

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES
Faculté de Génie Electrique
Département d'Electrotechnique

Thèse présentée par :

ALLAM Mohamed

Pour l'obtention du diplôme de :

Doctorat en Sciences

Spécialité : Electrotechnique

Option : Convertisseurs électromécaniques

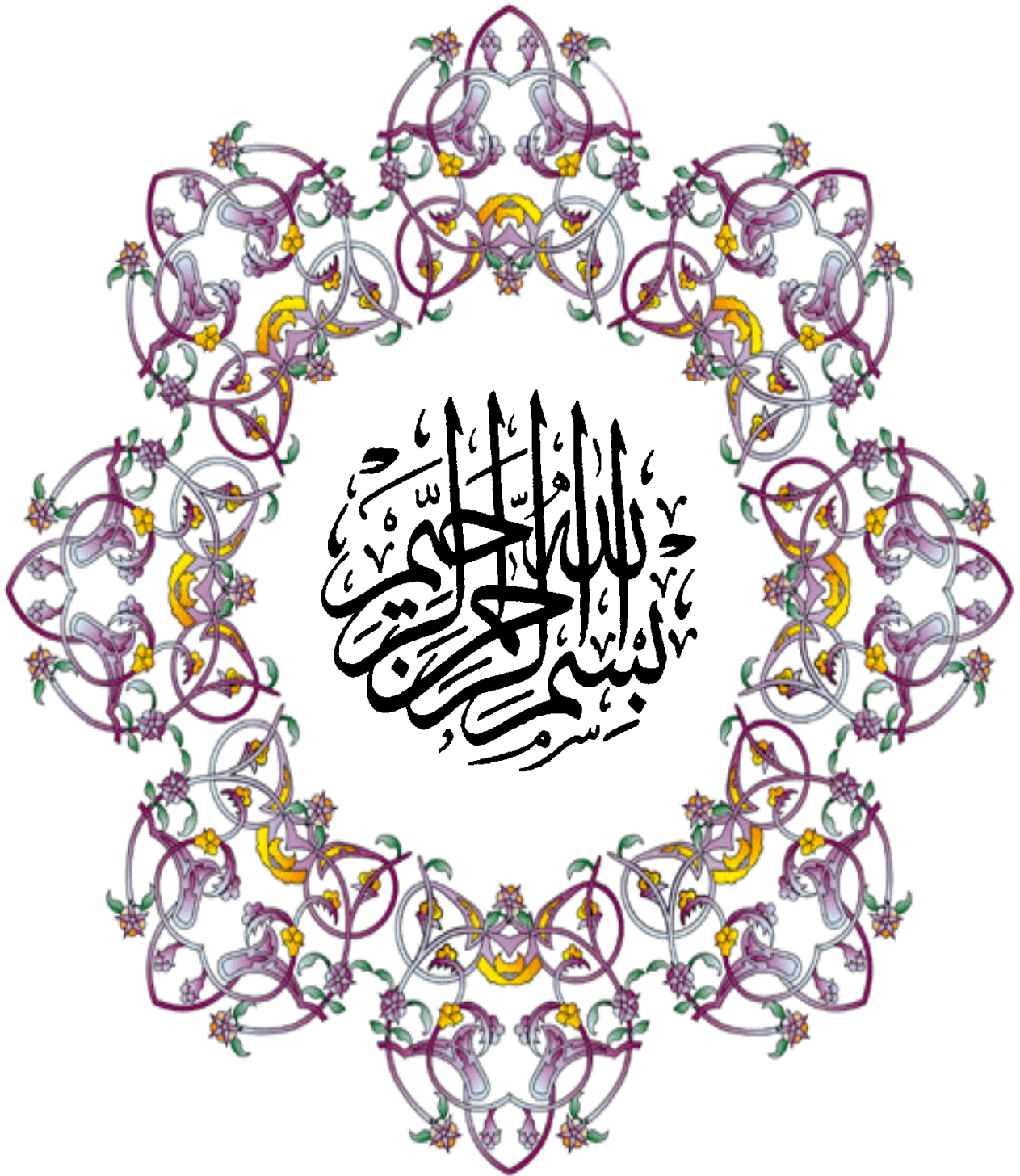
Intitulé de la thèse :

Contribution à la commande robuste du système d'énergie renouvelable

Présentée devant le jury composé de :

Mr MEROUFEL Abdelkader	Pr (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)	Président
Mr DEHIBA Boubaker	Pr (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)	Encadreur
Mr ABID Mohamed	Pr (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)	Co-Encadreur
Mr BENABDELLAH Mohamed Badreddine	MCA (U.S.T.O. MB. Oran)	Examineur
Mr MANSOURI Abdellah	Pr (U.S.T.O. MB. Oran)	Examineur
Mr TAHOUR Ahmed	Pr (U. Mascara)	Examineur

Soutenue le : 03/ 07 / 2017



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Avant-propos

Avant-propos

Tout d'abord, nous remercions le bon dieu tout puissant de nous avoir donné le courage et la volonté pour pouvoir réaliser ce modeste travail.

*Je suis particulièrement sensible à l'honneur que m'a fait Monsieur **B.DEHIBA**, Professeur à l'université djillali liabès de sidi bel abbès, d'accepte d'être encadreur de cette thèse et pour la confiance et l'intérêt qu'il m'a témoignés tout au long de la réalisation de ce travail.*

*Je tiens également à présenter mes vifs remerciements à Monsieur **M.ABID**, Professeur à l'Université djillali liabès de sidi bel abbès, mon Co-Encadreur.*

*Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à Monsieur **A. MEROUFEL**, Professeur de l'enseignement supérieur de l'université de sidi bel abbès, d'avoir accepté de présider et d'honorer de sa présence le jury de soutenance.*

Mes remerciements s'étendent également aux membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

Enfin, que tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à l'élaboration de ce travail, trouvent ici l'expression de notre vive reconnaissance.

MOHAMED ALLAM

*Liste des
publications &
communications*

Liste des publications & communications

Publications :

M. Allam, B. Dehiba, M. Abid, K. Mouilah, and Y. Djeriri , « A comparative study between field oriented control and sliding mode control for DFIG integrated in wind energy system», Journal of Electrical Engineering, JEE, Romania, ISSN 1582- 4594, Vol.15, No.3,pp.01-09, September 2015.

K. Mouilah, M. Abid, A.Naceri, **M.Allam**, « Fuzzy control of a doubly fed induction generator for wind turbines », Journal of Electrical Engineering, JEE, Romania, ISSN 1582-4594, Vol.14, No.4, pp.01-05, June 2014.

M. Allam, B. Dehiba, M. Abid, Y. Djeriri, et R.Adjoudj, « Étude comparative entre la commande vectorielle directe et indirecte de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) dédiée à une application éolienne », Journal of Advanced Research in Science and Technology, ISSN: 2352-9989, Vol.1, No.2, pp. 88-100, Juin 2014.

Y. Djeriri, A. Meroufel, **M. Allam**, « Artificial neural network-based robust tracking control for doubly fed induction generator used in wind energy conversion systems », Journal of Advanced Research in Science and Technology, JARST, Algeria, ISSN 2352-9989, Vol.2, No.1, pp.173-181, January 2015.

Communications :

M. Allam, B. Dehiba, M. Abid, R Adjoudj, and Y. Djeriri, « Commande par la logique floue de la machine asynchrone à double alimentation dédiée au système éolien », The First National Conference on Electronics and Technologies, M'Sila, Algeria, Mai 19-20,2015.

M. Allam, B. Dehiba, M. Abid, R Adjoudj, and A.Bentaallah, « Nonlinear control of a doubly fed induction machine for wind turbine »; 2nd International Conference on Automatic Control and Mechatronics, USTO, Oran, November 10-11, 2015.

Liste des figures & Tableaux

Liste des figures**Chapitre I**

Figure I.1	: Production mondiale d'électricité basée sur les énergies renouvelables.	04
Figure I.2	: Part des énergies fossiles et renouvelables dans la production d'électricité dans les pays arabes nord africains	05
Figure I.3	: Répartition des énergies renouvelables en Algérie 22000 MW à l'horizon de 2030.	06
Figure I.4	: Une cellule photovoltaïque en silicium(a), Photovoltaïque énergie (b).	08
Figure I.5	: Différents types de la biomasse énergie.	10
Figure I.6	: La géothermie énergie.	11
Figure I.7	: Moulin à eau.	12
Figure I.8	: Ancêtres des moulins à vent (Deutsches Museum).	13
Figure I.9	: Conversion de l'énergie cinétique du vent en électricité.	14
Figure I.10	: Capacité éolienne cumulée dans le monde entier.	15
Figure I.11	: 1 ^{ère} ferme éolienne en Algérie.	16
Figure I.12	: Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s).	17
Figure I.13	: Aérogénérateur à axe vertical (structure de Darrieus classique).	18
Figure I.14	: Aérogénérateur à axe vertical (structure de Darrieus de type H).	18
Figure I.15	: Aérogénérateur à axe vertical (structure de Savonius).	18
Figure I.16	: Aérogénérateur à axe horizontal.	19
Figure I.17	: Aérogénérateur à axe horizontal : sous le vent ou aval(a), au vent ou amont(b).	20
Figure I.18	: Différentes parties d'une éolienne Nordex N60 (1300 kW).	20
Figure I.19	: Tour tubulaire (a)et Tour en treillis(b).	21
Figure I.20	: Vu aérienne de la nacelle pendant l'assemblage d'une turbine.	22
Figure I.21	: Pale d'une turbine éolienne de 1.5 MW.	23
Figure I.22	: Composants électroniques dans le mât d'une éolienne.	23
Figure I.23	: Multiplicateurs de vitesse d'une turbine éolienne.	24
Figure I.24	: Les parcs éoliens offshore (a) et onshore (b).	25
Figure I.25	: Taille des hélices.	26
Figure I.26	: Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone.	27
Figure I.27	: Eolienne à vitesse fixe à base de la MAS à cage directement connectée au réseau électrique 3~.	28
Figure I.28	: Génération à puissance électrique variable (Pales fixes, décrochage aérodynamique).	29
Figure I.29	: Génération à puissance électrique constante (pales orientables).	30
Figure I.30	: Système pitch utilisant un actionneur hydraulique (a) et 3 moteurs électriques(b).	30
Figure I.31	: Eolienne à vitesse variable à base d'une machine asynchrone à cage.	31
Figure I.32	: Eolienne à vitesse variable à base d'une MADA.	32

Figure I.33 :	<i>Eolienne à vitesse variable à base d'une MS couplée à la turbine via un multiplicateur.</i>	32
Figure I.34 :	<i>Eolienne à vitesse variable à base d'une MS directement couplée à la turbine.</i>	32
Figure I.35 :	<i>Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent.</i>	33
Figure I.36 :	<i>Caractéristique puissance/vitesse du vent d'une éolienne.</i>	34
Figure I.37 :	<i>Tube de courant autour d'une éolienne.</i>	35
Figure I.38 :	<i>Coefficients de puissance et de couple en fonction de la vitesse normalisée λ pour différents types de turbines.</i>	37

Chapitre II

Figure II.1 :	<i>Système de conversion éolienne.</i>	42
Figure II.2 :	<i>Modèle mécanique de la turbine éolienne.</i>	45
Figure II.3 :	<i>Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne.</i>	46
Figure II.4 :	<i>Coefficient de puissance C_p en fonction de λ et β.</i>	47
Figure II.5 :	<i>Coefficient de couple C_c en fonction de λ et β.</i>	47
Figure II.6 :	<i>Puissance de la turbine en fonction de la vitesse de rotation.</i>	48
Figure II.7 :	<i>Couple de la turbine en fonction de la vitesse de rotation.</i>	48
Figure II.8 :	<i>Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation.</i>	51
Figure II.9 :	<i>Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation.</i>	52
Figure II.10:	<i>Profil du vent appliqué au système.</i>	52
Figure II.11:	<i>Réponse du système sans asservissement de vitesse mécanique.</i>	54
Figure II.12:	<i>Réponse du système avec asservissement de vitesse mécanique.</i>	56
Figure II.13:	<i>Structure de la MADA (stator et des contacts rotorique).</i>	57
Figure II.14:	<i>Modes de fonctionnement de la MADA.</i>	60
Figure II.15:	<i>MADA avec pont à diodes et pont à thyristors.</i>	62
Figure II.16:	<i>MADA avec cycloconvertisseur.</i>	63
Figure II.17:	<i>MADA avec convertisseurs MLI.</i>	64
Figure II 18:	<i>Schéma des enroulements de la MADA.</i>	66
Figure II.19:	<i>Référentiel tournant d'axes (d-q).</i>	70
Figure II.20:	<i>L'ensemble convertisseurs - MADA.</i>	76
Figure II.21:	<i>Onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC.</i>	77
Figure II.22:	<i>Principe de commande en MLI sinus-triangulaire.</i>	78
Figure II.23:	<i>Résultats obtenus de la MADA couplée à la turbine éolienne.</i>	80

Chapitre III

Figure III.1:	<i>Equivalence entre la commande d'une MCC et la commande vectorielle d'une MADA.</i>	81
----------------------	---	----

Figure III.2:	<i>Orientation de l'axe d sur le flux statorique.</i>	83
Figure III.3:	<i>Schéma bloc du système à réguler.</i>	84
Figure III.4:	<i>Schéma bloc de la commande directe.</i>	85
Figure III.5:	<i>Schéma bloc de la commande indirecte.</i>	85
Figure III.6:	<i>Système régulé par un PI.</i>	86
Figure III.7:	<i>Schéma bloc de l'ensemble du système étudié (CVD)</i>	88
Figure III.8:	<i>Schéma bloc de l'ensemble du système étudié (CVI)</i>	88
Figure III.9:	<i>Résultats obtenus de la CVD à vitesse fixe de la MADA.</i>	90
Figure III.10:	<i>Résultats obtenus de la CVI à vitesse fixe de la MADA.</i>	92
Figure III.11:	<i>Résultats obtenus de la CVD à vitesse variable de la MADA.</i>	94
Figure III.12:	<i>Résultats obtenus de la CVI à vitesse variable de la MADA.</i>	96
Figure III.13:	<i>Commande vectorielle de la MADA à facteur de puissance unitaire pour un fonctionnement de vitesse fixe.</i>	99
Figure III.14:	<i>Commande vectorielle de la MADA à facteur de puissance unitaire pour un fonctionnement de vitesse variable.</i>	102
Figure III.15:	<i>Influence des variations paramétriques sur la commande vectorielle directe et indirecte.</i>	103

Chapitre IV

Figure IV.1:	<i>Trajectoires de f^+ et de f^- pour le mode de glissement.</i>	106
Figure IV.2:	<i>Les modes de trajectoire dans le plan de phase.</i>	107
Figure IV.3:	<i>Valeur continu de la commande. u_{eq}.</i>	110
Figure IV.4:	<i>Définition de la fonction « sign ».</i>	111
Figure IV.5:	<i>Phénomène de chattering.</i>	112
Figure IV.6:	<i>Définition de la fonction « SAT ».</i>	113
Figure IV.7:	<i>Définition de la fonction « Smooth ».</i>	113
Figure IV.8:	<i>Schéma bloc de l'ensemble du système étudié (CMG).</i>	116
Figure IV.9:	<i>Résultats obtenus de la CMG à vitesse fixe de la MADA.</i>	118
Figure IV.10:	<i>Résultats obtenus de la CMG à vitesse variable de la MADA.</i>	120
Figure IV.11:	<i>Commande par mode glissant de la MADA à facteur de puissance unitaire.</i>	123
Figure IV.12:	<i>Influence des variations paramétriques sur la commande par mode glissant.</i>	125

Chapitre V

Figure V.1:	<i>Exemple de fonction d'appartenance :(a) Logique classique, (b) Logique Floue.</i>	128
Figure V.2:	<i>Fonctions d'appartenance.</i>	128
Figure V.3:	<i>Formes usuelles des fonctions d'appartenance.</i>	130
Figure V.4:	<i>Schéma général d'un contrôleur flou.</i>	132

Figure V.5:	<i>Schéma général d'un contrôleur glissant-flou (CMGF).</i>	137
Figure V.6:	<i>Fonctions d'appartenance de l'entrée de la fonction floue.</i>	138
Figure V.7:	<i>Fonctions d'appartenance de la sortie de la fonction floue.</i>	138
Figure V.8:	<i>Schéma bloc de l'ensemble du système étudié (CMGF).</i>	139
Figure V.9:	<i>Résultats obtenus de la CMGF à vitesse fixe de la MADA.</i>	141
Figure V.10:	<i>Résultats obtenus de la CMGF à vitesse variable de la MADA.</i>	142
Figure V.11:	<i>Commande par mode glissant floue de la MADA à facteur de puissance unitaire.</i>	146
Figure V.12:	<i>Influence des variations paramétriques sur la commande par mode glissant floue.</i>	147
Figure V.13:	<i>Comparaison de l'effet Chattering entre CMG et CMGF.</i>	148

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 :	<i>Le programme de développement des énergies renouvelables en Algérie.</i>	06
Tableau I.2 :	<i>Classification des turbines éoliennes.</i>	14
Tableau I.3 :	<i>Croissance des éoliennes depuis 1985.</i>	26

Chapitre III

Tableau III.1:	<i>Comparaison entre les temps de réponse de la commande vectorielle directe et indirecte.</i>	104
Tableau III.2:	<i>Comparaison entre les erreurs statiques de la commande vectorielle directe et indirecte.</i>	104

Chapitre V

Tableau V.1:	<i>Matrice d'inférence.</i>	134
---------------------	-----------------------------	-----

*Notation
&
Symboles*

<u>Symboles</u>	<u>Significations</u>	<u>Unités</u>
E_c	Energie cinétique.	$Kg.m.s^{-1}$
m	Masse d'air	Kg
S	Surface d'aire balayée par les pales	m^2
v	Vitesse du vent	m/s
ρ	masse volumique de l'air	Kg/m^3
P_v	Puissance de la masse d'air qui traverse la surface S	W
P_t	Puissance aérodynamique de la turbine	W
λ	Ratio de vitesse	-
R	Rayon de la turbine éolienne	m
Ω_t	Vitesse mécanique de rotation de l'aérogénérateur	rad/s
Ω_t^*	Vitesse de référence de la turbine	rad/s
β	Angle de calage des pâles	deg
C_p	Coefficient de puissance	-
C_c	Coefficient de couple	-
C_{p-max}	Coefficient de puissance maximal	-
P_{t-max}	Puissance aérodynamique maximale	W
$P_{t-optimale}$	Puissance aérodynamique optimale	W
η_a	Rendement aérodynamique de l'éolienne	%
G	Gain du multiplicateur	-
$\Omega_{méc}$	Vitesse mécanique de la génératrice	rad/s
$\Omega_{méc}^*$	Vitesse mécanique de la génératrice de référence	rad/s
C_t	Couple de la turbine avant le multiplicateur	$N.m$
$C_{t-optimale}$	Couple aérodynamique optimal	$N.m$
$C_{méc}$	Couple mécanique après le multiplicateur	$N.m$
C_{em}	Couple électromagnétique de la machine	$N.m$
C_f	Couple de frottement visqueux	$N.m$
J_g	Moment d'inertie de la génératrice	$Kg.m^2$
J_t	Moment d'inertie de la turbine	$Kg.m^2$
J_T	Moment d'inertie Total (génératrice + turbine)	$Kg.m^2$
f_r	Coefficient dû aux frottements visqueux de la génératrice	$N.m.s/rd$
λ_{opt}	Ratio de vitesse optimale	-
P_s	Puissance active statorique de	W
$P_{s-réf}$	Puissance active statorique de référence	W
Q_s	Puissance réactive statorique	W
$Q_{s-réf}$	Puissance réactive statorique de référence	W
g	Glissement de la MADA	-
f	Fréquence du réseau	Hz
f_s	Fréquence du stator	Hz
f_r	Fréquence du rotor	Hz
f_{sr}	Fréquence du glissement	Hz
f_p	Fréquence de la porteuse	Hz
$f_{réf}$	Fréquence de la modulation (référence)	Hz
I_m	Indice de modulation	-
T_m	Taux de modulation	-
ω_s	Pulsations statorique	rad/s

ω_r	<i>Pulsations statorique</i>	<i>rad/s</i>
ω_{sr}	<i>Pulsations statorique</i>	<i>rad/s</i>
N_r	<i>Nombre de spires des bobinages rotorique</i>	-
N_s	<i>Nombre de spires des bobinages statorique</i>	-
m	<i>Rapport de transformation rotor/stator</i>	-
p	<i>nombre de paires de pôles</i>	-
g	<i>Glissement de la machine</i>	-
E_r	<i>Valeur efficace des f.é.m. rotorique</i>	<i>V</i>
E_s	<i>Valeur efficace des f.é.m. statorique</i>	<i>V</i>
S_s	<i>Puissance apparente statorique</i>	<i>VA</i>
S_r	<i>Puissance apparente statorique</i>	<i>VA</i>
P_m	<i>Puissance mécanique</i>	<i>W</i>
θ	<i>Angle définit la position du rotor par rapport au stator</i>	<i>deg</i>
$V_{sa,b,c}$	<i>Tensions triphasés statorique</i>	<i>V</i>
$V_{ra,b,c}$	<i>Tensions triphasés rotorique</i>	<i>V</i>
$I_{sa,b,c}$	<i>Courants triphasés statorique</i>	<i>A</i>
$I_{ra,b,c}$	<i>Courants triphasés rotorique</i>	<i>A</i>
$\varphi_{sa,b,c}$	<i>Flux triphasés statorique</i>	<i>Web</i>
$\varphi_{ra,b,c}$	<i>Flux triphasés rotorique</i>	<i>Web</i>
R_s	<i>Résistance des enroulements statorique</i>	Ω
R_r	<i>Résistance des enroulements rotorique</i>	Ω
L_s	<i>Inductance cyclique statorique</i>	<i>H</i>
L_r	<i>Inductance cyclique rotorique</i>	<i>H</i>
M_s	<i>Inductance mutuelle statorique</i>	<i>H</i>
M_r	<i>Inductance mutuelle rotorique</i>	<i>H</i>
M	<i>Inductance magnétisante de la MADA</i>	<i>H</i>
M_{sr}	<i>Inductances mutuelles entre stator-rotor</i>	<i>H</i>
M_{rs}	<i>Inductances mutuelles entre rotor-stator</i>	<i>H</i>
l_s	<i>Inductances propres statorique</i>	<i>H</i>
l_r	<i>Inductances propres rotorique</i>	<i>H</i>
m	<i>Valeur maximale de l'inductance mutuelle</i>	<i>H</i>
V_s	<i>Tension simple statorique</i>	<i>V</i>
V_{dc}	<i>Tension de bus continu</i>	<i>V</i>
$P(\theta)$	<i>Matrice de transformation directe de Park</i>	-
$P(\theta)^{-1}$	<i>Matrice de transformation inverse de Park</i>	-
$\cos \phi$	<i>Facteur de puissance</i>	-
K_p	<i>Gain proportionnel</i>	-
K_i	<i>Gain intégral</i>	-
$e(x)$	<i>L'écart sur la variable à régler</i>	-
r	<i>Degré relatif</i>	-
u_{eq}	<i>Commande équivalente</i>	-
u_n	<i>Commande discontinue (nominale)</i>	-
K	<i>Gain positif</i>	-
$S(x)$	<i>Surface de glissement</i>	-
$Sign$	<i>Fonction</i>	<i>V</i>
Sat	<i>Fonction</i>	<i>V</i>
$Smooth$	<i>Fonction</i>	-
ε	<i>Largeur du seuil de la fonction saturation</i>	-
σ	<i>Coefficient de dispersion magnétique de Blondel</i>	-
U	<i>Univers de discours</i>	-

A	<i>Sous-ensemble flou</i>	-
$\mu_A(x)$	<i>Fonction d'appartenance</i>	-

Glossaire

PV	: <i>Photovoltaïque.</i>
GPV	: <i>Générateur Photovoltaïque.</i>
VAWT	: <i>Vertical Axis Wind Turbine.</i>
HAWT	: <i>Horizontal Axis Wind Turbine.</i>
AC	: <i>Alternating Current.</i>
DC	: <i>Direct Current.</i>
MS	: <i>Machine Synchrone.</i>
MAS	: <i>Machine Asynchrone.</i>
MADA	: <i>Machine Asynchrone à Double Alimentation.</i>
GADA	: <i>Génératrice Asynchrone à Double Alimentation.</i>
MPPT	: <i>Maximum Power Point Tracking.</i>
CCM	: <i>Convertisseur Côté Machine.</i>
CCR	: <i>Convertisseur Côté Réseau.</i>
MLI	: <i>Modulation de Largeur Impulsion.</i>
MCC	: <i>Machine à Courant Continu.</i>
CVD	: <i>Commande Vectorielle Directe.</i>
CVI	: <i>Commande Vectorielle Indirecte.</i>
PI	: <i>Proportionnelle Intégral.</i>
CSV	: <i>Commande à Structure Variable.</i>
S.S.V	: <i>Système à Structure Variable.</i>
SMC	: <i>Sliding Mode Control.</i>
MC	: <i>Mode de Convergence.</i>
MRP	: <i>Mode de Régime Permanent.</i>
CMG	: <i>Commande par Mode Glissant.</i>
FSMC	: <i>Fuzzy Sliding Mode Control.</i>
DFIM	: <i>Doubly fed Induction Machine.</i>
dqo	: <i>direct, quadrature et homopolaire</i>
NPC	: <i>Neutral Point Clamped</i>

