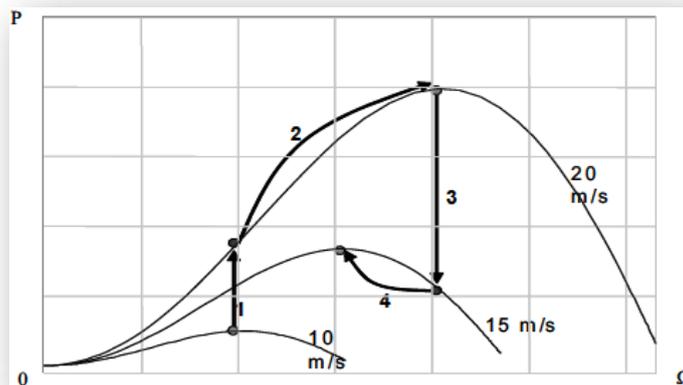


Figure II. 23 : Principe de fonctionnement de MPPT à vitesse de vent variable [6].

➤ Maximisation de la puissance avec connaissance de la courbe Cp

Dans cette méthode le principe est basé sur une recherche du point maximal de puissance en connaissant la courbe caractéristique Cp. Cette méthode permet de se rapprocher rapidement de l'optimum à l'aide des mesures simples de vitesse de rotation et cela soit avec ou sans l'utilisation des capteurs de vitesse du vent. Ces techniques diffèrent selon le type d'informations dont elles ont besoin pour délivrer la référence de vitesse. On peut classer ces techniques en deux familles, selon que la vitesse du vent est nécessaire ou non à la genèse de référence [2] :

▪ Commande MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique :

Pour des raisons d'utilisation d'un seul anémomètre (permettant d'utiliser qu'une mesure locale de la vitesse du vent qui n'est donc pas suffisamment représentative de sa valeur moyenne apparaissant

sur l'ensemble des pales) et son emplacement (situé derrière le rotor de la turbine), Il est difficile de mesurer précisément la vitesse du vent qui est de nature très fluctuante.

Une fausse mesure de la vitesse conduit à imposer une consigne non adaptée ce qui conduit à une dégradation de la puissance captée.

Afin d'établir la structure de commande MPPT sans asservissement de la vitesse, il est nécessaire d'émettre l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent (le système est supposé être dans un régime permanent). Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine, on obtient l'équation statique décrivant le régime permanent de la turbine [2]

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{mec} = 0 = C_m - C_{em} - C_{visq}$$

Si on néglige l'effet du couple visqueux ($C_{visq} = B \cdot \Omega$) on obtient :

$$C_m = C_{em}$$

Le couple électromagnétique est déterminé à partir d'une estimation du couple aérogénérateur

$$C_{em_réf} = \frac{C_{aer_estim}}{G}$$

Le couple aérogénérateur est lui-même estimé en fonction de la vitesse du vent et la vitesse de la turbine :

$$C_{aer_estim} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turb}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot V_{vent_estim}^3 \cdot \frac{1}{\Omega_{tur_estim}}$$

Une estimation de la vitesse de la turbine est calculée à partir de la vitesse mécanique

$$\Omega_{tur_estim} = \frac{\Omega_{mec}}{G}$$

L'estimation de la vitesse du vent est alors exprimée par :

$$V_{vent_estim} = \frac{\Omega_{tur_estim} \cdot R}{\lambda}$$

On regroupant ces équations on obtient une relation globale :

$$C_{em_réf} = \frac{C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot \Omega_{mec}^3}{2 \cdot G^3 \cdot \lambda^3}$$

Pour extraire le maximum de puissance générée ; Il faut fixer le ratio de vitesse à λ_{opt} qui correspond au maximum du coefficient de puissance C_{pmax} .

Le couple électromagnétique estimé doit alors être régler à la valeur suivante :

$$C_{em_réf} = \frac{C_{pmax} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot \Omega_{mec}^2}{2 \cdot G^3 \cdot \lambda_{opt}^3}$$

La représentation sous forme de schéma bloc du dispositif de commande, est illustrée dans la Figure II.24

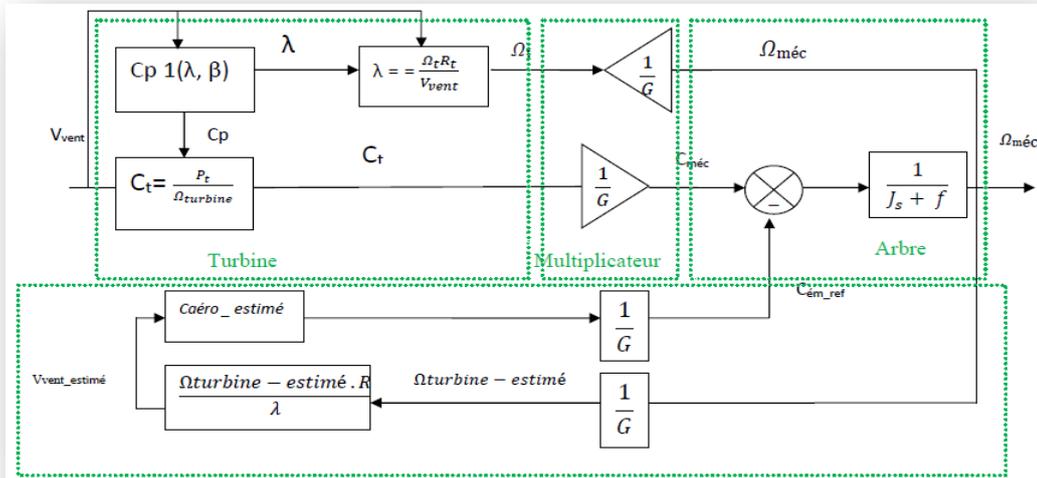


Figure II. 24 : Schéma bloc de la maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse [9]

▪ Commande MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique

La stratégie de commande consiste à régler le couple apparaissant sur l'arbre de la turbine, de manière à le fixer à sa vitesse de référence. Pour réaliser ceci, on utilise un asservissement de vitesse. Cet asservissement consiste à déterminer la vitesse de la turbine, qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée.

Le correcteur de vitesse doit accomplir deux tâches :

- Il doit asservir la vitesse mécanique à sa valeur de référence.
- Il doit atténuer l'action du couple éolien qui constitue une entrée perturbatrice [23].

Si on considère la génératrice et son variateur sont idéaux, on suppose que le couple électromagnétique égale à sa référence [21] :

$$C_{em} = C_{em_réf}$$

D'après l'équation statique on a :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} (C_m - C_{em} - C_{visq})$$

Le couple électromagnétique s'écrit :

$$C_{em_réf} = k_p (\Omega_{mec_réf} - \Omega_{mec})$$

Avec : k_p est le correcteur du système.

La vitesse mécanique de référence est exprimée alors par la relation suivante :

$$\Omega_{mec_réf} = G\Omega_{tur_réf}$$

La référence de la vitesse de la turbine correspond à celle correspondante à la valeur optimale du rapport de vitesse λ_{opt} et elle est donnée par la relation suivante :

$$\Omega_{tur_réf} = \frac{\lambda_{opt} \cdot V_{vent}}{R}$$

Suite à ces équations, on obtient le schéma bloc de la commande de la vitesse mécanique présenté sur la Figure II.25

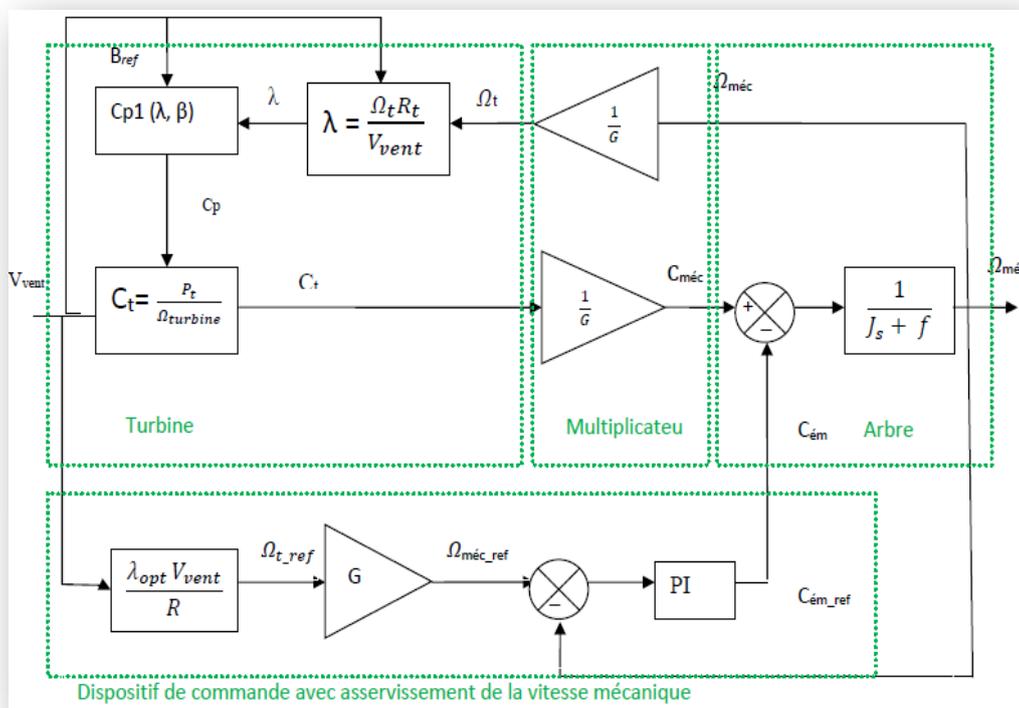


Figure II. 25 : Schéma bloc de la maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse [9].

Après modélisations de l'ensemble du système mécanique, on va procéder à des simulations de cette partie, sous l'environnement MATLAB/Simulink tout on s'intéressant à la zone de fonctionnement N°2 et on utilisant la stratégie de Commandé MPPT.

Les conditions de simulations et les paramètres de la turbine éolienne sont citées dans l'annexe A, tout en intégrant des limiteurs du vent permettant de maintenir la vitesse de la turbine entre une valeur maximale de 1660 tr/min et une valeur minimale de 1450 tr/min.

2.5 Simulation de la Turbine Sans asservissement

On va réaliser cette simulation suivant schéma bloc de la figure II.24 Résultats

Les résultats de simulations sont présentés sur les Figure II.26 à II.31

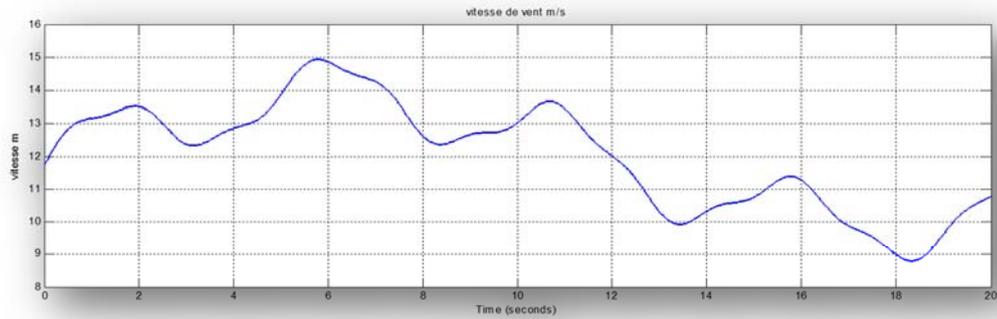


Figure II. 26 : Vitesse de vent [m/s]

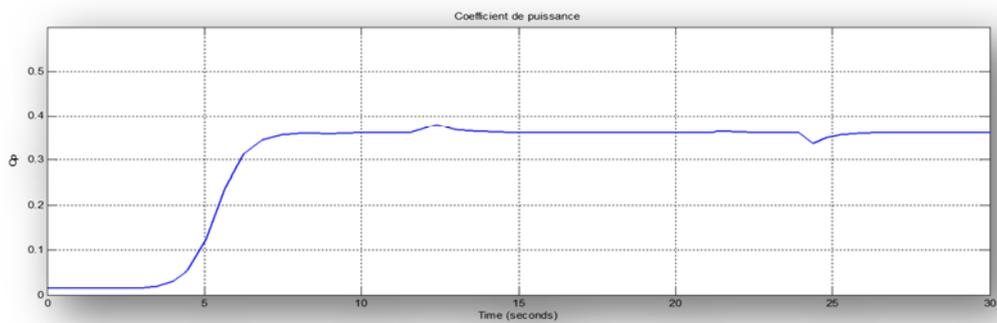


Figure II. 27 : Coefficient de puissance Cp

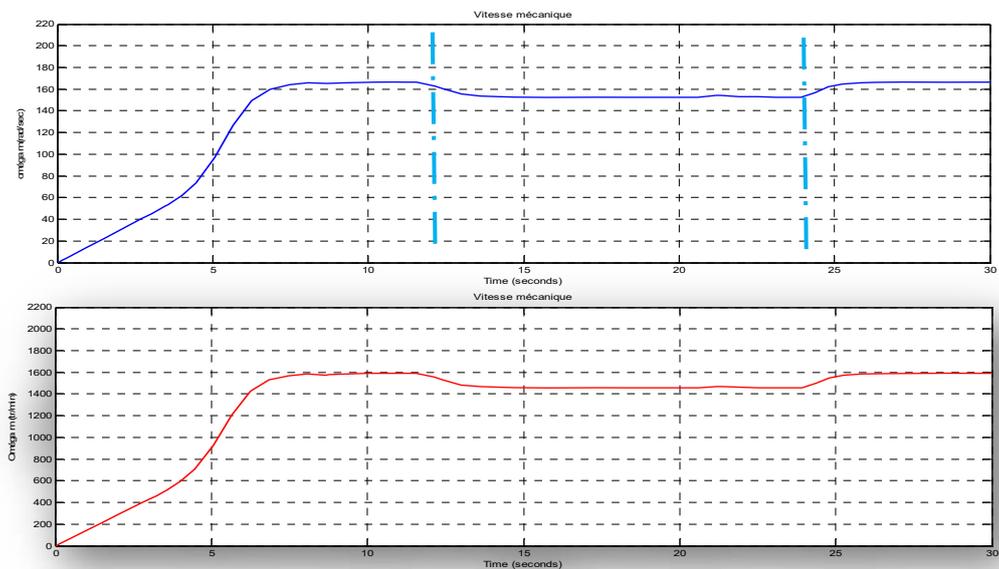


Figure II. 28 : Vitesse mécanique.

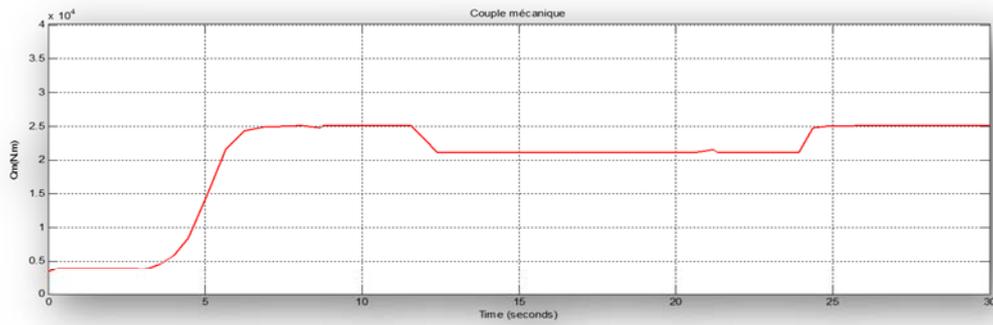


Figure II. 29 : Couple mécanique (W)

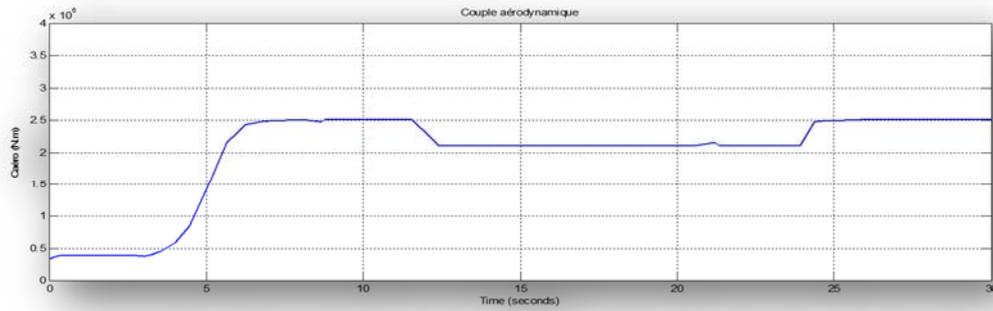


Figure II. 30 : Couple aérodynamique (W)

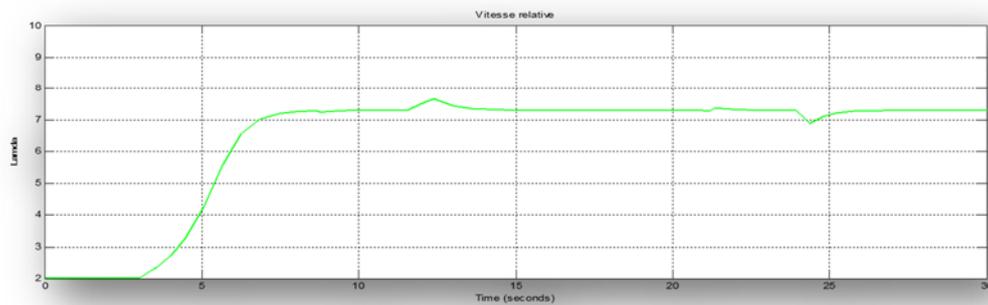


Figure II. 31 : Vitesse relative (m/s)

2.5.1 Interprétations

Figure II.27

Après avoir soumis notre turbine au profil du vent (de Van Der Hoven) défini dans la figure II.26, nous remarquons qu'à la suite d'un régime transitoire le C_p se stabilise à la valeur 0.36 à $t=7s$, avec présence de deux léger pics à $t= 12.5s$ et $t=24s$

Figure II.28

- L'évolution de la vitesse mécanique présente un régime transitoire et se stabilise à la valeur 1660 (tr/min) à $t=7s$ et suit la consigne, à $t=12 s$ le signal se stabilise à une nouvelle valeur de 1450 tr/min et une dernière variation est observée à $t=24s$ ou le signal se stabilise à la valeur de 1660 tr/min.

Cette variation est due principalement aux variations de la vitesse du vent conformément au profil de la figure II.26

Figures II.29 et II.30 :

- *Le couple mécanique et à l'image de la courbe représentant l'évolution de la vitesse mécanique, il atteint la valeur de 25000 Nm à $t=6$ s pour redescendre à la valeur de 21500 Nm à $t=12$ s puis il revient à une valeur finale de 25000 Nm à partir de $t=24$ s.*
- *Même chose pour le couple aérodynamique, mais avec des valeurs égales cent (100) fois celle de mécanique.*

Figures II.31 :

- *La vitesse relative et après un régime transitoire se stabilise à la valeur de 7.2 à $t=7$, avec présence d'une fluctuation positive à $t=12$ s et d'autre négative $t=24$ s dues aux variations de la vitesse mécanique*

2.6 Simulation de la Turbine avec asservissement**2.6.1 Historique des régulateurs**

Les premiers régulateurs de type centrifuge apparaissent vers 1750 pour régler la vitesse des moulins à vent, suivi en 1788 du fameux contrôleur de vitesse d'une machine à vapeur de James Watt. En 1942, Ziegler et Nichols ont proposé deux démarches permettant de trouver facilement les paramètres optimums pour une installation donnée. En quelques années, les propositions de Ziegler et Nichols ont été adaptées ou modifiées selon les besoins.

Au début des années 1990 et dans le but de fournir des règles d'ajustement simples mais plus performantes que celles de Ziegler et Nichols, Astrom et ses collaborateurs ont analysé le comportement dynamique d'un grand nombre de processus. Cette analyse a conduit l'établissement de tableaux servant aux calculs des paramètres P, I et D à partir de mesures simples. Ainsi, diverses méthodes de calcul des paramètres des régulateurs PID et une méthode d'auto-ajustement sont proposées par Astrom et Hagglund [14].

2.6.2 Généralités sur les régulateurs

On appelle régulateur ou (contrôleur) la partie d'un système de commande comparant le signal de mesure $y(t)$ avec le signal de consigne $r(t)$ afin de générer un signal de commande $u(t)$ (Figure II.33) Son but est de chercher à réduire l'erreur entre la consigne et la mesure. On peut classer les contrôleurs selon deux grandes familles :

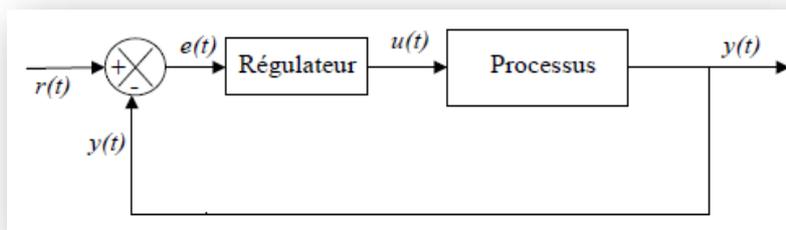


Figure II. 32 : Schéma fonctionnel d'un processus réglé [8].

- **Contrôleur classique** : Les contrôleurs de type classique sont constitués d'une seule variable d'entrée et d'une seule variable de sortie exemple contrôleur PI.
- **Contrôleur avancé** : Les contrôleurs de type avancé ou à méthode moderne sont constitués de plusieurs variables d'entrées et de plusieurs variables de sorties.

2.6.3 Régulation avec PI classique

2.6.3.1 Synthèse de régulateur

Afin de permettre la régulation MPPT avec asservissement un contrôleur du type proportionnel intégral, vu sa simplicité à synthétiser et son cout modéré, sera placé dans la chaine de régulation. Ce type de régulateur caractérisé par une action proportionnelle exprimé par le gain K_p et une autre intégrale exprimé par le gain K_I permettant l'élimination de l'erreur statique entre la grandeur régulée et la grandeur et une action intégrale assurant la rapidité de la régulation.

La fonction de transfert liant la vitesse aux couples (électromagnétique et mécanique) est donnée par :

$$\frac{\Omega}{C_{mec} - C_{em}} = \frac{1}{Js+f} \quad \text{II. 25}$$

La régulation de la vitesse mécanique avec ce type de régulateur est schématisée sur la Figure II.34

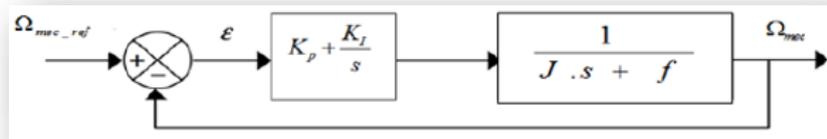


Figure II. 33 : Boucle de régulation de la vitesse mécanique avec PI [8].

De ce schéma, la fonction de transfert de régulateur PI est donnée par :

$$FT_{reg} = K_p + \frac{K_I}{s} = \frac{K_p.s + K_I}{s} \quad \text{II. 26}$$

La fonction de transfert du système à réguler est donnée par :

$$FT_{sys} = \frac{1}{J.s+f} \quad \text{II. 27}$$

La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par :

$$\begin{cases} FTBO_{\Omega} = \frac{\Omega_{mec}}{\Omega_{m.ref}} = \frac{K_p.s + K_I}{s} \cdot \frac{1}{J.s+f} \\ FTBO_{\Omega} = \frac{K_p.s + K_I}{J.s^2 + f.s} \end{cases} \quad \text{II. 28}$$

Et la fonction de transfert en boucle fermée est donnée alors par :

$$\begin{cases} FTBF_{\Omega} = \frac{FTBO_{\Omega}}{1 + FTBO_{\Omega}} \\ FTBF_{\Omega} = \frac{\frac{K_p.s + K_I}{J}}{s^2 + \frac{(f + K_p).s + K_I}{J}} \end{cases} \quad \text{II. 29}$$

La fonction de transfert générale en boucle fermée est donnée alors par :

$$G(s) = \frac{2.\xi.\omega_n.s + \omega_n^2}{s^2 + 2.\xi.\omega_n.s + \omega_n^2} \quad \text{II. 30}$$

Où :

ξ est le coefficient d'amortissement et ω_n la pulsation propre.

Utilisant la méthode par identification on obtient :

$$\begin{cases} 2.\xi.\omega_n = \frac{(f+K_p)}{J} \\ \omega_n^2 = \frac{K_I}{J} \end{cases} \quad \text{II. 31}$$

D'où en peut tirer les paramètres de régulateur :

$$\begin{cases} K_p = \omega_n^2 \cdot J \\ K_I = 2.\xi.\omega_n \cdot J - f \end{cases} \quad \text{II. 32}$$

Afin de permettre l'optimisation des performances dynamiques et la stabilité du système, on opte pour un coefficient d'amortissement en boucle fermée ξ de valeur égale à 0,707 [36] [37].

2.6.3.2 Résultats des simulations

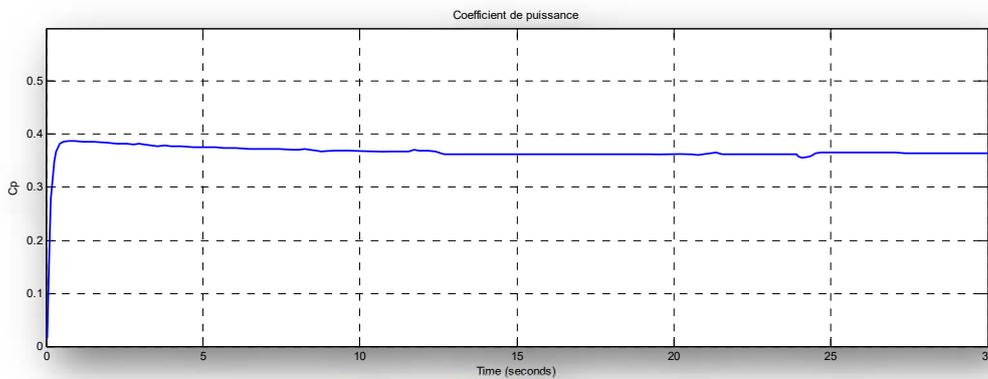


Figure II. 34 : Coefficient de puissance

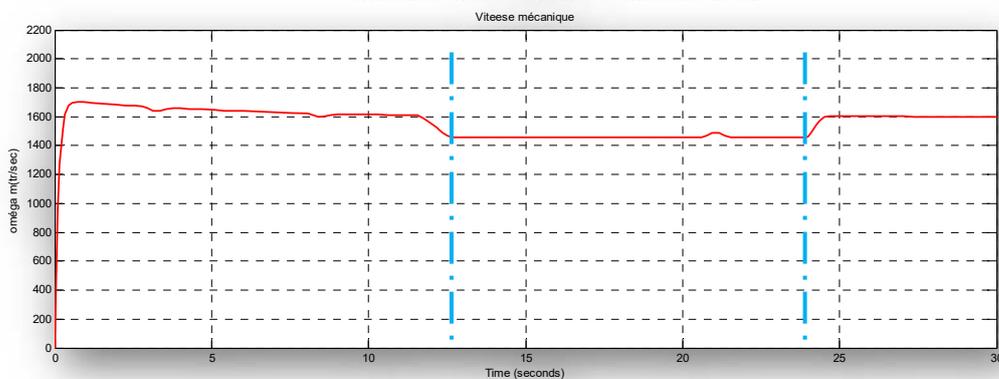


Figure II. 35 : Vitesse mécanique (tr/min)

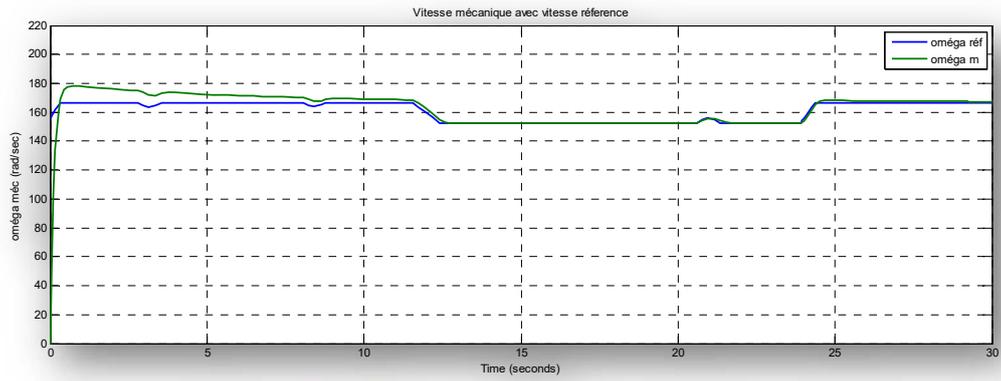


Figure II. 36 : Vitesse mécanique (rad/sec)

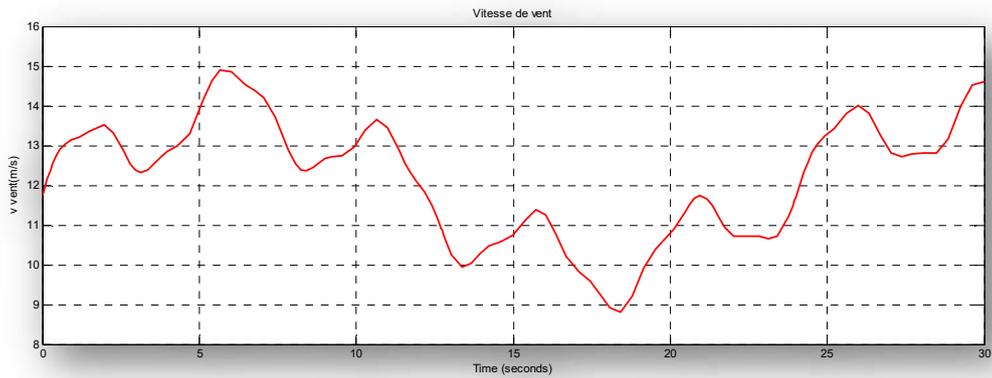


Figure II. 37 : Vitesse de vent (m/s)

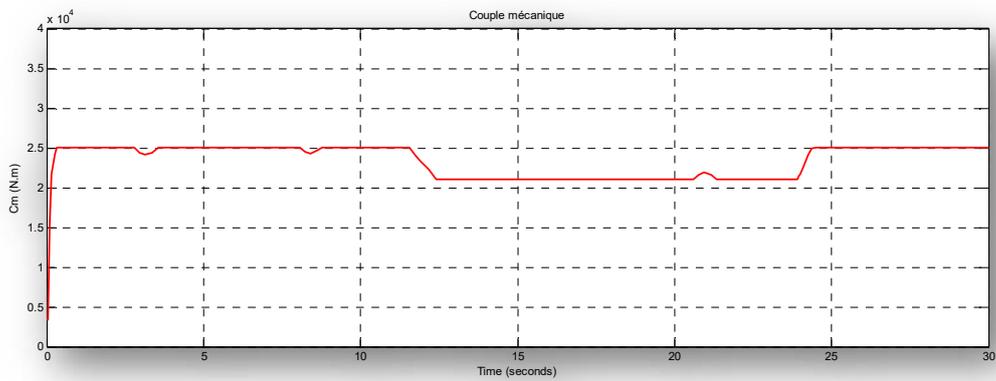


Figure II. 38 : Couple mécanique (N.m)

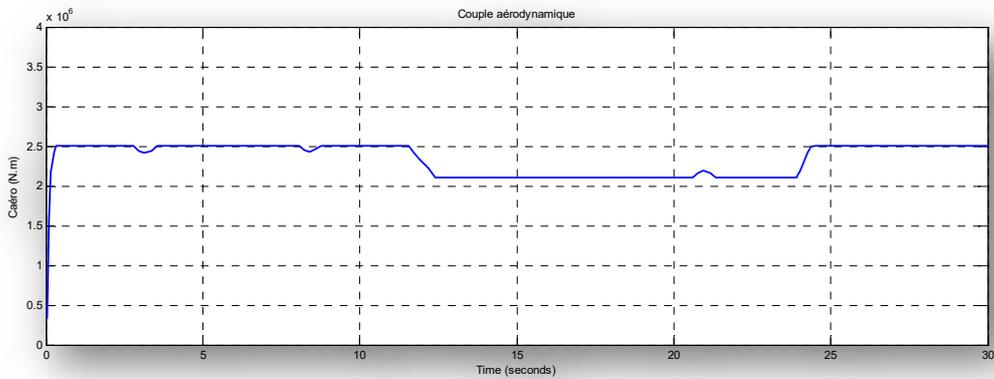


Figure II. 39 : Couple aérodynamique (N.m)

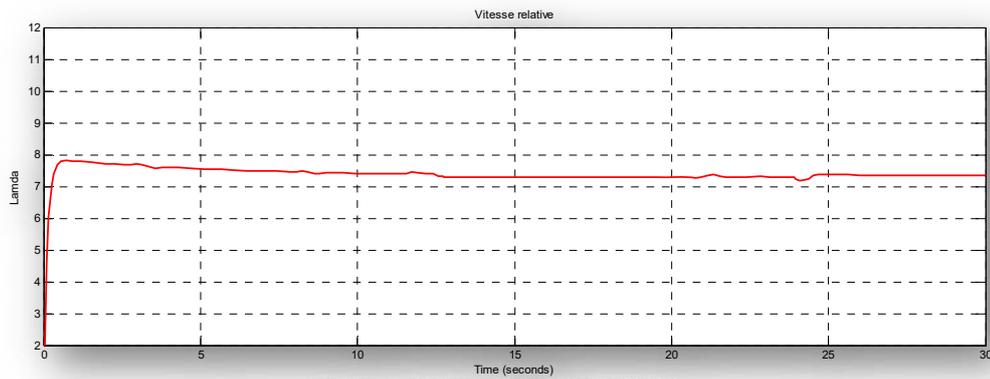


Figure II. 40 : Vitesse relative (m/s)

2.6.3.3 Interprétations des résultats

Figure II.34 :

Après avoir soumis notre turbine au profile du vent (de Van Der Hoven) défini dans la figure II.26, nous remarquons qu'à la suite d'un régime transitoire le C_p se stabilise à la valeur 0.36 à $t=0.5s$, avec présence de deux léger pics à $t= 12.5s$ et $t=24s$

Figure II.35 et II.36 :

Temps de réponse faible d'environ 0.32 s

Dépassement égale environ 7.80 %

L'évolution de la vitesse mécanique présente un régime transitoire et se stabilise à la valeur 1660 (tr/min) à $t=0.5s$ et suit la consigne, à $t=12 s$, le signal se stabilise à une nouvelle valeur de 1450 tr/min et une dernière variation est observée à $t=24s$ ou le signal se stabilise à la valeur de 1660 tr/min.

Cette variation est due principalement aux variations de la vitesse du vent conformément au profile de la figure II.37

Figures II.38 et II.39 :

- Le couple mécanique et à l'image de la courbe représentant l'évolution de la vitesse mécanique, il atteint la valeur de 25000 Nm à $t= 0.35 s$ pour redescendre à la valeur de 21500 Nm à $t=12 s$ puis il revient à une valeur finale de 25000 Nm à partir de $t=24 s$.
- Même chose pour le couple aérodynamique, mais avec des valeurs égales cent (100) fois celle de mécanique.

Figures II.31 :

La vitesse relative et après un régime transitoire se stabilise à la valeur de 7.2 à $t=0.35s$, avec présence d'une fluctuation positive à $t= 12s$ et d'autre négative $t=24s$ dues aux variations de la vitesse mécanique

Régulation avec PI avancé.

Les commandes classiques du type PI, sont les plus utilisées au plan industriel pour leur simplicité et leur faible cout, mais ces régulateur de commande nécessitent la connaissance complète ou partielle du modèle et ne permettent de maintenir de bonnes performances que dans le cas où les paramètres du système sont fixées et on travaille autour de certains points de fonctionnement. Si ces

paramètres changent, il faut recalculer les coefficients du PI pour que le contrôleur fonctionne bien. Pour résoudre ce problème, d'autres régulateur et lois de commandes peuvent être utilisées pour avoir de meilleures performances, à savoir :

- Une régulation basée sur la technique neuronale
- Une régulation basée sur la logique floue,
- une régulation basée sur la technique H infini
- une régulation basée sur la technique LQR
- une régulation basée sur la technique non linéaire par mode glissant
- une régulation basée sur la technique non linéaire par la méthode backstepping

Dans notre étude on se limitera aux régulateurs basés sur la technique neuronale, la logique floue et la technique H infini.

2.6.4 Régulateur PI neuronal

2.6.4.1 Introduction

Les réseaux de neurones artificiels, sont des modèles inspirés du fonctionnement cérébral de l'être humain et de ses capacités d'apprentissage en exploitant le concept de neurone formel. Ce sont des structures organisées autour d'un ensemble de cellules appelé neurones interconnectées par des liens pondérés et modifiables lors d'une procédure appelée apprentissage. Ils sont très efficaces à résoudre les problèmes de modélisation, d'identification et de contrôle des processus non linéaires et complexes.

2.6.4.2 Neurone formel [38] [39]

En 1943, Mac Culloch et Pitts ont émis l'idée simplificatrice du neurone formel, c'est-à-dire un opérateur binaire interconnecté à ses semblables par des « synapses » excitatrices ou inhibitrices (Figure II.30).

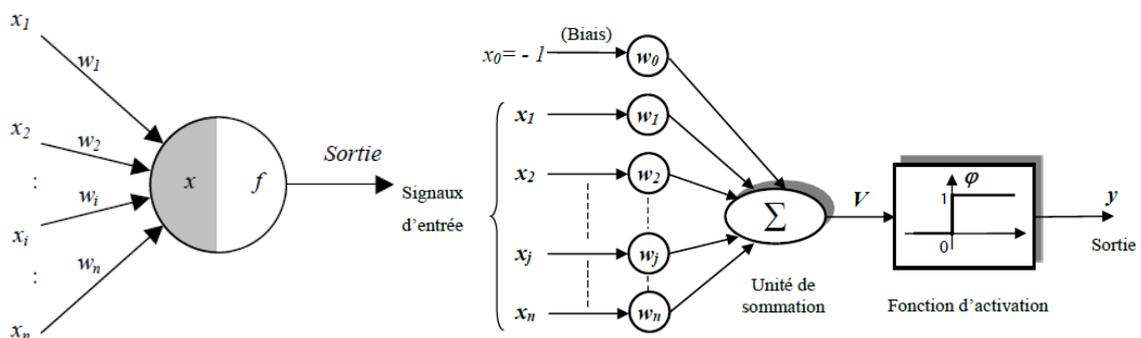


Figure II. 41 : Modèle du neurone formel de Mac Culloch et Pitts avec biais [38][39].

Les entrées du neurone sont désignées par x_i ($i=1...n$). Les paramètres w_i reliant les entrées aux neurones sont appelés poids synaptiques ou tout simplement poids. La sortie du neurone est donnée par [39] :

$$\text{Sortie} = f(x) \text{ avec } x = \sum_{i=1}^n x_i w_i$$

- x étant l'état d'activation du neurone (également appelé état ou activité).
- f est la fonction d'activation du neurone. Conformément au modèle biologique, les fonctions d'activation sont généralement croissantes et bornées. Les fonctions les plus connues sont la fonction signe, la fonction linéaire saturée et la fonction sigmoïde [39].

2.6.4.3 Perceptron [38]

F. Rosenblatt a publié en 1958 un article sur un modèle probabiliste du stockage de l'information et de l'organisation dans le cerveau, appelé « Perceptron ». Dans cette publication Il est arrivé à ramener le Perceptron à un réseau à une seule couche de connexions entre un « organe sensoriel » comme une rétine et un ensemble de neurones formels chargés de faire des classifications parmi les stimulus vus par cette rétine.

2.6.4.4 Architecture des réseaux de neurones artificiels [39] [40]

Un réseau de neurone est une structure organisée autour d'un ensemble de neurones interconnectés, selon une certaine topologie, par des liaisons affectées de poids. Ces liaisons offrent à chaque neurone un canal pour émettre et recevoir des signaux venant d'autres neurones. Dans cette structure chaque neurone fonctionne indépendamment des autres, de telle sorte que l'ensemble forme un système massivement parallèle.

D'une manière générale, l'architecture des réseaux de neurones formels peut aller d'une connectivité totale (tous les neurones sont reliés les uns aux autres), à une connectivité locale où les neurones ne sont reliés qu'à leurs proches voisins. Mais la différence majeure porte sur la présence de boucles qui permettent d'avoir accès au temps.

Par ailleurs, on notera la possibilité d'organiser les neurones en *réseaux monocouche* ou en *réseaux multicouche* :

- réseaux monocouche : Les neurones sont tous sur le même niveau, ils délivrent les sorties du réseau et sont directement interconnectés aux entrées.
- réseaux multicouche : La première couche est la couche d'entrée, la dernière est la couche de sortie, les couches intermédiaires sont appelées couches internes ou cachées, car si elles participent activement au réseau, la solution n'apparaît que dans la couche de sortie.

2.6.4.5 Modèles des réseaux de neurones

On distingue couramment, dans la littérature relative aux réseaux de neurones, les réseaux non bouclés et les réseaux bouclés.

2.6.4.5.1 Réseaux de neurones non bouclés "Feed-Forward Neural Network"

Leurs neurones sont organisés sous la forme d'une ou plusieurs couches successives, l'information circulant de la couche d'entrée vers la couche de sortie via d'éventuelles couches intermédiaires sans aucun retour en arrière. Ces réseaux sont généralement qualifiés d'objets statiques. La Figure II.42 représente un réseau de neurones non bouclés à quatre entrées et deux sorties, avec une couche cachée comprenant trois neurones et une couche de sortie à deux neurones.

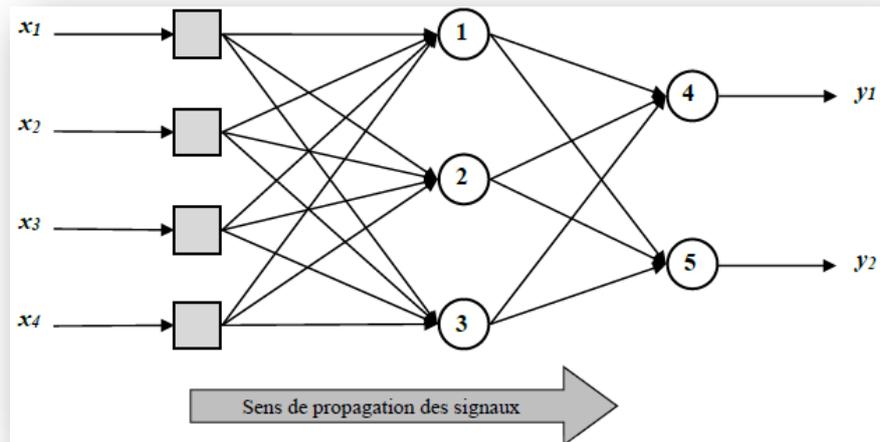


Figure II. 42 : Représentation d'un Réseau de neurones non bouclés [40].

2.6.4.5.2 Réseaux de neurones bouclés "Feed-back Neural Network" :

Ils sont caractérisés par une architecture à une ou plusieurs couches présentant des connexions entre neurones de la même couche ou vers des couches amont. En effet la sortie d'un neurone à un instant précis ne pouvant être fonction de sa valeur au même instant (principe de causalité), il est évident d'introduire des retards pour chaque boucle de retour. La figure illustre un exemple de réseau de neurones bouclé.

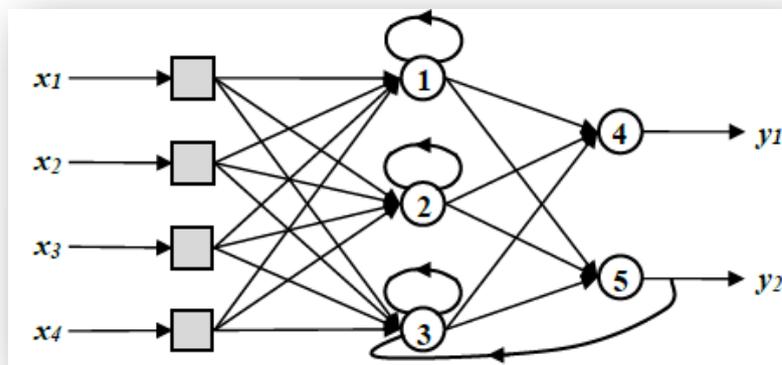


Figure II. 43 : Représentation d'un Réseaux de neurones bouclés [40]

2.6.4.6 Apprentissage des réseaux de neurones

C'est une phase du développement d'un réseau de neurones, durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré. Pour un réseau de neurones, apprendre c'est calculer les valeurs des coefficients de ses connexions en fonction d'exemples disponibles afin d'accomplir la tâche à laquelle il est dévolu.

L'apprentissage est la caractéristique essentielle des réseaux de neurones artificiels, ceux-ci en tant que systèmes capables d'apprendre mettent en œuvre le principe d'apprentissage par expérience. Selon le degré de contrôle de l'utilisateur et la tâche demandée au réseau, on définit trois types d'apprentissage.

2.6.4.6.1 Modes d'apprentissage

- **Apprentissage en ligne (on line training) :** *Egalement désigné d'apprentissage incrémental, le réseau vierge est mis en situation où il développerait un comportement adéquat et consiste à modifier les poids du réseau successivement et au-fur et à mesure de la disponibilité des exemples. C'est une méthode d'apprentissage adaptative.*
- **Apprentissage hors ligne (off line training) :** *Souvent appelé apprentissage par paquets, c'est le plus employé, il est effectué, à part sur un échantillon de patrons présélectionnés et consiste à estimer les paramètres du réseau en présentant plusieurs fois des exemples, l'ordre de présentation étant fixé ou aléatoire. Ce mode d'apprentissage est non-adaptatif.*

2.6.4.6.2 Types d'apprentissage

- **Apprentissage supervisé :** *Ce type d'apprentissage est choisi lorsque l'on veut faire converger le réseau vers un état précis. On lui présente les couples de données entrées-sorties désirées et la modification des poids des connexions des différents noeuds est faite de manière à minimiser l'erreur entre les sorties désirées et les sorties obtenues.*
- **Apprentissage semi-supervisé :** *On ne dispose d'aucun comportement de référence précis, au plus une évaluation qualitative de celui-ci. On délivre au réseau des exemples d'entrée et on lui assigne une récompense ou une pénalité. Le réseau doit agir de manière à trouver les réponses qui lui donnent un maximum de récompense.*
- **Apprentissage non supervisé :** *Le réseau est laissé libre de converger vers son état stable lorsqu'on lui présente le patron d'apprentissage, formé des seules valeurs d'entrée. Le réseau doit détecter des points communs aux exemples proposés selon un critère de similarité, et modifier les poids synaptiques des connexions (ou sa structure). L'objectif étant de fournir la même sortie pour des entrées ayant des caractéristiques proches.*

A l'issu de cette phase et dans le cas d'un apprentissage hors ligne les poids sont fixés et resterons inchangés, le réseau est alors prêt pour la phase d'utilisation.

2.6.4.7 Identification neuronale des processus [40] [41].

2.6.4.7.1 Identification directe

Il s'agit de réaliser l'apprentissage d'un réseau de neurones identificateur RNI, à partir des séquences des entrées de commande appliquées et des sorties mesurées. Le réseau de neurones est mis en parallèle avec le processus à identifier, la sortie y du processus réel est comparée à la sortie \hat{y} du réseau, pour former l'erreur d'estimation $e = y - \hat{y}$ qui sert à ses paramètres à l'aide d'un algorithme d'apprentissage.

La figure 1 illustre le schéma de principe d'une identification directe.

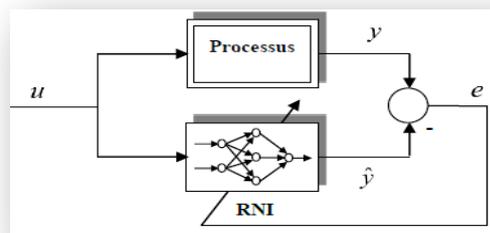


Figure II. 44 : Principe de l'identification directe par un réseau de neurones [39]

Deux méthodes peuvent être utilisées, selon que l'on utilise les sorties réelles du processus, ou celles estimées par le réseau de neurones, d'où deux structures dites : *modèle série-parallèle* et *modèle parallèle*.

2.6.4.7.2 Modèle d'identification série-parallèle

La structure d'identification dite série-parallèle utilise les sorties réelles du processus pour établir le vecteur d'entrée. La figure II.46 montre le principe d'une identification directe par modèle série-parallèle.

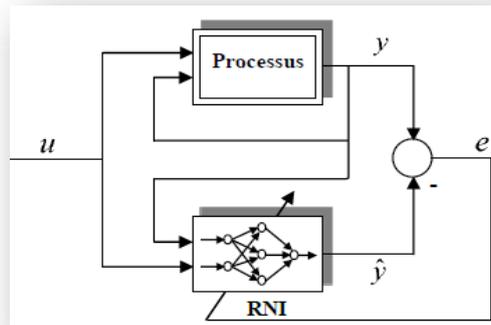


Figure II. 45 : Principe de l'identification directe par modèle série-parallèle [39].

2.6.4.7.3 Modèle d'identification parallèle

Dans le cas où l'on utilise la séquence des sorties du réseau de neurones pour former le vecteur d'entrée, l'identification est dite parallèle. En effet, après quelques itérations la sortie du réseau identificateur tend à se rapprocher de celle du processus. Le principe d'une identification directe par modèle parallèle est illustré par la Figure.

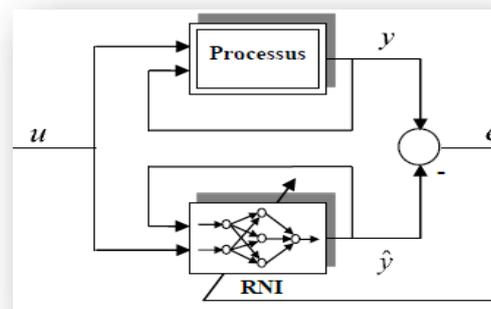


Figure II. 46 : Principe de l'identification directe par modèle parallèle [39].

2.6.4.7.4 Identification inverse

Ce type d'identification consiste à trouver un modèle inversé du processus à contrôler. Le modèle délivre, en fonction de la sortie du système, l'action à appliquer pour y parvenir.

L'entrée du procédé est comparée à la sortie de l'identificateur neuronal (RNI) et à la sortie du processus est injectée comme entrée du réseau de neurone. La Figure II.48 présente le principe d'une identification par modèle inverse.

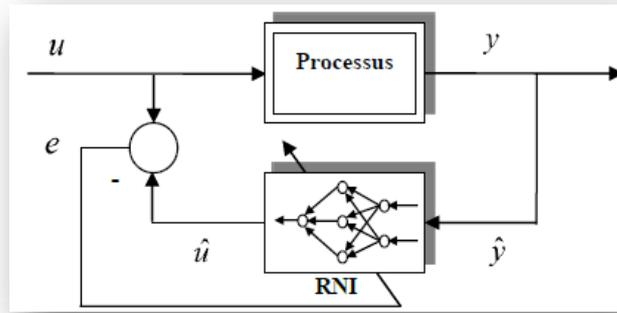


Figure II. 47 : Principe de l'identification du modèle inverse par un réseau de neurones [39].

2.6.4.8 Résultats des simulations

On utilise dans notre cas d'étude, on utilise le principe de l'identification directe pour l'apprentissage de PI neuronal, d'où on place le régulateur PI classique déjà, étudié, en parallèle avec le régulateur neuro-contrôleur. A la fin de cette opération, on laisse juste le **neuro-contrôleur** qui va assurer la commande de processus.