Sommaire

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur les systèmes d'énergies renouvelables	
I.1. Introduction.....	4
I.2. Le Potentiel d'Energies Renouvelables en Algérie	5
I.3. Différents types d'énergies renouvelables.....	7
I.3.1. Energie solaire.....	7
I.3.1.1. Solaire thermique	7
I.3.1. 2. Solaire photovoltaïque.....	8
I.3.2. La biomasse	9
I.3.2.1. Bois énergie	9
I.3.2.2. Le biocarburant	9
I.3.2.3. Le biogaz	9
I.3. 3. La géothermie	10
I.3.3.1. La géothermie de haute énergie et de moyenne énergie	11
I.3.3.2. La géothermie basse énergie et très basse énergie	11
I.3.4. Hydraulique	11
I.3.5. Eolien	12
I.4. Généralité sur l'éolienne	12
I.4.1. Historique de l'éolien	12
I.4.2. Définition de l'énergie éolienne	13
I.4.3. Situation actuelle de l'énergie éolienne dans le monde	14
I.4.4. Energie éolienne en Algérie	15
I.4.5. Différents types des éoliennes	17
I.4.5.1. Eoliennes à axe vertical	17
I.4.5.2. Eoliennes à axe horizontal	19
I.4.6. Architecture d'une éolienne	20
I.4.7. Emplacement des parcs éoliens	24
I.4. 8. Taille des aérogénérateurs	25
I.4.9. Types de fonctionnement des éoliennes	26
I.4.9.1. Les éoliennes à vitesse fixe	26
a)- Les éoliennes à décrochage aérodynamique « <i>stall</i> »	28
b)- Les éoliennes à pales orientables « <i>pitch</i> ».....	29
I.4.9.2. Les éoliennes à vitesse variable	31
I.4.10. Intérêt de la vitesse variable.....	33
I.4.11. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne	33
I.4.12. Notions théoriques sur l'éolien.....	34
I.4.12.1. L'énergie disponible dans le vent	34
I.4.12.2. Notions aérodynamiques « <i>Théorie de Betz</i> »	35
a)- Le coefficient de puissance.....	35
b)- Le coefficient du couple.....	37
I.4.13. Les systèmes de Stockage d'énergie.....	38
1.4.13.1. Stockage à court terme.....	38
1.4.13.2. Stockage à long terme.....	39
I.4.14. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	39
I.4.14.1. Avantages	39
I.4.14.2. Inconvénients.....	40
I.15. Conclusion.....	40
Chapitre II : Modélisation de la chaîne de conversion éolienne (Turbine, MADA et Convertisseurs)	

II.1. Introduction.....	41
II.2. Description générale du système	41
II.3. Modélisation mathématique de la turbine éolienne	42
II.3.1. Modèle du vent.....	42
II.3.2. Modèle énergétique de la turbine.....	43
II.3.2.1. Hypothèses simplificatrices	43
II.3.2.2. Modèle d'équations	43
II.3.2.3. Modèle du multiplicateur de vitesse	45
II.3.2.4. Modèle de la partie mécanique	45
II.3.2.5. Schéma bloc du modèle de la turbine	46
II.3.2.6. Résultats de la simulation obtenus	46
II.4. Stratégie de commande de la turbine éolienne	49
II.4.1. Contrôle sans asservissement de vitesse mécanique	50
II.4.2. Contrôle avec asservissement de vitesse mécanique	51
II.4.3. Résultats obtenus du contrôle MPPT	52
II.4.3.1. MPPT sans asservissement de vitesse mécanique	53
II.4.3.2. MPPT avec asservissement de vitesse mécanique	54
II.5. Généralités sur les machines asynchrones à double alimentation.....	56
II.5.1. Définition	56
II.5.2. Principe de fonctionnement	57
II.5.3. Application des machines asynchrones à double alimentation	59
II.5.4. Modes de Fonctionnement de la MADA	60
II.5.5. Différentes configurations d'un système éolien à base d'une MADA	61
II.5.5.1. MADA avec pont à diodes et pont à thyristors	61
II.5.5.2. MADA avec pont à diodes et pont à transistors.....	62
II.5.5.3. MADA avec cycloconvertisseur.....	63
II.5.5.4. MADA avec convertisseurs MLI	63
II.5.6. Intérêt de la MADA.....	64
II.5.7. Avantages et inconvénients de la MADA.....	64
II.5.7.1. Avantages.....	64
II.5.7.2. Inconvénients.....	65
II.5.8. Modélisation de la MADA.....	65
II.5.8.1. Hypothèses simplificatrices.....	66
II.5.8.2. Modèle mathématique de la MADA.....	66
II.5.8.2.1. Equations dans le repère triphasé (a, b, c).....	66
a)- Equations électriques.....	67
b)- Equations magnétiques.....	68
II.5.8.2.2. Equations dans le repère de Park (d, q, o).....	69
a)- Matrice de Park.....	69
b)- Choix de référentiel.....	70
c)- L'application de la transformation de Park.....	71
d)- Expressions des puissances	72
e)- Expression du couple	72
II.5.9. Alimentation de la machine.....	73
II.5.9.1. Modélisation du CCM.....	74
II.5.9.2. Principe de la commande MLI.....	76
II.5.9.3. Résultats de Simulation obtenus.....	77
II.6. Conclusion.....	80

Chapitre III : Commande vectorielle de la MADA

III.1. Introduction.....	81
III.2. Technique d'orientation du flux de la MADA	82
III.3. Synthèse du régulateur PI.....	86
III.4. Résultats de simulations obtenues	87
III.4.1. Test de suivi de consigne	89
a)- <i>Vitesse du vent fixe</i>	89
b)- <i>Vitesse du vent variable</i>	92
c)- <i>Interprétation des résultats</i>	96
III.4.2. Contrôle de facteur de puissance	97
a)- <i>Vitesse du vent fixe</i>	97
b)- <i>Vitesse du vent variable</i>	100
c)- <i>Interprétation des résultats</i>	102
III.4.3. Tests de robustesse	102
a)- <i>Vitesse du vent fixe</i>	103
b)- <i>Vitesse du vent variable</i>	103
c)- <i>Interprétation des résultats</i>	103
III.5. Conclusion.....	104
Chapitre IV : Commande par mode glissant de la MADA	
IV.1. Introduction.....	105
IV.2. Bases mathématiques de la commande à structure variable	105
IV.3. Les modes de la trajectoire dans le plan de phase	107
IV.4. Conception de la commande par mode glissant	107
IV.4.1. Choix de la surface de glissement	108
IV.4.2. Conditions de convergence et d'existence.....	109
IV.4.3. La détermination de la loi de commande.....	109
IV.4.3.1. Commande équivalente « u_{eq} ».....	110
IV.4.3.2. Commande discontinue de base « u_n ».....	111
IV.5. Application de la commande par mode glissant à la MADA.....	114
IV.5.1. Contrôle de la puissance active.....	114
IV.5.2. Contrôle de la puissance réactive.....	115
IV.6. Résultats de simulations obtenus.....	116
IV.6.1. Test de suivi de consigne	117
a)- <i>Vitesse du vent fixe</i>	117
b)- <i>Vitesse du vent variable</i>	119
c)- <i>Interprétation des résultats</i>	120
IV.6.2. Contrôle de facteur de puissance	121
a)- <i>Vitesse du vent fixe</i>	121
b)- <i>Vitesse du vent variable</i>	121
c)- <i>Interprétation des résultats</i>	124
IV.6.3. Tests de robustesse	124
a)- <i>Vitesse du vent fixe</i>	124
b)- <i>Vitesse du vent variable</i>	124
c)- <i>Interprétation des résultats</i>	125
III.7. Conclusion.....	125
Chapitre V : Commande hybride par mode glissant floue de la MADA	
V.1. Introduction	126
V.2. Généralités sur la commande par logique floue	126
V.2.1. Bref historique de la logique floue	126

V.2.2. Théorie floue	127
V.2.3. Notions de base sur les ensembles flous.....	127
V.2.3.1 Définition d'un ensemble flou.....	127
V.2.3.2. Variable linguistique.....	128
V.2.3.3. Fonction d'appartenance	129
V.2.3.4. Opérations sur les ensembles flous	130
V.2.4. Structure générale d'un contrôleur flou	132
V.2.4.1. Interface de fuzzification	133
V.2.4.2. Base des règles.....	133
V.2.4.3. Mécanisme d'inférence	134
V.2.4.4. Interface de défuzzification.....	135
V.2.5. Intérêt de la commande floue	136
V.3. Commande hybride par mode glissant floue de la MADA	136
V.3.1. Structure générale d'un contrôleur glissant-flou	137
V.3.2. Résultats de simulations obtenus	138
V.3.2.1. Test de suivi de consigne	139
a)- <i>Vitesse du vent fixe</i>	139
b)- <i>Vitesse du vent variable</i>	141
c)- <i>Interprétation des résultats</i>	143
V.3.2.2. Contrôle de facteur de puissance	143
a)- <i>Vitesse du vent fixe</i>	143
b)- <i>Vitesse du vent variable</i>	143
c)- <i>Interprétation des résultats</i>	146
V.3.2.3. Tests de robustesse	146
a)- <i>Vitesse du vent fixe</i>	146
b)- <i>Vitesse du vent variable</i>	147
c)- <i>Interprétation des résultats</i>	147
V.3.2.4. Comparaison de l'effet Chattering	147
a)- <i>Vitesse du vent fixe</i>	147
b)- <i>Vitesse du vent variable</i>	148
c)- <i>Interprétation des résultats</i>	148
III.7. Conclusion.....	128
Conclusion générale et Perspectives	149
Références Bibliographiques	151
Annexes	156

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie électrique est devenue un élément fondamental à cause de nos différentes exigences en plusieurs termes domestiques et industriels. Ce qui nous incite à réfléchir toujours à des nouvelles techniques de production de cette énergie. Depuis l'aube de l'humanité, la production de l'énergie était basée en une grande partie sur les combustibles comme le bois, les fossiles (charbon, pétrole, gaz...), puis l'uranium. Mais le grand problème accompagnant l'utilisation de ces matières est l'émission de gaz et les dégagements massifs de composés divers ; ce qui déséquilibre notre planète et pousse vers un cycle ouvert non renouvelable. [6]

Face à ces problèmes et de façon à limiter l'emploi de l'énergie d'origine combustible. Certain pays, aux profits d'autres sources d'énergie plus prometteuses, se sont tournés vers la nouvelle forme d'énergie dite « renouvelable ».

On appelle énergie renouvelable un ensemble de sources d'énergie qui sont inépuisables à l'échelle humaine, largement disponibles, essentiellement gratuites et sont compatibles avec un certain respect environnemental. Elles peuvent être converties, selon les besoins, en chaleur ou en électricité. [1]

C'est ainsi que les pays industrialisés se sont lancés dans le développement et l'utilisation des sources d'énergie renouvelables comme le solaire, la biomasse, la géothermie, la marémotrice, l'hydraulique,... Parmi ces sources d'énergie, l'éolienne représente un potentiel assez important non pas pour remplacer les énergies existantes mais pour palier à l'amortissement de la demande de plus en plus galopante. Après des siècles d'évolution et des recherches plus poussées depuis quelques décennies, plusieurs pays se sont, aujourd'hui résolument tournés vers l'énergie éolienne. [2]

Une grande partie des éoliennes installées de nos jours sont équipées de machines asynchrones à double alimentation (MADA). L'avantage que présente ce type de génératrice est qu'elles permettent une production d'énergie électrique et ce à vitesse variable, ce qui nous amène à dire que ces génératrices nous permettent une meilleure exploitation des ressources éolienne sous des conditions de vent différentes. Mais la difficulté majeure rencontrée dans la commande de la MADA réside dans le fait que les puissances à commander sont des variables fortement couplées.

La plupart des éoliennes utilisées pour la production d'électricité doivent permettre de produire un maximum de puissance en exploitant au mieux l'énergie disponible dans le vent. C'est pour cela que de nombreux systèmes de commande de l'éolienne, agissant au niveau de

la partie mécanique ou électrique, sont développés pour maximiser la conversion d'énergie. On parle alors de recherche du point de fonctionnement à puissance maximum (MPPT en anglais *Maximum Power Point Tracking*). Il est possible de modifier l'angle de calage des pales, ou la vitesse de rotation de l'hélice ou bien encore jouer sur la commande de la génératrice. [45]

Plusieurs méthodes de commande de la MADA sont apparues, parmi elles, la commande vectorielle par flux orienté. Son principe de base est de rendre cette machine semblable du point de vue commande à une machine à courant continu à excitation séparée [49]. Cette commande basée sur les régulateurs classiques (réglage à action proportionnelle, intégrale et dérivée), ne permet pas dans tous les cas de maîtriser les régimes transitoires, et en général, les variations paramétriques de la machine. Cependant, il existe des commandes modernes et robustes telle que la commande des systèmes à structure variable (SSV) ou commande par modes glissants.

La commande par mode glissant a connu un grand succès ces dernières années. Cela est dû à la simplicité de mise en œuvre et la robustesse par rapport aux variations paramétriques internes et des perturbations externes du système. Cependant, la présence de la fonction « *sign* » dans la loi de commande provoque un phénomène de broutement (Chattering) qui peut exciter les hautes fréquences jusqu'à endommager le système.

Pour obtenir des hautes performances et une meilleure exécution de la génératrice à double alimentation, il faut concevoir une technique de commande robuste et hybride, qui rendre le système plus performant et lisse. Il existe différentes stratégies dans littérature pour résoudre le problème de broutement. Dans notre cas nous nous intéressons aux réglages des puissances active et réactive développées par la MADA en utilisant des régulateurs en mode de glissant-flou, afin d'évaluer les performances apportées par ce type de réglage par la simulation sous l'environnement Matlab/SimulinkTM.

Dans ce contexte Le présent travail concerne une contribution à la commande robuste du système d'énergie renouvelable en particulier l'énergie éolienne. Pour ce faire, on a adopté le plan de travail constitué de cinq chapitres organisés comme suit :

Le premier chapitre est consacré à des généralités sur les systèmes d'énergies renouvelables.

Le deuxième chapitre aborde la modélisation de la chaîne de conversion éolienne (Turbine, MADA et Convertisseurs).

Le troisième chapitre est dédié à la présentation de la technique de commande vectorielle (directe et indirecte) de la MADA.

Le quatrième chapitre développe la technique de la commande par mode glissant de la MADA.

Le cinquième chapitre traite la commande hybride par mode glissant floue de la MADA.

Enfin notre travail sera clôturé par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I :

Généralités sur les systèmes d'énergies renouvelables

Chapitre I :

Généralités sur les systèmes d'énergies renouvelables

I.1. Introduction

Les énergies renouvelables sont des énergies inépuisables. Fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la Terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des végétaux, leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes. Ce sont les énergies de l'avenir. Aujourd'hui, elles sont sous-exploitées par rapport à leur potentiel. Ainsi, les énergies renouvelables couvrent seulement 20 % de la consommation mondiale d'électricité. [1]

En utilisant les énergies renouvelables, on lutte contre l'effet de serre, en réduisant notamment les rejets de gaz carbonique dans l'atmosphère. En développement dans le monde entier, les énergies renouvelables permettent de gérer de façon intelligente les ressources locales et de créer des emplois. On qualifie les énergies renouvelables d'énergies "flux" par opposition aux énergies "stock", elles-mêmes constituées de gisements limités de combustibles fossiles : pétrole, charbon, gaz, uranium. [1]

Il existe plusieurs ressources en énergies renouvelables : l'énergie hydraulique, éolienne, solaire thermique, photovoltaïque, la géothermie et la biomasse. Ces ressources en énergie sont pratiquement inépuisables et propres, la figure I.1 donne la répartition de la production d'électricité entre les différentes sources renouvelables ainsi que leurs prévisions [2].

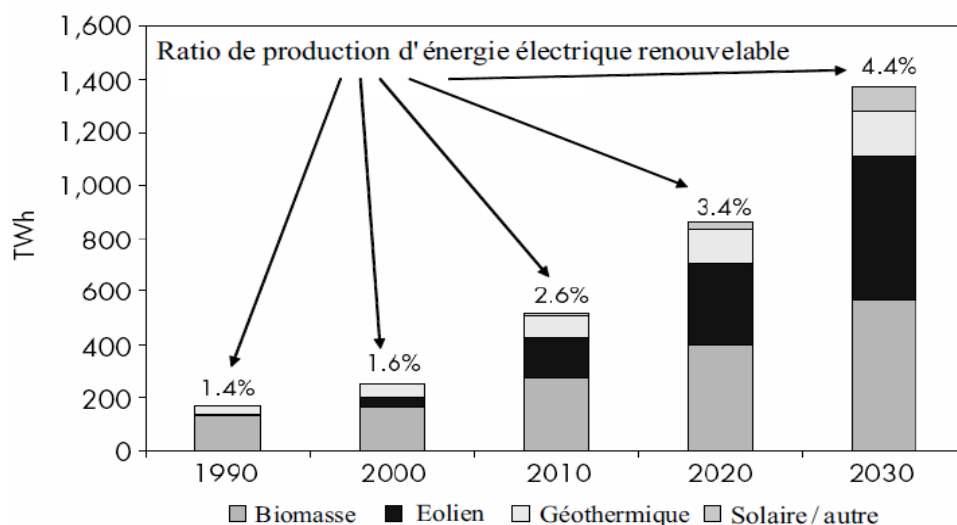


Figure I.1 : Production mondiale d'électricité basée sur les énergies renouvelables.

I.2. Le Potentiel d'Énergies Renouvelables en Algérie

Dans les pays d'Afrique du Nord, figure I.2, la production d'électricité est principalement basée sur les combustibles fossiles, plus de 99% de la production totale d'électricité provient des combustibles fossiles. Le peu qui reste (0,7%) provient des énergies renouvelables. Ce qui concerne l'Algérie, les énergies renouvelables n'ont pas encore connu à l'heure actuelle le développement qui permettrait leur exploitation, malgré le gisement en énergies renouvelables dont dispose l'Algérie. Ceci constitue un atout majeur qui pourra être valorisé pour faire de l'Algérie un fournisseur en énergie électrique. [3]

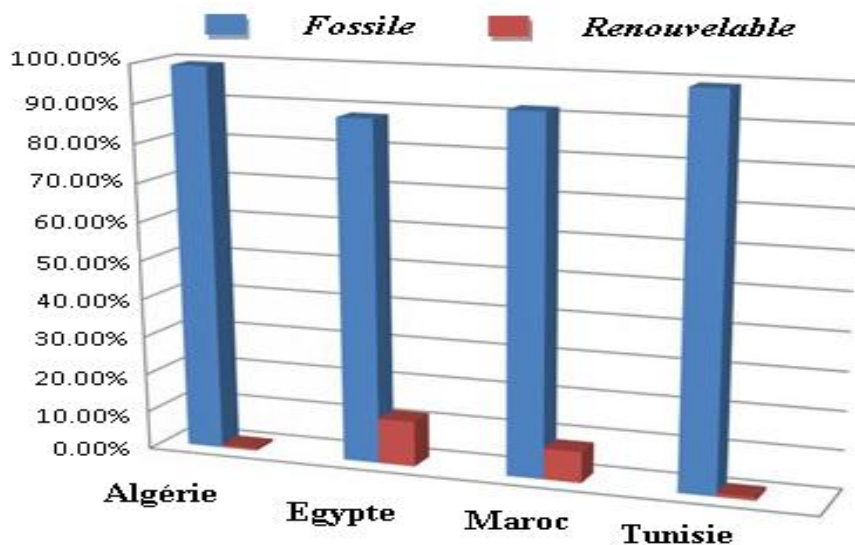


Figure I.2: Part des énergies fossiles et renouvelables dans la production d'électricité dans les pays arabes nord africains.

Heureusement, En 2011 une décision présidentielle sur l'orientation de l'Algérie vers les énergies renouvelables a été prise. De ce fait, un programme très ambitieux de développement de ces énergies renouvelable a été adopté récemment par le gouvernement en visant une contribution de ces énergies à hauteur de 27% de la production nationale d'électricité à l'horizon 2030.

La consistance du programme en énergies renouvelables à réaliser pour les besoins du marché national sur la période 2015-2030 est de 22 000 MW, dont plus de 4525 MW seront réalisés d'ici 2020. Ce programme consiste au développement du photovoltaïque, l'éolien à grande échelle, et les filières de la biomasse, de la cogénération et de la géothermie avec l'introduction du solaire thermique à partir de 2021. Les capacités en énergie renouvelables seront installées selon les spécificités de chaque région : Région du Sud, pour l'hybridation des centrales existantes et l'alimentation des sites éparses compte tenu de la disponibilité des espaces et de l'important potentiel solaire et éolien qui privilégie ces régions ; Région des

Hauts Plateaux pour leur potentiel d'ensoleillement et de vent avec possibilité d'acquisition des terrains ; Région du littoral selon la disponibilité des assiettes de terrain avec l'exploitation de tous les espaces tels que les toitures et terrasses des bâtiments et autres espaces non utilisés. Les besoins complémentaires pour d'autres domaines d'application sont intégrés dans la capacité totale du photovoltaïque, tels que le résidentiel, l'agriculture, le pompage, les ressources en eau, l'industrie, l'éclairage public et les services. [4]

Le programme de développement des énergies renouvelables se présente comme suit :

Tableau I.1: Le programme de développement des énergies renouvelables en Algérie. [4]

	1ère phase 2015-2020 [MW]	2ème phase 2021-2030 [MW]	TOTAL [MW]
Photovoltaïque	3000	10575	13575
Eolien	1010	4000	5010
Solaire thermique	-	2000	2000
Biomasse	360	640	1000
Cogénération	150	250	400
Géothermie	05	10	15
TOTAL [MW]	4525	17475	22000

La figure I.3 représente l'objectif du programme algérien des énergies renouvelables 22 GW à l'horizon de 2030.

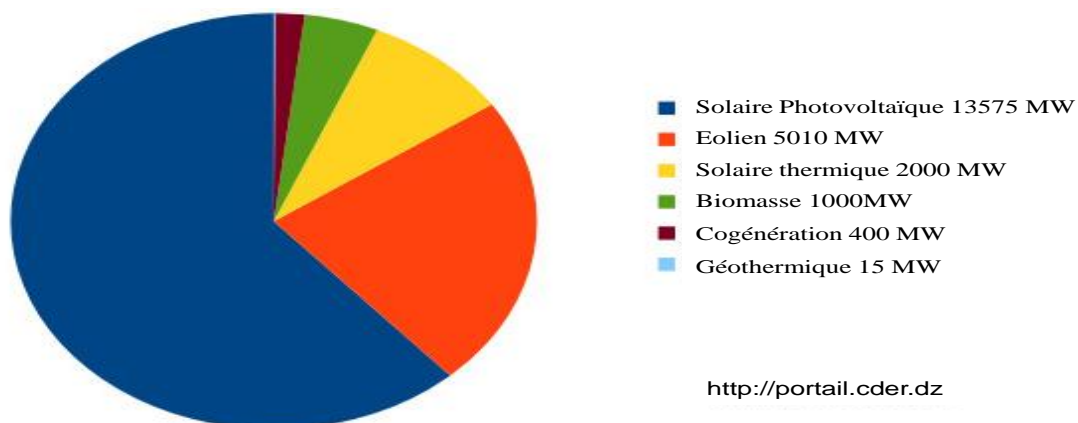


Figure I.3: Répartition des énergies renouvelables en Algérie 22000 MW à l'horizon de 2030.

L'introduction des énergies renouvelables aura pour conséquence:

- une plus grande exploitation du potentiel disponible,
- une meilleure contribution à la réduction de CO₂,
- une réduction de la part des énergies fossiles dans le bilan énergétique national,
- un développement de l'industrie nationale, la création d'emplois.