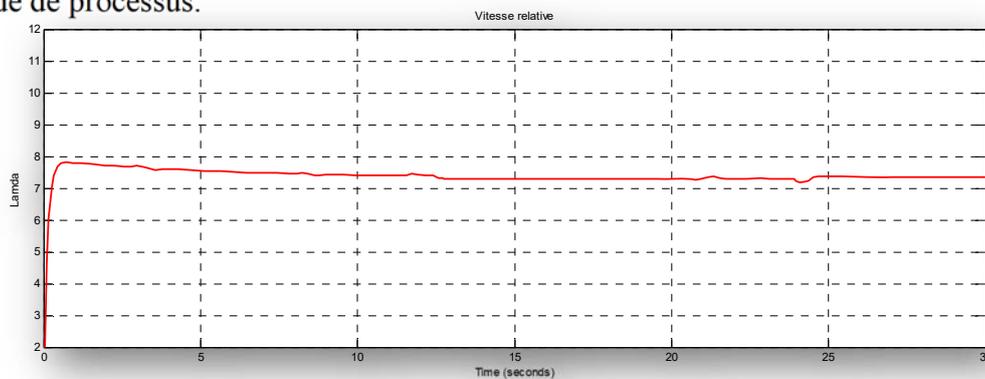


Figure II. 48 : Coefficient de puissance

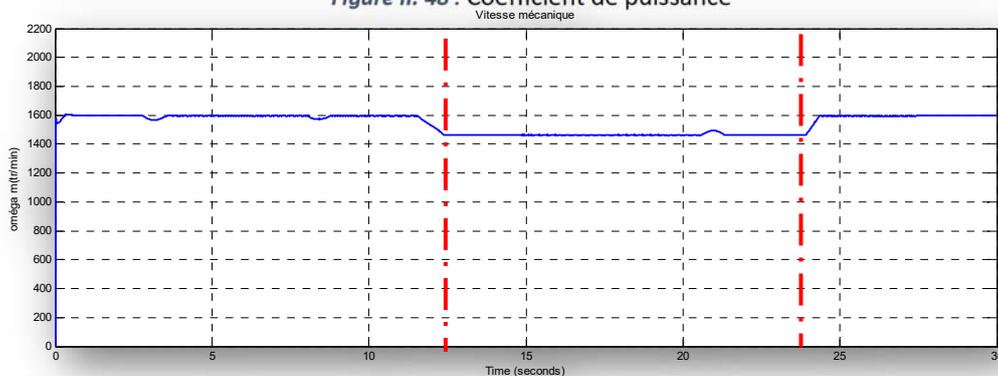


Figure II. 49 : Vitesse mécanique [tr/min]

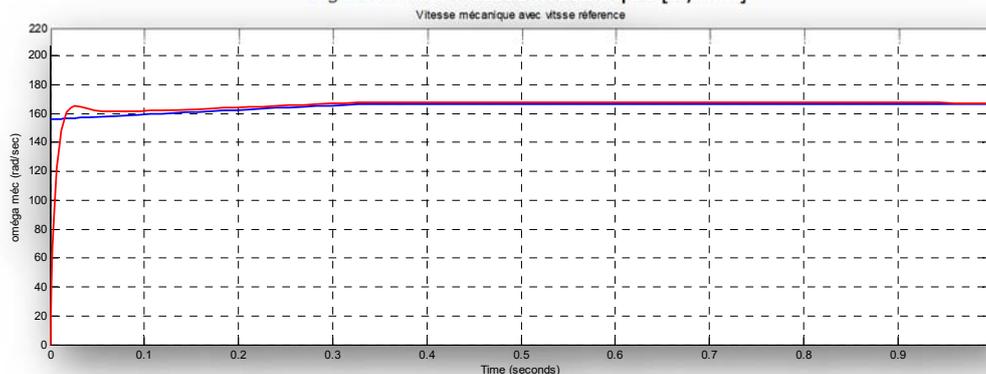


Figure II. 50 : Vitesse mécanique (rad/sec).

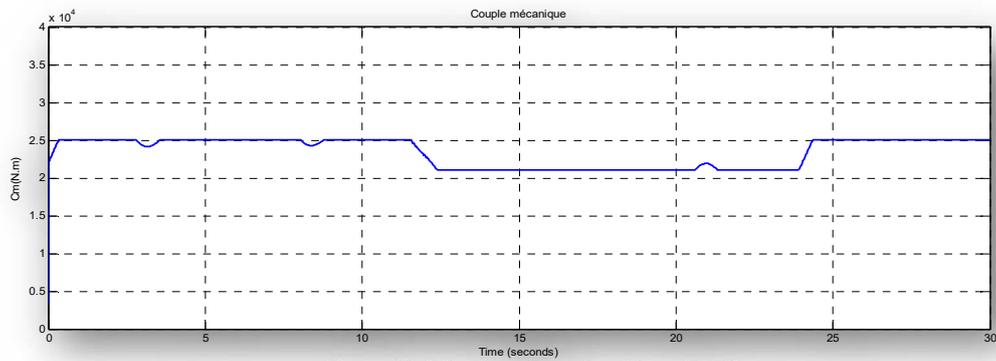


Figure II. 51 : Couple mécanique [Nm]

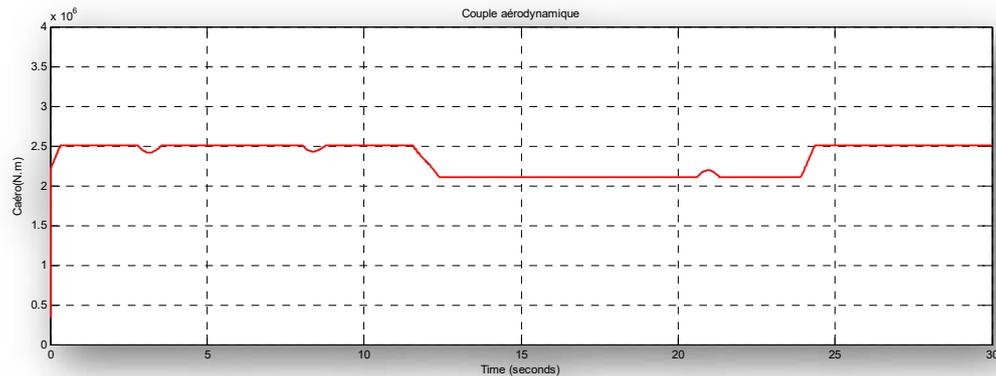


Figure II. 52 : Couple aérodynamique [Nm]

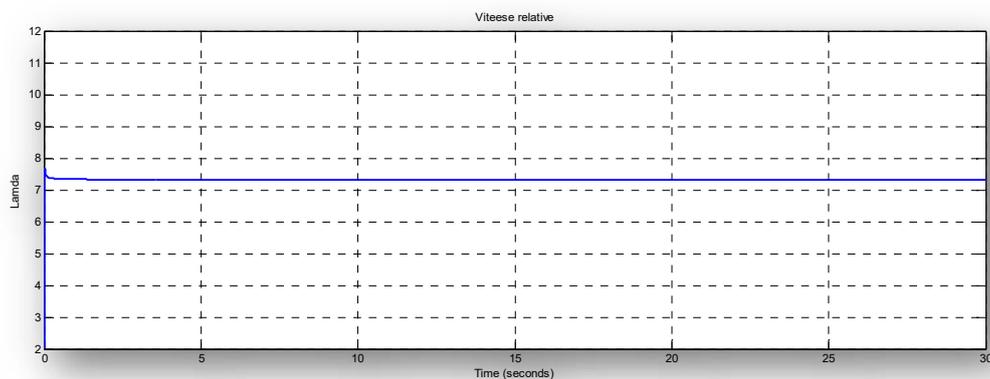


Figure II. 53 : Vitesse relative [m/s]

2.6.4.9 Interprétation des résultats

Figure II.50 :

Après avoir soumis notre turbine au profil du vent (de Van Der Hoven) défini dans la figure II.26, nous remarquons qu'à la suite d'un régime transitoire le C_p se stabilise à la valeur 0.36 à $t=0.06s$, avec présence de deux léger pics à $t= 12.5s$ et $t=24s$

Figure II.51 et II.52 :

Temps de réponse faible d'environ 0.015 s

Dépassement égale environ 3 %

L'évolution de la vitesse mécanique présente un régime transitoire et se stabilise à la valeur 1660 (tr/min) à $t=0.06s$ et suit la consigne, à $t=12s$, le signal se stabilise à une nouvelle valeur

de 1450 tr/min et une dernière variation est observée à $t=24s$ ou le signal se stabilise à la valeur de 1660 tr/min.

Cette variation est due principalement aux variations de la vitesse du vent conformément au profile de la figure II.37

Figures II.53 et II.54 :

- *Le couple mécanique et à l'image de la courbe représentant l'évolution de la vitesse mécanique, il atteint la valeur de 25000 Nm à $t= 0.3 s$ pour redescendre à la valeur de 21500 Nm à $t=12 s$ puis il revient à une valeur finale de 25000 Nm à partir de $t=24 s$.*
- *Même chose pour le couple aérodynamique, mais avec des valeurs égales cent (100) fois celle de mécanique.*

Figures II.31 :

- *La vitesse relative et après un régime transitoire se stabilise à la valeur de 7.2 à $t=0.06s$, avec présence d'une fluctuation positive à $t= 12s$ et d'autre négative $t=24s$ dues aux variations de la vitesse mécanique*

2.6.5 Régulateur H_{∞}

2.6.5.1 Introduction

En Automatique, la synthèse d'une loi de commande se fait généralement sur un modèle nominal simplifié qui ne prend pas en compte toute la complexité du système. Des dynamiques sont négligées, comme celles qui se trouvent en dehors de la bande passante du système asservi. Du fait de ces approximations, il est généralement nécessaire de recourir à une étape de validation a posteriori de la loi de commande. On parle d'analyse de la robustesse ; il s'agit en effet d'analyser la robustesse du comportement du système asservi face aux perturbations externes (variation des conditions de fonctionnement) ou internes (variation des paramètres) du système.

L'analyse de la robustesse s'appuie généralement sur la formulation d'un modèle variant dans le temps, variation qui peut s'exprimer en fonction d'un certain nombre de paramètres incertains. L'analyse de la robustesse en stabilité consiste à établir si le système demeure stable malgré les variations attendues des paramètres. On peut aussi souhaiter que le système maintienne certaines performances (comme la bande passante). L'analyse de la robustesse en performance cherche à établir si le système maintient les performances prévues pour les variations attendues des paramètres.

Les méthodes d'analyse diffèrent en fonction du modèle choisi. Parmi ces modèles qui traitent les systèmes linéaires on trouve la norme H_{∞}

2.6.5.2 Définition de la norme H_{∞} [34] [35]

La commande robuste H_{∞} est née de la recherche d'une meilleure formalisation du cahier de charge par des critères mathématiques dont la résolution efficace permet de synthétiser un correcteur satisfaisant ce cahier de charge. Cette commande propose une solution imparfaite mais très intéressante. Tout comme en automatique fréquentielle classique, l'incertitude est explicitement prise en compte. De plus :

- *Le cahier de charge est formalisé par un critère mathématique*
- *Un algorithme numérique efficace permet de tester s'il existe un correcteur qui satisfasse au critère en temps raisonnable, si oui un correcteur est proposé en sortie de l'algorithme.*

La commande H^∞ standard est défini comme suit (Figure II.58)

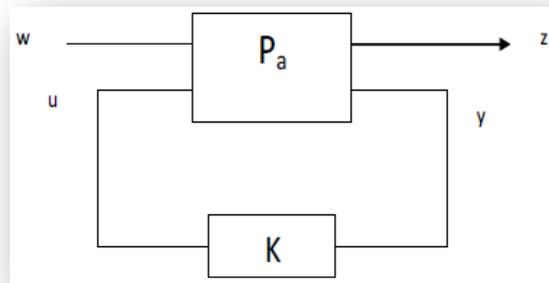


Figure II. 54 : Le problème H^∞ [34].

Etant donné le système augmenté P_a , trouver un régulateur stabilisant K tel que :

$$j(K) = \|T_{zw}\|_\infty < \gamma$$

Le système augmenté P_a avec les fonctions des pondérations et donné par l'équation suivante :

$$P(s) = \begin{bmatrix} A_G & 0 & 0 & 0 & 0 & B_G \\ -BW_1C_G & AW_1 & 0 & 0 & BW_1 & -BW_1D_G \\ 0 & 0 & AW_2 & 0 & 0 & BW_2 \\ BW_3C_G & 0 & 0 & AW_3 & 0 & BW_3D_G \\ -DW_3C_G & CW_1 & 0 & 0 & DW_1 & DW_1D_G \\ 0 & 0 & CW_2 & 0 & 0 & DW_2 \\ DW_3C_G & 0 & 0 & CW_3 & 0 & DW_3D_G \\ C & 0 & 0 & 0 & 1 & D_G \end{bmatrix}$$

W_1, W_2, W_3 Représentent les fonctions des pondérations.

La figure suivante représente le système augmenté par les fonctions de pondérations

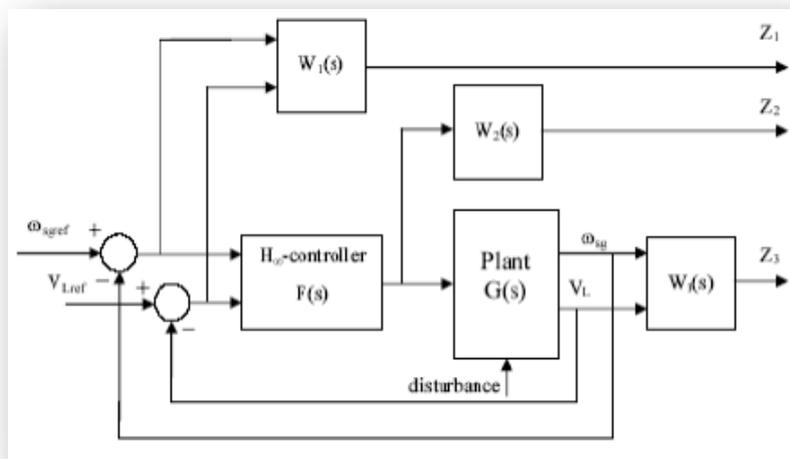


Figure II. 55 : Diagramme simplifié de plant augmenté [34].

2.6.5.3 Synthèse du correcteur robuste H_∞

On considère la réalisation de l'objet linéaire de commande et d'observation dans l'espace d'état de la figure suivante

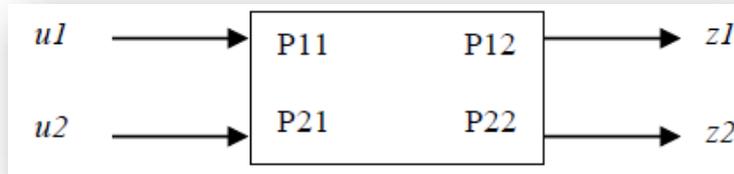


Figure II. 56 : Objet de la commande [34].

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B_1 u_1 + B_2 u_2 \\ z_1 = C_1 x + D_{11} u_1 + D_{12} u_2 \\ z_2 = C_2 x + D_{21} u_1 + D_{22} u_2 \end{cases}$$

Avec A, Matrices à dimensions correspondent [35]. L'objectif est de chercher un régulateur robuste et d'une loi de commande avec boucle de retour de stabilisation sous forme [35] :

$$u_1 = P_{11} + P_{12} K(I - P_{22} K)^{-1} P_{21}^{-1} z_2(p)$$

Et en minimisant le plus grand possible la norme de matrice $TZ_1 u_1$

Le problème standard de cette commande (problème de petit gain) est effectué par la vérification de l'inégalité de norme infinie suivante [35] :

$$\|T_{z_1 u_1}\|_\infty = \sup(\sigma_{\max}(T_{z_1 u_1}(j\omega))) \leq \gamma$$

Où σ_{\max} La valeur singulière maximale, $\gamma = \text{constante} > 0$ niveau d'optimisation

Avec :

$$\|T_{z_1 u_1}\| = \begin{vmatrix} W_1^{-1} S \\ W_2^{-1} R \\ W_3^{-1} T \end{vmatrix}$$

Où :

$$\frac{1}{\sigma(s(j\omega))} \geq |W(j\omega)| \quad \text{et} \quad \sigma(T(j\omega)) \leq |W(j\omega)|$$

- S : Sensibilité
- T : Sensibilité complémentaire
- W_1, W_2, W_3 Les fonctions des pondérations

- $\bar{\sigma}$: La valeur singulière maximale

Cette équation donne la notion de « loop shaping » pour la synthèse d'un contrôleur robuste H_∞ , afin de satisfaire au compromis « robuste performance »

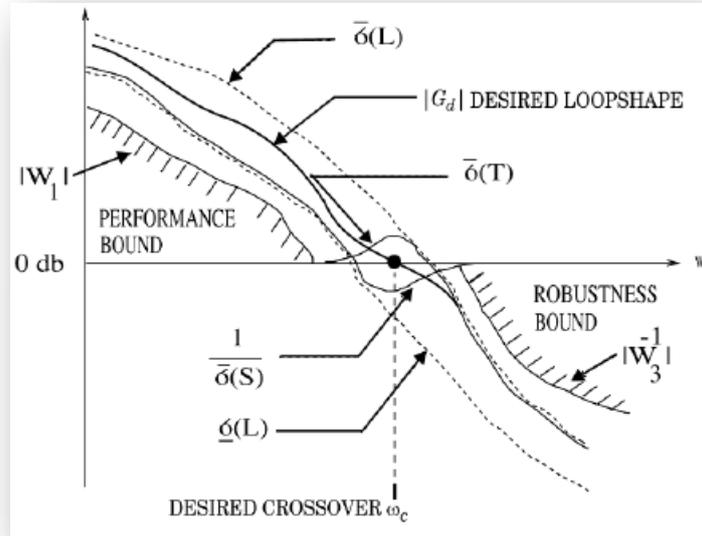


Figure II. 57 : Spécifications de Loop shaping [35].

Afin de permettre la synthèse globale du régulateur il faut résoudre les deux matrices de HAMILTON H et J suivantes [35] (correspondant aux deux équations de RICCATI).

$$H_\infty = \begin{bmatrix} A^T & -\gamma^2 B_1 B_1^T - B_2 B_2^T \\ C_1 C_1^T & -A \end{bmatrix}$$

$$J_\infty = \begin{bmatrix} A^T & -\gamma^2 C_1 C_1^T - C_2 C_2^T \\ B_1 B_1^T & -A \end{bmatrix}$$

La procédure numérique de synthèse et d'optimisation du régulateur sera effectuée à base de la méthode 2-RICCATI. Pour que ce régulateur existe il faut que les conditions suivantes soient vérifiées :

- H et J n'admettent pas des racines sur l'axe imaginaire ;
- X, Y qui sont solutions d'équation de RICCATI ne sont pas négatives
- $\varphi(XY) < \gamma^2$, φ : rayon spectral des solutions
- Si toutes ces conditions sont vérifiées, le régulateur robuste prend la forme suivante :

$$K(s) = -F_\infty [(SI - A_\infty)^{-1}] Z_\infty L_\infty$$

Où

$$A_\infty = A + \gamma^{-2} B_1 B_1^T X_\infty + B_2 F_\infty + Z_\infty L_\infty C_2$$

$$F_{\infty} = -B_2^T X_{\infty}$$

$$L_{\infty} = -Y_{\infty} C_2^T$$

$$Z_{\infty} = (I_n - \gamma^2 Y_{\infty} X_{\infty})^{-1}$$

2.6.5.4 Résultats des simulations.

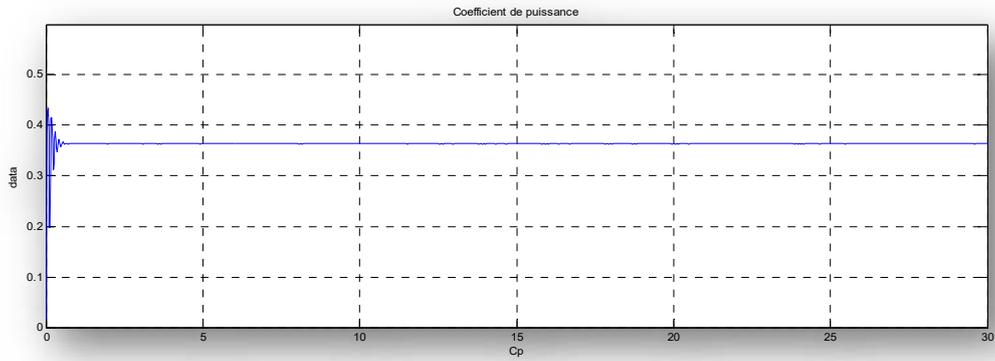


Figure II. 58 : Coefficient de puissance

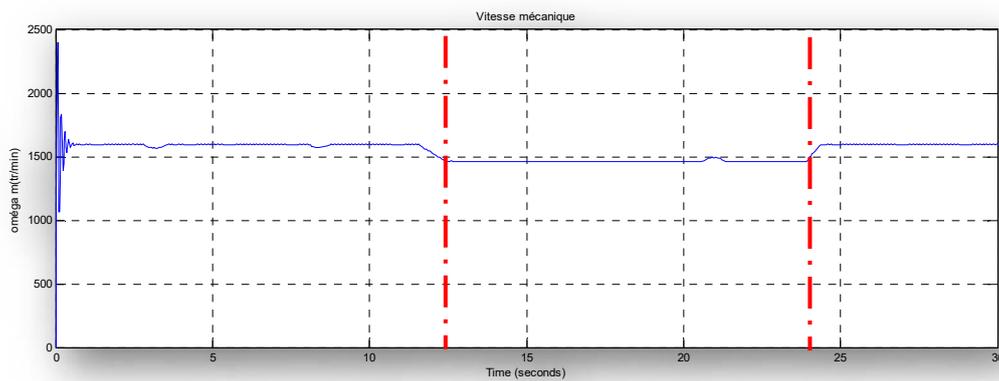


Figure II. 59 : Vitesse mécanique [tr/min]

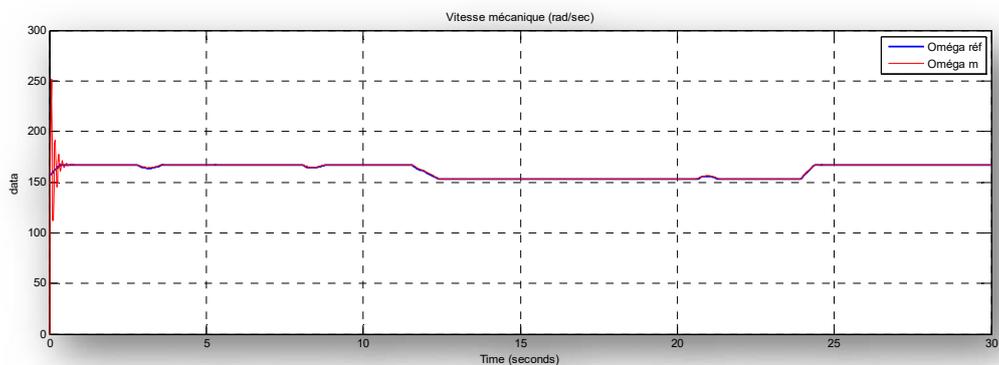


Figure II. 60 : Vitesse mécanique [rad/sec]

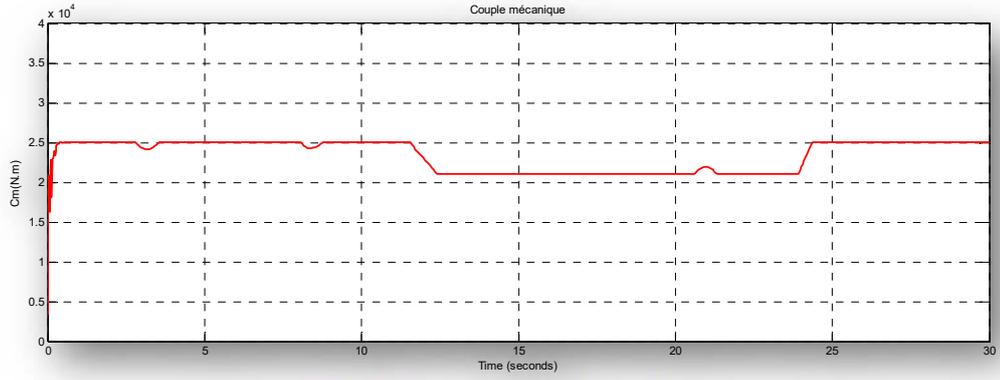


Figure II. 61 : Couple mécanique [Nm]

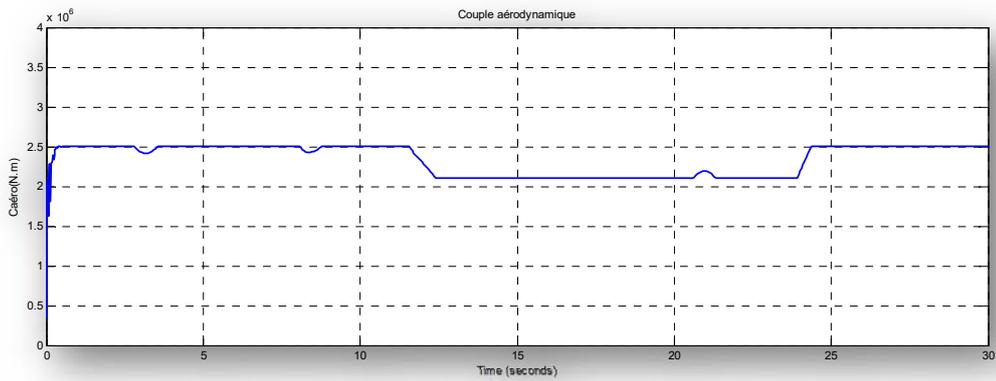


Figure II. 62 : Couple aérodynamique [Nm]

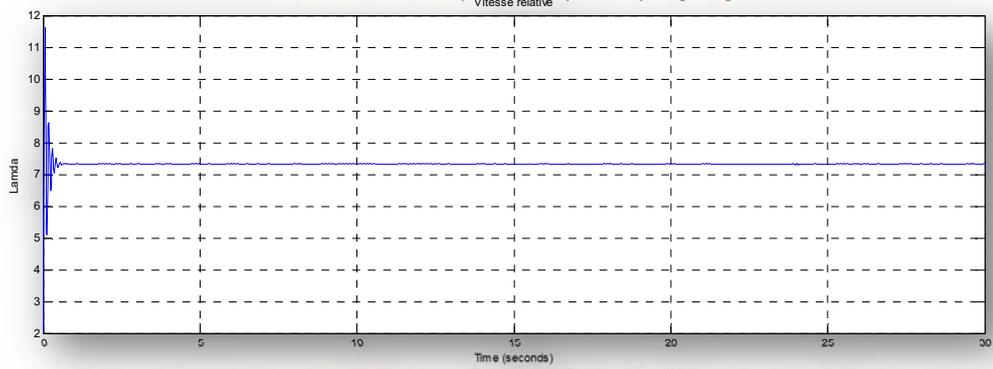


Figure II. 63 : Vitesse relative [m/s]

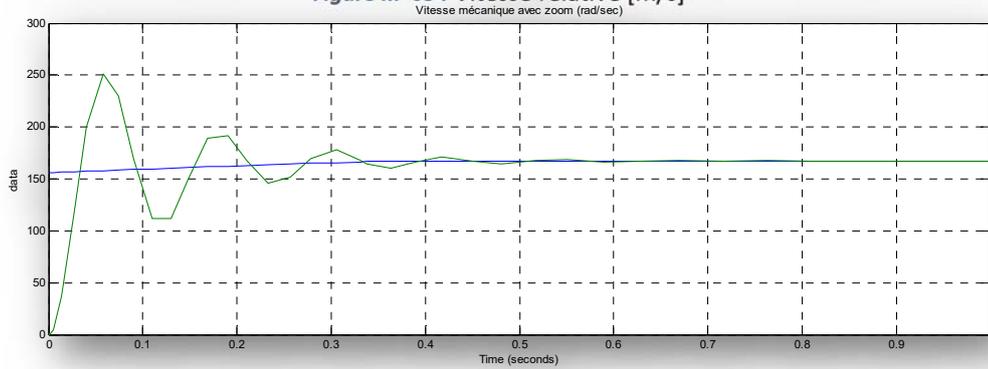


Figure II. 64 : Vitesse mécanique avec zoom [rad/sec]

2.6.5.5 Interprétation des résultats

Figure II.60 :

Après avoir soumis notre turbine au profile du vent (de Van Der Hoven) défini dans la figure II.26, nous remarquons qu'à la suite d'un régime transitoire le C_p se stabilise à la valeur 0.36 à $t=0.36s$, avec présence de deux léger pics à $t= 12.5s$ et $t=24s$

Figure II.61, II.62 et II.66 :

Temps de réponse faible d'environ 0.03 s

Dépassement égale environ 50 %

L'évolution de la vitesse mécanique présente un régime transitoire et se stabilise à la valeur 1660 (tr/min) à $t=0.5s$ et suit la consigne, à $t=12 s$, le signal se stabilise à une nouvelle valeur de 1450 tr/min et une dernière variation est observée à $t=24s$ ou le signal se stabilise à la valeur de 1660 tr/min.

Cette variation est due principalement aux variations de la vitesse du vent conformément au profile de la figure II.37

Figures II.63 et II.64 :

- *Le couple mécanique et à l'image de la courbe représentant l'évolution de la vitesse mécanique, il atteint la valeur de 25000 Nm à $t= 0.32 s$ pour redescendre à la valeur de 21500 Nm à $t=12 s$ puis il revient à une valeur finale de 25000 Nm à partir de $t=24 s$.*
- *Même chose pour le couple aérodynamique, mais avec des valeurs égales cent (100) fois celle de mécanique.*

Figures II.65 :

- *La vitesse relative et après un régime transitoire se stabilise à la valeur de 7.2 à $t=0.5s$, avec présence d'une fluctuation positive à $t= 12s$ et d'autre négative $t=24s$ dues aux variations de la vitesse mécanique*

2.6.6 Régulateur PI Flou

2.6.6.1 Introduction

La logique floue est une théorie mathématique englobant la logique classique. Contrairement à cette dernière elle autorise plus de deux valeurs de vérité pour une proposition c'est-à-dire il existe des états intermédiaires entre vrai et faux. Une proposition peut être par exemple presque vraie, ou bien 70% vraie et donc fausse à 30%. Elle permet la prise en compte d'ensembles définis de manière imprécise. Dans cette logique on parle d'un degré d'appartenance dans un ensemble défini.

2.6.6.2 Historique et domaines d'applications [42]

Les prémisses de la logique floue sont apparues en 1940 lorsque des chercheurs américains ont commencé à se pencher sur le concept d'incertitude. En 1965, Lofti Zadeh introduit la théorie des

ensembles flous, (fuzzy set theory). En 1973 ce même professeur publie un article qui mentionne pour la première fois le terme de valeurs linguistiques, dont la valeur est un mot et non une lettre. En 1974 un chercheur Mamdani établit la première application industrielle de la logique floue : la régulation floue d'une chaudière à vapeur. Il introduit ainsi la commande floue dans la régulation industrielle.

Grâce au chercheur japonais M. Sugeno, la logique floue a été introduite au Japon dès 1985. Actuellement dans le monde, il existe de nombreuses applications dans différents domaines, voici une liste non exhaustive de quelques-unes :

- *Appareils électroménagers (lave-linge, aspirateur, autocuiseur,...etc),*
- *Systèmes audio-visuels (appareil photo autofocus, caméscope à stabilisateur d'imagesystèmes automobiles embarqués (ABS, suspension, climatisation,...etc.)*
- *systèmes de transport (train, métro, ascenseur,...),*
- *systèmes de décision, diagnostic (médical, assurance)*
- *systèmes de contrôle/commande dans la plupart des domaines industriels de production,*
- *transformation, traitement de produits et déchets.*

2.6.6.3 Notion d'appartenance partielle

Dans la théorie des ensembles, un élément appartient ou n'appartient pas à un ensemble. La notion d'ensemble est à l'origine de nombreuses théories mathématiques. Cette notion essentielle ne permet cependant pas de rendre compte de situations pourtant simples et rencontrées fréquemment. Parmi des fruits, il est facile de définir l'ensemble des pommes. Par contre, il sera plus difficile de définir l'ensemble des pommes mûres. On conçoit bien que la pomme mûrit progressivement... la notion de pomme mûre est donc graduelle. C'est pour prendre en compte de telles situations qu'a été créée la notion d'ensemble flou. La théorie des ensembles flous repose sur la notion d'appartenance partielle : chaque élément appartient partiellement ou graduellement aux ensembles flous qui ont été définis. Les contours de chaque ensemble flou (*Figure II.69*) ne sont pas « nets », mais « flous » ou « graduels ».

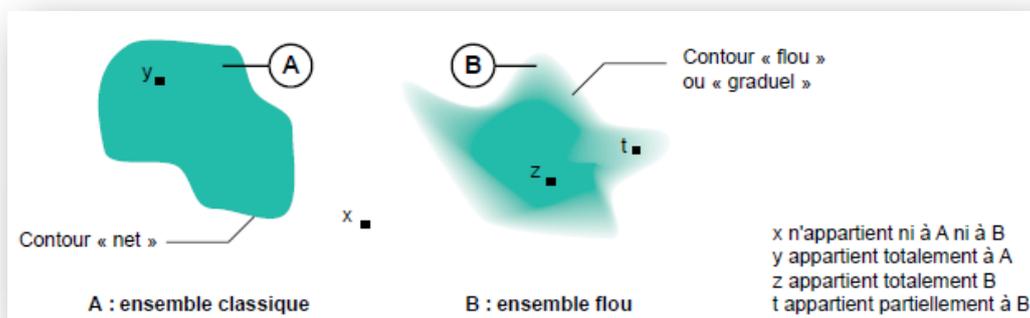


Figure II. 65 : Comparaison d'un ensemble classique et d'un ensemble flou [43].

2.6.6.4 La théorie des sous-ensembles flous

Soit E un univers et $\mu_A : E \rightarrow [0 ; 1]$. On appelle sous ensemble flou A de E l'ensemble des éléments de E qui vérifient $\mu_A \neq 0$. Une telle fonction μ_A est appelée fonction d'appartenance. Elle caractérise en effet le degré d'appartenance d'un élément x au sous-ensemble flou A .

Un sous-ensemble flou est entièrement caractérisé par sa fonction d'appartenance. Si on connaît A , alors on connaît μ_A et inversement, connaître μ_A permet de connaître A .

L'interprétation de cette fonction est la suivante :

- $\mu_A(x) = 1$ signifie que x appartient à A avec certitude.
- $\mu_A(x) = 0$ signifie que x n'appartient pas à A avec certitude.
- Les autres valeurs servent à graduer le degré d'appartenance de x à A .

2.6.6.5 Fonctions d'appartenance

Supposons que nous voulions définir l'ensemble des personnes de « taille moyenne ». En logique classique, nous conviendrons par exemple que les personnes de taille moyenne sont celles dont la taille est comprise entre 1,60 m et 1,80 m. La fonction caractéristique de l'ensemble $()$ donne « 0 » pour les tailles hors de l'intervalle [1,60 m ; 1,80 m] et « 1 » dans cet intervalle. L'ensemble flou des personnes de « taille moyenne » sera défini par une « fonction d'appartenance » qui diffère d'une fonction caractéristique par le fait qu'elle peut prendre n'importe quelle valeur dans l'intervalle [0, 1]. A chaque taille possible correspondra un « degré d'appartenance » à l'ensemble flou des « tailles moyennes » (Figure) compris entre 0 et 1.

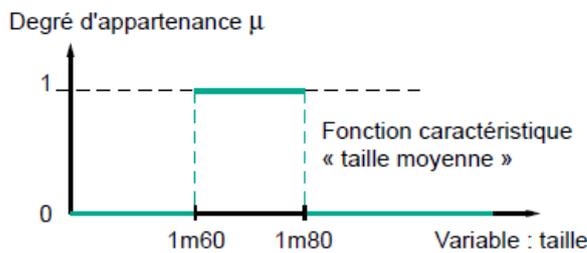


Figure II. 66 : Fonction caractéristique [43]

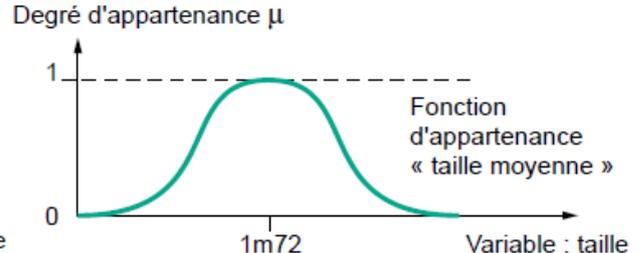


Figure II. 67 : Fonction d'appartenance [43].

Les fonctions d'appartenance peuvent théoriquement prendre n'importe quelle forme. Toutefois, elles sont souvent définies par des segments de droites, et dites « linéaires par morceaux » (Figure II.72).

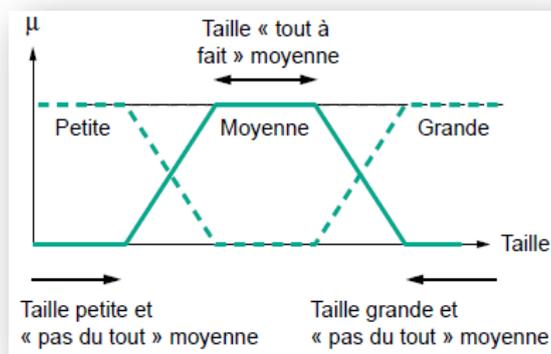


Figure II. 68 : Fonctions d'appartenance linéaires par morceaux. [43].

Les fonctions d'appartenance « linéaires par morceaux » sont très utilisées car :

- Elles sont simples,
- Elles comportent des points permettant de définir les zones où la notion est vraie, les zones où elle est fausse, ce qui simplifie le recueil d'expertise.

Ce sont des fonctions d'appartenance de ce type qui seront utilisées dans notre simulation.

Il est à noter que dans certains cas, les fonctions d'appartenance peuvent être égales à 1 pour une seule valeur de la variable et égales à 0 ailleurs, et prennent alors le nom de « fonctions d'appartenance singletons » (*Figure II.73*).

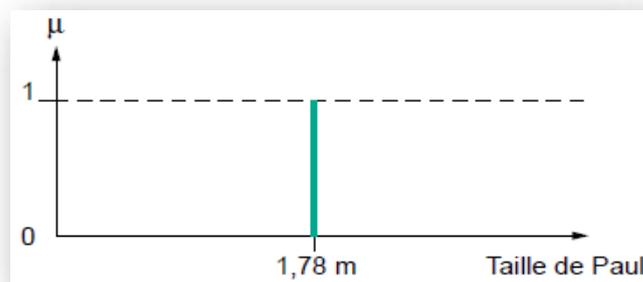


Figure II. 69 : Fonction d'appartenance singleton [43].

2.6.6.6 Fuzzification - Degré d'appartenance

L'opération de fuzzification permet de passer du domaine réel au domaine du flou. Elle consiste à déterminer le degré d'appartenance d'une valeur (mesurée par exemple) à un ensemble flou. Par exemple (*Figure II.74*), si la valeur courante de la variable « entrée » est de 2, le degré d'appartenance à la fonction d'appartenance « entrée faible » est égal à 0,4 qui est le résultat de la fuzzification.

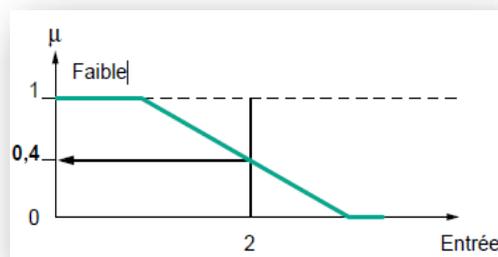


Figure II. 70 : Fuzzification [43].

On peut aussi dire que la proposition « entrée faible » est vraie à 0,4. On parle alors de degré de vérité de la proposition. Degré d'appartenance et degré de vérité sont donc des notions similaires.

2.6.6.6.1 Opérateurs logiques flous

Ces opérateurs permettent d'écrire des combinaisons logiques entre notions floues, c'est-à-dire de faire des calculs sur des degrés de vérité. Comme pour la logique classique, on peut définir des opérateurs ET, OU, négation.

2.6.6.6.2 Choix des opérateurs

Il existe de nombreuses variantes dans ces opérateurs, les plus répandus sont ceux dits « de Zadeh » décrits cidessous :

- **Intersection :**

L'opérateur logique correspondant à l'intersection d'ensembles est le ET. Le degré de vérité de la proposition « A ET B » est le minimum des degrés de vérité de A et de B :

$$\mu (A \text{ ET } B) = \text{MIN} (\mu (A), \mu (B))$$

Exemple :

« Température Basse » est vraie à 0,7

« Pression Faible » est vraie à 0,5

*« Température Basse **ET** Pression Faible » est donc vraie à 0,5 = MIN (0,7 ; 0,5)*

- **Union :**

L'opérateur logique correspondant à l'union d'ensembles est le OU. Le degré de vérité de la proposition « A OU B » est le maximum des degrés de vérité de A et de B :

$$\mu (A \text{ OU } B) = \text{MAX} (\mu (A), \mu (B)).$$

Exemple :

« Température Basse » est vraie à 0,7

« Pression Faible » est vraie à 0,5

« Température Basse OU Pression Faible » est donc vraie à 0,7.

- **Complément :**

L'opérateur logique correspondant au complément d'un ensemble est la négation.

$$\mu (\text{NON } A) = 1 - \mu (A)$$

Exemple :

« Température Basse » est vraie à 0,7

« NON Température Basse », que l'on utilisera généralement sous la forme «Température NON Basse », est donc vraie à 0,3.

2.6.6.6.3 Règles floues

La logique floue a pour objectif de formaliser et de mettre en œuvre la façon de raisonner d'un être humain. En cela, elle peut être classée dans le domaine de l'intelligence artificielle. L'outil le plus utilisé dans les applications de logique floue est la base de règles floues. Une base de règles floues

est composée de règles qui sont généralement utilisées en parallèle, mais peuvent également être enchaînées dans certaines applications.

Une règle est du type :

SI « prédicat » ALORS « conclusion ».

Par exemple : « Si température élevée et pression forte ALORS ventilation forte et soupape grande ouverte ».

Les bases de règles floues, tout comme les systèmes experts classiques, fonctionnent en s'appuyant sur une base de connaissance issue de l'expertise humaine. Il y a néanmoins de grandes différences dans les caractéristiques et le traitement de cette connaissance. Une règle floue comporte trois étapes fonctionnelles résumées dans la Figure II.75 :

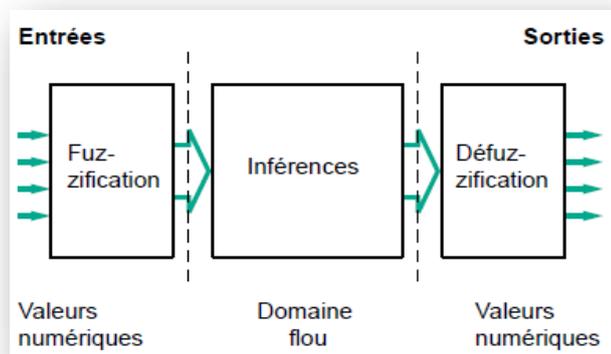


Figure II. 71 : Traitement flou [43].

2.6.6.6.4 La défuzzification

A la fin de l'inférence, l'ensemble flou de sortie est déterminé mais il n'est pas directement utilisable pour donner une information précise à l'opérateur ou commander un actionneur. Il est nécessaire de passer du « monde flou » au « monde réel », c'est la défuzzification. Il existe plusieurs méthodes, la plus souvent rencontrée étant le calcul du « centre de gravité » de l'ensemble flou (Figure II.76)

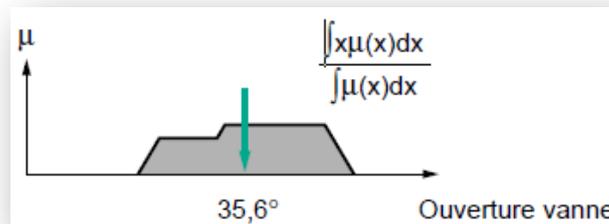


Figure II. 72 : Défuzzification par centre de gravité [43].

2.6.6.6.5 Synthèse d'un contrôleur PI flou de type MAMDANI

La formulation d'un régulateur PI classique est :

$$\text{Commande} = K_p * \text{erreur} + K_I * \text{somme (erreurs)}.$$

Cette formulation fait intervenir le proportionnel et l'intégrateur en parallèle (commande = erreur + intégrale de l'erreur). Une autre formulation du régulateur PI peut être trouvé écrivant : variation de

la commande = intégrale de (la dérivé de l'erreur + l'erreur). Ainsi, la formule commande = K_p * erreur + K_I * somme (erreurs) se transforme en :

"Commande(k) = commande (k-1) + K_p * variation (erreur) + K_I * erreur"

On a alors :

$$\begin{cases} u(k) = u(k-1) + \Delta u \\ \Delta u = K_p \cdot \Delta e + K_I \cdot e \\ e = c - y \\ \Delta e = e(k) - e(k-1) \end{cases}$$

Avec :

- $u(k)$: La commande à l'instant k
- Δu : La variation de la commande
- e : L'erreur ($e(k)$, l'erreur à l'instant k)
- Δe : La variation de l'erreur ($e(k) - e(k-1)$)
- c : La consigne à respecter
- y : La mesure de la réponse du système à la consigne donnée

On remarque que tout ce que l'on a à faire, c'est trouver la variation de la commande à appliquer à chaque instant en fonction de l'erreur et de sa variation. L'utilisation d'un système flou va nous permettre de ne pas nous soucier des coefficients K_p et K_i qui seront automatiquement déterminés en fonction des réglages que l'on aura fait sur notre système flou.

2.6.6.6.5.1 Les règles et la Matrice d'interférences

Les données que l'on a en entrées sont l'erreur et la variation de l'erreur et la sortie la commande été la variation de la commande. La variation de l'erreur en fonction de la variation de la commande est représentée sur le tableau ci-dessous, par une matrice d'interférences de vingt-cinq règles

		<i>du</i>				
		NG	NP	EZ	PP	PG
<i>de</i>	NG	NG	NG	NG	NP	EZ
	NP	NG	NP	NP	EZ	PP
	EZ	NP	NP	EZ	PP	PP
	PP	NP	EZ	PP	PP	PG
	PG	EZ	PP	PP	PG	PG

Tableau II. 3 : Matrices d'inférences.

2.6.6.6.5.2 Défuzzification

Dans notre cas d'étude on a opté la méthode « MAX-MIN » de Mamdani

- Opérateur ET : Formation du minimum,
- Opérateur OU : Formation du maximum,
- Implication ALORS : Formation du minimum,
- Agrégation : Formation du maximum.

La méthode de défuzzification retenue est celle du centre de gravité.

2.6.6.7 Résultats de simulation

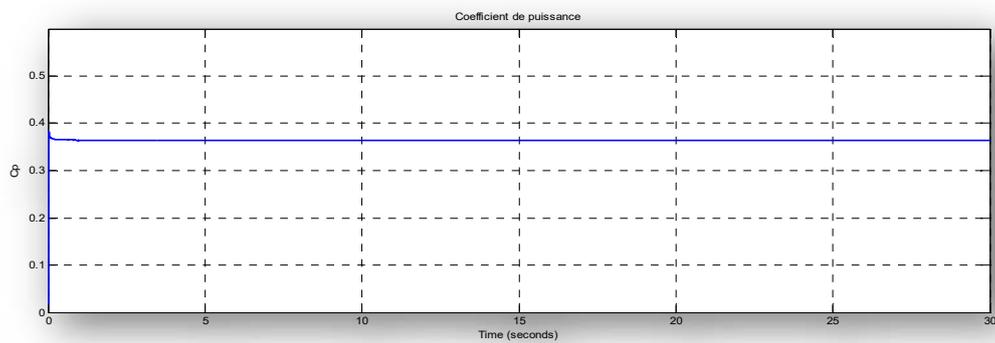


Figure II. 73 : Coefficient de puissance

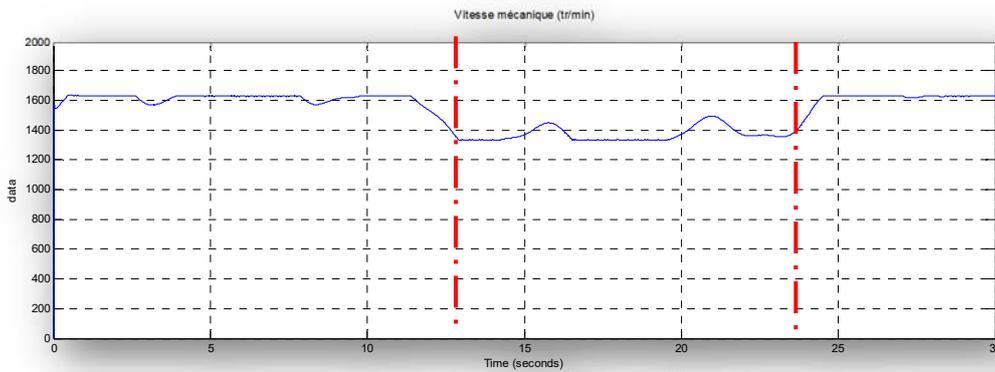


Figure II. 74 : Vitesse mécanique [tr/min]

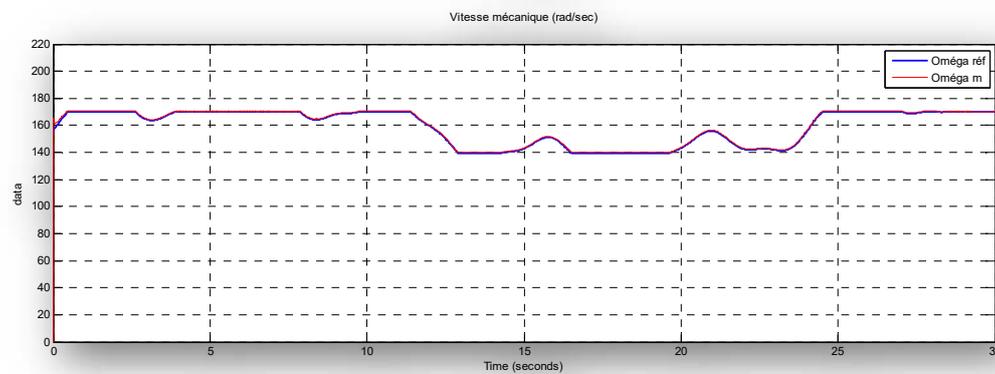


Figure II. 75 : Vitesse mécanique [rad/sec]

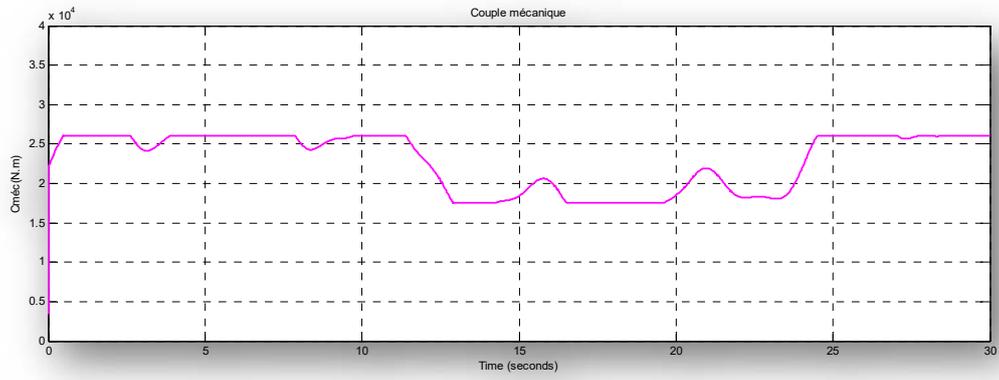


Figure II. 76 : Couple mécanique [Nm]