Dans ce contexte, 65 projets pour la période 2011/2020, dont 10 projets pour la seule phase pilote 2011- 2013 ont été identifiés [5]. Ces projets seront menés dans le but de produire 22 000 MW à l'horizon 2030, dont 10 000 MW pourraient être dédiés à l'exportation [5]. En matière d'emploi, la réalisation du programme des énergies renouvelables prévoit la création de plus de 200 000 emplois directs et indirects.

I.3. Différents types d'énergies renouvelables

Parmi les énergies renouvelables, trois grandes familles émergent : l'énergie d'origine mécanique (l'éolien), énergie électrique (panneaux photovoltaïques) ou l'énergie sous forme de la chaleur (géothermie, solaire) en sachant qu'à la racine de toutes ces énergies est l'énergie en provenance du Soleil transformée ensuite par l'environnement terrestre. Etant donné que l'énergie mécanique est très difficilement transportable, elle n'est utilisable directement que ponctuellement (pompage direct de l'eau, moulins,...). Cette énergie est donc majoritairement transformée en énergie électrique. A l'exception de la biomasse et de l'hydraulique, l'autre inconvénient majeur des énergies renouvelables vient du non régularité des ressources. A l'opposé, les fluctuations de demande en puissance selon les périodes annuelles ou journalières ne sont pas forcément en phase avec les ressources. Par exemple, en hiver il y a un besoin énergétique plus important pour le chauffage et l'éclairage mais les journées d'ensoleillement sont plus courtes. La solution à retenir est certainement la diversification voire le couplage entre plusieurs sources, par exemple du solaire avec l'énergie éolienne. Un aperçu sur les différents types d'énergie renouvelable d'une façon générale est nécessaire: [6]

I.3.1.Énergie solaire

L'énergie solaire est inépuisable, gratuite et non polluante et même si l'énergie solaire reçue par la terre est d'intensité variable, intermittente et peu dense, son utilisation offre de nombreuses possibilités. Parmi ses nombreuses applications, on distingue le solaire thermique qui transforme le rayonnement solaire en chaleur et le solaire photovoltaïque qui convertit la lumière en électricité. [3]

I.3.1.1. Solaire thermique

Une des façons de profiter directement de l'énergie des photons émis par le soleil est le chauffage direct des capteurs thermiques. Ils se comportent comme une serre où les rayons du soleil cèdent leur énergie à des absorbeurs qui à leur tour réchauffent le fluide circulant dans l'installation de chauffage. La température du fluide peut atteindre jusqu'à 60 à 80°C. Ce

système est totalement écologique, très peu cher et la durée de vie des capteurs est élevée. Une autre propriété qui rend ce type des capteurs universels est que l'ensoleillement ne doit pas forcément être direct ce qui signifie que, même dans les zones couverts de nuages (peu denses évidemment) le fonctionnement reste correct. Le grand inconvénient est l'impossibilité de transporter l'énergie ainsi captée à grande distance. Cette source est donc à utilisation locale (principalement chauffage individuel, piscines). [7]

Une autre application de la technique thermo solaire est la production d'eau douce par distillation qui est très intéressante du point de vue des pays en voie de développement.

La technologie thermo solaire plus évoluée utilisant des concentrateurs optiques (jeu de miroirs) permet d'obtenir les températures très élevées du fluide chauffé. Une turbine permet alors de transformer cette énergie en électricité à l'échelle industrielle. Cette technologie est néanmoins très peu utilisée et demande un ensoleillement direct et permanent [8].

I.3.1.2. Solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant de photons, compris dans le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en énergie électrique. Elle utilise pour ce faire des modules photovoltaïques composés de cellules ou de photopiles fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible qui réalisent cette transformation d'énergie [9].

L'association de plusieurs modules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV). [10], [11]

La production d'électricité par générateur photovoltaïque est liée à l'intensité, à la durée de l'ensoleillement et à l'orientation du panneau par rapport au soleil.

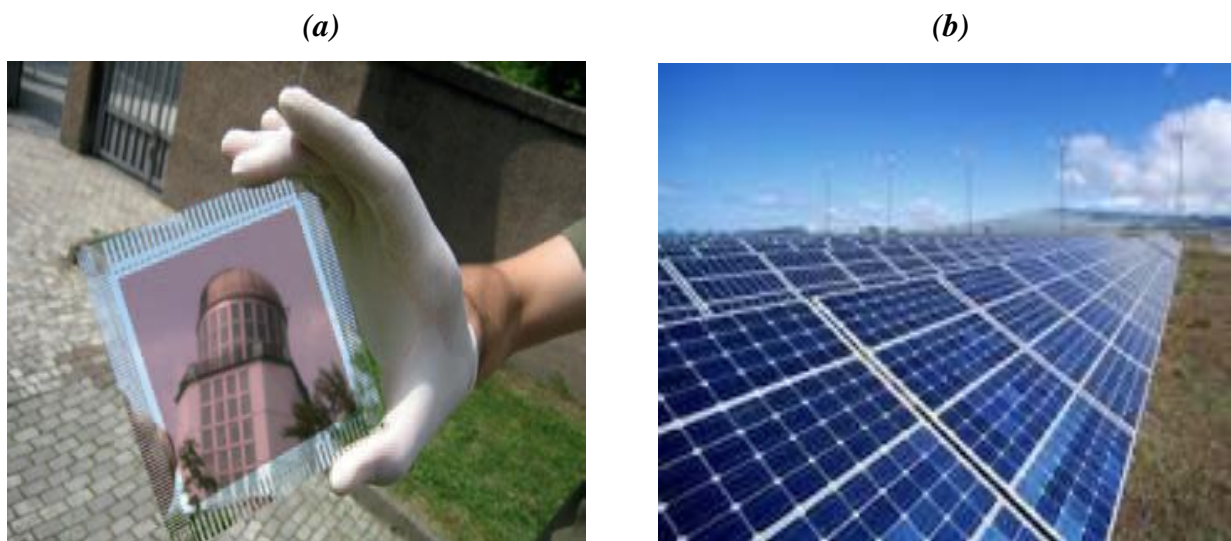


Figure I.4 : Une cellule photovoltaïque en silicium(a), Photovoltaïque énergie (b).

I.3.2. La biomasse

Grâce à la photosynthèse, les plantes utilisent l'énergie solaire pour capturer le gaz carbonique et le stocker sous forme d'hydrates de carbone, tout en assurant leur croissance. Les premiers hommes ignoraient bien sûr ce processus physico-chimique, mais ils ont vite compris l'intérêt de la « biomasse » pour se chauffer. Employé pour désigner toute la matière vivante, ce terme de biomasse s'applique depuis peu à l'ensemble des végétaux employés comme sources d'énergie. Le bois de feu est bien sûr la plus ancienne de ces sources. Aujourd'hui on peut ajouter la biomasse dite « humide » ; déchets organiques agricoles, déchets verts, boues des stations d'épuration, ordures ménagères qui constituent, à une moindre échelle, autant de sources d'énergie, mais pas forcément très écologiques.

Différents types sont à considérer : le bois-énergie, les biocarburants, le biogaz. [12]

I.3.2.1. Bois énergie

Le bois est sans doute la source d'énergie la plus intéressante dans la problématique des énergies renouvelables. Tout le monde a en tête les dégâts provoqués par la déforestation dans les régions tropicales. Le bois constitue donc une source d'énergie renouvelable et relativement propre. Sans entrer dans un débat de spécialistes, un petit rappel s'impose ; en brûlant (ou en pourrissant sur le sol), un arbre rejette dans l'atmosphère le gaz carbonique qu'il avait absorbé en grandissant, ni plus ni moins. Dans un pays qui pratique la sylviculture et replante au minimum autant d'arbres qu'il en coupe, le bilan écologique est donc neutre.

I.3.2.2. Le biocarburant

L'autre atout de la biomasse est la possibilité de fabriquer des biocarburants. Il en existe deux types : les éthanol et les biodiesels. Les éthanol, destinés aux moteurs à essence, sont issus de différentes plantes comme le blé, le maïs, la betterave et la canne à sucre. Le procédé consiste à extraire le sucre de la plante pour obtenir de l'éthanol après fermentation. Quant aux biodiesels, ils sont extraits des oléagineux (colza, tournesol, soja etc.) Les esters d'huile obtenus peuvent alors être mélangés au gazole. En règle générale, ces biocarburants sont mélangés aux carburants classiques, essence et gazole. Ils entraînent alors une petite diminution des rejets de monoxyde de carbone et de dioxyde de carbone, gaz responsable de l'effet de serre. Mais ces biocarburants ont un énorme inconvénient ; ils occupent des surfaces agricoles au détriment des cultures vivrières. [6]

I.3.2.3. Le biogaz

Le biogaz est un mélange composé essentiellement de méthane (CH₄) et de gaz carbonique (CO₂). Suivant sa provenance, il contient aussi des quantités variables d'eau, d'azote, d'hydrogène sulfuré (H₂S), d'oxygène, d'aromatiques, de composés organo-halogénés

(chlore et fluor) et des métaux lourds, ces trois dernières familles chimiques étant présentes à l'état de traces. Le biogaz est produit par un processus de fermentation anaérobie des matières organiques animales ou végétales, qui se déroule en trois étapes (hydrolyse, acidogènes et méthanogènes) sous l'action de certaines bactéries. Il se déroule spontanément dans les centres d'enfouissement des déchets municipaux, mais on peut le provoquer artificiellement dans des enceintes appelées "digesteurs" où l'on introduit à la fois les déchets organiques solides ou liquides et les cultures bactériennes.



Figure I.5: Différents types de la biomasse énergie.

I.3.3. La géothermie

Le principe de la géothermie consiste à extraire l'énergie contenue dans le sol pour l'utiliser sous forme de chauffage ou d'électricité. Partout, la température croît depuis la surface vers l'intérieur de la Terre. Selon les régions l'augmentation de la température avec la profondeur est plus ou moins forte, et varie de 3 °C par 100 m en moyenne jusqu'à 15 °C ou même 30 °C. Cette chaleur est produite pour l'essentiel par la radioactivité naturelle des roches qui constituent la croûte terrestre. Elle provient également, pour une faible part, des échanges thermiques avec les zones internes de la Terre dont les températures s'étagent de 1000°C à 4300°C. Cependant, l'extraction de cette chaleur n'est possible que lorsque les formations géologiques qui constituent le sous-sol sont poreuses ou perméables et contiennent des aquifères (nappe souterraine renfermant de l'eau ou de la vapeur d'eau). [13] On distingue quatre types de géothermie ; la haute, la moyenne, la basse et la très basse énergie.



Figure I.6 : La géothermie énergie.

I.3.3.1. La géothermie de haute énergie et de moyenne énergie

La géothermie de haute énergie ($> 180\text{ °C}$) et de moyenne énergie (température comprise entre 100 °C et 180 °C) valorisent les ressources géothermales sous forme d'électricité.

I.3.3.2. La géothermie basse énergie et très basse énergie

La géothermie basse énergie (températures comprises entre 30 °C et 100 °C) permet découvrir une large gamme d'usages : chauffage urbain, chauffage de serres, utilisation de chaleur dans les processus industriels,...Par rapport à d'autres énergies renouvelables. La géothermie très basse énergie nécessite l'utilisation des pompes à chaleur et donc une installation particulière [14].

La géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent), ni même de la disponibilité d'un substrat, comme c'est le cas de la biomasse. C'est donc une énergie fiable et stable dans le temps. Cependant, il ne s'agit pas d'une énergie entièrement inépuisable dans ce sens qu'un puits verra un jour son réservoir calorifique diminuer. Si les installations géothermiques sont technologiquement au point et que l'énergie qu'elles prélèvent est gratuite, leur coût demeure, dans certains cas, très élevé.

I.3.4. Hydraulique

L'eau est également une source renouvelable puisqu'elle se régénère grâce au cycle d'évaporation et des précipitations. Sa force est connue et exploitée depuis des milliers d'années au travers des barrages, des moulins à eau et des systèmes d'irrigation. Plusieurs technologies permettent d'exploiter l'énergie produite par la chute ou le mouvement de l'eau. Les roues à aubes peuvent la transformer directement en énergie mécanique (moulin à eau), tandis que les turbines et les générateurs électriques la transforment en électricité.[15],[16]



Figure I.7 : Moulin à eau.

I.3.5. Eolien

Parmi toutes les énergies renouvelables contribuant à la production d'électricité, l'éolienne représente un potentiel assez important non pas pour remplacer les énergies existantes, mais pour palier à l'amortissement de la demande de plus en plus galopante.

Notre étude s'intéresse à la filière éolienne où plusieurs pays sont déjà résolument tournés vers l'énergie éolienne. La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie.

I.4.Généralité sur l'éolienne

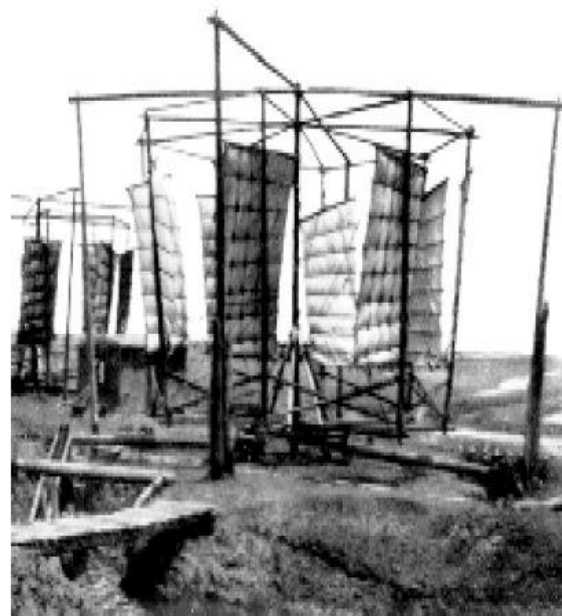
I.4.1.Historique de l'éolien

L'utilisation de l'énergie du vent pour effectuer un travail est une pratique aussi vieille que l'histoire. Il y a environ 5000 ans, les égyptiens furent les premiers à capter cette source d'énergie dans le domaine maritime. Ils s'en servirent pour déplacer de petites embarcations à l'aide d'une voile. Les chinois sont, à cette époque, les premiers à prendre la mer sur des radeaux de fortune. Quant aux premières éoliennes, il faut remonter jusqu'à 4000 années en arrière pour en trouver la trace. C'est sous le règne d'*Hammourabi*, roi de *Babylone*,

qu'apparurent les premiers systèmes d'irrigation entraînés par le vent et on utilisait déjà en Perse les premiers moulins à vent à axe vertical pour moudre du grain [17], des moulins à vent semblables et extrêmement primitifs ont survécu en Afghanistan jusqu'à nos jours comme le montre la figure I.8. Petit à petit, cette technologie commença à faire son chemin vers toute l'Europe.



Moudre les grains en Afghanistan



Pompage de l'eau en Chine

Figure I.8 : Ancêtres des moulins à vent (*Deutsches Museum*).

Bien que des éoliennes soient déjà présentes en occident bien avant le XIIe siècle, c'est à cette période qu'elles connurent un réel essor. On les appela « moulins à vent », car leur principale utilisation était de moudre le grain. Les moulins à vent servaient à drainer les champs aux Pays-Bas et à transporter de l'eau pour l'irrigation en France. En Amérique du Nord, dans les années 1800, des millions de moulins à vent furent construits pour pomper de l'eau destinée aux champs et à l'élevage, ce qui permit aux pionniers de s'installer sur les terres semi-arides de l'Ouest. [18]

I.4.2. Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice, Figure I.9. [19]

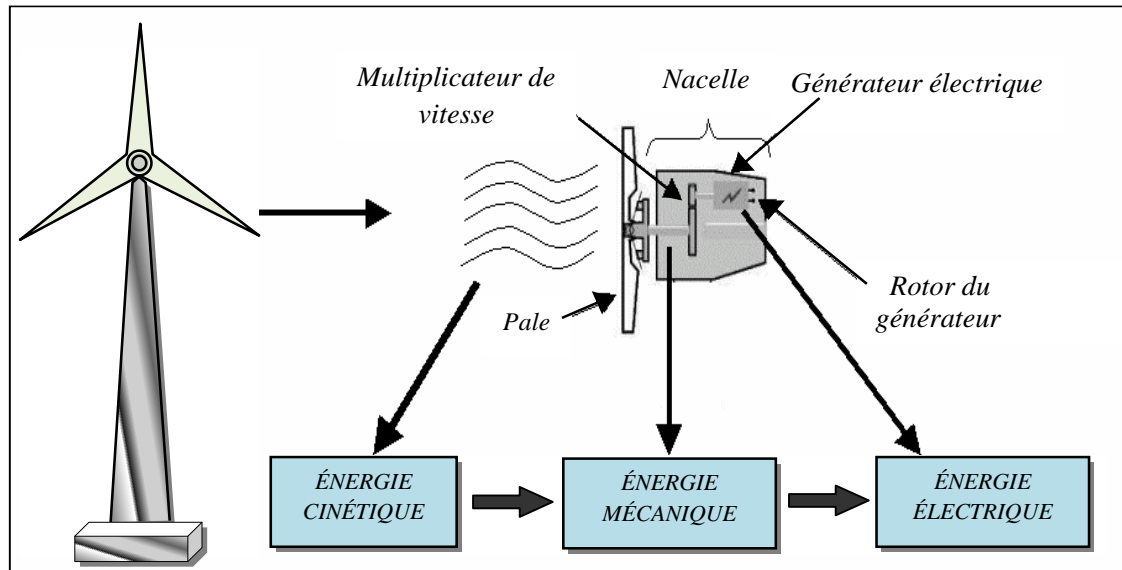


Figure I.9 : Conversion de l'énergie cinétique du vent en électricité.

Selon leur puissance nominale, les éoliennes sont divisées en trois catégories [19], [20]:

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

A titre de comparaison, le tableau ci-dessous propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice

Tableau I.2: Classification des turbines éoliennes.

Echelle	Puissance d'hélice	Diamètre de l'hélice
Petite	Moins de 40 KW	Moins de 12 m
Moyenne	De 40 KW à 999 KW	12 m à 45 m
Grande	1 MW et plus	46 m et plus

I.4.3. Situation actuelle de l'énergie éolienne dans le monde

À la fin 2014, le total mondial de la puissance installée éolienne atteignait 369,6 GW, en augmentation de 51,5 GW en un an (+16,2 %, contre +12,4 % en 2013). La Chine a installé à elle seule 23,35 GW, soit 45,2 % du total 2014, et représente 31 % du parc mondial fin 2014. [21]

À la fin 2013, la puissance installée éolienne mondiale atteignait 318,6 GW, en augmentation de 35,6 GW en un an (+12,4 %), dont 11,3 GW pour l'Union européenne ; le marché a connu un net ralentissement, pour la première fois dans l'histoire de l'ère industrielle de l'éolien : les installations en 2012 avaient totalisé 44,2 GW, dont 11,8 GW pour l'UE ; cette baisse du marché est due surtout à l'écroulement du marché des États-Unis (1 084 MW contre 13 078 MW en 2012), à cause de la reconduction très tardive du système d'incitation fédéral ; le marché européen a légèrement fléchi en raison de l'adoption par plusieurs gouvernements de nouvelles politiques moins favorables ; par contre, la Chine a représenté à elle seule près de la moitié du marché mondial : 16,1 GW. L'Europe a eu en 2013 une part de marché de 34,1 %, derrière le marché asiatique (51,2 % contre 35,6 % en 2012), et loin devant le marché nord-américain qui a chuté à 9,3 % contre 31,4 % en 2012. L'Europe reste cependant en tête pour la puissance totale en fonctionnement : 38,3 % contre 36,4 % pour l'Asie et 22,3 % pour l'Amérique du Nord. [21]

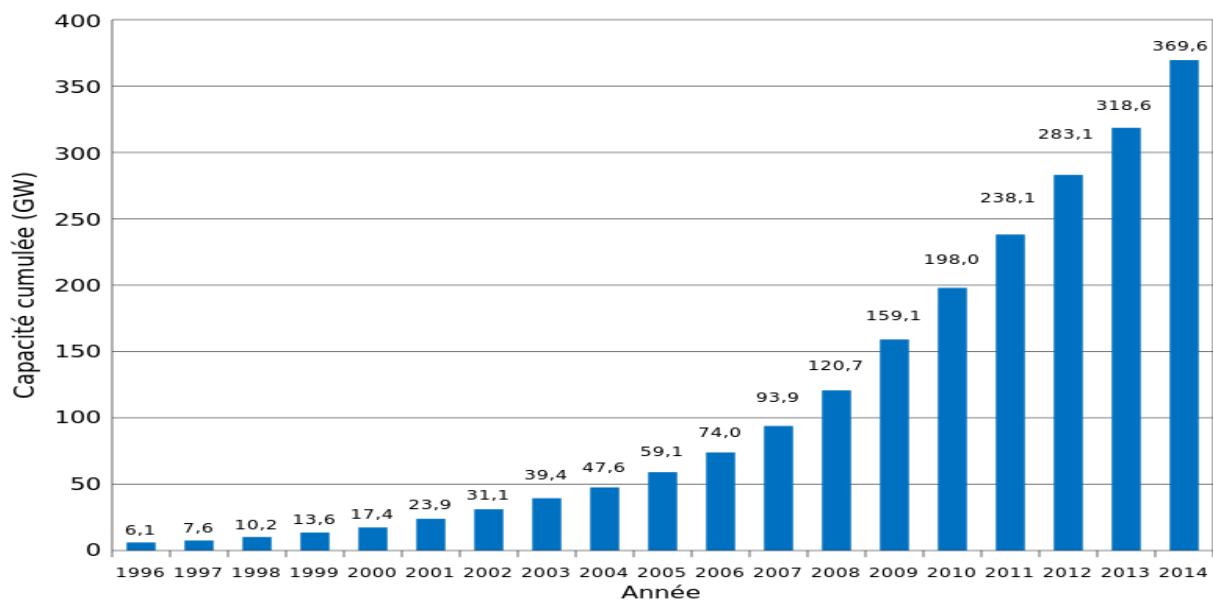


Figure I.10 : Capacité éolienne cumulée dans le monde entier. [22]

I.4.4. Energie éolienne en Algérie

Comparativement au Maroc, à la Tunisie et à l'Égypte, l'Algérie possède un potentiel éolien qui est assez faible. En dépit de cela, elle n'exclut pas l'énergie éolienne qui constitue son second axe de développement (après le solaire) avec un projet pilote à l'horizon 2012-2013, dont l'investissement serait de 30 millions d'euros pour la construction de la première ferme éolienne d'une capacité de 10 MW (10 tranches) à Adrar, dans le sud-ouest du pays. Entre 2014 et 2015, deux autres fermes éoliennes de 20 MW chacune devraient être réalisées.

Des études seront menées pour identifier les emplacements favorables afin de réaliser d'autres projets sur la période 2016-2030 pour une puissance d'environ 1700 MW. [23]

Signalons que la ferme éolienne d'Adrar, première du genre à l'échelle nationale, d'une capacité de 10 mégawatts, est implantée sur une superficie de 30 hectares, dans la zone de Kabertène, 72 kilomètres au nord de la wilaya d'Adrar. Elle est constituée de 12 éoliennes de 850kW chacune et d'une puissance cumulée de 10.2MW dont six ont été déjà réceptionnées en juin 2014. Les turbines utilisées dans ce parc sont de type « G52/850/50-60Hz » fournies par le constructeur espagnol GAMESA, équipées par des générateurs asynchrones à double alimentation (GADA).



Figure I.11 : 1^{ère} ferme éolienne en Algérie.

Etant engagée dans une nouvelle phase d'exploitation des énergies renouvelables, l'Algérie prévoit d'atteindre à l'horizon 2030 près de 40% de la production nationale d'électricité de sources renouvelables. Bien que le choix de l'énergie solaire soit prédominant, l'énergie éolienne représente le deuxième axe de production de ce programme. Avant d'étudier la possibilité d'implanter une ferme éolienne dans une région donnée, il est nécessaire de faire des études du gisement éolien pour une connaissance précise de la météorologie du vent.

Le gisement éolien en Algérie est très diversifié. Il varie d'une zone à une autre selon la cartographie et le climat de cette dernière. La carte représentée à la figure I.12 [4], montre que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement le Sud-Ouest avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région

d'Adrar. Concernant le Nord, il est à noter que la vitesse moyenne est globalement peu élevée. Cependant, les sites côtiers d'Oran, Béjaia et Annaba, et les hauts plateaux de Tiaret et El Kheiter ainsi que la région délimitée par Béjaia au Nord et Biskra au sud, sont prometteurs en termes de production si la hauteur des éoliennes choisies est élevée.