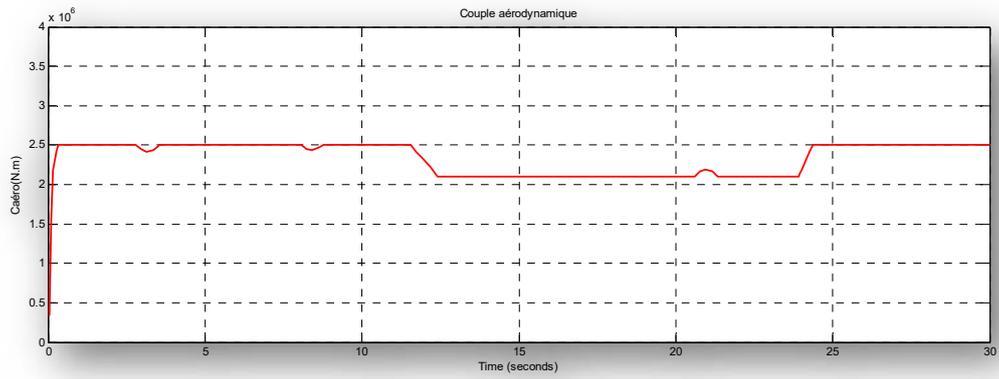


Figure II. 77 : Couple aérodynamique [Nm]

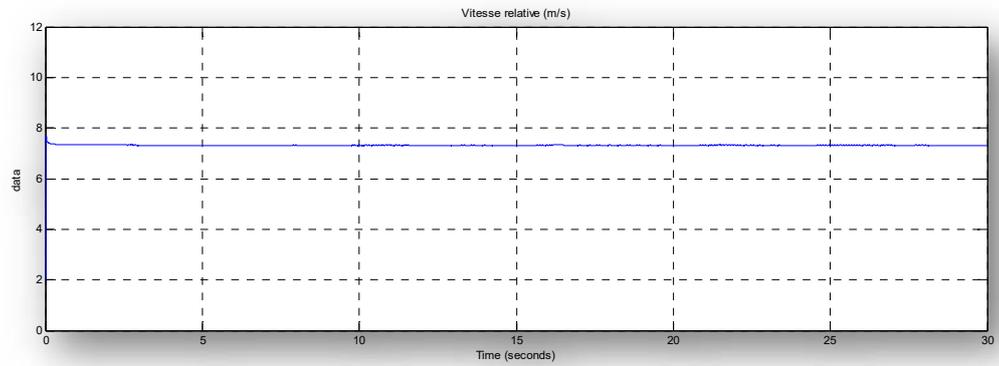


Figure II. 78 : Vitesse relative [m/s]

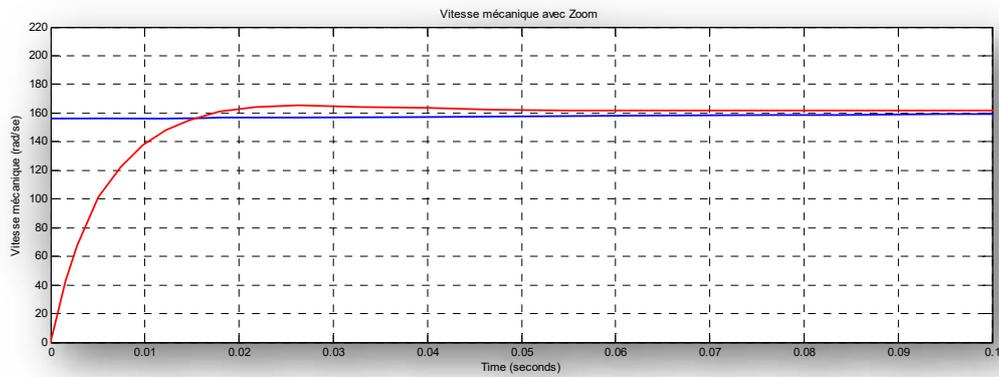


Figure II. 79 : Vitesse mécanique avec zoom [rad/sec]

2.6.6.8 Interprétation des résultats

Figure II.75 :

Après avoir soumis notre turbine au profile du vent (de Van Der Hoven) défini dans la figure II.26, nous remarquons qu'à la suite d'un régime transitoire le C_p se stabilise à la valeur 0.36 à $t=0.0045s$, avec présence de deux léger pics à $t= 12.5s$ et $t=24s$

Figure II.76, II.77 et II.81 :

Temps de réponse faible d'environ 0.01 s

Dépassement égale environ 2 %

L'évolution de la vitesse mécanique présente un régime transitoire et se stabilise à la valeur 1660 (tr/min) à $t=0.06s$ et suit la consigne, à $t=12 s$, le signal se stabilise à une nouvelle valeur de 1450 tr/min et une dernière variation est observée à $t=24s$ ou le signal se stabilise à la valeur de 1660 tr/min.

Cette variation est due principalement aux variations de la vitesse du vent conformément au profile de la figure II.37

Figures II.78 et II.79 :

- *Le couple mécanique et à l'image de la courbe représentant l'évolution de la vitesse mécanique, il atteint la valeur de 25000 Nm à $t= 0.32 s$ pour redescendre à la valeur de 21500 Nm à $t=12 s$ puis il revient à une valeur finale de 25000 Nm à partir de $t=24 s$.*
- *Même chose pour le couple aérodynamique, mais avec des valeurs égales cent (100) fois celle de mécanique.*

Figures II.80 :

- *La vitesse relative et après un régime transitoire se stabilise à la valeur de 7.2 à $t=0.045s$, avec présence d'une fluctuation positive à $t= 12s$ et d'autre négative $t=24s$ dues aux variations de la vitesse mécanique*

2.7 Etude comparative des techniques de régulations

Figure II. 80 : Vitesse mécanique (tous les régulateurs) [rad/sec]

Figure II. 81 : Vitesse mécanique avec zoom (tous les régulateurs) [rad/sec]

2.8 Interprétation générale

Sur la base des résultats obtenus pour les différents PI, on peut déduire que le régulateur à base du PI Flou est le plus performant, avec un temps de réponse plus court, un dépassement plus petit et un régime transitoire presque négligeable.

2.9 Conclusion

Après modélisation et simulation de la partie mécanique avec différents PI, on est arrivé à choisir le PI Flou comme régulateur vu ses performances en comparaison avec les autres PI étudiés. Après ce choix, nous allons l'exploiter dans le troisième chapitre pour la commande de notre aérogénérateur à base d'une MADA.

Pour cela on va réaliser la régulation de la turbine avec un PI Flou et pour ce qui est de la commande directe de la MADA, on utilisera un régulateur PI classique.

Etude et simulation d'une MADA

3.1 Modélisation de la MADA

3.1.1 Introduction

Afin de permettre la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique plusieurs types des machines électriques sont utilisés à savoir les machines synchrones, les machines asynchrones et les machines à courant continu. Actuellement les systèmes éoliennes à vitesse variables basés sur MADA connaissent une popularité grandissante et principalement dans les fermes éoliennes terrestre vu qu'elle présente bien des avantages : le convertisseur lié à l'armature rotorique est dimensionné au tiers de la puissance nominale du rotor, les pertes dans les semi-conducteurs sont faibles, possibilité d'avoir une vitesse variable de l'éolienne ...etc. Cela nous a encouragés, après avoir étudié, modélisé et simuler la partie mécanique de l'éolienne dans le chapitre précédent, à adopter, dans ce chapitre, la régulation d'une éolienne à base d'une MADA comme cas d'étude, on exploite les résultats obtenus pour le choix d'un Pi dans le but de vérifier sa performance dans cas d'intégration de la turbine dans un système d'éolienne.

3.1.2 Evolution de la MADA

Connue depuis 1899 [25], la machine à induction à double alimentation, *DFIM* (de l'anglais, *Doubly Fed Induction Machine*), est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné alimentée par ses deux armatures : le stator et le rotor. Elle a été étudiée en premier lieu pour être utilisée en tant que moteur à grande vitesse mais vu les problèmes d'instabilités rencontrés dès lors l'ont fait abandonner pour un temps. Grâce au progrès des technologies précitées, plusieurs applications de la *DFIM* sont alors devenues possibles dont l'intérêt réside principalement dans les possibilités de contrôle du flux des puissances pour les régimes caractéristiques hypo et hyper-synchrones, cela étant aussi bien dans les fonctionnements moteur que générateur. La théorie d'orientation du flux, apparue dans le début des années 70, appliquée à la *DFIM* avec succès a donné lieu à un outil puissant pour son contrôle.

3.1.3 Structure et principe de fonctionnement d'une MADA

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné est composée d'un stator identique à celui des machines asynchrones classique et un rotor bobiné par un bobinage triphasé accessible par des trois bagues munies de contacts glissants *figure III.1*.

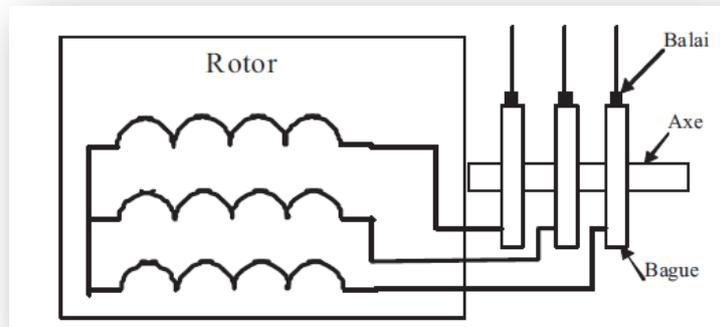


Figure III. 1 : Structure du rotor d'une MADA [10].

Utilisée dans un système éolien, le stator de la machine est directement connecté au réseau contrairement au rotor qui est relié au réseau par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance (*Figure III.2*). La partie convertisseurs de puissance est principalement constituée par :

- *Un redresseur* : C'est le convertisseur côté rotor machine « CCR » qui permet de contrôler le couple électromagnétique T_g et la puissance réactive Q_s échangée entre le stator et le réseau ;
- *Un bus continu* ;
- *Un onduleur* : C'est le convertisseur côté réseau « CCR » qui contrôle la tension (bus continu) et la puissance réactive Q_r échangée entre le rotor et le réseau.

Les convertisseurs sont bien évidemment commandés en MLI (PWM) [25]. Ces convertisseurs de puissance sont dimensionnés en fonction de la puissance nominale de la machine.

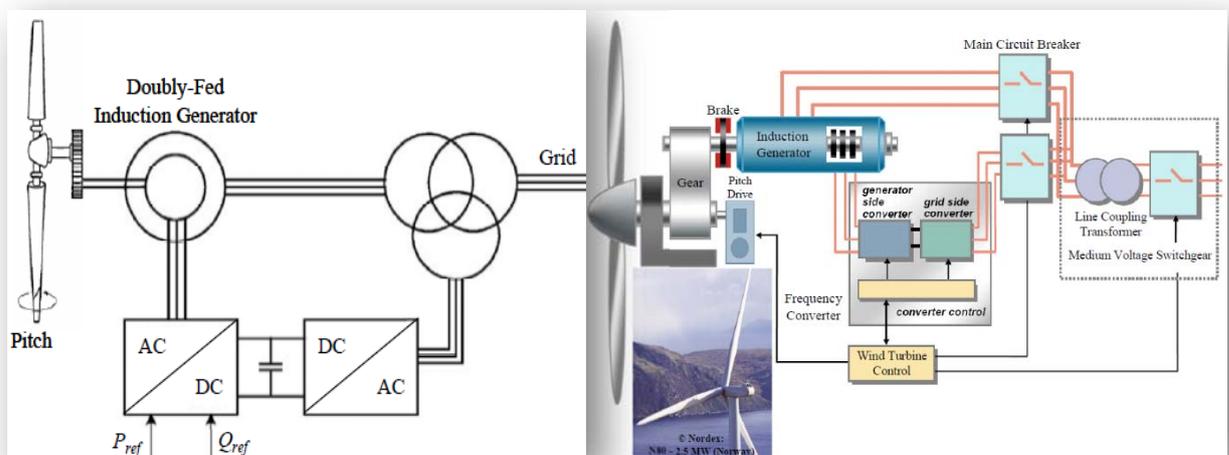


Figure III. 2 : La MADA dans le contexte éolien [25].

3.1.4 Modes de fonctionnement d'une MADA

Une MADA et grâce à sa double alimentation offre plusieurs possibilités de reconfiguration du mode de fonctionnement de la machine. Elle peut fonctionner pour les deux modes, moteur (en dessous de la vitesse de synchronisme) et générateur (dessus de celle-ci), avec deux vitesses hypo-synchrones et hyper-synchrones. Le fonctionnement d'une (MADA) dans quatre quadrants est schématisé dans la *figure III.3*, tel que P_s , P_r désignent les puissances absorbées ou fournies par le stator et le rotor de la machine P_m la puissance mécanique.

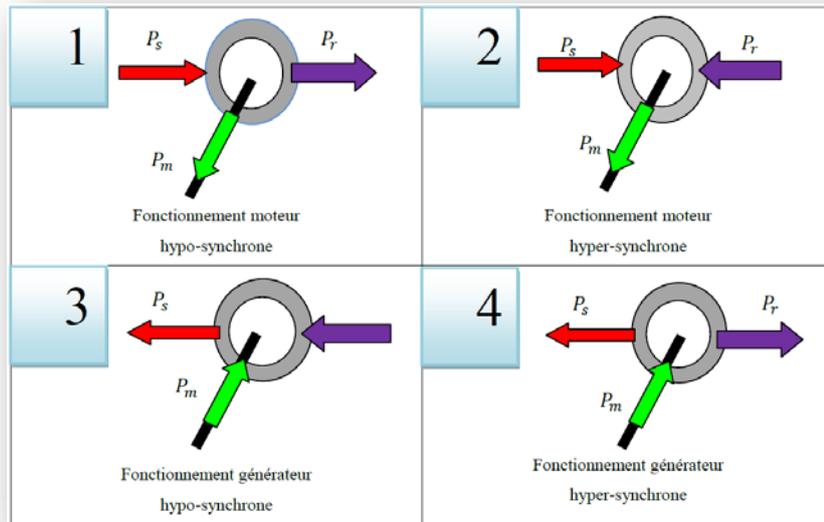


Figure III. 3 : Modes opérationnels caractéristiques de la MADA [14].

➤ Fonctionnement en **moteur** ($P_m > 0$) :

- En mode **hypo-synchrone** : La puissance est fournie par le réseau. Si la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, "la puissance de glissement" est renvoyée sur le réseau.
- En mode **hyper-synchrone** : Une partie de la puissance absorbée par le réseau est engendrée par le rotor et sera convertie en puissance mécanique.

➤ Fonctionnement en **génératrice** ($P_m < 0$) :

- En mode **hypo-synchrone** : une partie de la puissance traverse le stator et sera réabsorbée par le rotor.
- En mode **hyper-synchrone** : la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine sera transmise au réseau aux pertes près. La majorité de cette puissance est transmise à travers le stator et une partie de cette puissance correspondant à $g.P_m$ par l'intermédiaire du rotor [26].

3.1.5 Principe de variation de la vitesse de la MADA

En négligeant les pertes, on peut écrire les équations régissant le fonctionnement de la MADA, montré dans la figure précédente, comme suit :

$$Pr = g. PS$$

$$Prés = Pmec = PS - Pr = 1 - g. PS$$

A partir de ces équations on remarque que pour une puissance constante transmise au stator, plus on augmente la puissance transmise au rotor, plus le glissement augmente. De cela il est donc possible de contrôler la vitesse de la génératrice en agissant simplement sur la puissance transmise au rotor via le glissement g . Sur la base de ce principe plusieurs variantes de chaînes de conversion éolienne à vitesse variable et à base de la MADA sont envisageables. Elles diffèrent par la dissipation ou la récupération de la puissance rotorique, la bidirectionnalité ou non du transfert de cette dernière, et le type des convertisseurs utilisés [27].

3.1.6 Avantage des éoliennes à base de la MADA

Les éoliennes à base d'une MADA procurent ainsi plusieurs avantages à savoir [28] :

- *Le facteur de puissance peut être réglé car la génératrice peut être contrôlée pour fonctionner de façon similaire à un alternateur synchrone. En effet, les puissances active et réactive peuvent être contrôlées de façon indépendante grâce au convertisseur connecté au rotor de la MADA*
- *Les convertisseurs statiques utilisés sont moins volumineux, moins coûteux, nécessitant ainsi un système de refroidissement moins lourd. Ils génèrent moins de perturbations comparativement aux convertisseurs utilisés pour les éoliennes à base de machine asynchrone à cage ou à aimant permanent ;*
- *Le dimensionnement des filtres est réduit et, de ce fait, leur coût s'en trouve amoindri,*
- *Les pertes liées aux convertisseurs statiques sont diminuées et le rendement du système de génération est amélioré.*

3.1.7 Modèle de la MADA

3.1.7.1 Hypothèses simplificatrices [16]

Malgré sa simplicité de construction, le modèle mathématique d'une MADA est compliqué, à cause des phénomènes mis en jeu qui sont de natures électriques, magnétiques et mécaniques, avec une structure multi variable non-linéaire. Dans un repère triphasé fixe et lié au stator, le modèle de la machine asynchrone, présente l'inconvénient d'avoir des équations différentielles à coefficients variables en fonction de la position du rotor, et donc du temps. Les hypothèses simplificatrices suivantes sont les plus couramment considérées dans la littérature scientifique:

- *la machine présente une parfaite symétrie, tant au stator et qu'au rotor ;*
- *le circuit magnétique est considéré non-saturé ;*
- *la distribution spatiale des forces magnétomotrices dans l'entrefer est sinusoïdale ;*

- les pertes fer dues à l'hystérésis et aux courants de Foucault sont négligées ;
- l'effet d'encoche et l'effet de peau sont également négligés.

La figure III.4 représente la structure de principe de la machine asynchrone triphasée.

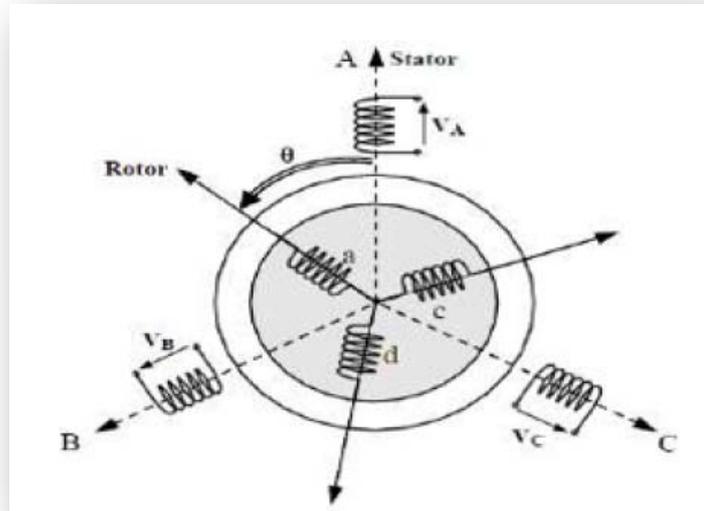


Figure III. 4 : Position des axes statoriques et rotoriques dans l'espace électrique [8].

Les trois enroulements statoriques et les trois enroulements rotoriques mettent en évidence la configuration symétrique de la machine. La position de la phase rotorique (Oar) par rapport celle de la phase statorique (OAs) repérée par l'angle Θ

Parmi les approches utilisées pour la modélisation des machines tournantes triphasées, celle basée sur la théorie des deux axes de R.H. Park qui consiste la transformation d'un système triphasé en un système biphasé équivalent, en passant du référentiel fixe (**A,B,C**) vers un autre référentiel mobile (**d-q**), où **d** est l'axe direct et **q** l'axe de quadrature arrière, perpendiculaires et mutuellement couplés, l'angle entre les deux référentiels est appelé angle de Park. Dans cette approche on arrive à éliminer la dépendance de la position du rotor et l'ordre de système sera réduit dans le cas équilibré, ce qui permet d'obtenir des modèles dynamiques caractérisés par des systèmes d'équations à coefficients constants, mais le système reste non-linéaire, multi variable.

3.1.7.2 Représentation dans le repère triphasé (a,b,c)

Comme vu dans le principe de fonctionnement d'une MADA, les trois enroulements statorique couplés en étoile ou en triangle si ils sont alimentés par une tension triphasé de, il en résulte alors la création d'un champ magnétique glissant dans l'entrefer de la machine (Théorème de FERRARIS). La vitesse de rotation de ce champ par rapport au stator est donnée par :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p}$$

III. 1

En appliquant la loi de Faraday aux enroulements de la machine asynchrone, on détermine les équations différentielles exprimant les tensions en fonction des différents flux par [14] [25] :

➤ Pour le stator

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{III. 2}$$

➤ Pour le rotor

$$\begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad \text{III. 3}$$

Où :

v_{sa} v_{sb} v_{sc} et v_{ra} v_{rb} v_{rc} sont respectivement les tensions par phase au stator et au rotor.

i_{sa} i_{sb} i_{sc} et i_{ra} i_{rb} i_{rc} sont respectivement les courants par phase au stator et au rotor.

Φ_{sb} Φ_{sc} et Φ_{ra} Φ_{rb} Φ_{rc} sont respectivement les flux par phase au stator et au rotor.

R_s : La résistance des enroulements statoriques.

R_r : La résistance des enroulements rotoriques.

On définit les vecteurs flux suivant :

$$[\Phi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \text{ et } [\Phi_{rabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix}$$

Ainsi que les vecteurs courants suivants :

$$[i_{sabc}] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \text{ et } [i_{rabc}] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}$$

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

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sabc} \\ \Phi_{rabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{rs}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sabc} \\ i_{rabc} \end{bmatrix}$$

Ou bien :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} = [L_s] \cdot \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad \text{III. 4}$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} = [L_r] \cdot \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + [M_{rs}] \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}$$

III. 5

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix} \text{ et } [L_r] = \begin{bmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_s & l_r \end{bmatrix} \quad [25]$$

Avec :

$[L_s]$: Matrice des coefficients d'inductance statorique,

$[L_r]$: Matrice des coefficients d'inductance rotorique.

l_s : Inductance propre d'une phase statorique

m_s : L'inductance mutuelle entre deux phases statorique

l_r : Inductance propre d'une phase rotorique

m_r : L'inductance mutuelle entre deux phases rotorique

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M_{max} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Le coefficient $[M_{sr}]$ représente la valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle stator-rotor obtenue lorsque les bobinages sont en regard l'un de l'autre.

En remplaçant les relations (3.4) et (3.5) dans (3.2) et (3.3) on obtient les expressions sous forme matricielle suivantes :

$$\begin{cases} [v_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + [L_s] \frac{d[i_s]}{dt} + \frac{d([M_{sr}].[i_r])}{dt} \\ [v_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + [L_r] \frac{d[i_r]}{dt} + \frac{d([M_{sr}].[i_s])}{dt} \end{cases} \quad III. 6$$

3.1.7.2.1 Couple électromagnétique

L'expression générale du couple électromagnétique est donné par :

$$[C_{em}] = \frac{1}{2} [i]^t \frac{\partial [L]}{\partial \theta} \cdot [i] \quad III. 7$$

Avec :

$$[i] = [i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc} \ i_{ra} \ i_{rb} \ i_{rc}]^t$$

Et

$$[L] = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{rs}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix}$$

L'équation mécanique est donnée par :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f \Omega \quad III. 8$$

Où :

Ω : Vitesse mécanique de la machine.

C_{em} : Couple électromagnétique.

f : Coefficient de frottement visqueux.

C_r : Couple résistant.

J : Moment d'inertie.

Vu la complexité des équations électriques et mécanique de la machine asynchrone a exploitées à cause des dimensions des matrices entrant dans les calculs et de la dépendance de la matrice inductance vis à vis de la position de l'axe rotorique par rapport à l'axe statorique, qui est variable dans le temps.

3.1.7.3 Modèle biphasé de la MADA

Afin de permettre la réalisation d'une commande vectorielle de la MADA, il faut faire un changement du repère triphasé fixe (ABC), à un repère biphasé tournant (dq) (Figure III.5).

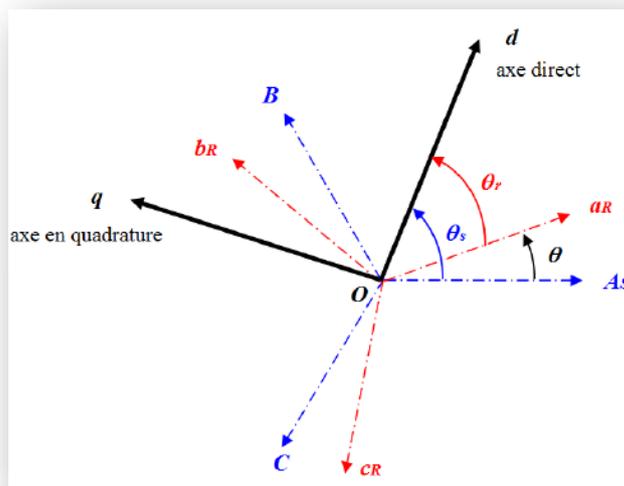


Figure III. 5 : Position spatiale des différents référentiels [14]

Les angles θ_s et θ_r sont liés par la relation suivante :

$$\theta_s = \theta_r + \theta \quad \text{III. 9}$$

A partir de cette équation on peut obtenir après dérivation, les relations des vitesses w_s et w_r :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta_r}{dt} + \frac{d\theta}{dt} \quad \text{III. 10}$$

Avec :

$$w_s = \frac{d\theta_s}{dt} \text{ et } w_r = \frac{d\theta_r}{dt}$$

3.1.7.3.1 La transformation de Park

La transformation de Park appelée aussi transformation des deux axes, permet de ramener les variables du repère réel (ABC), aux composantes homopolaires indice 0, d'axe directe (indice d) et d'axe quadrature (indice q). On remarque alors que les grandeurs statoriques et rotoriques sont exprimées dans un même repère comme le montre la Figure III.6.

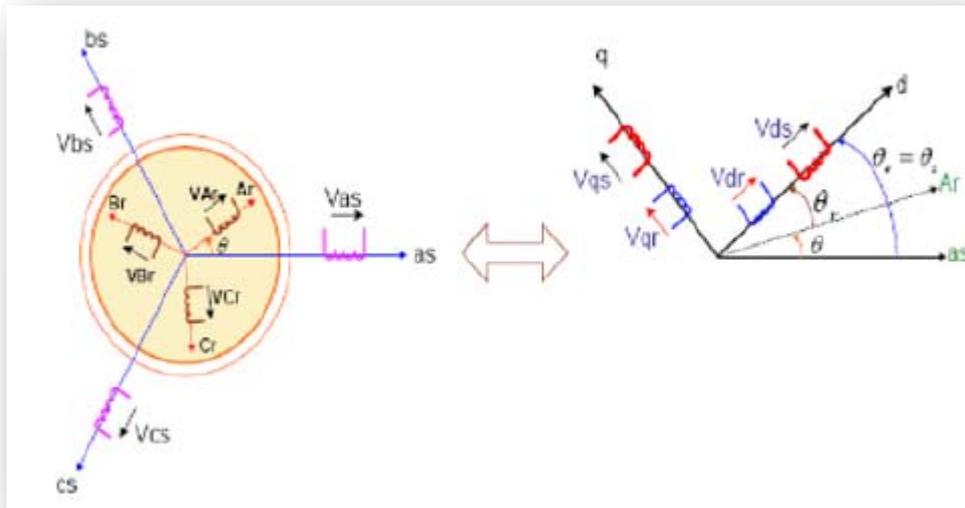


Figure III. 6 : Orientation du repère de Park [8].

Le modèle repose sur les hypothèses simplificatrices classiques :

- Les flux sont additifs,
- Les inductances propres sont constantes et qu'il y a une variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques. [14] [25].

3.1.7.3.2 Les transformations usuelles :

Il existe principalement deux transformations : **Clark** et **Concordia**. La transformation de Clark conserve l'amplitude des grandeurs mais non la puissance ni le couple (on doit multiplier par un coefficient 3/2), tandis que celle de Concordia, elle conserve la puissance mais pas l'amplitude [14].

Mathématiquement, le choix d'une matrice normée (Concordia) est souvent utilisé pour des raisons de symétrie. Dans la modélisation et son application Le produit matriciel définissant la transformée de Park et de Concordia (permettant la conservation de la puissance) est le suivant [14] [25] :

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

Avec :

$$[P(\psi)] = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \text{ et } T_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad \text{III. 11}$$

Avec :

$\psi = \theta_s$ pour les grandeurs statoriques et $\psi = \theta_r$ pour les grandeurs rotoriques

Les variables réelles sont obtenues à partir des variables biphasées

La transformation de Park définie par la matrice de rotation $[P(\theta)]$ est donnée sous la forme suivante :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{III. 12}$$

La transformation de Park inverse, définie par la matrice de rotation $[P(\theta)]^{-1}$ est donnée sous la forme suivante :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{III. 13}$$

Pour revenir aux variables réelles à partir des variables biphasées :

$$\begin{bmatrix} Xa \\ Xb \\ Xc \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} \begin{bmatrix} Xd \\ Xq \\ Xo \end{bmatrix} \quad \text{III. 14}$$

En appliquant ces transformations aux tensions et aux flux statoriques et rotoriques, nous obtenons le modèle électrique biphasé d'une machine asynchrone (avec $w_s = \dot{\theta}_s$ et $w_r = \dot{\theta}_r$) En passant par la matrice de transformation de «Park», les grandeurs statoriques et rotoriques du repère triphasé seront transformées comme suit [14] [25] :

Pour les tensions :

$$\begin{cases} [V_{s,dq}] = [P(\theta_s)][V_{s,abc}] \\ [V_{r,dq}] = [P(\theta_r)][V_{r,abc}] \end{cases} \quad \text{III. 15}$$

Pour les courants :

$$\begin{cases} [\Phi_{s,dq}] = [P(\theta_s)][\Phi_{s,abc}] \\ [\Phi_{r,dq}] = [P(\theta_r)][\Phi_{r,abc}] \end{cases} \quad \text{III. 16}$$

Les relations liants les flux et les courants, sont données par :

$$\begin{cases} [\Phi_{ds}] = L_s \cdot I_{ds} + M \cdot I_{dr} \\ [\Phi_{qs}] = L_s \cdot I_{qs} + M \cdot I_{qr} \end{cases} \quad \text{III. 17}$$

$$\begin{cases} [\Phi_{dr}] = L_r \cdot I_{dr} + M \cdot I_{ds} \\ [\Phi_{qr}] = L_r \cdot I_{qr} + M \cdot I_{qs} \end{cases} \quad \text{III. 18}$$

Avec :

$L_s = l_s - M_s$: Inductance cyclique statorique ;

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

$M = \frac{3}{2} M_{sr} = \frac{3}{2} M_{rs}$: Mutuelle cyclique entre le stator et le rotor.

On obtient alors les équations des tensions statoriques et rotoriques :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \Phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} - \omega_s \Phi_{sd} \end{cases} \quad \text{III. 19}$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - \omega_r \Phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} - \omega_r \Phi_{rd} \end{cases} \quad \text{III. 20}$$

Où :

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} \quad \text{et} \quad \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$$

Avec :

V_{sd} et V_{sq} : Tensions statoriques dans le repère de Park.

V_{rd} et V_{rq} : Tensions rotoriques dans le repère de Park.

I_{sd} et I_{sq} : Courants statoriques dans le repère de Park.

I_{rd} et I_{rq} : Courants rotoriques dans le repère de Park.

Φ_{sd} et Φ_{sq} : Flux statoriques dans le repère de Park.

Φ_{rd} et Φ_{rq} : Flux rotoriques dans le repère de Park.

R_s et R_r : Résistances respectives des bobinages statorique et rotorique.

θ_s et θ_r : Angles de Park respectifs des grandeurs statoriques et rotoriques.

Les flux statoriques et rotoriques, s'expriment par :

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \Phi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} \end{cases} \quad \text{III. 21}$$

$$\begin{cases} \Phi_{rd} = L_s I_{rd} + M I_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_s I_{rq} + M I_{sd} \end{cases} \quad \text{III. 22}$$

Avec :

$$L_s = L_{fs} + L_m \quad \text{III. 23}$$

$$L_r = L_{fr} + m^2 L_m \quad \text{III. 24}$$

Où :

L_s : l'inductance cyclique statorique,

L_r : l'inductance cyclique rotorique,

L_m : l'inductance magnétisante,

L_{fs} : l'inductance de fuite statorique,

L_{fr} : l'inductance de fuite rotorique.

Les relations des puissances active et réactives sont exprimées par :

Pour le stator

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} \cdot I_{sd} + V_{sq} \cdot I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} \cdot I_{sd} + V_{sd} \cdot I_{sq} \end{cases} \quad \text{III. 25}$$

Pour le rotor :

$$\begin{cases} P_r = V_{rd} \cdot I_{rd} + V_{rq} \cdot I_{rq} \\ Q_r = V_{rq} \cdot I_{rd} + V_{rd} \cdot I_{rq} \end{cases} \quad \text{III. 26}$$

Le couple électromagnétique C_{em} est alors exprimé par :

- A partir des équations des courants et des flux statorique :

$$C_{em} = p \cdot (\Phi_{sd} \cdot I_{sq} - \Phi_{sq} \cdot I_{sd}) \quad \text{III. 27}$$

- A partir des équations des courants et des flux rotorique :

$$C_{em} = p \cdot \frac{M \cdot L_m}{L_s} (\Phi_{sq} \cdot I_{rd} - \Phi_{sd} \cdot I_{rq}) \quad \text{III. 28}$$

Enfinement et pour compléter le modèle, la relation fondamentale de la dynamique pour les corps en rotation, tenant compte de l'influence des différents couples exercés sur l'arbre du rotor est donnée par :

$$C_{em} = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} + B \cdot \Omega + C_r \quad \text{III. 29}$$

3.1.7.3.3 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 [14].

Il existe trois référentiels importants qui sont :

- *Lier au stator ;*
- *Lier au rotor ;*
- *Lier au champ tournant.*

3.1.7.3.3.1 Référentiel lié au stator

En choisissant un référentiel $d-q$ lié au champ tournant statorique et en alignant le vecteur flux statorique avec l'axe d , le flux Φ_{sd} est maintenu constant (ce qui est assuré par la présence d'un réseau stable connecté au stator), le choix de ce repère rend le couple électromagnétique de la génératrice constant et par conséquent la puissance active uniquement dépendante du courant rotorique d'axe q .

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -\omega \quad \text{III. 30}$$

Les équations de tensions deviennent :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \Phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \Phi_{rd} \end{cases} \quad \text{III. 31}$$

3.1.7.3.3.2 Référentiel lié au rotor

Si on choisit un référentiel lié au rotor on a :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta}{dt} = \omega \quad \text{III. 32}$$

Les équations de tensions deviennent :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \Phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt} \Phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt} \Phi_{sd} \end{cases} \quad \text{III. 33}$$

3.1.7.3.3.3 Référentiel lié au champ tournant

Dans ce référentiel on a : $\omega = \omega_s - \omega_r$ alors :

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \quad \text{III. 34}$$

Les équations de tensions sont données alors par :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \Phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_s \Phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \Phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \Phi_{rd} \end{cases} \quad \text{III. 35}$$

Dans notre cas d'étude on va choisir un référentiel lié au champ tournant, ce qui permet d'avoir les grandeurs constants dans le régime permanent, cela va nous aider à faire la régulation très facilement.

3.1.7.3.4 Modélisation de l'alimentation de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation peut être branchée soit directement au réseau ou par l'intermédiaire des variateurs des vitesses.

L'évolution de l'électronique de puissance et en particulier, les convertisseurs statiques, a permis, une gestion et un contrôle efficaces et faciles des signaux de commande. Parmi les techniques de commande utilisées, on note la technique MLI (Modulation de largeur d'impulsion). Le principe de cette technique est d'imposer à la machine des ondes de tensions à amplitudes et fréquences variables à partir du réseau standard 220/380V, 50Hz.

La structure d'un convertisseur statique qui alimente une MADA, est constituée essentiellement, d'un pont redresseur (AC/DC), servant à redresser la tension, ensuite la tension de l'étage continu sera filtrée par des composants passifs C ou LC, pour être finalement appliquée à l'onduleur.

L'ensemble redresseur, filtre et onduleur de tension sont représentés sur la *figure III.7*

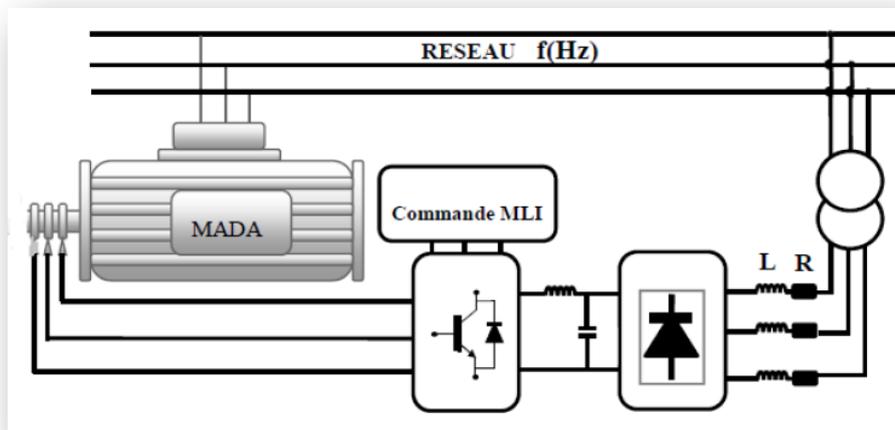


Figure III. 7 : L'ensemble convertisseur machine [47]

3.1.7.3.5 Modélisation du redresseur

Le redresseur est un convertisseur statique capable de transformer l'énergie d'une source alternative en une source continue. Il existe plusieurs montages, et le choix se fait selon les performances désirées [47].

Dans notre cas d'étude, on s'intéresse seulement au redresseur triphasé à double alternance non commandé dont les composants sont des diodes, figuré (III.8). L'alimentation du redresseur se fait par le réseau électrique triphasé ou le système de tension est équilibré [47].

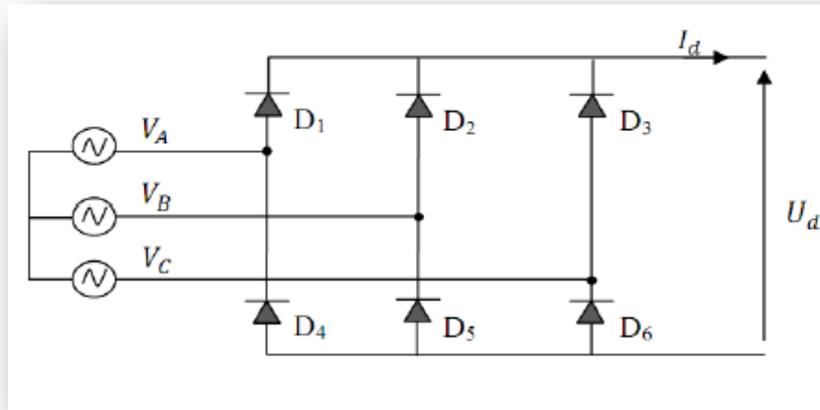


Figure III. 8 : Représentation du redresseur triphasé à diodes [47]

Si on suppose que le redresseur est alimenté par un réseau triphasé équilibré de tension donnée par [47] :

$$\begin{cases} V_A = V_m \sin(\omega t) \\ V_B = V_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_C = V_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad \text{III. 36}$$

On négligeant l'effet d'empîtement, la tension de sortie du redresseur sera définie alors comme suit [47] :

$$U_d(t) = \text{Max}[V_A(t), V_B(t), V_C(t)] - \text{Min}[V_A(t), V_B(t), V_C(t)] \quad \text{III. 37}$$

Sa valeur moyenne est donnée par [47] :

$$\overline{U_d} = \frac{\pi}{3} \int_0^{\frac{\pi}{3}} V_m \left[\sin(\omega t) - \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \right] d\omega t = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \quad \text{III. 38}$$

La tension obtenue à partir de ce redresseur présente des ondulations importantes. Pour diminuer ces ondulations, on utilise un filtre [47].

3.1.7.3.6 Modélisation du filtre

Afin d'éliminer les hautes fréquences, on utilise un filtre passe bas « LC » (Figure III.9), ce qui permet de réduire les ondulations de la tension et du courant redressé.

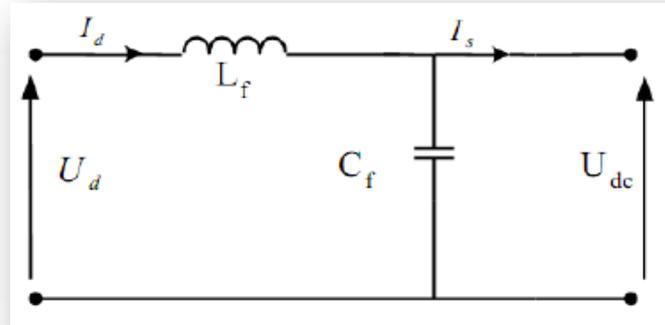


Figure III. 9 : Représentation d'un filtre passe-bas

Le modèle de ce filtre est donné par le système d'équations suivant [47] :

$$\begin{cases} U_d(t) = L_f \frac{dI_d}{dt} + U_{dc}(t) \\ \frac{dU_{dc}(t)}{dt} = \frac{1}{C_f} (I_d(t) - I_s(t)) \end{cases} \quad \text{III. 39}$$

La fonction de transfert de ce filtre est donnée par [47] :

$$F(s) = \frac{U_{dc}(s)}{U_d(s)} = \frac{1}{1 + (\sqrt{L_f C_f} s)^2}$$

C'est un filtre de deuxième ordre avec une fréquence de coupure égale à :

$$f_c = \frac{1}{1 + \sqrt{L_f C_f}}$$

3.1.7.3.7 Modélisation de l'onduleur de tension

Un onduleur de tension est un convertisseur statique assurant la conversion continu-alternatif de la tension. La tension de sortie d'un onduleur a une forme d'onde périodique mais elle n'est pas sinusoïdale et elle peut être très proche de la forme d'onde souhaitée avec une fréquence désirée. Cet onduleur est constitué de cellules de commutation généralement à transistors ou à thyristors GTO pour les grandes puissances. Il permet d'imposer à la machine des ondes à amplitudes et fréquences variables à partir d'un réseau standard 220/380 V-50 Hz [47].

Dans notre cas d'étude, nous considérons un onduleur triphasé idéal à deux niveaux de tension, à Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI), modélisé par des interrupteurs parfaits à commutation instantanée. Le point milieu de la source de tension est fictif (Figure III.10).

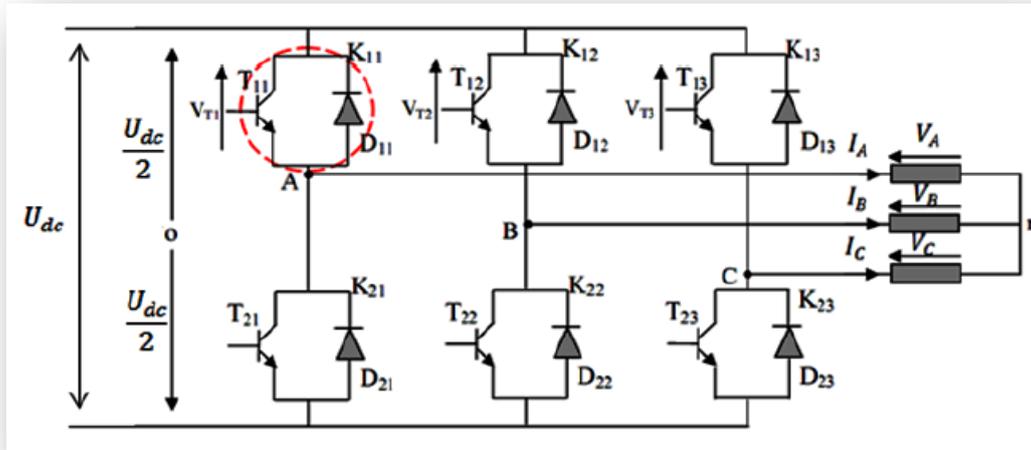


Figure III. 10 : Onduleur de tension triphasé à deux niveaux [47].

3.1.7.3.7.1 Principe de fonctionnement

Le montage onduleur est constitué de six interrupteurs bidirectionnels, chaque interrupteur est constitué d'un transistor (T) et d'une diode (D) montés en tête-bêche Figure (III.10). Les couples d'interrupteurs (K11, K21), (K12, K22), (K13, K23) sont commandés d'une manière complémentaire, pour assurer la continuité des courants dans la charge d'une part, et d'éviter le court-circuit de la source d'autre part [47]. Pour se prémunir d'un court-circuit intempestif, il est nécessaire de laisser un petit intervalle de temps entre la commande à la fermeture de T21 (ou T22 ou T23) et la commande à l'ouverture de T11 (ou T12 ou T13) et inversement. Le rôle des six diodes à roue libre est d'assurer la protection des thyristors.

L'état des interrupteurs, supposés parfaits peuvent être défini par trois grandeurs booléennes de commande ($j=1,2,3$)[47].

$S_j = 1$ le cas où l'interrupteur de haut est fermé et celui d'en bas ouvert.

$S_j = 0$ le cas où l'interrupteur de haut est ouvert et celui d'en bas fermé.

Pour simplifier l'étude nous supposerons que [35] :

- La commutation des interrupteurs est instantanée.
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable c'est-à-dire l'interrupteur supposé idéalisé.
- La charge est équilibrée couplée en étoile avec neutre isolé.

Les trois tensions composées : u_{AB}, u_{BC}, u_{CA} sont définies par les relations suivantes [47] :

$$\begin{cases} u_{AB} = u_{AO} - u_{BO} \\ u_{BC} = u_{BO} - u_{CO} \\ u_{CA} = u_{CO} - u_{AO} \end{cases} \quad \text{III. 40}$$

Au niveau de la charge, les relations donnant les tensions simples sont

$$\begin{cases} u_{AB} = u_A - u_B \\ u_{BC} = u_B - u_C \\ u_{CA} = u_C - u_A \end{cases} \quad \text{III. 41}$$

Si on fait la différence III.38-III.39 on obtient :

$$\begin{cases} u_{AB} - u_{CA} = 2 \cdot u_A - (u_B + u_C) \\ u_{BC} - u_{AB} = 2 \cdot u_B - (u_A + u_C) \\ u_{CA} - u_{BC} = 2 \cdot u_C - (u_A + u_B) \end{cases} \quad \text{III. 42}$$

Sachant que les tensions u_A, u_B, u_C forment un système triphasé équilibré ($u_A + u_B + u_C = 0$), alors on obtient :

$$\begin{cases} u_{AB} - u_{CA} = 3 \cdot u_A \\ u_{BC} - u_{AB} = 3 \cdot u_B \\ u_{CA} - u_{BC} = 3 \cdot u_C \end{cases} \quad \text{III. 43}$$

De cela les nouvelles expressions des tensions simples sont données par :

$$\begin{cases} u_A = \frac{1}{3} \cdot (u_{AB} - u_{CA}) \\ u_B = \frac{1}{3} \cdot (u_{BC} - u_{AB}) \\ u_C = \frac{1}{3} \cdot (u_{CA} - u_{BC}) \end{cases} \quad \text{III. 44}$$

Les tensions simples en fonction des tensions mesurées entre les points A, B, C et le point milieu fictif O sont alors donnée par :

$$\begin{cases} u_A = \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot u_{AO} - u_{BO} - u_{CO}) \\ u_B = \frac{1}{3} \cdot (-u_{AO} + 2 \cdot u_{BO} - u_{CO}) \\ u_C = \frac{1}{3} \cdot (-u_{AO} - u_{BO} + 2 \cdot u_{CO}) \end{cases} \quad \text{III. 45}$$

Sous la forme matricielle les tensions sont données par :

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{AO} \\ u_{BO} \\ u_{CO} \end{bmatrix} \quad \text{III. 46}$$

Chaque bras de l'onduleur est constitué de deux interrupteurs supposés parfaits et fonctionnant de façon complémentaire, on peut par conséquent associer à chacun d'eux une valeur binaire de commande S_i , avec ($i = A, B, C$) et telle que :

$S_i = +1$: si l'interrupteur du haut est fermé et l'interrupteur du bas ouvert ;
 $S_i = -1$: si l'interrupteur du haut est ouvert et l'interrupteur du bas fermé.

Alors on peut écrire :

$$\begin{bmatrix} u_{AO} \\ u_{BO} \\ u_{CO} \end{bmatrix} = \frac{U_{CC}}{2} \cdot \begin{bmatrix} S_A \\ S_B \\ S_C \end{bmatrix} \quad \text{III. 47}$$

Finalement le convertisseur est modélisé par la matrice de connexion suivante :

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \frac{U_{cc}}{2} \cdot \begin{bmatrix} S_A \\ S_B \\ S_C \end{bmatrix} \quad \text{III. 48}$$

Le système (III.46) représente le modèle mathématique de l'onduleur triphasé à MLI.

Les tensions simples délivrées données par l'onduleur seront obtenues directement à partir des états des grandeurs de commande SA, SB et SC qui représentent les signaux de commande des interrupteurs. Les états de ces grandeurs seront aussi déterminés par la stratégie de commande envisagée.

Le modèle mathématique obtenu reste valide pour les deux modes de fonctionnement soit en onduleur où en redresseur. Le tableau ci-dessous montre les expressions qui prennent les tensions simples et les tensions composées, en fonction de l'état ouvert ou fermé des interrupteurs k1, k2, k3 (les états de k4, k5, k6 sont respectivement complémentaires de ceux de k1, k2, k3).

K ₁	K ₂	K ₃	V _{ao}	V _{bo}	V _{co}	V _A	V _B	V _C	V _{AB}	V _{BC}	V _{CA}
F	F	F	E/2	E/2	E/2	0	0	0	0	0	0
F	O	F	E/2	-E/2	E/2	E/3	-2E/3	E/3	E	E	0
F	F	O	E/2	E/2	-E/2	E/3	-E/3	-2E/3	0	E	-E
F	O	O	E/2	-E/2	-E/2	2E/3	-E/3	-E/3	E	0	-E
O	F	F	-E/2	E/2	E/2	-2E/3	E/3	E/3	-E	0	E
O	O	F	-E/2	-E/2	E/2	-E/3	-E/3	2E/3	0	-E	E
O	F	O	-E/2	E/2	-E/2	-E/3	2E/3	-E/3	-E	E	0
O	O	O	-E/2	-E/2	-E/2	0	0	0	0	0	0

Tableau III. 1 : Calcul des vecteurs tensions [47].

3.1.7.3.7.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Dans notre cas d'étude, nous sommes intéressés à la technique d'origine analogique dite sinus-triangle.

Cette modulation est appelée également modulation de largeur d'impulsion intersectée puisque son principe repose sur l'intersection d'une onde modulante basse fréquence, dite tension de référence, généralement sinusoïdale avec une onde porteuse haute fréquence de forme généralement triangulaire d'où l'appellation triangulo-sinusoïdale.