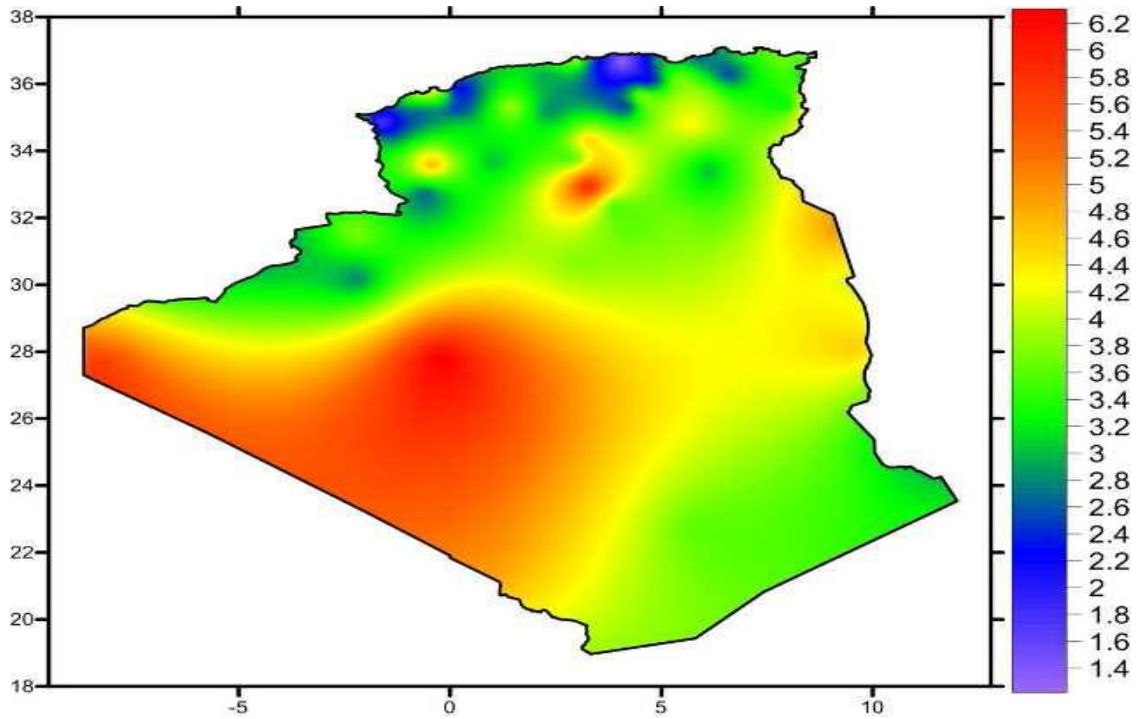


Figure I.12 : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s).

I.4.5. Différents types des éoliennes

Dans la technologie concernant les dispositifs de conversion d'énergie, il existe deux grandes catégories d'éoliennes, qui se réfèrent à la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice: [24], [25]

- ❖ les turbines éoliennes à axe vertical ou **VAWT** (**V**ertical **A**xis **W**ind **T**urbine).
- ❖ les turbines éoliennes à axe horizontal ou **HAWT** (**H**orizontal **A**xis **W**ind **T**urbine);

I.4.5.1. Eoliennes à axe vertical

Les aérogénérateurs à axe vertical ont été les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique. Plusieurs prototypes ont vu le jour mais rares sont ceux qui ont atteint le stade de l'industrialisation. Ils sont classés selon leur caractéristique aérodynamique en deux familles ; les aérogénérateurs conçus sur la base de la portance (Aérogénérateurs à rotor de Darrieus : conçu par l'ingénieur français George Darrieus) et ceux basés sur la traînée (Aérogénérateurs à rotor de Savonius : inventé par le finlandais Siguard Savonius en 1924).

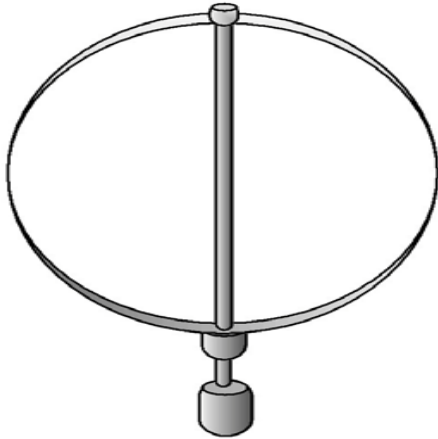


Figure I.13: Aérogénérateur à axe vertical (structure de Darrieus classique).

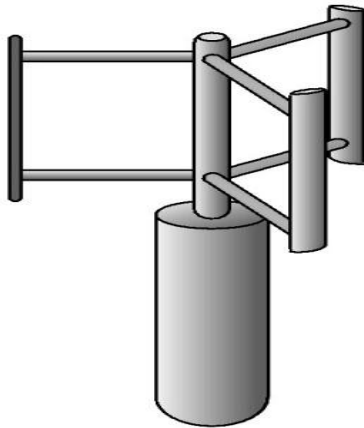


Figure I.14: Aérogénérateur à axe vertical (structure de Darrieus de type H).

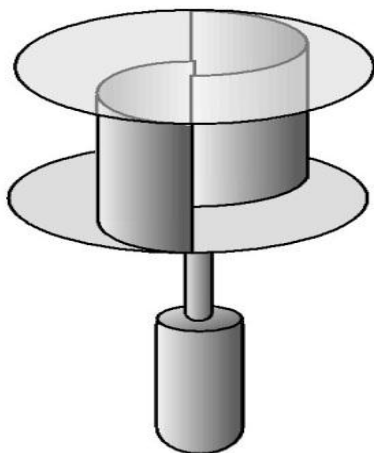


Figure I.15 : Aérogénérateur à axe vertical (structure de Savonius).

I.4.5.2. Eoliennes à axe horizontal

Les turbines à axe horizontal, Figure I.16 sont les plus utilisées actuellement comparées à celles à axe vertical puisque elles présentent un coût moins important, en plus elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques. Elles sont constituées de plusieurs pales pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre des pales varie entre 1 et 3, le rotor tripale est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien par-à-pour à rotor bipale. [26]



Lagerwey bipale 250KW



Nordex tripale 1,5MW

Figure I.16 : Aérogénérateur à axe horizontal.

La turbine peut se trouver à l'avant de la nacelle ou à l'arrière : au vent (upwind) ou sous le vent (downwind). L'avantage des dispositifs sous le vent est qu'ils se positionnent automatiquement face au vent ce qui permet, notamment pour les fortes puissances d'éviter le système mécanique d'orientation, complexe, lourd et coûteux. L'inconvénient majeur réside dans une fatigue accrue due aux fréquentes oscillations liées aux changements de direction du vent. Le procédé « sous le vent ou aval » reste peu utilisé comparativement à celui « au vent ou amont ». Figure I.17. [27]

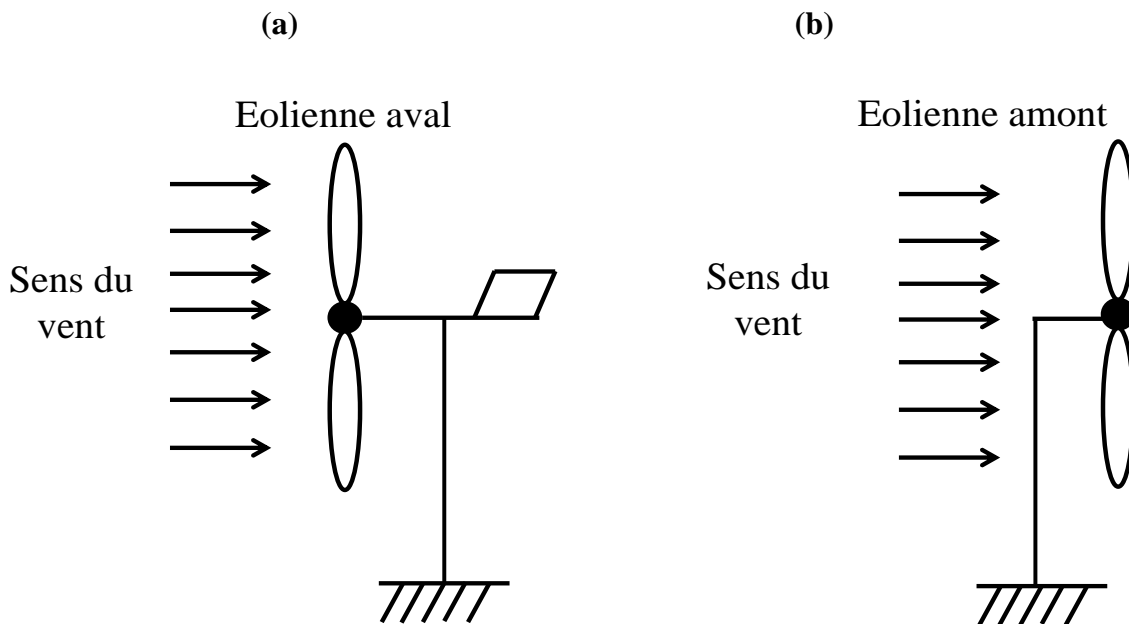


Figure I.17 : Aérogénérateur à axe horizontal : sous le vent ou aval(a), au vent ou amont(b).

I.4.6. Architecture d'une éolienne

Une éolienne rapide est constituée principalement de trois parties : la tour, la nacelle et les pales. Chacune de ces parties doit être minutieusement étudiée et modélisée de façon à obtenir un meilleur rendement et une bonne fiabilité du système ainsi qu'un faible coût d'investissement. [27]

La figure I.18 représente les différentes parties d'une éolienne à axe horizontale Nordex N60 (1300 kW). [29]

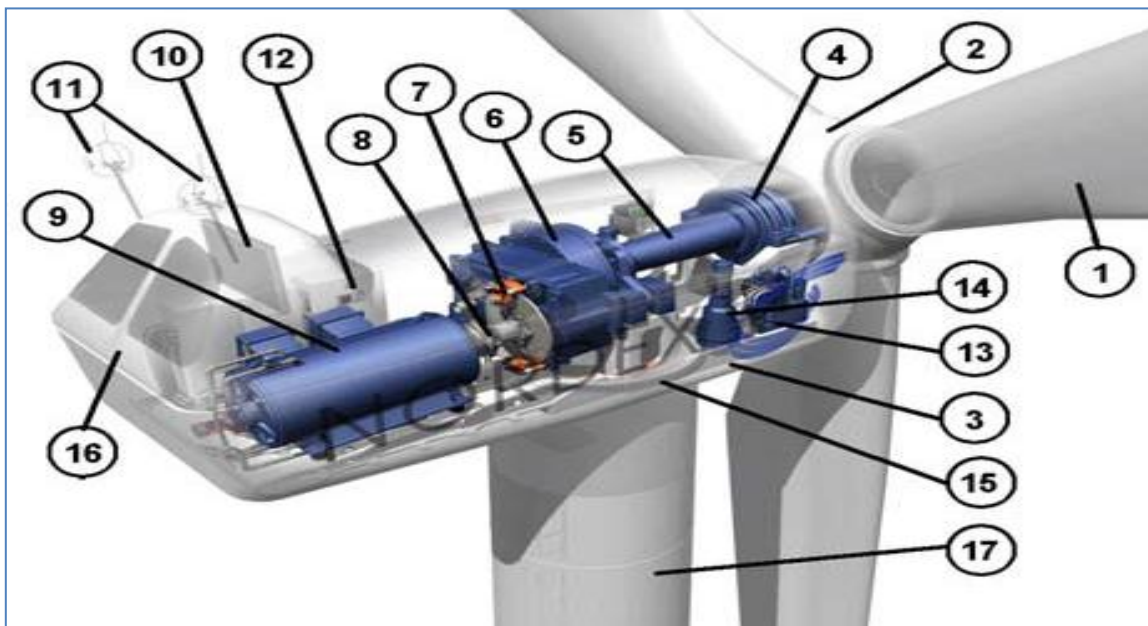


Figure I.18 : Différentes parties d'une éolienne Nordex N60 (1300 kW).

1 : *Pales* en composite fibre de verre. Pas fixe, profil de type stall (décrochage aérodynamique).

2 : *Moyeu* du rotor en fonte.

3 : *Structure de la turbine* en fonte ductile ou en acier soudé galvanisé à chaud.

4 : *Paliers* du rotor à double rangée de billes.

5 : *Arbre lent* du rotor en acier haute résistance.

6 : *Multiplicateur* de vitesse à 3 étages (1 train épicycloïdal et 2 trains parallèles).

7 : *Frein à disque* sur l'arbre rapide avec témoin d'usure.

8 : *Accouplement* avec la génératrice de type flexible.

9 : *Génératrice* (800/2000 kW) asynchrone refroidie à l'eau.

10 : *Radiateur de refroidissement* intégré au système multiplicateur-génératrice.

11 : *Système de mesure de vent* (anémomètre et girouette).

12 : *Système de contrôle* surveille et pilote la turbine.

13 : *Système hydraulique* pour les freins d'extrémité de la pale et le système d'orientation.

14 : *Entraînement d'orientation* de la tourelle à deux trains d'engrenages.

15 : *Paliers du système d'orientation* équipés d'un frein à disque.

16 : *Capot de la nacelle* en structure acier recouvert de composite fibre de verre.

17 : *Tour* en acier tubulaire (plusieurs hauteurs possibles).

➤ La tour est généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, elle doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre une tour (mât) de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW: diamètre de 90m, mât 80m).

(a)



(b)



Figure I.19 : Tour tubulaire (a) et Tour en treillis (b).

➤ La nacelle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine asynchrone et les systèmes hydrauliques ou

électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne. [30]



Figure I.20 : Vu aérienne de la nacelle pendant l'assemblage d'une turbine.

➤ Le rotor, formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit. Les rotors à vitesse fixe sont souvent munis d'un système d'orientation de la pale permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ce système allie ainsi simplicité et faible coût.

Les rotors à vitesse variable sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié voire supprimé. Toutefois, une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites tels la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique). [30], [31]



Figure I.21 : Pale d'une turbine éolienne de 1.5 MW.

- Une armoire de commande, comportant tous les convertisseurs d'électroniques de puissance (onduleur, redresseur), ainsi que les systèmes de régulation de puissance, de courant et de tension et d'orientation des pales et de la nacelle.



Figure I.22 : Composants électroniques dans le mât d'une éolienne.

- Le multiplicateur de vitesse permet d'augmenter la vitesse de rotation du moyeu à la vitesse de rotation du générateur. Une turbine d'une capacité de 1 MW avec un rotor de 52 m de diamètre tourne à la vitesse de 20 tours/minute, alors que le générateur tourne à 1500 tours/minute. Le rapport de transmission de la boîte est alors égal à $1500/20$ soit 75.

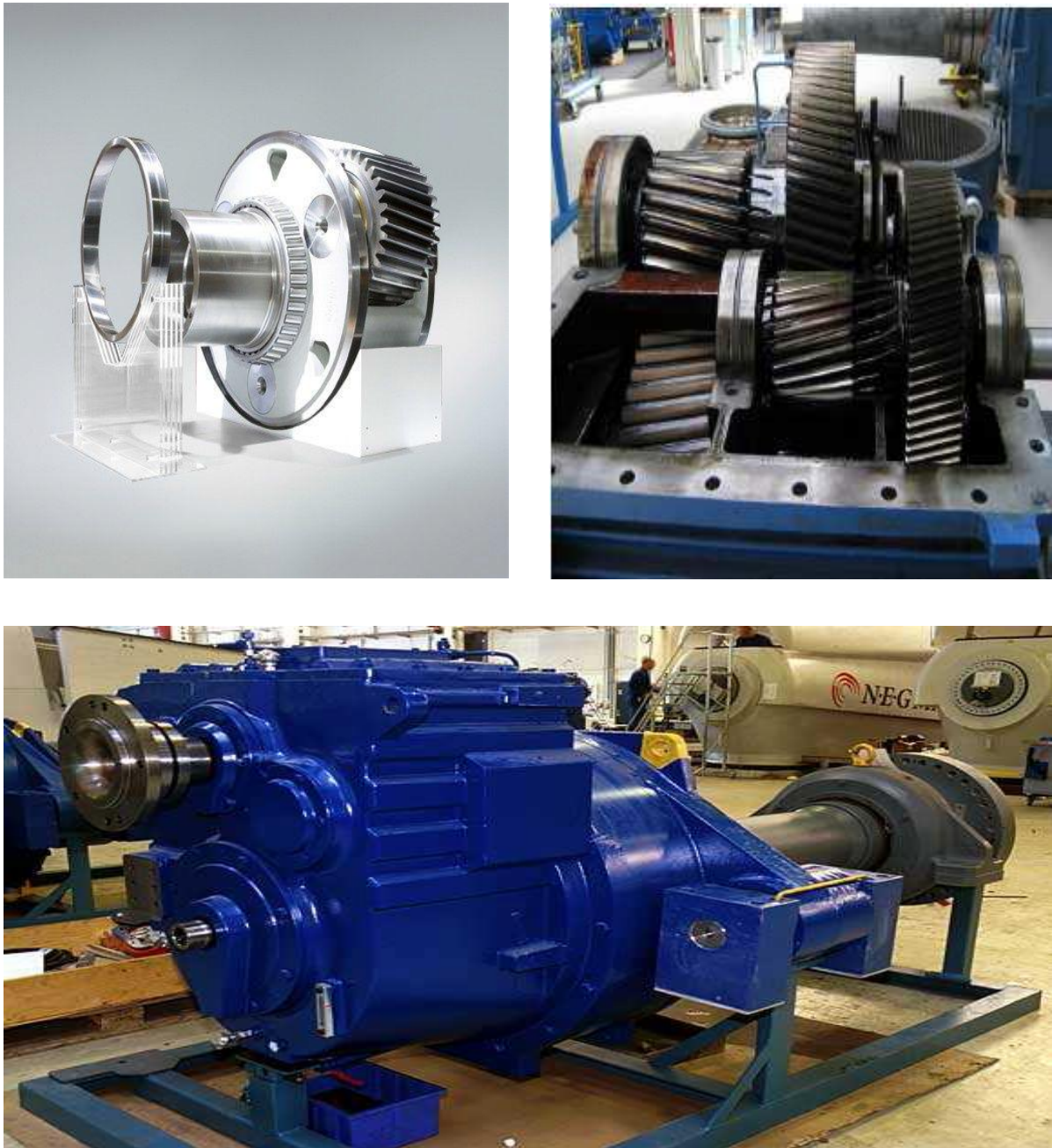


Figure I.23 : Multiplicateurs de vitesse d'une turbine éolienne.

I.4.7. Emplacement des parcs éoliens

Les parcs éoliens se situent naturellement là où il y a un niveau de vent suffisant tout au long de l'année pour permettre une production maximale. Les côtes, les bords de mers et les plateaux offrent des conditions intéressantes en terme de vent mais il faut aussi tenir compte de l'impact sur le paysage. Pour ces raisons, lorsque c'est possible, des parcs éoliens offshore sont construits (540 MW offshore installés en Europe fin 2003). Ces derniers comportent des dizaines d'éoliennes comme on peut le voir sur la figure I.23. [32]



Figure I.24 : Les parcs éoliens offshores (a) et onshores (b).

I.4.8. Taille des aérogénérateurs

Avec le développement récent et le besoin de fournir des puissances croissantes au réseau, les constructeurs et les chercheurs mettent au point des éoliennes de plus en plus puissantes et donc plus grandes, ce que présente la figure I.25. Pour utiliser le maximum de la force du vent, on cherche à ce que l'hélice balaie une surface où le vent est maximum. Pour cela les éoliennes sont très haut perchées pour ne pas subir les effets de sol qui freinent le vent. [32]

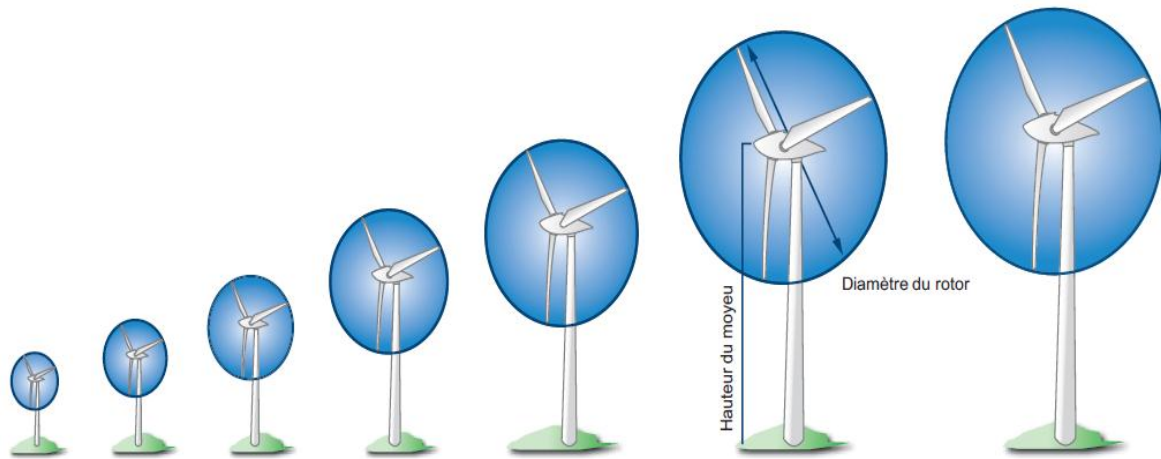


Figure I.25 : Taille des hélices.

Le tableau I.3 suivant représente la croissance des éoliennes depuis 1985 jusqu'à 2014.

Tableau I.3: Croissance des éoliennes depuis 1985.

	1985	1990	1995	2000	2005	2008	2011	2012	2014
Puissance nominale (kW)	80	250	600	1 500	3 000	6 000	7 500	7 500	8 000
Diamètre du rotor (m)	20	30	46	70	90	126	127	154	164
Hauteur du moyeu (m)	40	50	78	100	105	135	149	149	149

Croissance des éoliennes depuis 1985. Source : La Fédération allemande de l'énergie éolienne (BWE), dena.

I.4.9. Types de fonctionnement des éoliennes

Il existe sur le marché plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques. Le cahier des charges pour une génératrice éolienne varie selon le type et les dimensions géométriques de la voilure.

Les machines électriques synchrones et asynchrones constituent le cœur de l'éolienne à vitesse fixe et à vitesse variable. Le fonctionnement de ces aérogénérateurs, qui présente quelques avantages, est influencé principalement par leurs configurations électriques.

I.4.9.1. Les éoliennes à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau. Sa vitesse Ω_{mec} est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice.

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde. La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en

moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne. La caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la figure I.26.

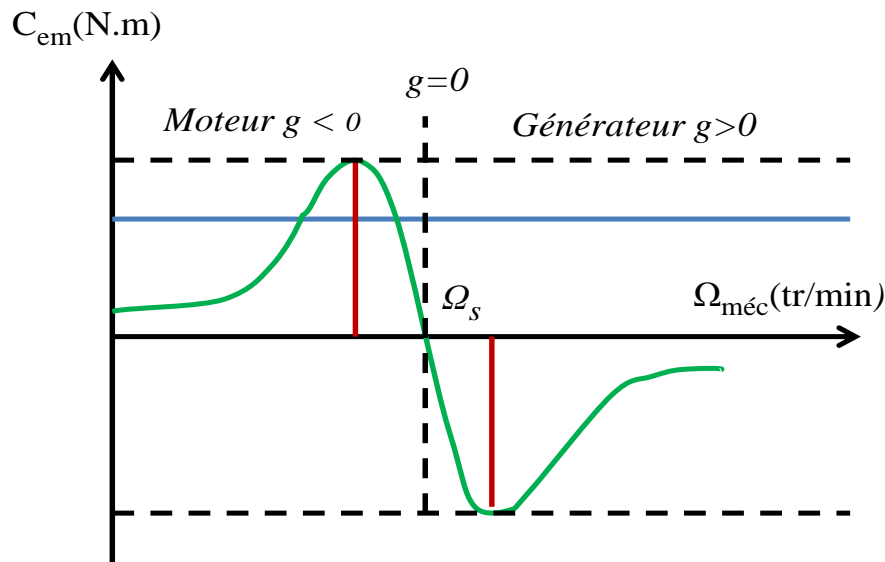


Figure I.26 : Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone.

Pour assurer un fonctionnement stable du dispositif, la génératrice doit conserver une vitesse de rotation proche du synchronisme (point $g = 0$). Le couple mécanique entraînant (produit par la turbine) tend à accélérer la vitesse de la génératrice. Cette dernière fonctionne alors en hyper synchrone et génère de la puissance électrique sur le réseau. Pour une génératrice standard à deux paires de pôles, la vitesse mécanique Ω_{mec} est légèrement supérieure à la vitesse du synchronisme $\Omega_s = 1500tr /min$, ce qui nécessite l'adjonction d'un multiplicateur pour adapter la génératrice à celle du rotor de l'éolienne.

Le dispositif le plus simple et le plus couramment utilisé consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau, figure I.27. La machine à un nombre de paire de pôles fixe et doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée (glissement inférieur à 2%).

La fréquence étant imposée par le réseau, si le glissement devient trop important les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs. La simplicité

de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance sur la machine. Ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau.

Celui-ci peut-être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités représentées sur la figure I.27 qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne.

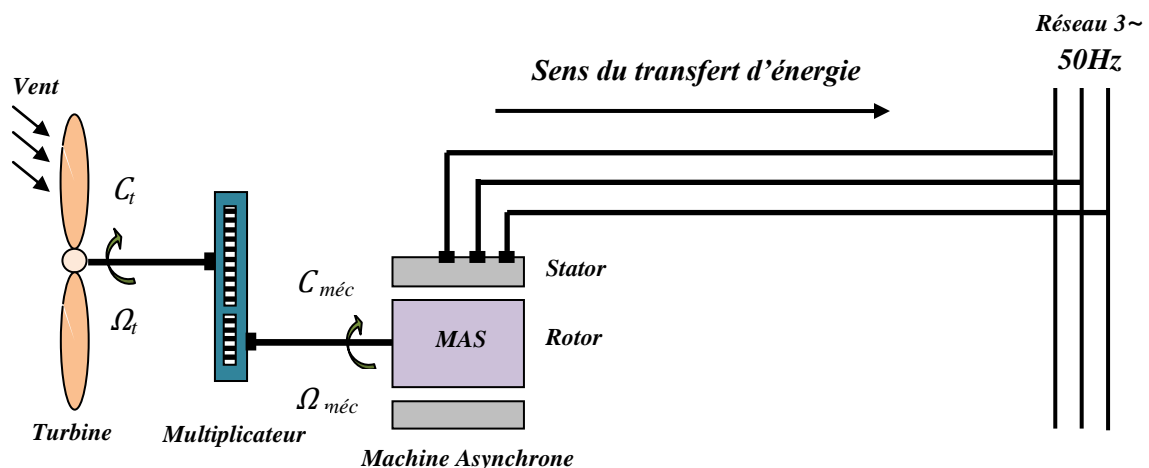


Figure I.27 : Eolienne à vitesse fixe à base de la MAS à cage directement connectée au réseau électrique 3~.

Malgré sa simplicité, le système de fonctionnement à vitesse fixe peut être bruyant, à cause de la modification des caractéristiques aérodynamiques dues à l'orientation des pales, et il n'exploite pas la totalité de la puissance théoriquement disponible pour les vitesses de vent élevées. La machine est alors naturellement protégée contre les surcharges mais l'efficacité de l'éolienne est fortement réduite. De plus, les variations du couple mécanique sont fréquentes puisque le système d'orientation des pales est souvent en action pour pallier les variations de vitesse de vent. Ces variations de couple produisent de brusques variations du courant débité sur le réseau entraînant ainsi des perturbations.

On peut distinguer deux technologies d'éoliennes à vitesse fixe : les éoliennes à décrochage aérodynamique et les éoliennes à pales orientables.

a) Les éoliennes à décrochage aérodynamique « *stall* »

Les éoliennes à décrochage aérodynamique « *stall* » génèrent une puissance électrique variable dont la valeur maximale correspond en général à la puissance nominale de la

machine. En dessous de cette valeur, la puissance fournie croît avec la vitesse du vent. Au-delà, la puissance fournie décroît avec la vitesse du vent, figure I.28.

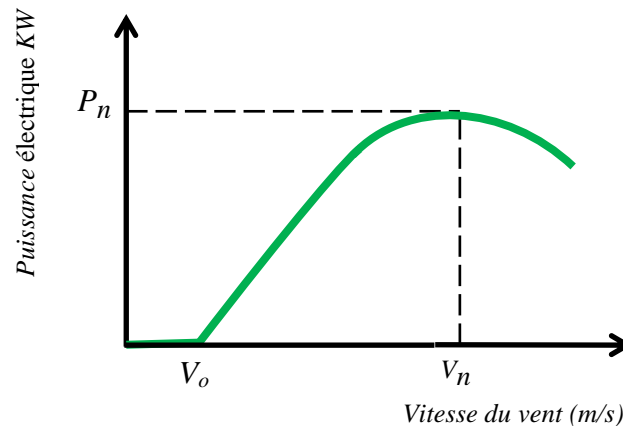


Figure I.28 : Génération à puissance électrique variable (Pales fixes, décrochage aérodynamique).

Avec :

P_n : la puissance nominale de la machine.

V_{vo} : la valeur de vitesse pour laquelle le rotor de la turbine commence à tourner.

V_{vn} : la valeur de vitesse pour laquelle la puissance nominale est atteinte.

Pour obtenir cette caractéristique de la puissance, les pales fixes sont conçues avec un profil qui permet d'obtenir une décroissance brusque de la portance à partir d'une vitesse donnée pour laquelle la puissance doit être diminuée. Au-delà de cette vitesse de vent, la puissance diminue très rapidement et un fonctionnement à puissance nominale constante n'est donc pas possible.

Pour les machines de forte puissance, on trouve également le système à décrochage aérodynamique qui est obtenu progressivement grâce à un dispositif permettant un débattement des pales contre le vent.

L'orientation des pales étant très réduite, le dispositif mécanique est technologiquement plus simple et moins coûteux que le système à orientation des pales.

b) Les éoliennes à pales orientables « pitch »

L'utilisation d'un système d'orientation des pales permet, par une modification aérodynamique, de maintenir constante la puissance de la machine en fonction de la vitesse du vent et pour une vitesse de vent supérieure à V_n , Figure I.29.

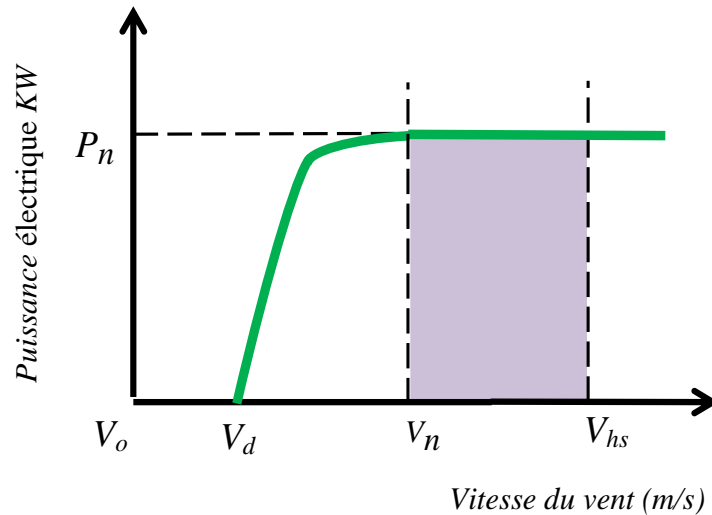


Figure I.29 : Génération à puissance électrique constante (pales orientables).

Avec :

V_d : la vitesse pour laquelle le générateur démarre.

V_n : la vitesse pour laquelle le générateur commence à fournir de la puissance.

V_{hs} : la valeur de la vitesse pour laquelle la machine doit être arrêtée.

Les deux images suivantes montrent deux types d'actionneurs qui permettent de limiter la puissance au niveau de la turbine éolienne, chaque pale est munie de son propre actionneur (Pitch Control), un dispositif Pitch utilisant un actionneur hydraulique est illustré sur la Figure I.30, *a* [33], la Figure I.30, *b* [34] montre 3 moteurs électriques à l'intérieur de l'éolienne.

(a)

(b)

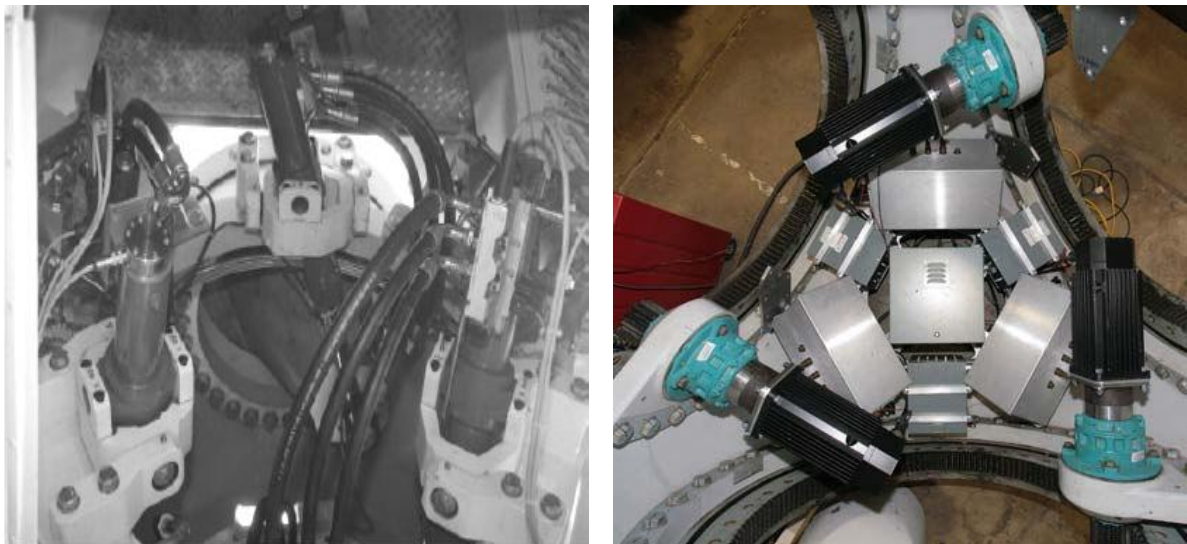


Figure I.30 : Système pitch utilisant un actionneur hydraulique (a) et 3 moteurs électriques (b).

Avantage :

- Système électrique plus simple.
- Plus grande fiabilité.
- Pas besoin de système électrique de commande.
- Moins chère.

Inconvénients :

- Pas de gestion de la puissance extraite.
- Maintenance de la boîte de vitesse.
- Magnétisation de la machine non gérée.
- Fonctionnement à une plage de vitesse de vent très étroite, donc une production d'énergie très perturbée

Ces inconvénients ont poussé les industriels à développer d'autres systèmes plus performants et fonctionnant pour une gamme de vitesse plus large.

1.4.9.2 Les éoliennes à vitesse variable

Les machines électriques qui sont couramment utilisées pour ce genre d'éoliennes, directement couplées au réseau, sont les machines asynchrone à cage, à double alimentation et synchrone à aimant permanent. La machine asynchrone à cage ou à double alimentation est généralement couplée à la turbine via un multiplicateur de vitesse, figure I.31 et figure I.32, tandis que la machine synchrone à aimant permanent peut être couplée aussi à la turbine à travers un multiplicateur, figure I.33 ou couplée directement à la turbine, figure I.34 si la machine comporte un grand nombre de pôles évitant ainsi le multiplicateur de vitesse. [35]

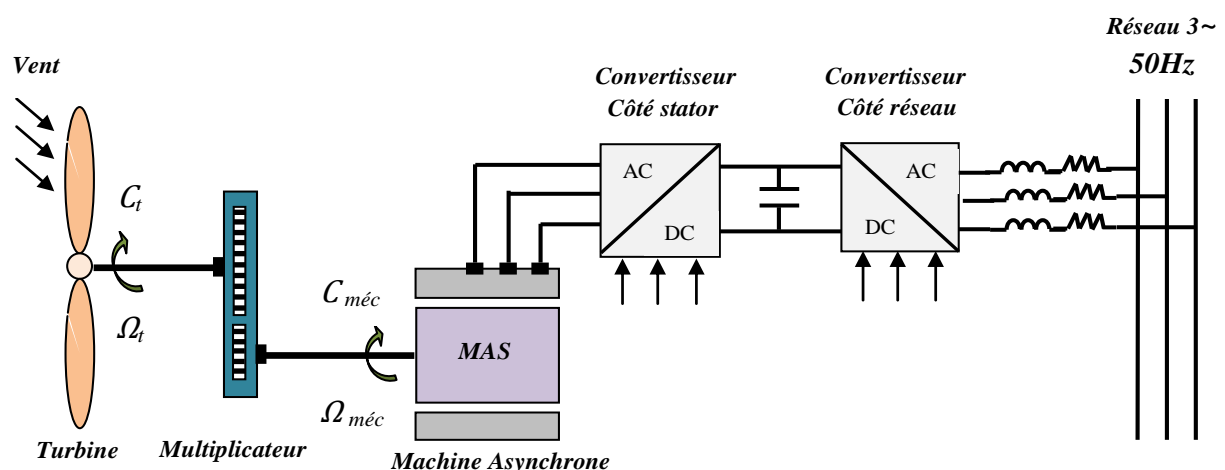


Figure I.31 : Eolienne à vitesse variable à base d'une machine asynchrone à cage.

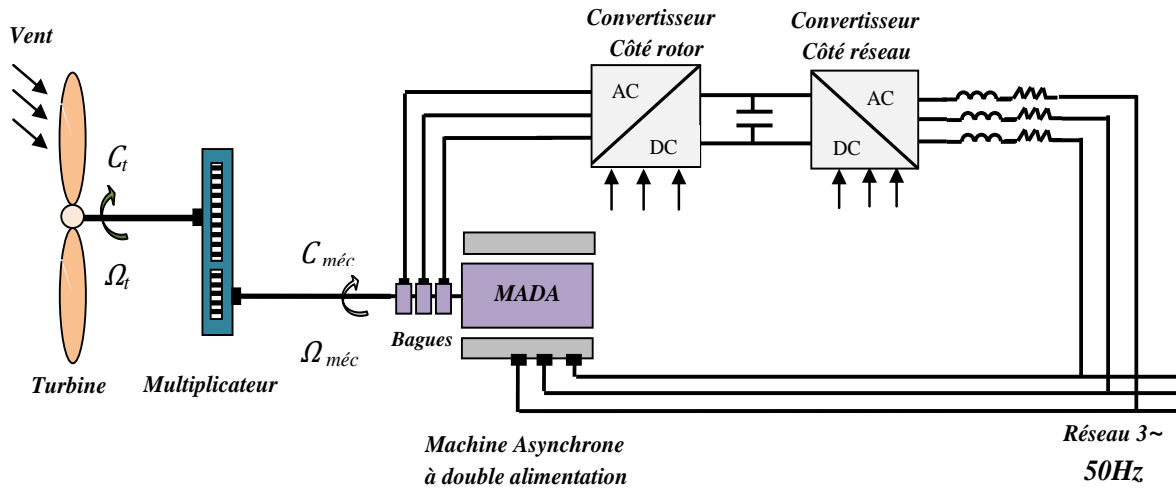


Figure I.32 : Eolienne à vitesse variable à base d'une MADA.

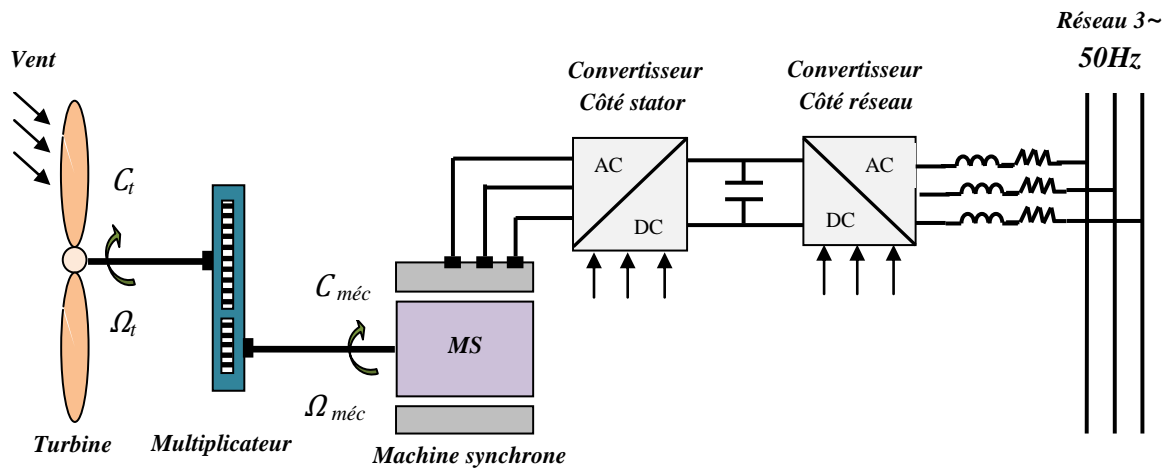


Figure I.33 : Eolienne à vitesse variable à base d'une MS couplée à la turbine via un multiplificateur.

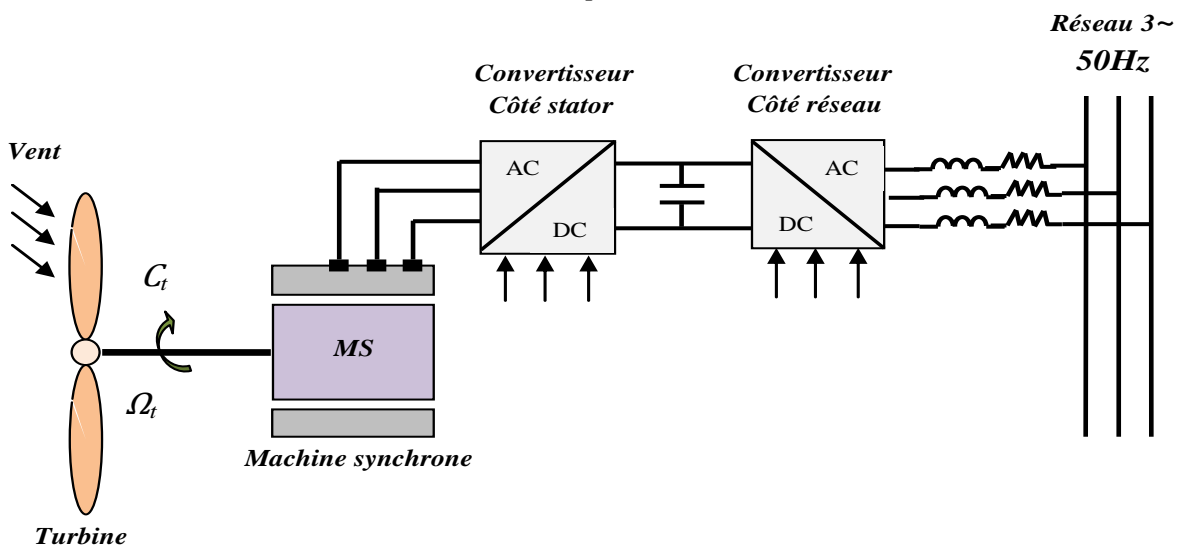


Figure I.34 : Eolienne à vitesse variable à base d'une MS directement couplée à la turbine.

I.4.10. Intérêt de la vitesse variable

La caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse est représentée sur la figure I.35. Pour une vitesse de vent V_1 et une vitesse mécanique de la génératrice Ω_1 ; on obtient une puissance nominale P_1 (point A). Si la vitesse du vent passe de V_1 à V_2 , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance P_2 se trouve sur la 2^{ème} caractéristique (point B). La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure Ω_2 . Il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée.

Les techniques d'extraction maximale de puissance consistent à ajuster le couple électromagnétique de la génératrice pour fixer la vitesse à une valeur de référence (Ω_{ref}) calculée pour maximiser la puissance extraite. [12]

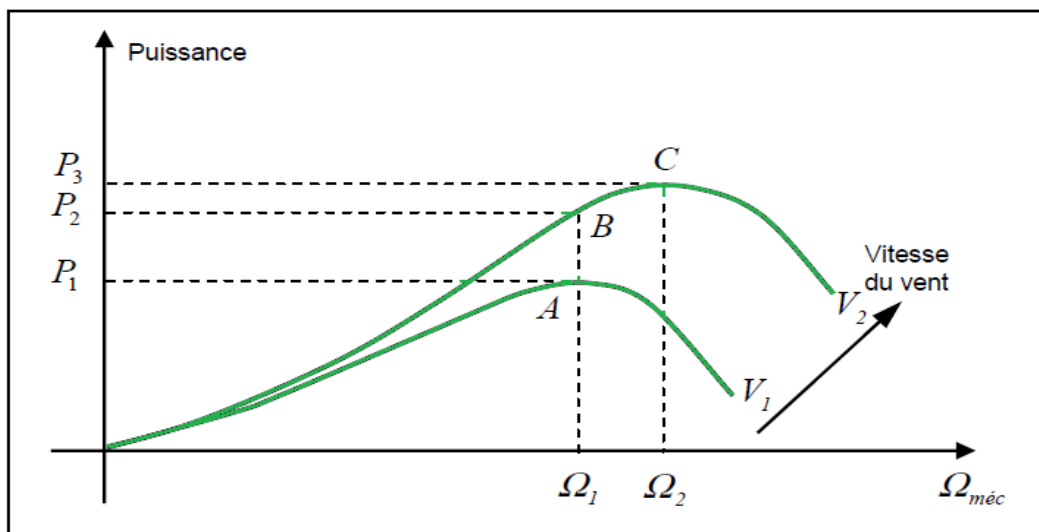


Figure I.35 : Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent.

I.4.11. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

L'objectif de cette régulation est double, d'une part de protéger l'éolienne contre le vent fort et d'autre part de délimiter la puissance. En effet, la turbine éolienne est dimensionnée pour fournir une puissance nominale P_n à une vitesse de vent nominale v_n , au-delà de cette vitesse, les paramètres de la turbine doivent évoluer afin de fournir la puissance nominale et de ne pas produire au-delà d'une vitesse maximale v_{max} qui pourrait endommager la turbine. On peut définir quatre zones de fonctionnement, figure I.36 [26], [27]:

- La zone *I* : le vent n'est pas suffisant pour faire fonctionner la turbine.
- La zone *II* : la puissance fournie par l'arbre va dépendre de la vitesse du vent.
- La zone *III* : la vitesse de rotation est maintenue constante par régulation de la vitesse et La puissance P fournie reste égale à P_n .
- La zone *IV* : la vitesse du vent est trop importante, pour ne pas détériorer le générateur éolien, les pales de la turbine sont mises en drapeaux ($\beta=90^\circ$).

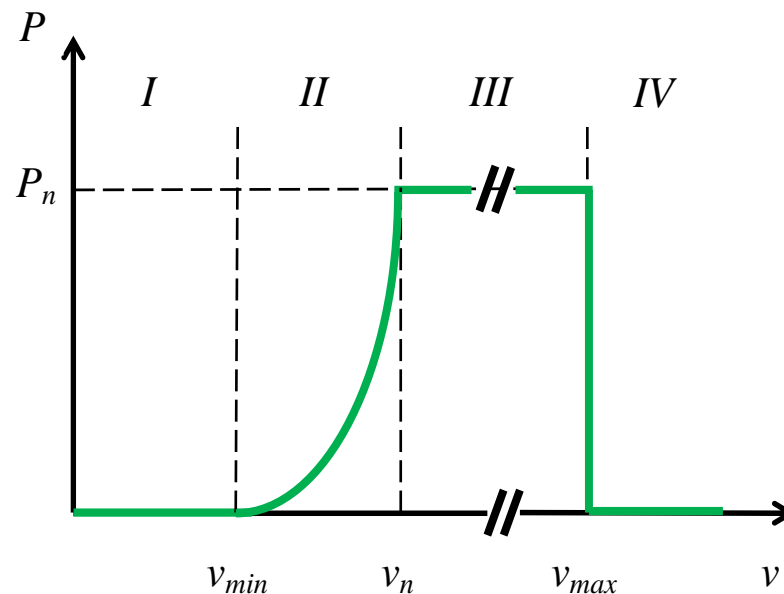


Figure I.36 : Caractéristique puissance/vitesse du vent d'une éolienne.

I.4.12. Notions théoriques sur l'éolien

I.4.12.1. L'énergie disponible dans le vent

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. En effet, si nous considérons une masse d'air, m , qui se déplace avec la vitesse v , l'énergie cinétique de cette masse est donnée par :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (\text{I.1})$$

A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air animées d'une vitesse v passant par la section S de la surface active de la voilure, la puissance P_v de la masse d'air qui traverse la surface équivalente à la surface active S de l'éolienne, figure I.37, est donnée par :

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

Avec :

S : la surface d'aire balayée par les pales (m^2);

ρ : la masse volumique de l'air, en général elle est égale 1.225 kg/m^3 à la pression atmosphérique à 15° C ;

v : vitesse du vent (m/s).