Le résultat de la comparaison de ces deux signaux sert à commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance [47].

Le schéma de principe est donné par la figure III.14

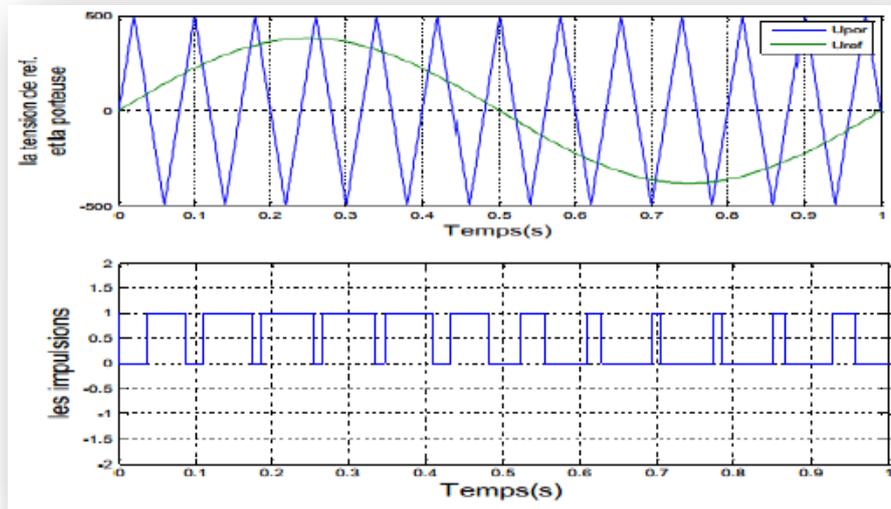


Figure III. 11 : principe de la commande MLI- sinus-triangle [8]

3.1.7.3.7.3 Equation de la référence :

La référence est un signal sinusoïdal d'amplitude V_r et de fréquence f_r . En triphasé, les trois tensions sinusoïdales de référence sont données par [47] :

$$\begin{cases} v_{rA}(t) = V_r \sin(2\pi f_r t) \\ v_{rB}(t) = V_r \sin(2\pi f_r t - \frac{2\pi}{3}) \\ v_{rC}(t) = V_r \sin(2\pi f_r t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases}$$

La fonction logique S_j associée au signal de commande est définie par :

$$S_{123} = \begin{cases} 1 & \text{si } (v_{rABC} - x(t)) \geq 0 \\ 0 & \text{si } (v_{rABC} - x(t)) < 0 \end{cases}$$

3.2 Modélisation et stratégie de commande de la MADA

3.2.1 Description du système éolien

Suite aux forces exercées par le vent, la turbine et via un multiplicateur, entraîne la MADA. Leur stator est directement raccordé au réseau électrique, contrairement au rotor qui est raccordé à travers des convertisseurs statiques triphasés. Le raccordement de ces convertisseurs qui sont commandés en Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI), est nommé :

- CCM coté MADA
- CCR côtés Réseau

Le fonctionnement de la MADA peut être soit en mode hypo ou hyper-synchrone grâce à la bidirectionnalité des convertisseurs. Le fonctionnement en mode hyper-synchrone permet de transférer l'énergie électrique du stator et du rotor vers le réseau, ce qui donne un bon rendement de la turbine.

3.2.2 Commande vectorielle du système éolien

Pour la commande de la MADA à rotor bobiné alimentée à travers un onduleur de tension, nous utilisons la commande vectorielle. La commande vectorielle est l'une des méthodes de commande appliquée aux machines électriques. Elle nous permet d'établir un mode de fonctionnement découplé en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants. Elle nous permet d'assimiler le comportement d'une machine asynchrone à celui d'une machine à courant continu qui a l'avantage d'avoir un découplage naturel entre les flux et les courants. Pour cela, nous appliquons une commande par orientation du flux.

Les stratégies de commande de la MADA reposent sur deux approches différentes [15] :

- *Le contrôle du flux en boucle fermée, où la fréquence et la tension sont considérées variables (réseau instable).*
- *Le contrôle du flux en boucle ouverte lorsque la tension et la fréquence sont constantes (réseau stable).*

Nous choisissons un référentiel diphasé (d,q) lié au champ tournant. Le flux statorique ϕ_s est orienté suivant l'axe d.

3.2.2.1 Commande du convertisseur côté MADA

Le principe de fonctionnement de cette commande est illustré sur la *figure III.12*

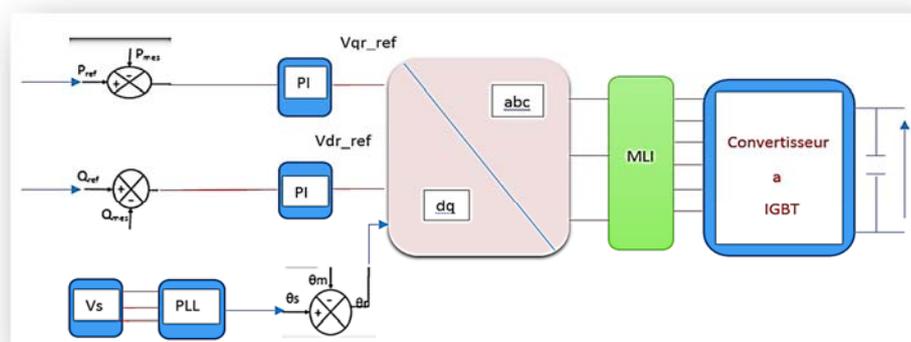


Figure III. 12 : Principe de la commande du CCM [24]

Supposons le réseau électrique stable, ayant pour tension simple V_s , ce qui donne un flux statorique constant, de l'équation (2.37), le couple électromagnétique C_{em} produit par la

machine et par conséquent la puissance active est uniquement dépendante du courant rotorique I_{qr} . De plus, pour les génératrices de moyenne et forte puissance utilisées dans les éoliennes, on peut négliger la résistance statorique.

Afin de contrôler le couple électromagnétique et la puissance réactive statorique, il suffit de contrôler les courants rotorique d'axes (d q) de la MADA.

3.2.2.1.1 Choix du référentiel pour le modèle de la MADA

Trois types de référentiels q sont utilisés :

- Référentiel fixé par rapport au stator : $\omega = \omega_s$.
- Référentiel fixé par rapport au rotor : $\omega = \omega_r$.
- Référentiel fixé par rapport au champ tournant : $\omega = 0$.

Avec ω la vitesse angulaire d'un système d'axe (d-q).

Dans notre cas d'étude, nous choisissons de fixer le repère d-q au champ tournant, ce qui permet d'avoir des grandeurs constantes dans le régime permanent, et donc une régulation plus aisée.

3.2.3 Commande vectorielle par orientation du flux statorique

Pour permettre le contrôle facile de la production d'électricité par une éolienne, nous allons réaliser un contrôle indépendant des puissances actives et réactives en établissant les équations qui lient les valeurs des tensions, générées par un onduleur, aux puissances actives et réactives statoriques. Cela nous conduit à choisir un référentiel lié au champ tournant ce qui donne un flux statorique orienté sur l'axe d comme le montre la *figure III.12*.

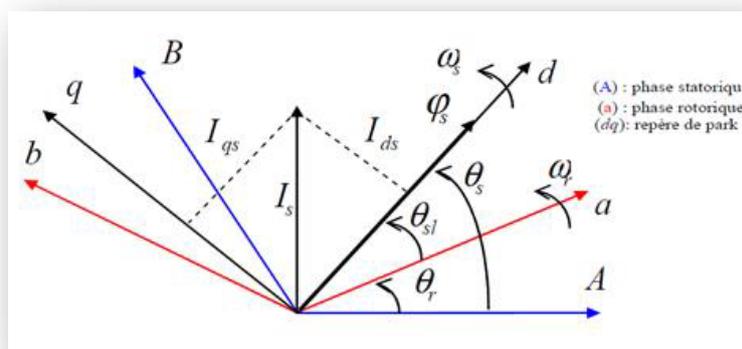


Figure III. 13 : Orientations de l'axe d sur le flux statorique [8]

On a alors :

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = \Phi_s \\ \Phi_{sq} = 0 \end{cases}$$

Remplaçons cette équation dans III.20 et III.21 on obtient [47]:

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = L_s I_{ds} + M I_{dr} = \Phi_s \\ \Phi_{sq} = L_s I_{qs} + M I_{qr} = 0 \end{cases} \quad \text{III. 50}$$

De cette équation les courants seront donnés par [47]:

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\Phi_{sd} - M I_{dr}}{L_s} \\ I_{qs} = \frac{-M I_{qr}}{L_s} \end{cases} \quad \text{III. 51}$$

Si on remplace cette équation dans III.26, le couple est donné alors par [47] :

$$C_{em} = \frac{-pM}{L_s} \Phi_s I_{qr} \quad \text{III. 52}$$

Dans le repère triphasé, la tension aux bornes d'une phase k ($k \in \{1, 2, 3\}$) du stator de la MADA s'exprime par :

$$v_{sk} = R_s \cdot I_{sk} + \frac{d\Phi_{sk}}{dt} \quad \text{III. 53}$$

Si on néglige la résistance du bobinage statorique R_s , ce qui constitue une hypothèse réaliste pour les génératrices de fortes puissances utilisées dans les systèmes éoliens, l'équation précédente devient :

$$v_{sk} \approx \frac{d\Phi_{sk}}{dt} \quad \text{III. 54}$$

De cette équation, on remarque que la tension et le flux statorique tournent tous les deux à la même vitesse, avec une avance de $\pi/2$ radians de la tension sur le flux. Considérons le flux statorique constant, on peut donc écrire dans le repère (dq) lié au champ tournant statorique :

$$\begin{cases} v_{sd} = 0 \\ v_{sq} = \sqrt{3}V_s = U_s \end{cases} \quad \text{III. 55}$$

Remplaçons III.48 et III.53 dans III.24, on obtient [47] :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M I_{qr}}{L_s} \\ Q_s = \frac{V_s \Phi_s}{L_s} - s \frac{V_s M I_{dr}}{L_s} \end{cases} \quad \text{III. 56}$$

À partir de III.53, l'expression du flux est donnée par :

$$\Phi_{ds} = \frac{V_s}{\omega_s} \quad \text{III. 57}$$

Remplaçons cette expression dans l'équation de la puissance réactive, on obtient :

$$Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{V_s M I_{dr}}{L_s} \quad \text{III. 58}$$

L'expression des flux rotorique (III.21) peut être exprimée, en remplaçant les courants statorique, par :

$$\begin{cases} \Phi_{rd} = (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rd} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \Phi_{rq} = (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rq} \end{cases} \quad \text{III. 59}$$

Si on remplace cette expression dans les équations des tensions rotorique d'axes d-q, alors on obtient :

$$\begin{cases} v_{rd} = R_r I_{rd} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{rd}}{dt} - g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rq} \\ v_{rq} = R_r I_{rq} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{rq}}{dt} + g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rd} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad \text{III. 60}$$

Où g correspond au glissement de la machine asynchrone.

A partir de tous ces équations que nous venons de mettre en place, on établit les relations entre les tensions appliquées au rotor de la machine et les puissances statorique que cela engendre. Il est donc possible maintenant de reproduire le schéma bloc de la machine asynchrone à double alimentation figure III.13 qui sera le bloc à réguler par la suite.

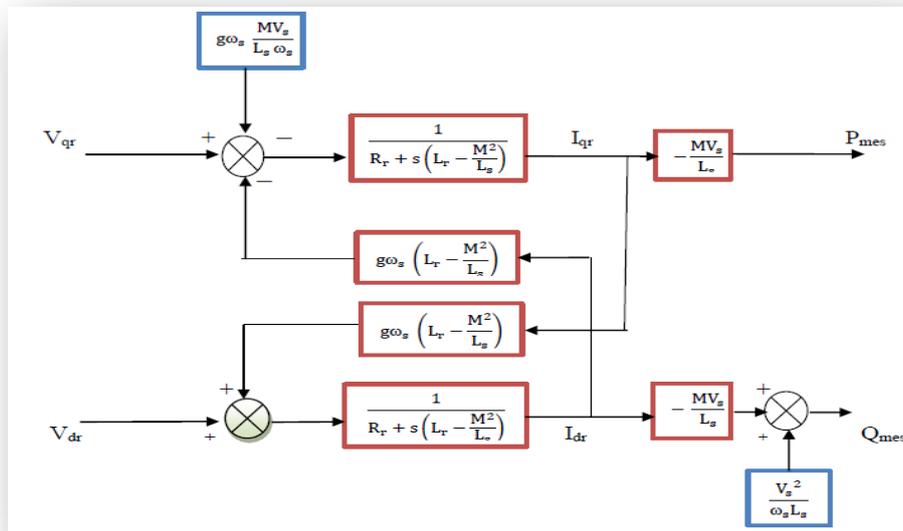


Figure III. 14 : Schéma bloc de la MADA [8]

Pour ce schéma bloc, nous considérons les tensions rotorique V_{rd} , V_{rq} comme variables de commande et les courants rotorique I_{rd} , I_{rq} comme variables d'état intermédiaires.

Il existe deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette machine :

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

Dans notre cas d'étude on s'intéresse seulement à la **méthode directe**

3.2.3.1 Commande directe en puissance active et réactive de la MADA

Dans cette méthode, le principe de la régulation consiste à commander indépendamment et directement les puissances P et Q de la MADA.

3.2.3.1.1 Schéma bloc en boucle ouverte

En posant les f_{em} suivantes [47]:

$$\begin{cases} f_{em,d} = -g\omega_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})I_{rq} \\ f_{em,q} = g\omega_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})I_{rd} + g\frac{MV_s}{L_s} \end{cases} \quad III. 61$$

Nous obtenons alors :

$$\begin{cases} v_{rd} = R_r I_{rd} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{rd}}{dt} + f_{em,d} \\ v_{rq} = R_r I_{rq} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{rq}}{dt} + f_{em,q} \end{cases} \quad III. 62$$

Utilisons la transformé de Laplace on obtient :

$$\begin{cases} (R_r + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \cdot S) I_{rd} = v_{rd} - f_{em,d} \\ (R_r + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \cdot S) I_{rq} = v_{rq} - f_{em,q} \end{cases} \quad III. 63$$

Où :

$$\begin{cases} I_{rd} = \frac{1}{(R_r + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \cdot S)} \cdot (v_{rd} - f_{em,d}) \\ I_{rq} = \frac{1}{(R_r + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \cdot S)} \cdot (v_{rq} - f_{em,q}) \end{cases} \quad III. 64$$

Si on remplace III.64 dans III.56 on obtient :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} \frac{1}{(R_r + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \cdot S)} \cdot (v_{rq} - f_{em,q}) \\ Q_s = -V_s \frac{M}{L_s} \cdot \frac{1}{(R_r + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \cdot S)} \cdot (v_{rd} - f_{em,d}) + \frac{V_s \Phi_s}{L_s} \end{cases} \quad III. 65$$

D'après l'expression III.63, pour le contrôle des puissances de la MADA il suffit alors de contrôler les deux puissances P_s et Q_s par les deux composantes V_{rd} et V_{rq} . Nous pouvons remarquer aussi qu'il y a un grand couplage entre les puissances statorique et les tensions rotorique selon la même expression.

A partir de cette expression nous pouvons établir le schéma bloc réduit de la MADA (Figure III.14) :

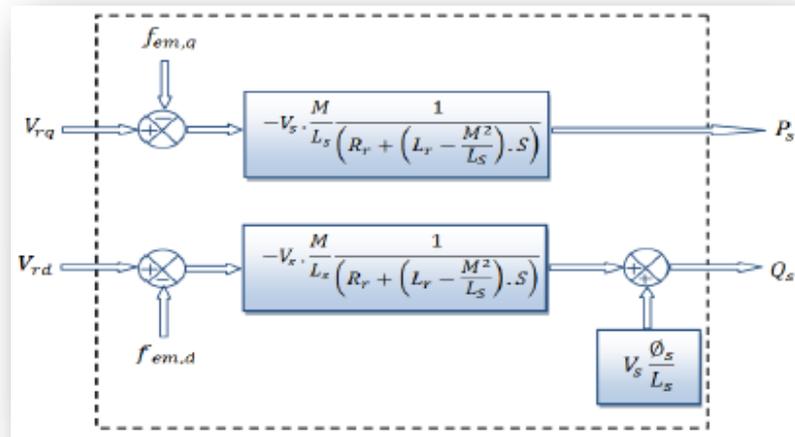


Figure III. 15 : Modèle réduit des puissances statorique de la MADA [47].

3.2.3.1.2 Schéma bloc de la régulation

Pour réguler les puissances statorique de la machine, un correcteur indépendant est mis en place une boucle de régulation pour chaque puissance, tout en compensant les termes de perturbation qui sont présents dans le schéma bloc de la figure III.14. Nous obtenons, ainsi, un découplage par compensation, qui permet de rendre les axes d et q complètement indépendants, comme le montre la figure III.15

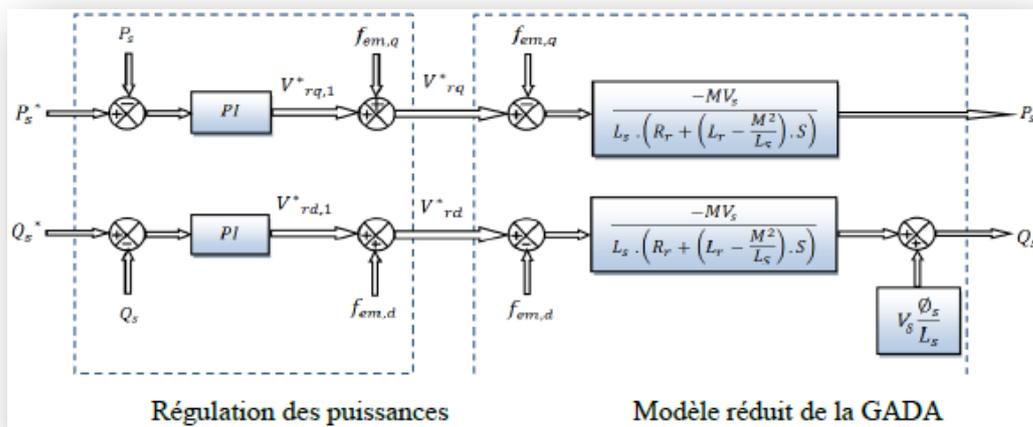


Figure III. 16 : Contrôle des puissances statorique de la GADA ou MADA [47].

3.2.3.1.2.1 Régulation avec un correcteur PI classique

La figure III.16 montre une partie du système bouclé et corrigé par un régulateur PI dont la fonction de transfert est de la forme $Kp + \frac{K_i}{s}$ correspondant aux deux régulateurs utilisés dans la figure III.15.

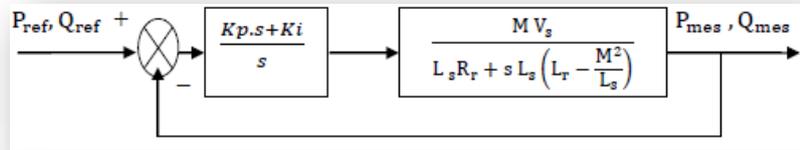


Figure III. 17 : Système régulé par un PI classique [47].

3.2.3.1.2.2 Synthèse du régulateur PI classique

La Fonction de Transfert en Boucle Ouverte (FTBO) avec les régulateurs s'écrit de la manière suivante :

$$FTBO = \frac{S + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{S}{K_p}} \frac{\frac{M V_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{S + \frac{L_s R_r}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}} \quad III. 66$$

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

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{L_s R_r}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})} \quad III. 67$$

Si l'on effectue la compensation des pôles, on obtient la FTBO suivante :

$$FTBO = \frac{K_p \frac{M V_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{S} \quad III. 68$$

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

$$FTBF = \frac{1}{1 + \tau_r \cdot S} \text{ Avec } \tau_r = \frac{1}{K_p} \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{M V_s} \quad III. 69$$

Avec τ_r le temps de réponse du système que l'on fixe à l'ordre de 200 ms [47], correspondant à une valeur suffisamment rapide pour l'utilisation faite sur l'éolienne où les variations de vent sont peu rapides et les constantes de temps mécanique sont importantes.

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

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

Le schéma bloc de la commande directe est donné sur la figure III.18 et III.19

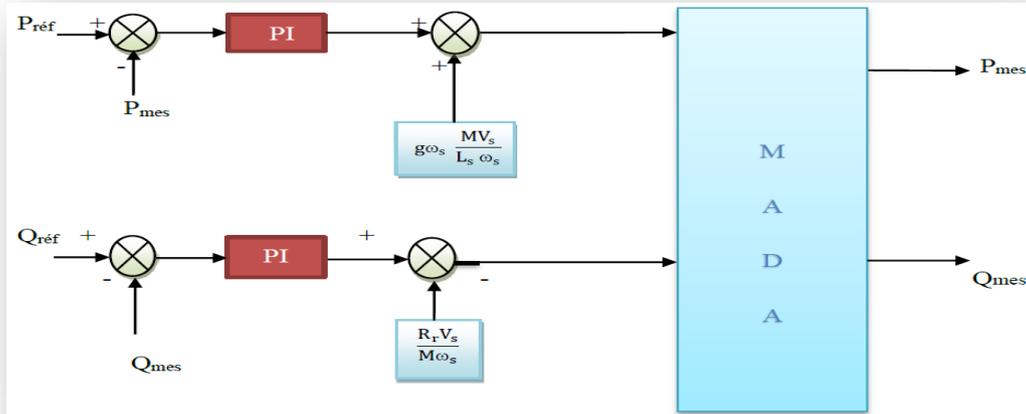


Figure III. 18 : Schéma bloc de la commande directe d'une MADA [47].

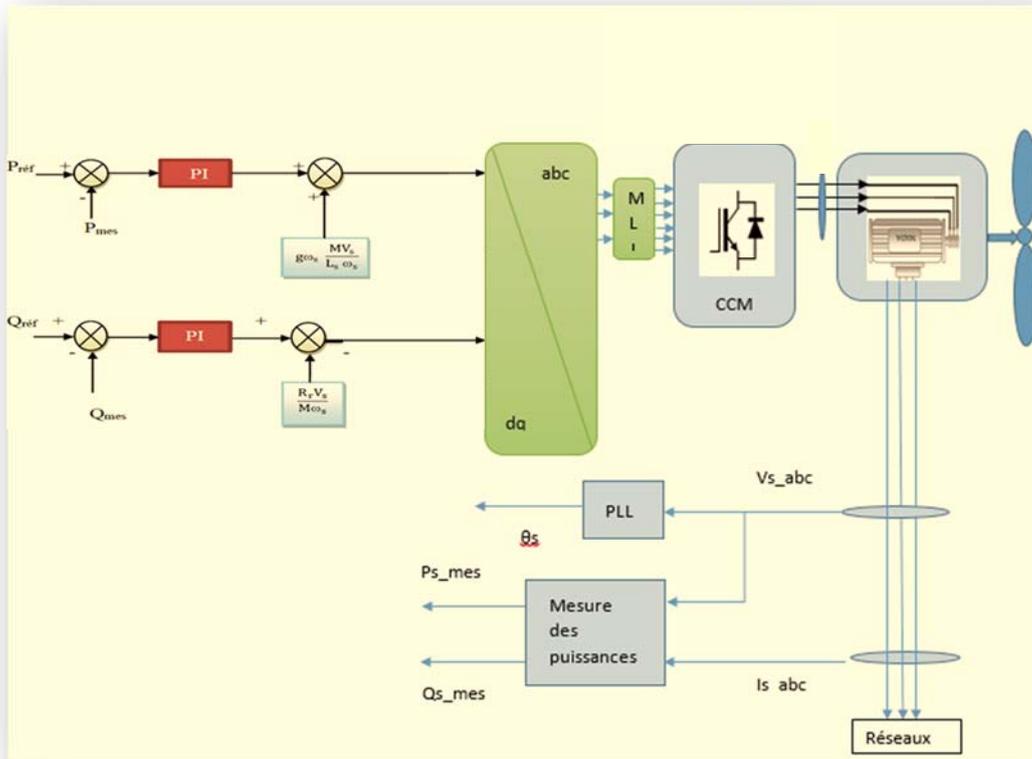


Figure III. 19 : Schéma bloc de la commande directe d'une éolienne à la base d'une MADA.

3.2.3.2 Commande du Convertisseur Côté Réseau « CCR » :

Le CCR est connecté entre le bus continu et le réseau électrique via un filtre RL. Ce convertisseur a deux rôles : le maintien de la tension constante DC indépendamment de l'amplitude et de la direction du flux d'énergie rotorique dans MADA. La Figure I.41 illustre le contrôle CCR.