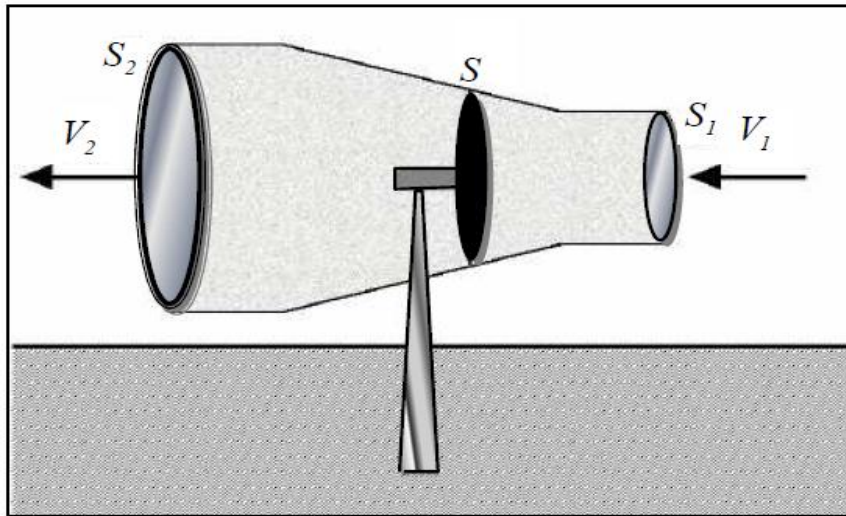


Figure I.37 : Tube de courant autour d'une éolienne.

I.4.12.2. Notions aérodynamiques « Théorie de Betz »

a) Le coefficient de puissance

La théorie globale du moteur éolien à axe horizontal a été établie par le savant Allemand Albert Betz dans les années 1920. Betz suppose que le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini en amont d'une vitesse V_1 et à l'infini en aval d'une vitesse V_2 , figure I.36.

La production d'énergie ne pouvant se faire que par la conversion de l'énergie cinétique, la vitesse V_2 est nécessairement inférieure à V_1 .

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 soit $\frac{V_1 + V_2}{2}$.

La masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est donnée par:

$$m = \frac{1}{2} \rho S (V_1 + V_2) \quad (\text{I.3})$$

La puissance P_t alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton):

$$P_t = \frac{1}{2} m (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{I.4})$$

Soit en remplaçant l'expression (I.3) dans (I.4), on obtient:

$$P_t = \frac{1}{4} \rho S (V_1 + V_2) (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{I.5})$$

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

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S V_1^3 \quad (\text{I.6})$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors:

$$\frac{P_t}{P_v} = \frac{1}{2} \left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 \right) \quad (\text{I.7})$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation (I.7), on s'aperçoit que le ratio P_t/P_v appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maxima de $16/27$ soit 0.593 . C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Dorénavant, pour alléger l'écriture, nous allons considérer que le symbole v correspond à V_1 pour la vitesse du vent.

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de l'angle de calage des pâles β [37] et la vitesse relative λ , représentant le rapport de la vitesse tangentielle de l'extrémité des pales de l'éolienne ($\Omega_t R$) sur la vitesse instantanée du vent v . [38]

Alors :

$$C_p = C_p(\lambda, \beta) \quad (\text{I.8})$$

Avec:

$$\lambda = \frac{R\Omega_t}{v} \quad (\text{I.9})$$

Où Ω_t est la vitesse mécanique de rotation de l'aérogénérateur en [rad/s], et R : le rayon de la turbine éolienne en [m].

Donc, la limite de Betz caractérise l'aptitude de l'aérogénérateur à capter de l'énergie éolienne. La puissance correspondante est donc donnée par :

$$P_t = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (\text{I.10})$$

De cette façon, la puissance maximale pouvant être recueillie par une éolienne est calculée par à la limite de Betz:

$$P_{t-\max} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_{p-\max} = 0.593 P_v \quad (\text{I.11})$$

Où $C_{p-\max}$ est le coefficient de puissance maximal.

Sous cette forme, la formule de Betz montre que l'énergie maximale susceptible d'être extraite par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59.3% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde. [39]

Ainsi, on peut définir la notion de rendement aérodynamique de l'éolienne η_a par le rapport:

$$\eta_a = \frac{C_p}{C_{p-\max}} = \frac{C_p}{0.593} \quad (\text{I.12})$$

En pratique, la valeur du maximum du coefficient de puissance approche la valeur de 0.48 avec une turbine tripale. Ce qui donne un rendement aérodynamique de 81% pour les turbines éoliennes actuelles. [40]

Le graphique de la figure 1.38 donne une vue sur les coefficients de puissance C_p habituels en fonction de la vitesse réduite pour différents types d'éoliennes. [18]

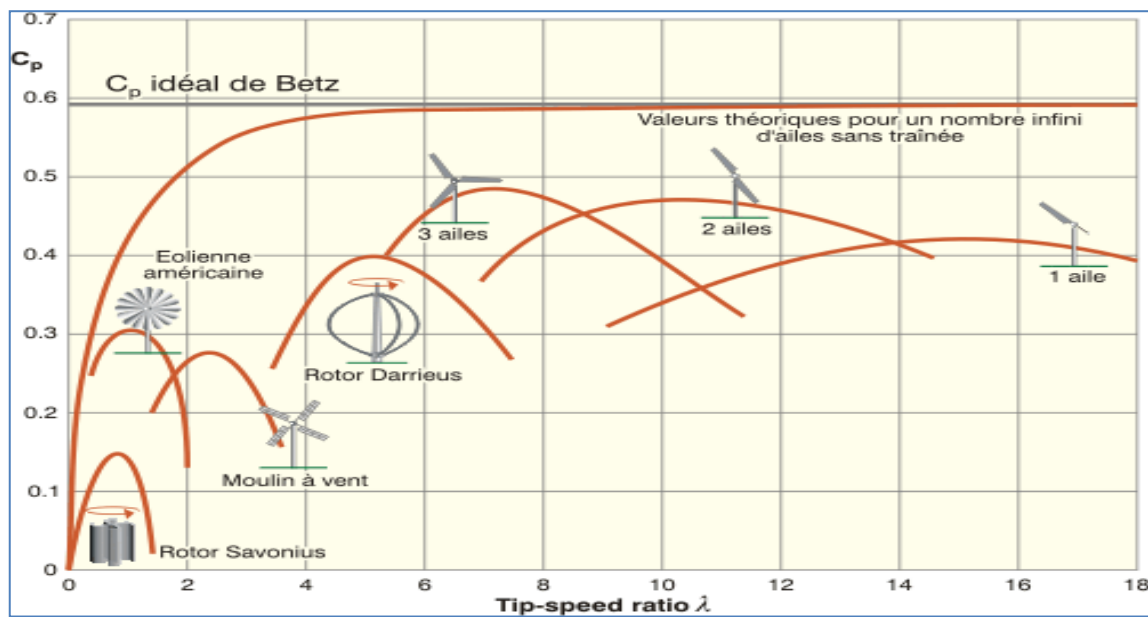


Figure I.38 : Coefficients de puissance et de couple en fonction de la vitesse normalisée λ pour différents types de turbines. [18]

b) Le coefficient du couple

Le coefficient du couple C_c est assez proche du coefficient de puissance C_p . Il est fort utile afin de calculer la valeur des couples produits pour différents points de fonctionnement notamment à vitesse de rotation Ω_t nulle. En effet, au démarrage, il y a bien un couple sur l'arbre dû à la force du vent sur les pales tandis que la puissance est nulle, ce qui correspond à

une valeur de C_p nulle pour une valeur de C_c non nulle. L'expression du couple est donc la suivante:

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{RP_t}{\lambda v} = \frac{1}{2} \frac{C_p}{\lambda} \rho \pi R^3 v^2 \quad (\text{I.13})$$

Et alors, la valeur du coefficient du couple C_c est déterminée par la formule suivante:

$$C_c = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{C_t}{\frac{1}{2} \rho \pi R^3 v^2} \quad (\text{I.14})$$

I.4.13. Les systèmes de Stockage d'énergie

Nous allons nous intéresser ici aux modes de stockage qui peuvent être associés à une éolienne. Le but est double: stocker de l'énergie électrique dans les périodes de fort vent pour pouvoir la restituer dans les périodes de vent plus faible et lisser au maximum la puissance produite par l'ensemble éolienne plus stockage. Le stockage se fait le plus souvent sous une forme autre que l'énergie électrique et demande donc des conversions énergétiques. Le rendement global du stockage est donc très variable en fonction des procédés choisis.

Il apparaît donc deux types de stockage, l'un à court terme et l'autre à long terme. Ils mettent en œuvre des méthodologies et des contrôles différents.

1.4.13.1. Stockage à court terme

Les systèmes de stockage à court terme permettent de transférer rapidement des puissances élevées sur des durées pouvant aller de la seconde à la dizaine de minutes. On trouve principalement des systèmes à stockage inertiel mais le développement récent de nouveaux composants tels que les super-capacités permet d'envisager des solutions de stockages électrochimiques.

Les systèmes inertiels sont eux aussi en grande évolution avec l'utilisation de machines rapides. Effectivement, le stockage qui s'effectuait classiquement dans de très lourds volants d'inertie tournant à 3000 tr/min accouplés à des machines classiques, s'effectue désormais à très grande vitesse avec des machines complexes comportant plusieurs rotors concentriques à des vitesses différentes.

L'alimentation se fait par de l'électronique de puissance permettant d'obtenir de plus grandes puissances et de stocker encore plus d'énergie. Il est désormais possible de stocker et restituer une puissance de plusieurs dizaines de kW pendant plus de dix minutes. Ces systèmes permettent donc de lisser la puissance fluctuante du vent.

Les super capacités ont elles aussi un grand intérêt pour le lissage des fluctuations de puissance de par leur dynamique plus rapide que celle des batteries. Leurs capacité augmente

et l'on trouve désormais des super capacités de 1800F, utilisées en association avec un convertisseur alternatif/continu permettant l'échange avec le réseau.

1.4.13.2. Stockage à long terme

Pour ce qui est des systèmes de stockage à long terme, on connaît les batteries et l'on voit se développer des systèmes complexes tels que les systèmes à air comprimé ou encore l'électrolyse associée à une pile à combustible.

Les batteries ont évolué durant cette dernière décennie et offrent désormais des capacités volumiques et massiques très importantes notamment avec les dernières générations du type lithium polymère.

Elles permettent aussi des fonctionnements en cyclage sans grande contrainte avec des chargeurs optimisant leur durée de vie.

Les systèmes à air comprimé utilisent différents procédés afin de stocker et restituer l'énergie en utilisant ou non l'énergie d'échauffement que la compression procure. De plus, un compresseur est utilisé pour le stockage et une turbine associée à une génératrice pour le déstockage.

Les systèmes utilisant un électrolyseur pour le stockage d'énergie sous forme d'hydrogène et la restitution d'énergie à raide d'une pile à combustible sont aussi à l'étude.

Pour ce qui est des systèmes à air comprimé ou électrolyse, ils sont encore en développement et le rendement global pour la restitution est relativement faible. Par contre, ils permettent d'obtenir des capacités importantes à moindre frais car le stockage se fait dans des réservoirs qui peuvent être dimensionnés en fonction de l'énergie que l'on veut stocker.

Il existe donc plusieurs solutions pour le stockage. Elles peuvent être associées afin d'obtenir une unité permettant simultanément de lisser les fluctuations de puissance (court terme) et d'atténuer les effets des périodes de faible ou forte production (long terme). En tous cas, il ne faut pas écarter un système de stockage associé à l'éolien à cause de son faible rendement global car les pertes dans les systèmes de conversion peuvent globalement ne pas être si pénalisantes si cela nous permet de maintenir constante la production en permanence.

I.4.14. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne [36]

I.4.14.1. Avantages

- l'énergie éolienne est une énergie renouvelable contrairement aux énergies fossiles.
- L'énergie éolienne est une énergie propre. Elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement comme les autres sources d'énergie qui ont causé un changement radical du climat par la production énorme et directe du CO₂.

- L'énergie éolienne ne présente aucun risque et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs contrairement à l'énergie nucléaire.
- Mode d'exploitation des éoliennes et la possibilité de les arrêter à n'importe quel moment, leur donne l'avantage d'avoir un bon rendement, contrairement aux modes de fonctionnement continus de la plupart des centrales thermiques et nucléaires.

I.4.14.2. Inconvénients

- Nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour les gérants des réseaux.
- Coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés.
- Bruit : il a nettement diminué grâce aux progrès réalisés au niveau des Multiplicateurs.

I.15. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une description générale des systèmes des énergies renouvelables. Dans ce contexte, quelques chiffres du développement de ces énergies dans le monde ont été exposés dont il a été observé que l'importance donnée à ces derniers est devenue de plus en plus considérable. Ainsi les efforts fournis par l'état algérien dans le but de développer ces sources d'énergies en particulier l'énergie éolienne.

Afin d'arriver à une meilleure compréhension du fonctionnement des turbines éoliennes, partant de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par la turbine (Loi de Betz), nous avons décrit les différents éléments constitutifs de la turbine ainsi que le mode de régulation de la vitesse de rotation d'une éolienne (vitesse fixe, vitesse variable, régulation par "pitch" et "stall").

Le stockage d'énergie permet d'obtenir un service réseau appréciable. Il y a deux types de stockage à envisager, stockage à court terme et stockage à long terme. Finalement on a terminé ce chapitre par les avantages et désavantages de l'énergie l'éolienne.

Le deuxième chapitre de nos travaux, est consacré à la modélisation de la chaîne de conversion éolienne (Turbine, MADA et Convertisseurs).

Chapitre II :

*Modélisation de la
chaîne de conversion
éolienne*

*(Turbine, MADA et
Convertisseurs)*

Chapitre II: Modélisation de la chaîne de conversion éolienne (Turbine, MADA et Convertisseurs)

II.1. Introduction

La modélisation de la chaîne de conversion éolienne est une étape primordiale dans la compréhension du système éolien. Cette étape permet de premier lieu d'abord de comprendre le comportement dynamique et l'interaction électromécanique de la machine. Avec le modèle approprié, nous pouvons nous orienter facilement n'importe quelle commande.

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement à la modélisation de la turbine éolienne. Dans un premier temps, les différentes parties constituant une éolienne seront modélisées. En deuxième étape, est consacré à l'utilisation d'une commande MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) avec et sans asservissement de vitesse dans le but de contrôler la puissance mécanique délivrée par la turbine de sorte à extraire le maximum de puissance et ce quelque soit le vent qui lui est appliqué.

Notre choix se porte sur la machine asynchrone à double alimentation car celle-ci nous permet de avoir une production optimale de puissance électrique quelque soient les conditions du vent et de vitesse à part de sa robustesse. La simplicité de conception et d'entretien de cette machine à la faveur des industries, s'accompagne toutefois d'une grande complexité physique, liée aux interactions électromagnétiques entre le stator et le rotor.

En comparaison avec la machine asynchrone à cage, la MADA permet d'avoir une plage de vitesse de rotation variant de $\pm 30\%$ autour de la vitesse de synchronisme. De plus, le contrôle des tensions rotorique nous permet de maîtriser les puissances produites tant au niveau actif que réactif, ce qui est un point très intéressant pour la gestion de l'éolienne et la participation aux services systèmes.

II.2. Description générale du système

Le dispositif, qui est étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant trois pales de longueur R , fixées sur un arbre d'entraînement qui est relié à un multiplicateur de gain G . Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique, figure II.1. Le stator de la MADA est directement raccordé au réseau électrique, tandis que son rotor est connecté au réseau mais via deux convertisseurs statiques bidirectionnels triphasés commandés en

Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI), l'un en mode onduleur (CCM), l'autre en mode redresseur (CCR), mis en cascade à travers un bus continu (DC-Bus).

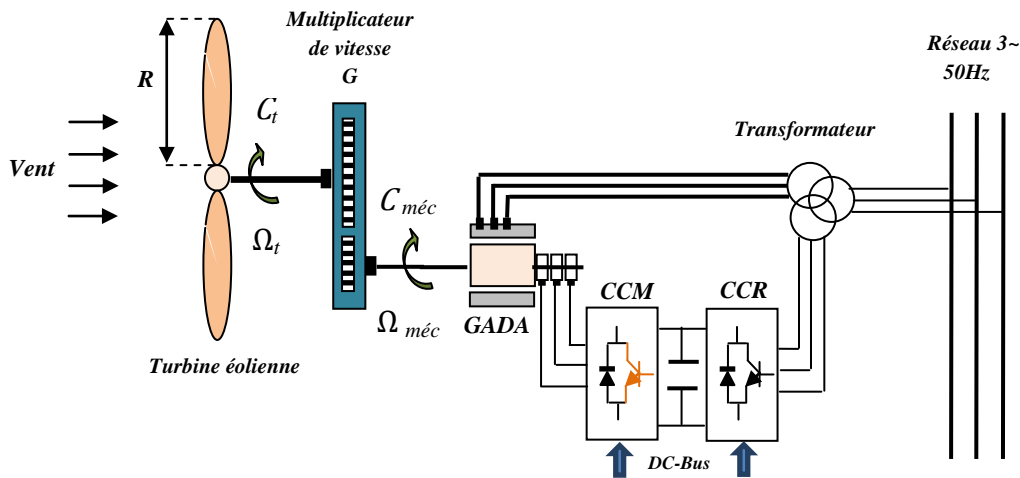


Figure II.1 : Système de conversion éolienne.

II.3. Modélisation mathématique de la turbine éolienne

II.3.1. Modèle du vent

Le vent est la source principale d'énergie pour faire fonctionner une éolienne, c'est pourquoi il est nécessaire de connaître son modèle mathématique. Celui-ci peut être très complexes qui rendent compte de sa phénoménologie turbulente.

La modélisation du vent est primordiale que ce soit pour :

- définir les conditions de fonctionnement de l'éolienne.
- définir les sollicitations qui s'appliquent sur les pales.
- évaluer le potentiel d'énergie utilisable.
- fournir une aide pour l'implantation des machines

La définition du modèle nécessite des données climatiques et géographiques du site concerné, ainsi que la période de l'an (saison) concernée par l'étude. A titre d'exemple, le modèle du vent est donné par une représentation en série de Fourier qui le présente comme un signal constitué par une superposition de plusieurs harmoniques, il est donné par l'équation suivant [41].

$$v(t) = A + \sum_{k=1}^i a_k \sin(\omega_k t) \quad (\text{II.1})$$

Avec :

A : Valeur moyenne de la vitesse du vent;

a_k : Amplitude de l'harmonique de l'ordre k ;

ω_k : Pulsation de l'harmonique de l'ordre k

i : Rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent.

Dans cette étude, nous avons représenté l'évolution de la vitesse du vent, par une fonction scalaire qui évolue dans le temps, modélisée sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques, conformément à [41] :

$$v(t) = 8.2 + 2 \sin(\omega t) - 1.75 \sin(3\omega t) + 1.5 \sin(5\omega t) - 1.25 \sin(10\omega t) + \sin(30\omega t) + 0.5 \sin(50\omega t) + 0.25(100\omega t) \quad (\text{II.2})$$

Avec :

ω : Pulsation donner par :

$$\omega = 2\pi/10 \quad (\text{II.3})$$

II.3.2. Modèle énergétique de la turbine

II.3.2.1. Hypothèses simplificatrices

Afin de modéliser la turbine, nous nous appuyerons sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, qui sont le plus couramment considérées. Ainsi nous supposerons que: [6]

- Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc la même inertie, la même élasticité et le même coefficient de frottement par rapport à l'air ;
- Les trois pales sont orientables et présentent toutes un même coefficient de frottement par rapport au support ;
- La répartition de la vitesse du vent est uniforme sur toutes les pales ;
- Le coefficient de frottement des pales par rapport à l'air est négligeable ;
- Les pertes par frottement de la turbine sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice.

II.3.2.2. Modèle d'équations

La puissance cinétique du vent à travers un disque éolien de rayon R , est donnée par l'équation suivante :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S v^3 = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 \quad (\text{II.4})$$

Avec :

- ρ : Masse volumique de l'air (celle-ci est de 1.225 Kg/m^3 en atmosphère normale) ;

- S : Surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale ;
- R : Correspond pratiquement à la longueur de la pale ;
- v : Vitesse du vent en (m/s).

Toutefois, toute l'énergie ne peut être captée, car la vitesse du vent n'est pas nulle après l'éolienne. On introduit alors un coefficient C_p appelé coefficient de performance ou de puissance, qui dépend des caractéristiques aérodynamiques des pales. Ce coefficient correspond au rendement du rotor de l'éolienne [19], [42]. La puissance sur l'arbre du rotor ou la puissance aérodynamique P_t apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit :

$$P_t = C_p P_v = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (\text{II.5})$$

Le coefficient de puissance C_p , dont le calcul est une valeur approchée de manière empirique pour une éolienne utilisant la génératrice de type MADA, est défini comme suit :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5 \left(116 \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) - 0.4\beta - 5 \right) \exp \left(-21 \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) \right) + 0.0068\lambda \quad (\text{II.6})$$

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{v} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

λ : Ratio de vitesse défini comme étant le rapport entre la vitesse linéaire des pales ($\Omega_t \cdot R$) et la vitesse du vent v .

β : Angle d'orientation des pales ;

Ω_t : Vitesse de la turbine en (rad/s).

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique (turbine) est déterminé directement par la relation suivante:

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p(\lambda, \beta) \frac{1}{\Omega_t} = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v^2 C_c(\lambda, \beta) \quad (\text{II.8})$$

Où C_c représente le coefficient du couple :

$$C_c = \frac{C_p}{\lambda} \quad (\text{II.9})$$

II.3.2.3. Modèle du multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur adapte la vitesse de rotation de la turbine (arbre lent) à la vitesse de rotation de la génératrice (arbre rapide). Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les deux équations suivantes [5] :

$$C_{méc} = \frac{C_t}{G} \quad (II.10)$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{méc}}{G} \quad (II.11)$$

Avec :

$C_{méc}$: Couple mécanique sur l'arbre de la génératrice ;

$\Omega_{méc}$: Vitesse de rotation (mécanique) de la génératrice ;

C_t : Couple de la turbine (aérodynamique) ;

Ω_t : Vitesse de la turbine ;

G : Gain du multiplicateur.

II.3.2.4. Modèle de la partie mécanique

Sur la base des hypothèses simplificatrices mentionnées dans la section (II.3.2.1), on obtient alors un modèle mécanique constitué de deux masses comme l'illustre la figure II.2, [42].

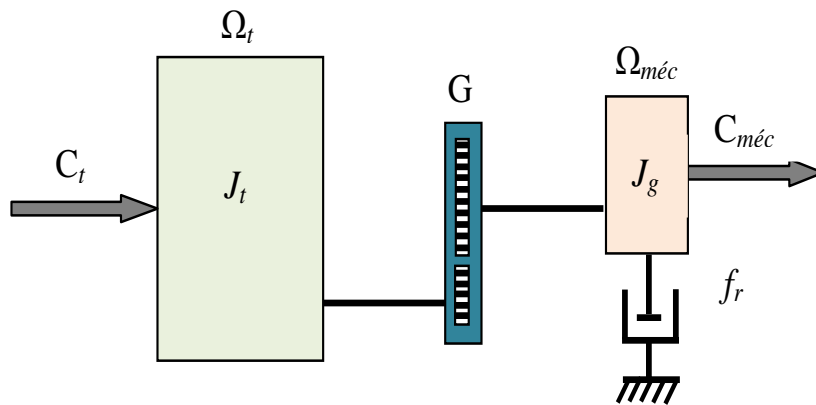


Figure II.2 : Modèle mécanique de la turbine éolienne.

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

$$J_T = \frac{J_t}{G^2} + J_g \quad (\text{II.12})$$

D'après la figure II.2, nous pouvons écrire l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique de la génératrice par :

$$J_T \frac{d\Omega_{méc}}{dt} + C_f = C_{méc} - C_{em} \quad (\text{II.13})$$

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

$$C_f = f_r \Omega_{méc} \quad (\text{II.14})$$

f_r : Coefficient dû aux frottements visqueux de la génératrice.

II.3.2.5. Schéma bloc du modèle de la turbine

Le schéma bloc de la figure II.3 correspond aux modélisations aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne. Ce schéma bloc montre que la vitesse de rotation $\Omega_{méc}$ de la génératrice, 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.

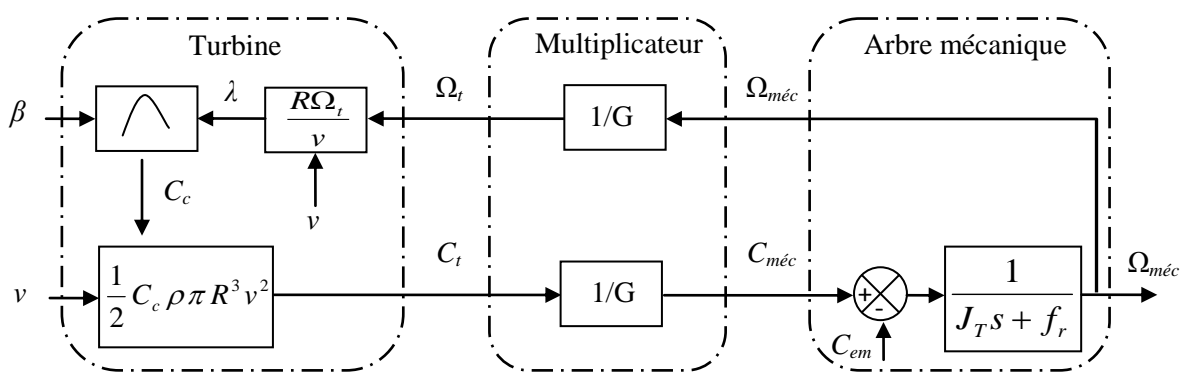


Figure II.3 : Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne.

II.3.2.6. Résultats de la simulation obtenus

Les caractéristiques de C_p et de C_c en fonction de λ pour différentes valeurs de l'angle de calage β sont illustrées respectivement sur les figures II.4 et II.5.

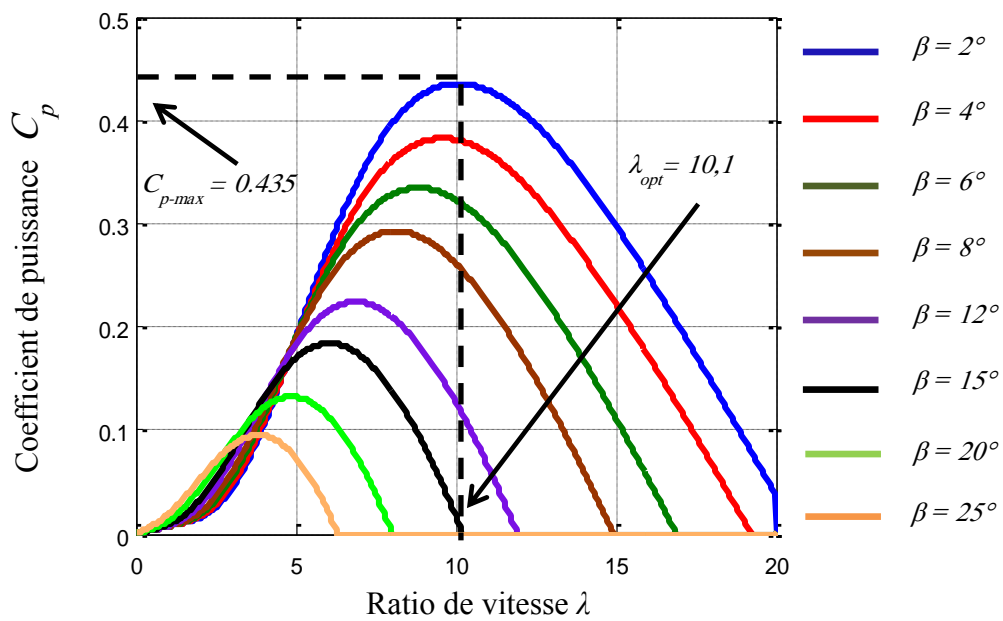


Figure II.4 : Coefficient de puissance C_p en fonction de λ et β .

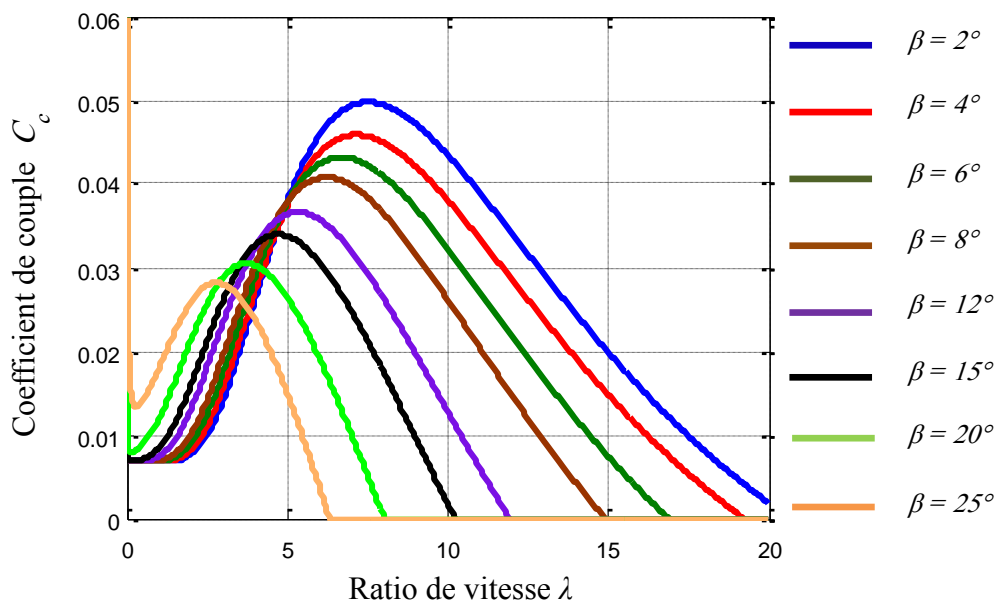


Figure II.5 : Coefficient de couple C_c en fonction de λ et β .

D'après la figure II.4, on constate que pour la valeur maximale de C_p ($C_{p-max} = 0.435$) est atteinte pour un angle de calage ($\beta = 2^\circ$) et ($\lambda = 10.1$). Cette valeur particulière de λ est définie comme la valeur optimale λ_{opt} .

Et pour la figure II.5, on remarque que le coefficient C_c s'exprime, comme le coefficient C_p , en fonction du ratio de vitesse λ pour différentes valeurs de l'angle de calage β .

Les figures II.6 et II.7 présentent respectivement les réponses de la puissance et le couple de la turbine de 10kW en fonction de la vitesse de rotation de la génératrice pour les différentes vitesses du vent.

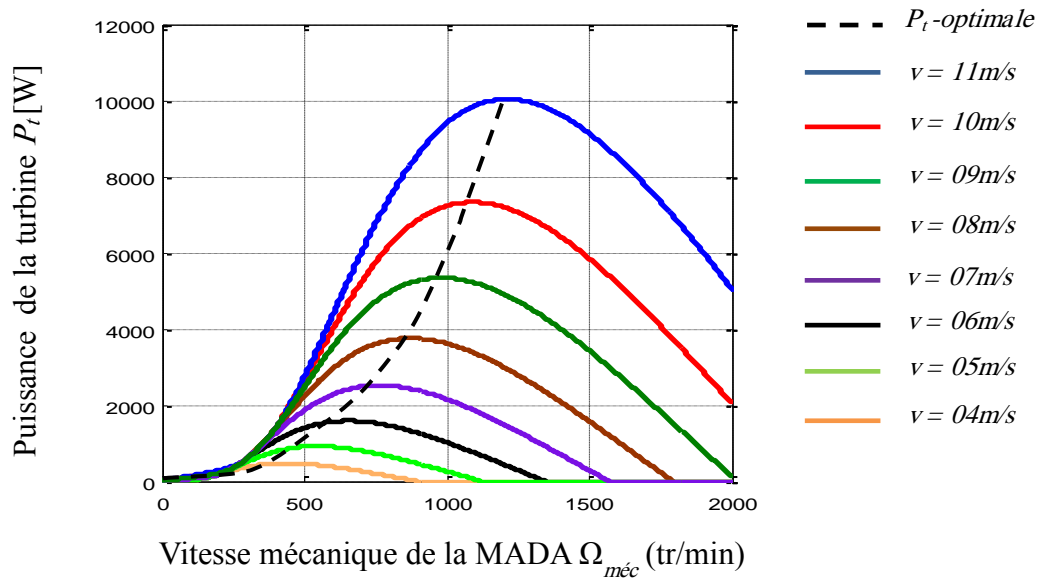


Figure II.6 : Puissance de la turbine en fonction de la vitesse de rotation.

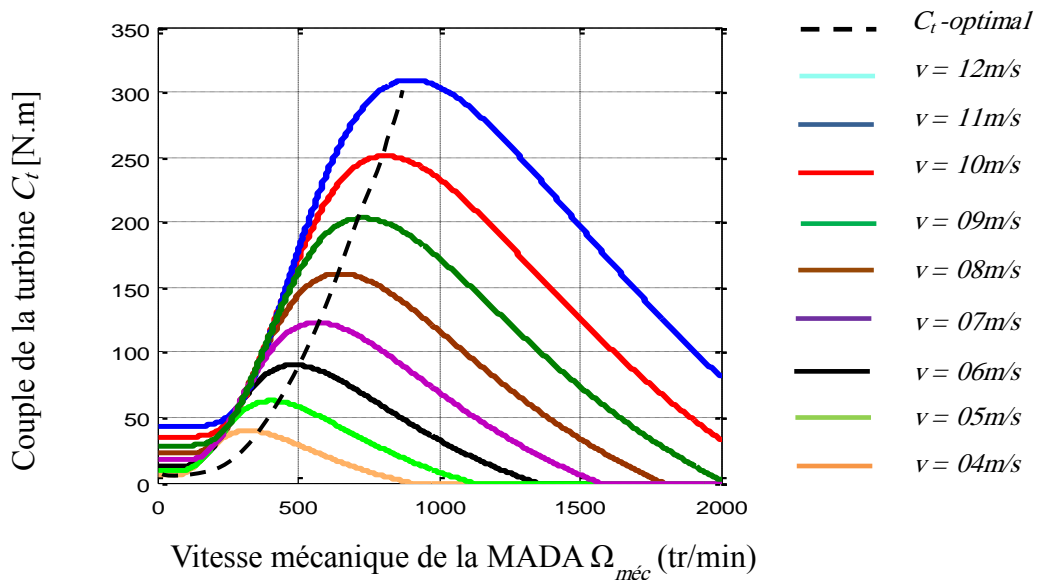


Figure II.7: Couple de la turbine en fonction de la vitesse de rotation.

Les résultats de simulations obtenus par les figures II.6 et II.7 montrent clairement l'intérêt du fonctionnement à vitesse variable d'un aérogénérateur. Il permet en effet par un réglage adapté de maximiser la puissance (couple) de la turbine pour chaque valeur de la vitesse du vent donnée, on parlant donc de l'MPPT.

II.4. Stratégie de commande de la turbine éolienne

Le système de contrôle le plus répandu des éoliennes traditionnelles directement connectées au réseau électrique de distribution, est basé principalement sur la technique d'extraction du maximum de puissance (MPPT), et ce sans supervision centralisée. Celles-ci doivent se déconnecter du réseau électrique lorsqu'un défaut survient sur ce dernier. Par conséquent, elles n'offrent aucune capacité de réglage quant à leur production et ne peuvent en aucun cas contribuer aux services système [5].

Nous constatons dans le schéma bloc de la figure II.3 que la vitesse de la turbine peut être contrôlée par action sur deux entrées: l'angle de calage des pales β et le couple électromagnétique de la génératrice C_{em} .

Il est donc nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser la puissance électrique générée (donc le couple) en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quelque soit la vitesse du vent considérée comme une entrée perturbatrice, à ce système de nature très fluctuante.

Nous pouvons envisager deux types de stratégie, nous présenterons différentes stratégies pour contrôler le couple électromagnétique (et indirectement la puissance électromagnétique convertie) afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée nous utilisons une loi de contrôle de vitesse ou une loi de contrôle du couple. Si on utilise une loi de contrôle du couple, l'angle de calage reste fixe, on parle alors de contrôle indirect de la vitesse. Ce principe est connu sous la terminologie (MPPT). Par contre, si nous utilisons une loi de contrôle de vitesse, une action sur l'angle de calage permet de limiter cette puissance et nous parlons alors d'un contrôle direct de la vitesse. Donc on peut distinguer deux modes de contrôle : [42]

- le contrôle sans asservissement de vitesse mécanique;
- le contrôle avec asservissement de vitesse mécanique.

Pour l'étude de ces deux modes de contrôle, on supposera que la génératrice (MADA) et ces convertisseurs sont idéaux, i.e., quelle que soit la puissance mécanique transmise par la turbine, le couple mécanique sur l'arbre de la génératrice $C_{méc}$ est donc à tout instant égal à sa valeur de référence imposée par la commande ($C_{méc}=C_t^*$). Ainsi, le générateur et ces convertisseurs seront modélisés par un gain unitaire.

II.4.1. Contrôle sans asservissement de vitesse mécanique

Ce mode de contrôle repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent devant les constantes de temps électriques du système éolien, ce qui implique que le couple d'accélération de la turbine peut être considéré comme nul. Dans ce cas, à partir de l'équation (II.13), nous pouvons écrire : [5]

$$J_T \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = C_{méc} - C_{em} - C_f = 0 \quad (II.15)$$

De plus, si l'on néglige l'effet du couple dû aux frottements visqueux ($C_f = f_r \Omega_{méc} = 0$) par rapport au couple mécanique C_{em} , on peut alors écrire :

$$C_{méc} = C_{em} \quad (II.16)$$

Une estimation de la vitesse de rotation de la turbine, notée $\hat{\Omega}_t$, est obtenue à partir de la mesure de la vitesse de rotation de la MADA :

$$\hat{\Omega}_t = \frac{\Omega_{méc}}{G} \quad (II.17)$$

Une mesure précise de la vitesse du vent étant difficile, une estimation de celle-ci, notée \hat{v} , est obtenue à partir de l'estimation de la vitesse de rotation de la turbine :

$$\hat{v} = \frac{\hat{\Omega}_t R}{\lambda_{opt}} \quad (II.18)$$

Le couple de la turbine éolienne peut ensuite être obtenu à partir des estimations de la vitesse du vent et de la vitesse de rotation de la turbine. Il peut s'exprimer par :

$$\hat{C}_t = \frac{1}{2} C_{c-max} \rho \pi R^3 \hat{v}^2 \quad (II.19)$$

Remplaçant maintenant (II.18) dans (II.19), le couple de la turbine de référence s'exprime donc par :

$$\hat{C}_t^* = \frac{1}{2 \lambda_{opt}^2} C_{c-max} \rho \pi R^5 \hat{\Omega}_t^2 \quad (II.20)$$

Le couple électromagnétique de référence est alors obtenu à partir de l'estimation du couple de la turbine éolienne :

$$\hat{C}_{em}^* = \hat{C}_{méc}^* = \frac{\hat{C}_t^*}{G} = \frac{1}{2 G \lambda_{opt}^2} C_{c-max} \rho \pi R^5 \hat{\Omega}_t^2 \quad (II.21)$$

Le schéma bloc de la figure II.8 résume le principe de la stratégie du contrôle MPPT de la turbine éolienne sans asservissement de la vitesse de rotation.

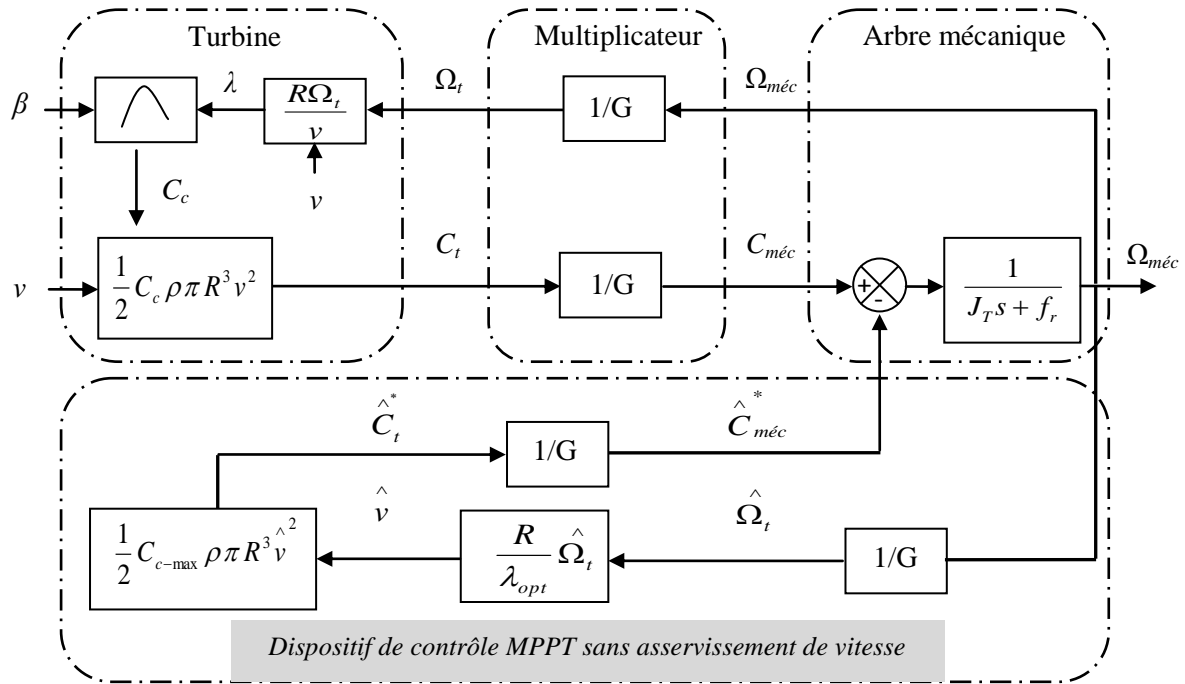


Figure II.8: Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation.

II.4.2. Contrôle avec asservissement de vitesse mécanique

Cette stratégie de contrôle consiste à régler le couple électromagnétique de la génératrice de manière à fixer la vitesse de rotation mécanique à une vitesse de référence permettant d'extraire le maximum de puissance de la turbine. Donc nous devons prendre en compte le gain du multiplicateur.

Pour une vitesse du vent fixe donnée, on souhaite que la puissance mécanique soit maximale, ce qui correspond à la valeur maximale du coefficient C_p (C_{p-max}). Celle-ci est obtenue si la vitesse relative λ est égale à sa valeur optimale λ_{opt} (pour β constant et égal à 2°).

La vitesse mécanique de référence de la MADA est obtenue à partir de l'équation suivante :

$$\Omega_{méc}^* = G \Omega_t^* \quad (II.22)$$

Avec :

$$\Omega_t^* = \frac{\lambda_{opt} v}{R} \quad (II.23)$$

Le couple électromagnétique de référence $C_{méc}^*$ permettant d'obtenir une vitesse mécanique de la génératrice égale à la vitesse de référence $\Omega_{méc}^*$ est obtenu par une relation inverse indirecte :

$$C_{méc}^* = R(\Omega_{méc}^*)(\Omega_{méc}^* - \Omega_{méc}) \quad (II.24)$$

Avec : $R(\Omega_{méc}^*)$: C'est le régulateur de vitesse (PI), (voir annexe A).

Le schéma de principe du contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique de rotation est montré à la figure II.9.

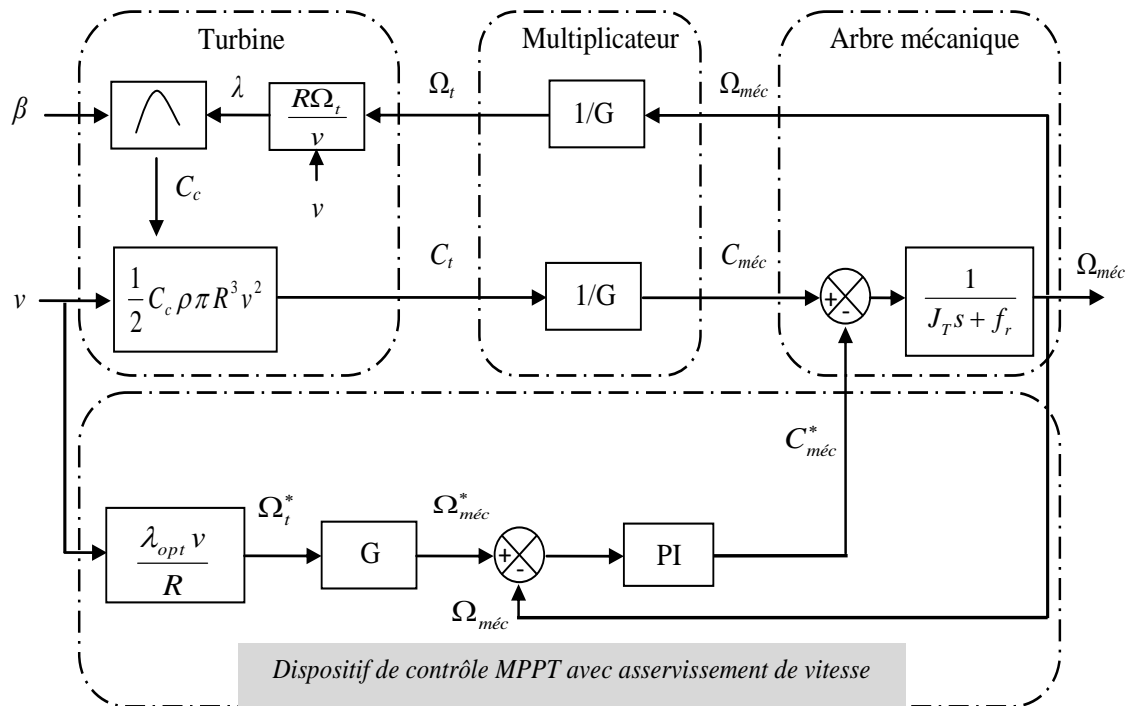


Figure II.9: Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation.

II.4.3. Résultats obtenus du contrôle MPPT

Les deux structures de commande MPPT étudiées précédemment ont été simulées par le logiciel Matlab/SimulinkTM, en considérant un profil du vent illustré par la figure II.10.

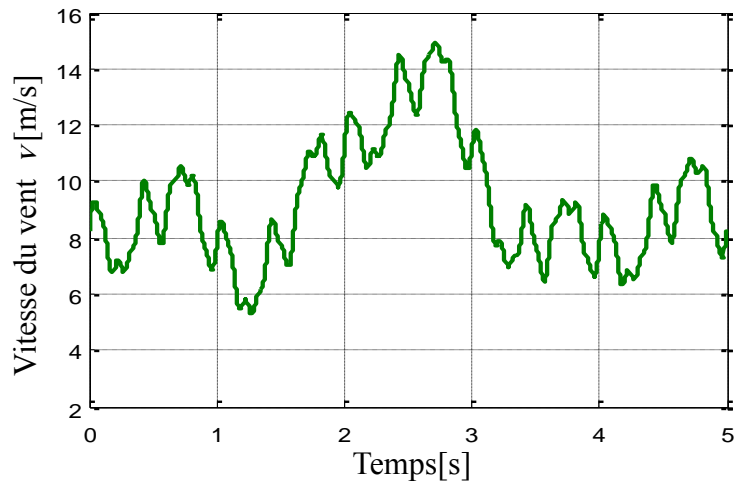
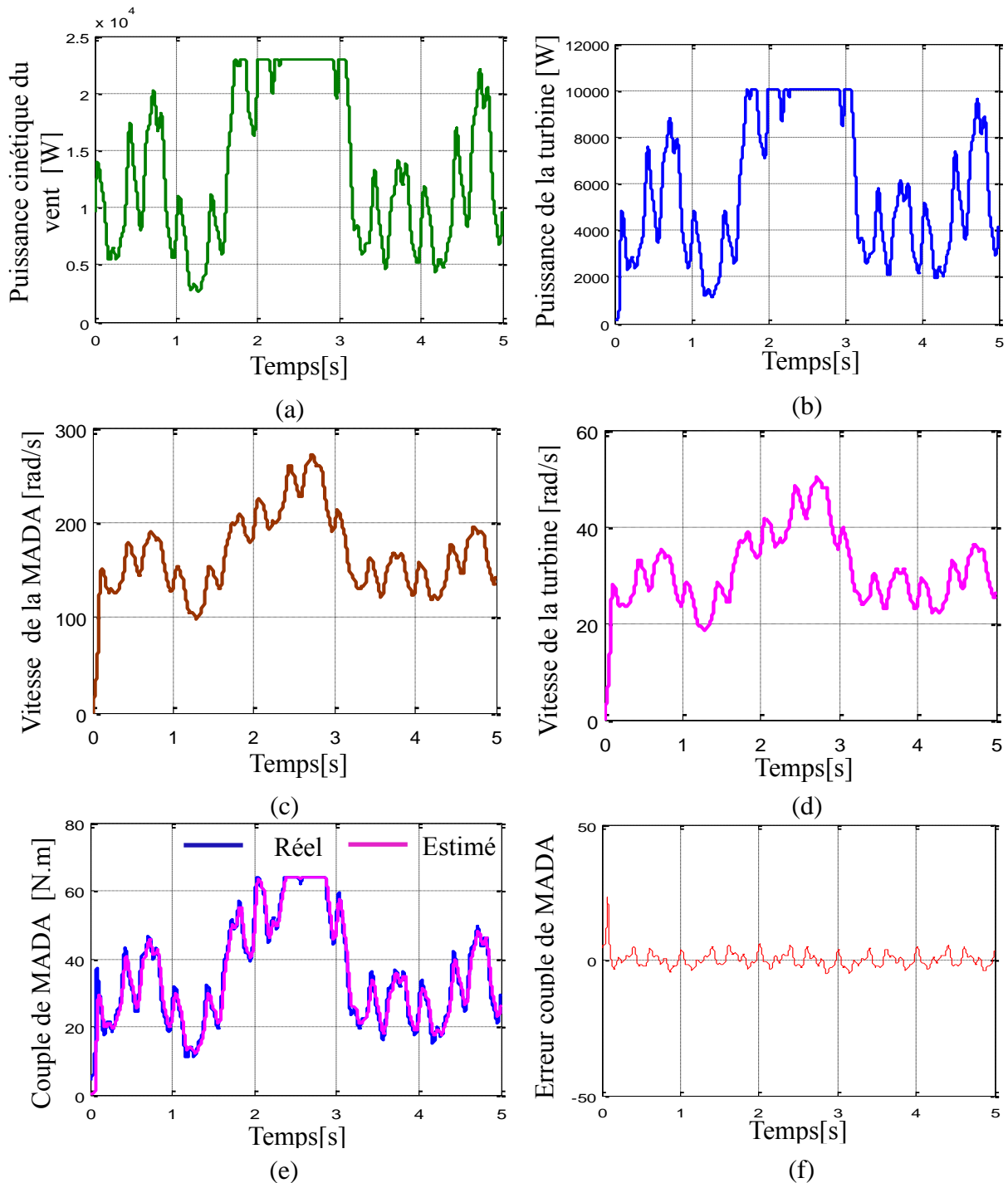


Figure II.10 : Profil du vent appliqué au système étudié.