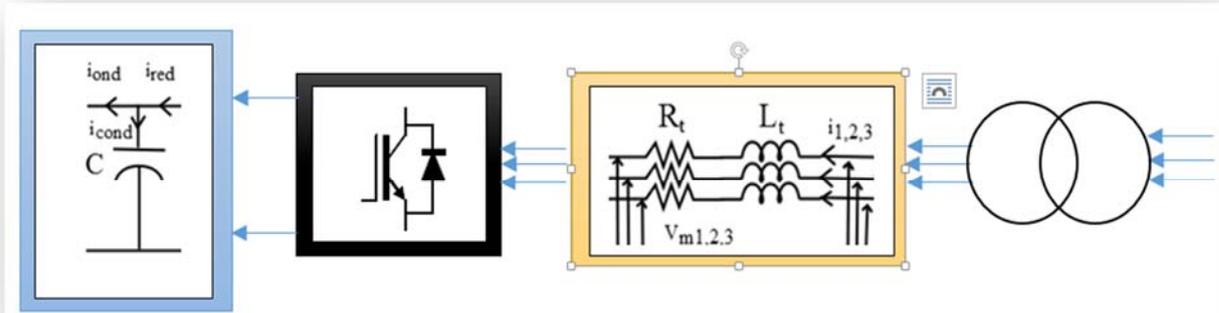


Figure III.20 : Connexion du CCR au réseau

Cette commande exécute les fonctions suivantes :

- Contrôle des courants circulant dans le filtre RL,

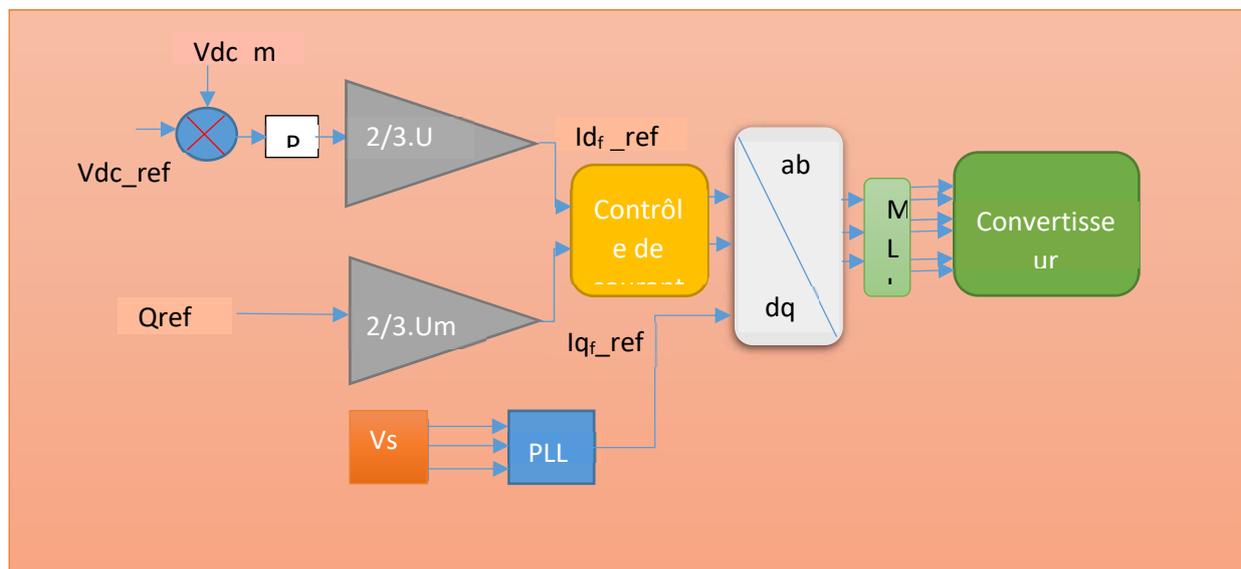


Figure III.21 : Commande de Convertisseur coté réseau

3.2.3.2.1 Contrôle de la tension du bus continu

Afin d'assurer le bon fonctionnement du système, la tension de connexion DC doit être constante quelle que soit la taille et la direction de la puissance du rotor. Les expressions de puissance actives

et réactives (le côté réseau) et le courant circulant à travers le filtre (côté grille) vérifie l'expression de la puissance active et réactive (côté alternatif) tel que : [7]

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q) \\ Q = \frac{3}{2} (v_q i_d - v_d i_q) \end{cases} \quad III.71$$

En alignant le vecteur tension de référence sur l'axe d :

$$\begin{cases} v_d = U \\ v_q = 0 \end{cases} \quad III.72$$

Avec :

U : Amplitude de la tension de phase du réseau.

Les équations I.103 deviennent alors:

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} v_d i_d \\ Q = -\frac{3}{2} v_d i_q \end{cases} \quad III.73$$

En remplaçant I.104 dans I.105 on obtient :

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} U i_d \\ Q = -\frac{3}{2} U i_q \end{cases} \quad III.74$$

À partir de l'équation I.106 on obtient l'expression des puissances (côté continu) suivante :

$$P_{dc} = P_1 - P_2 \quad III.75$$

$$P_1 = P_{dc} + P_2 \quad III.76$$

Avec :

$$P = v_{dc} \cdot i_{dc}$$

$$P_2 = v_{dc} \cdot i_2$$

III.77

$$P_1 = v_{dc} \cdot i_1$$

Le schéma de commande de la tension aux bornes du condensateur est donné par la Figure I.43.

[11]

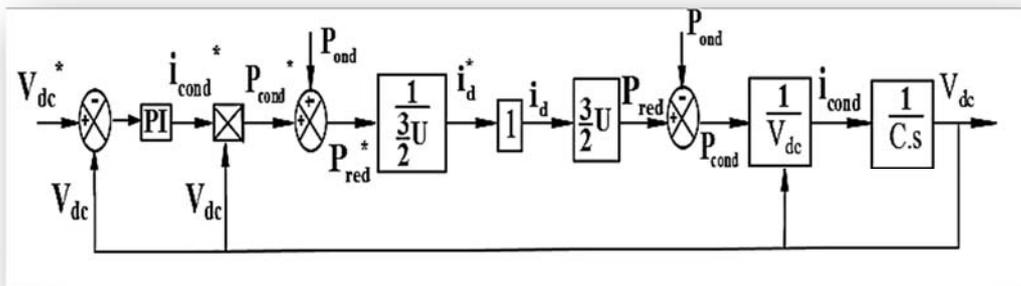


Figure III.22 : Schéma de commande de la tension aux bornes du condensateur

Ce diagramme représente la boucle de régulation de tension externe. En forçant la valeur de tension de référence, la valeur de courant actuelle telle que spécifiée dans la boucle de régulation interne du courant traversant le filtre est obtenue dans l'axe d-q en sortie. [7]

3.2.3.2.2 Commande des courants du filtre

Le filtre reliant le convertisseur de partie CCR au réseau est constitué d'une inductance « L » et résistance « R », comme indiqué sur la Figure. I.44.

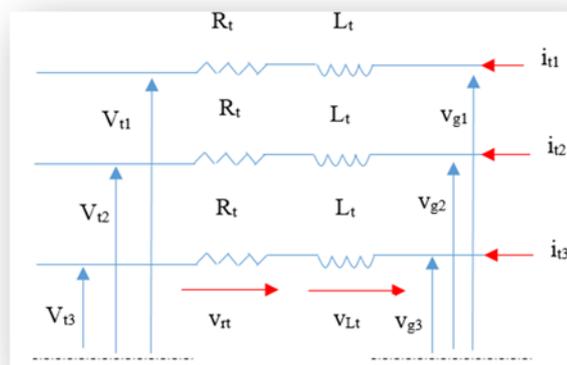


Figure III.23 : Filtre coté réseau

La fonction de transfert du filtre (L, R) est donnée par l'équation suivante :

$$F(s) = \frac{1}{R_t + L_t s}$$

III.78

En appliquant les lois de Kirchoff, nous obtenons :

$$[V_g] = R_t [i_t] + L_t \frac{d}{dt} [i_t] + [V_{mt}] \quad III.79$$

Avec: $k=1, 2, 3$. Dans le repère diphasé d-q, l'équation I.111 s'écrit :

$$V_{dt} = R_t i_d + L_t \frac{d}{dt} i_d - L_t \omega_s i_q + V_{md} \quad III.80$$

$$V_{qt} = R_t i_q + L_t \frac{d}{dt} i_q + L_t \omega_s i_d + V_{mq}$$

En supposant que:

$$V_{dt} = R_t i_d + L_t \frac{d}{dt} i_d \quad III.81$$

$$V_{qt} = R_t i_q + L_t \frac{d}{dt} i_q$$

A partir des deux équations précédentes, on obtient :

$$\begin{cases} V_{md} = V_{sd} + L_t \omega_s i_q - V_{td} \\ V_{mq} = V_{sq} - L_t \omega_s i_d - V_{tq} \end{cases} \quad III.82$$

3.2.3.3 Simulations et résultats des modèles en boucle fermée

Après avoir modélisé la MADA on va effectuer la simulation du modèle de la figure III.19 avec un régulateur (**PI classique**) coté CCM et CCR de notre MADA, on va simuler notre MADA avec une vitesse de 1660 tr/min de 0 et de 24s à 30s et 1450 tr/min de 12s à 24 s. Les résultats obtenus sont tel que :

Figure III. 24 : Vitesse mécanique

Figure III. 20 : Couple électromécanique

Figure III.26: Courant rotorique.

Figure III.27 : Courant statorique.

Figure III. 28 : Puissance active.

Figure III. 219 : Puissance réactive.

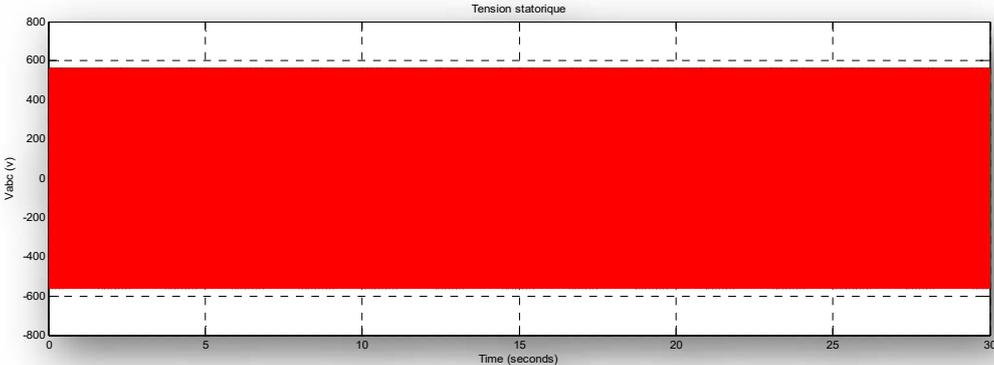


Figure III. 30 : Tension statorique

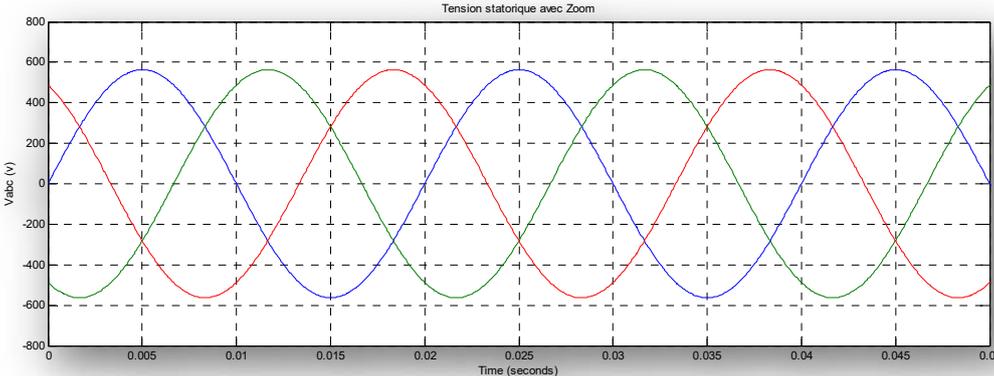


Figure III. 31 : Tension statorique avec zoom

Figure III. 3222 : Tension de bus continu.

(a)

(b)

Figure III. 33 : Courant rotorique avec Zoom. (a) : hyper vers hypo, (b) inversement

Figure III. 234 : Courant statorique avec Zoom.

(a)

(b)

Figure III. 24 : Puissance active et réactive avec zoom, (a) : active, (b) réactive :

3.2.3.4 Interprétation des résultats

Figure III.24 :

- De 0 à 12s et de 24 à 30s, la MADA fonctionne en hyper synchrone et de 12 à 24 s, la MADA fonctionne en hypo synchrone.

Figures III.26 et III.33 :

- On remarque que le courant rotorique augmente à $t=6s$ à cause de la variation de la puissance active et à $t= 10s$ à cause de la variation de la puissance réactive.
- La fréquence de la sinusoïde des courants change à $t=12s$ et à $t=24$ dû à la variation de la vitesse de la génératrice

Figure III.27 et III.34 :

- On remarque que le courant statorique augmente à $t=6s$ à cause de la variation de la puissance active et à $t= 10s$ à cause de la variation de la puissance réactive.

Figure III.28, III.29 et III.35 :

- Temps de réponse : 0.05 Pour la puissance active et 0.1 pour la puissance réactive
- Dépassement : 1% pour la puissance active et 0.5 pour la puissance réactive
- De 0 à 12s et de 24 à 30s, on remarque que l'allure de la puissance active suit la consigne avec présence des perturbations et de 12 à 24 s, elle suit aussi la consigne mais avec présence des petites perturbations (presque nulle). A $t= 6s$ on a ramené la vitesse de consigne de la puissance active à (-2MW), après un pique, on remarque que la puissance active suit la consigne. A $t= 10s$, on a ramené la vitesse de consigne de la puissance réactive à (-2MW), après un pique, on remarque que la puissance active suit la consigne
- De 0 à 12s et de 24 à 30s, on remarque que l'allure de la puissance réactive suit la consigne avec présence des perturbations et de 12 à 24 s, elle suit aussi la consigne mais avec présence des petites perturbations (presque nulle). A $t= 6s$ on a ramené la vitesse de consigne de la puissance active à (-2MW), après un pique on remarque que la puissance réactive suit la consigne. A $t= 10s$, on a ramené la vitesse de consigne de la puissance réactive à (-2MW), après un pique, on remarque que la puissance réactive suit la consigne

Figure III.32 :

- Pour l'allure de la tension du bus continu on remarque qu'après un régime transitoire de 0.13s il se stabilise et suit la consigne.
- La variation de la puissance active à $t=6s$ et réactive à $t=10s$ provoque la création des piques sur l'allure de la tension du bus continu.

3.3 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'étudier, modéliser et simuler notre système générateur, en utilisant un PI classique pour la régulation et commande côté machine et côté réseau de notre MADA.

Suite aux résultats obtenus, nous avons remarqué que le PI classique donne des résultats satisfaisants pour la commande directe de la MADA.

Conclusion générale

Dans un premier temps, nous avons présenté un aperçu sur le développement des éoliennes et plus particulièrement le potentiel existant en Algérie.

Suite à quoi, nous avons effectué une comparaison de performances de quatre différents régulateur PI (classique, neurone, Hinfini et flou), appliqué à une turbine à vitesse variable pour extraire un maximum de puissance du vent. Après les série de simulation, il s'est avéré que l'emploi du régulateur à base de PI floue nous donne les résultats les plus performants.

En second lieu, notre intérêt s'est porter sur l'évaluation des performances du régulateur PI de la commande directe de notre MADA. Les résultats obtenus ont été très satisfaisants.

En perspective, il serait très intéressant d'évaluer les performances des régulateurs pour un aérogénérateur intégrant à la fois la turbine et la MADA pour un fonctionnement en hypo et hypersynchrone.

Annexe

1. Paramètres de simulation

•Partie mécanique :

L'inertie turbine $J_{tur} = 800 \text{ Kg.m}^2$;

L'inertie moteur $J_m = 127 \text{ Kg.m}^2$;

Nombre de pales = 3.

Rayon de la surface balayée par les pales : $R = 45\text{m}$.

Gain du multiplicateur : $G = 100$.

Densité de l'air à 15°C : $\rho = 1.225 \text{ kg. M}$

Le vent nominale $V_{vent} = 10.5 \text{ m/s}$

•Partie électrique :

Systeme	Paramètres	
MADA	$U_s = 690\text{V}$; $U_r = 2060$ $f = 50\text{H}$; $R_s = 2.65 \text{ m}\Omega$; $L_s = 0.0021 \text{ H}$; $M = 0.0023 \text{ H}$;	$P_n = 2\text{MW}$; $p = 2$; $R_r = 2.75 \text{ m}\Omega$; $L_r = 0.0021 \text{ H}$; $J = 133 \text{ Kg.m}^2$
Bus continu	$V_{dc} = 1200\text{V}$	$C_{bus} = 0.085 \text{ Farad}$
Réseau électrique	$U = 230\text{V}$;	$f = 50\text{Hz}$
La charge	$L_c = 1 \cdot 10^{-3} \text{ H}$	$R_c = 100 \Omega$

2. Conditions de simulation

t=6s	Variation de la puissance active
------	----------------------------------

t=10s	Variation de la puissance réactive
t=12	Passage de mode hyper-synchrone vers le mode hypo-synchrone
t=24s	Passage de mode hypo-synchrone vers le mode hyper-synchrone

Bibliographie

- [1]. J. Marc Noël M. Rapin. Energie éolienne. Dunod, 2010.
- [2]. A. MIRECKI, Étude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance, Thèse N°2213 (2005), Institut national polytechnique de Toulouse, France.
- [3]. 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 2010. Université Henri Poincaré, Nancy 1, France.
- [4]. KENDOULI FAIROUZ. CENTRALE EOLIENNE ET QUALITE DE L'ENERGIE ELECTRIQUE. Thèse de doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2012
- [5]. Haritza CAMBLONG. Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable. Thèse de doctorat. Ecole nationale supérieure d'arts et métier centre de Bordeaux
- [6]. ABDOULA YB MAMADIE SYLLA. MODÉLISATION D'UN ÉMULATEUR ÉOLIEN À BASE DE MACHINE ASYNCHRONE À DOUBLE ALIMENTATION. COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE. UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES. HIVER 2013
- [7]. Kamel AMMOUR. Ahmed MEKELLECHE. Commande de la vitesse d'une éolienne par l'approche multi-modèle. Thème présentée pour l'obtention du diplôme de Master, Université de Tlemcen, 22/10/2014.
- [8]. OSMANI Ilyes. MALTI Omar. Modélisation et commande indirect des puissances de la génératrice asynchrone à double alimentation dédié à un système éolien. Thème présentée pour l'obtention du diplôme de Master, Université de Tlemcen, 21 / 06 / 2017.
- [9]. BOUSMAHA Thawriyyaa et TAHIR Zineb. Etude et Simulation d'une ferme éolienne en vue d'une application hybride. Thème présentée pour l'obtention du diplôme de Master, Université de Tlemcen, 19/06/2016.
- [10]. Rabia MAMMAD. Etude et simulation de la robustesse d'une commande pour éolienne à base de MADA en présence des incertitudes des paramètres et/ou des perturbations présente dans le réseau électrique. Thème présentée pour l'obtention du diplôme de Master, Université de Tlemcen, 29 Juin 2017
- [11]. Frank Kreith and D. Yogi Goswami, Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy, Ltd, 2007.
- [12]. F. POITIERS, Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne : machine asynchrone à cage autonome, machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau, Thèse N° ED 0366-125 (2003), École Polytechnique de l'Université de Nantes, France.
- [13]. S. NOUHOU, Étude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne, Thèse (2007), École Nationale Polytechnique, Algérie
- [14]. Azzouz TAMAARAT. Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA. Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra, 08/12/2015
- [15]. Duc-Hoan TRAN. Conception Optimale Intégrée d'une chaîne éolienne « passive » : Analyse de robustesse, validation expérimentale. Université de Toulouse, 27 septembre 2010
- [16]. LOUCIF MOURAD. Synthèse de lois de commande non-linéaires pour le contrôle d'une machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système aérogénérateur. Thèse de doctorat 3ème Cycle, Université de Tlemcen, 12 / 05 / 2016, 06/12/2004
- [17]. S.EL AIMANI. Modélisation de déférentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension. Thèse de doctorat. Université des sciences et technologies de LILE
- [18]. ABDOULA YB MAMADIE SYLLA. MODÉLISATION D'UN ÉMULATEUR ÉOLIEN À BASE DE MACHINE ASYNCHRONE À DOUBLE ALIMENTATION
- [19]. N. Laverdure, « l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires ». Thèse de doctorat de l'Université Grenoble.
- [20]. L. Leclercq, « apport de stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes ».
- [21]. Kelkoul Bahia. Etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation. Magister, Université de Tlemcen, 29/06/2011
- [22]. M.D. Manjrekar, P.K. Sleimer, T.A. Lipo, "High bride multilevel power conversion system: A competitive solution for high power applications", IEEE Tran, on Industry Applications, volume 36, N° 3 May/June 2000, pp. 834 -841.
- [23]. L. HEMOUZAL, Mohamed MEDIOUNI, Mustapha KOURCHI. « Stratégies de commande d'une turbine éolienne en vue de l'extraction de sa puissance maximale ». Laboratoire de l'Energie et de l'Environnement, ENSA, Agadir.
- [24]. TRIA Fatma Zahra, Contribution à la commande d'un système éolien basé sur une MADA par différentes techniques Université d'El- oued 2012/2013

- [25]. Tapia A., Tapia G., Ostolaza J.X., and Sáenz J.R., "Modeling and Control of a Wind Turbine Driven Doubly Fed Induction Generator," IEEE Transaction on energy conversion, vol. 18, N°2, June 2003 pp 194-204
- [26]. FERKOUS Khaled ETUDE D'UNE CHAINE DE CONVERSION D'ENERGIE EOLIENNE, UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE, 27 /05 / 2009
- [27]. Bernard MULTON, Aérogénérateurs électriques, Master Recherche Equipe SETE Module C16.STS IST Paris-ENS Cachan 2007
- [28]. Pierre BOUCHER, le vent et ses caprices ([http://www. Le vent –Wind.com](http://www.LeVent-Wind.com))
- [29]. [http://portail.cder.dz/ spip.php article 5751](http://portail.cder.dz/spip.php/article/5751)
- [30]. Philippe LECONTE, Marc RAPIN, Edmond SZECHYEYI Eolienne, Technique d'ingénieur
- [31]. Bernard MULTON, Xavier ROBOAM, Brayima DAYKO, Christian NICHITA, Aérogénérateurs électriques, Technique d'ingénieur 10/11/2004
- [32]. N. KASBADJI MERZOUK et M. MERZOUK « Perspectives du pompage éolien en ALGERIE », Projet National de recherche, domicilié au CDER Alger 2008.
- [33]. Edouard Laroche, Commande robuste Master IRIV, Université de Strasbourg, 2011/2012
- [34]. N.A LEHTOMAKI, N.R. SANDELL, M. ATHANS, Robustness results in linear quadratic Gaussian based multi variable control design "IEEE Trans. On Automatic Control"
- [35]. R. Asgharian "Asymptomatic approach to performance weights selection in design of robust H_{∞} PSS using genetic algorithms"
- [36]. A. Mechernene M. Loucif, A. Boumediene. Maximum Power Point Tracking Based on Backstepping Control of Wind Turbine. Journal EEA Electrotehnica, Electronica, Automatica (= Electrical Engineering, Electronics, Automation), Vol. 62, no. 3, pp 103-110, July - September 2014.
- [37]. A. Mechernene M. Zerikat, S. Chekroun. Dynamical performances of sensorless vector control induction motor drive with a new adaptive neural network speed observer. Sciences and Techniques of Automatic Control, 2010.
- [38]. Michel WEINFELD, Réseaux de neurones, Technique d'ingénieur
- [39]. Y. Nakoula, «Apprentissage des modèles linguistiques flous par jeu de règles pondérées », thèse en vue de l'obtention du titre de Docteur de l'Université de Savoie, Spécialité Electronique, Electrotechnique, Automatique, 1997.
- [40]. K.S. Narendra, T.W. Parthasarathy, «Identification and Control for Dynamical Systems using Neural Networks», IEEE Transactions on Neural Networks. NN-1, 1, pp.4-27, 1990.
- [41]. PAGANI Clara, SADAoui Akim, CHABOT Simon, Introduction à la logique floue, Université de technique Compiègne, 2011
- [42]. François CHEVRIE, François GUÉLY, La logique floue, Collection technique Groupe Schneider, Cahier technique n° 191
- [43]. Revue "La Nature" n° 2823 décembre 1929 (Collection M. Rapin)
- [44]. RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21ST CENTURY. RAPPORT MONDIAL 2012 sur les énergies renouvelables
- [45]. RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21ST CENTURY RAPPORT SUR LE STATUT MONDIAL DES ENERGIES RENOUVLABLES 2016
- [46]. HAMOUICHE ABDELKRIM MALIOUI ABDELHAMID, Commande par mode glissant de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) utilisée dans une éolienne, Thème présentée pour l'obtention du diplôme de Master, Université de Tlemcen 11 /06/2017

Résumé

Notre étude nous a permis d'implémenter différentes stratégies de la commande artificiel (Commande par la logique flou et la commande neuronale plus une commande classique et la commande H infini) appliquées à la commande d'une Turbine à vitesse variable.

Après une présentation des différentes théories, des tests de performances des différents régulateurs ont été effectués à l'aide du logiciel Matworks SimPower Systems. Les résultats obtenus ont été très satisfaisant et conforme aux attentes, de sorte que les performances obtenue avec le régulateur PI Floue ont été les plus proche de la consigne imposée.

Mots Clés

Turbine, MADA, , réseau de neurone, logique floue, technique H infini, PI, MPPT.

Abstract:

Our study allowed us to implement different strategies of the artificial control (control by fuzzy logic and neural control plus a conventional control and infinite H control) applied to the control of a variable speed turbine.

After a presentation of the different theories, tests of the performances of the different regulators were carried out using the software Matworks SimPower Systems. The results obtained were very satisfactory and in line with the expectations, so that the performances obtained with the PI Floue were the closest to the set point imposed.

Key words:

Turbine, DFIG, Neuron Network, Fuzzy logic, infinite H technique, PI, MPPT.

ملخص

دراستنا سمحت لنا بتنفيذ استراتيجيات مختلفة للسيطرة الاصطناعية (السيطرة عن طريق المنطق الضبابي والسيطرة العصبية , أكثر المنظم الكلاسيكي و الأمر H اللانهائي) تطبق على نظام من التوربين دي سرعة متغيرة.

بعد عرض نظريات مختلفة ، اختبارات الأداء لمختلف المنظمين, قدمت باستخدام البرنامج Matworks SimPower Systems . النتائج التي تم الحصول عليها كانت مرضية للغاية ووفقاً للتوقعات ، بحيث الأداء الذي تم الحصول عليه مع PI المنطق الضبابي كانت الأقرب من التعليمات المفروضة.

مفاتيح الكلام

التوربينات، MADA, شبكة العصبونات ، المنطق الضبابي ، تقنية لانهائية H ، PI ، MPPT.