II.4.3.1. MPPT sans asservissement de vitesse mécanique

La figure II.11 présente les réponses de la stratégie de commande MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique de la génératrice. Les figures II.11-(a-b-c-d-e-f-g-h-i-j) montrent respectivement : la puissance cinétique du vent P_v , la puissance de la turbine (aérodynamique) maximale extractible du vent P_t , la vitesse mécanique de la génératrice $\Omega_{méc}$, la vitesse mécanique de la turbine éolienne Ω_t , le couple électromagnétique réel $C_{méc}$ et estimé de référence de la MADA, l'erreur au niveau du couple, le coefficient de puissance C_p , le coefficient de couple C_c , la ratio de vitesse (vitesse relative) λ ainsi que l'angle de calage β .



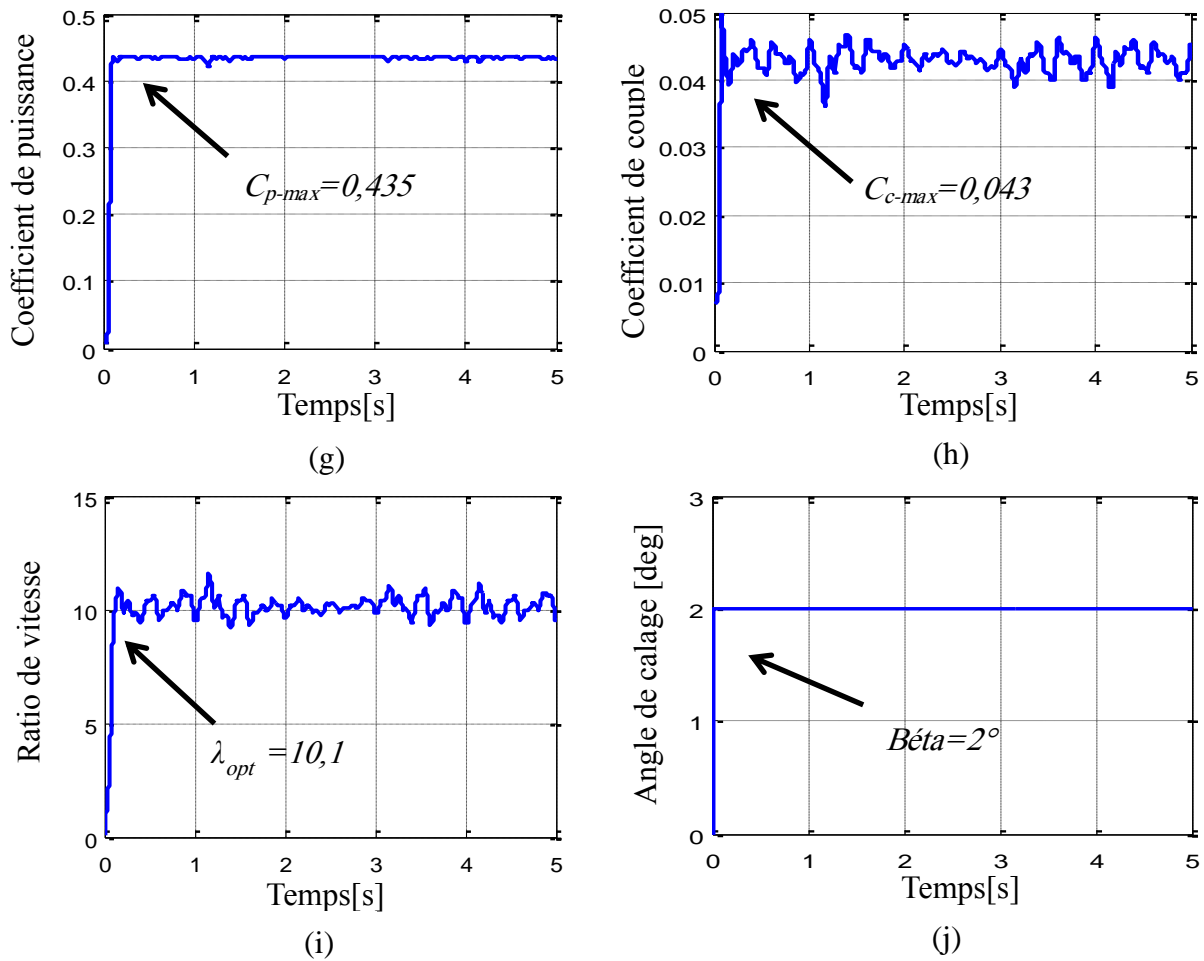


Figure II.11 : Réponses du système sans asservissement de vitesse mécanique.

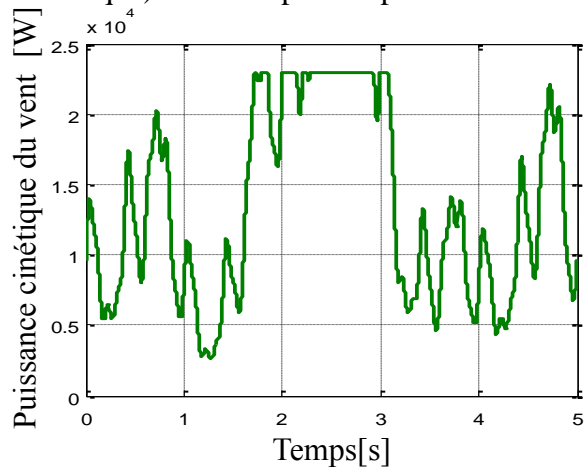
Les résultats de simulation relatifs à cette structure montrent que les variations de la vitesse mécanique (couple) de la génératrice sont adaptées à la variation de celle du vent mais avec une dynamique lente.

II.4.3.2. MPPT avec asservissement de vitesse mécanique

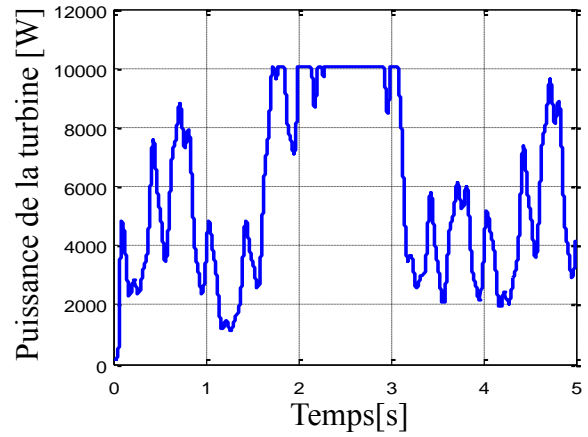
Dans cet algorithme, l'asservissement de vitesse est réalisé à l'aide d'un régulateur classique de type Proportionnel-Intégrateur PI.

La puissance cinétique du vent P_v , la puissance de la turbine (aérodynamique) maximale extractible du vent P_t , le couple de la turbine C_t , le couple mécanique de la génératrice $C_{méc}$, la vitesse mécanique de la génératrice $\Omega_{méc}$ ainsi que sa référence $\Omega_{méc}^*$, l'erreur au niveau de la vitesse, la vitesse mécanique de la turbine éolienne Ω_t , le coefficient de puissance C_p , le coefficient de couple C_c , la ratio de vitesse λ ainsi que l'angle de calage β . sont montrés respectivement sur les figures II.12-(a-b-c-d-e-f-g-h-i-j).

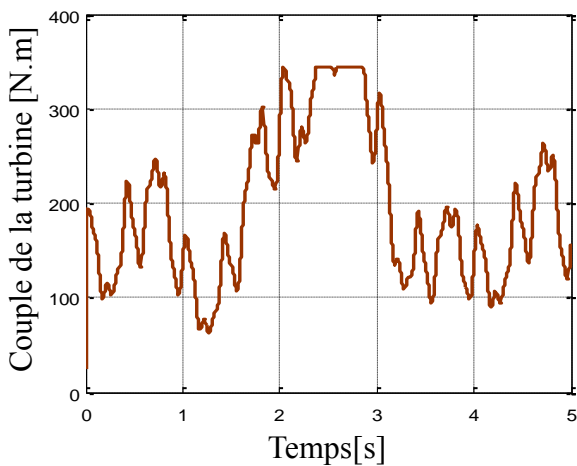
Les résultats obtenus par cette technique de commande montrent les meilleures performances statiques et dynamiques, meilleure poursuite de la consigne contrôlée (vitesse mécanique) et un temps de réponse souhaitable offerts par le régulateur PI.



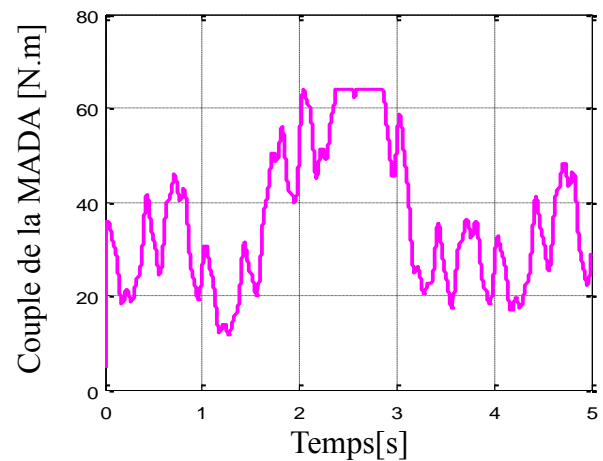
(a)



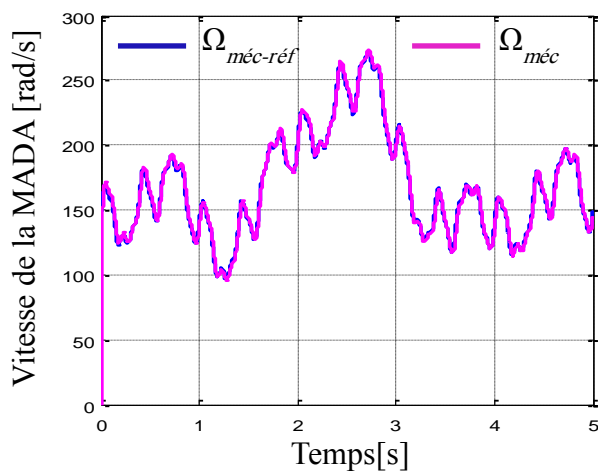
(b)



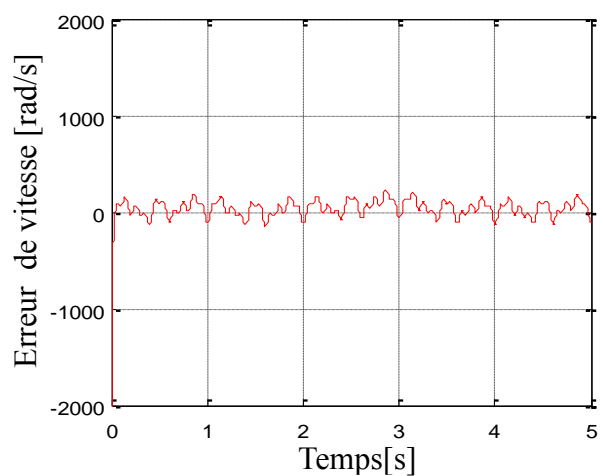
(c)



(d)



(e)



(f)

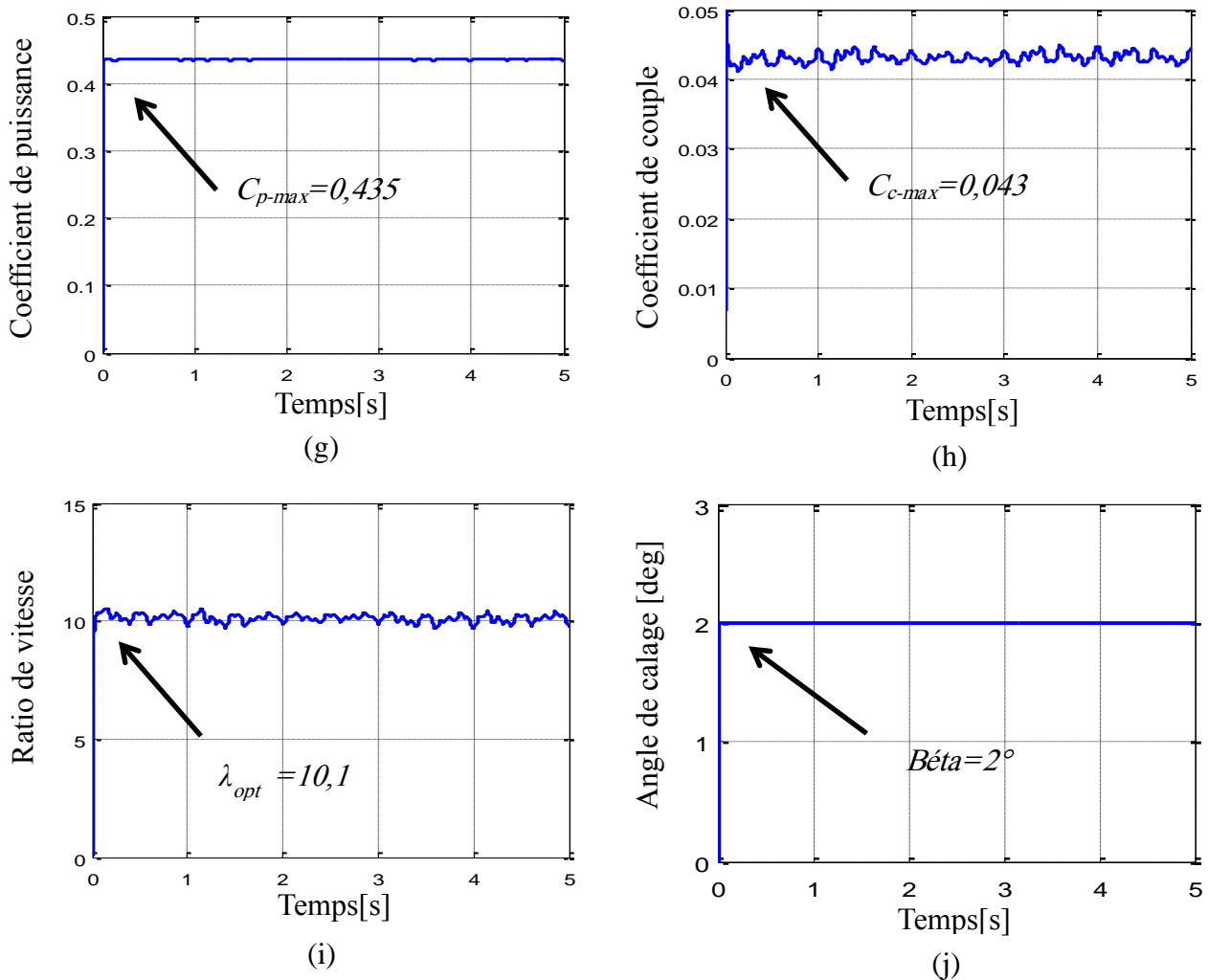


Figure II.12 : Réponses du système avec asservissement de vitesse mécanique.

En fin, on peut dire que les deux techniques de commande MPPT sans et avec asservissement de vitesse mécanique de la machine sont adaptées à la variation de la vitesse du vent, ce qui justifie le choix de cette méthode pour le contrôle des aérogénérateurs.

II.5. Généralités sur les machines asynchrones à double alimentation

II.5.1 Définition

La *Machine Asynchrone à Double Alimentation-MADA* en anglo-saxon « *Doubly Fed Induction Machine- DFIM* » est une machine triphasée à courant alternatif. Elle se compose comme une machine asynchrone ou d'une machine synchrone d'un primaire dit stator qui est fixe, et d'un secondaire qui est le rotor de forme cylindrique qui est mobile. Le stator comporte trois enroulements ; couplés en étoile ou en triangle ; qui sont alimentés par un

système triphasé de tension. Le rotor qui est constitué comme le stator, comporte un bobinage triphasé avec un même nombre de pôles, couplé en étoile et les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants (balais bagues collectrices) permettant d'avoir accès aux tensions et courants du rotor, figure II.13. Ce type de machine nécessite une seule source d'alimentation pour alimenter les deux côtés de la machine et ceci constitue un avantage principal surtout dans les domaines d'application à vitesse variable, où le glissement de la machine à double alimentation peut être contrôlé par l'association des convertisseurs de puissance du côté statorique ou rotorique ou bien des deux à la fois. Ceci dépend essentiellement du facteur technico-économique de construction. Cette machine peut fonctionner en moteur ou génératrice. Dans le cas d'une génératrice son fonctionnement permet une production d'électricité à vitesse variable. Elle donne l'occasion, alors, de mieux contrôler les ressources éoliennes pour différentes conditions de vent.

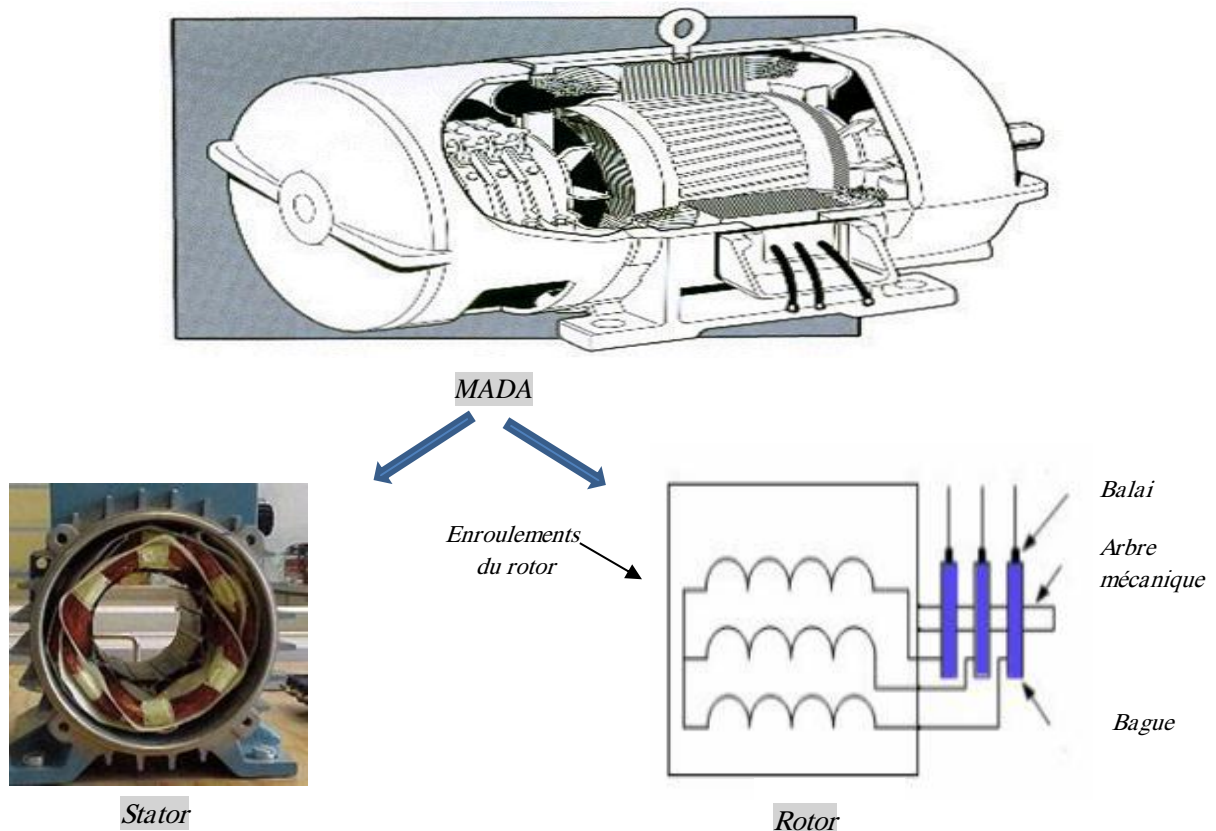


Figure II.13 : Structure de la MADA (stator et des contacts rotorique).

II.5.2 Principe de fonctionnement

Pour expliquer son principe de fonctionnement, on néglige toutes les pertes. En prenant en compte cette hypothèse, la puissance P_s est fournie au stator et traverse l'entrefer : une partie de cette puissance fournie, $(1 - g)P_s$, est retrouvée sous forme de puissance mécanique ; le reste, gP_s sort par les balais sous forme de grandeurs alternatives de fréquence gf_s . Ces

grandeurs, de fréquence variable, sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique, auquel est renvoyée, par l'intermédiaire du deuxième convertisseur. Ce réseau reçoit donc $(1 + g)P_s$ [42]. Les bobinages du rotor sont donc accessibles grâce à un système de balais et de collecteurs. Une fois connecté au réseau, un flux magnétique tournant à vitesse fixe apparaît au stator. Ce flux dépend de la réluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage et donc du courant statorique. Lors de la rotation, le flux magnétique généré par le stator crée des forces électromotrices (f.e.m) dans les enroulements rotoriques.

Le rapport entre les f.e.ms créées au rotor et au stator est défini par [43] :

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{N_r}{N_s} \cdot \frac{\omega_s - p \cdot \Omega_{méc}}{\omega_s} = m \cdot \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = m \frac{\omega_{sr}}{\omega_s} \quad (\text{II.25})$$

Avec :

N_r et N_s : représentent respectivement le nombre de spires des bobinages rotorique et statorique ;

ω_s , ω_r et ω_{sr} représentent respectivement les pulsations statorique et rotorique et de glissement.

p : est le nombre de paires de pôles ;

m : est le rapport de transformation rotor/stator ;

La relation qui relie la fréquence du stator et celle du rotor, est donnée par :

$$f_s = f_r + f_{sr} \quad (\text{II.26})$$

Avec :

f_s , f_r et f_{sr} sont la fréquence du stator (réseau), du rotor et de glissement respectivement.

En définissant le glissement par :

$$g = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (\text{II.27})$$

L'équation (II.25) devient alors :

$$\frac{E_r}{E_s} = m \cdot g \quad (\text{II.28})$$

Les courants au stator et au rotor sont alors liés comme dans un transformateur parfait :

$$\frac{I_r}{I_s} = \frac{1}{m} \quad (\text{II.29})$$

Donc, le rapport entre les puissances apparentes rotorique S_r et statorique S_s s'exprime par :

$$\frac{S_r}{S_s} = \frac{I_r}{I_s} \cdot \frac{E_r}{E_s} = g \quad (\text{II.30})$$

La pulsation au stator (imposée par le réseau) étant supposée constante, il est donc possible de contrôler la vitesse de la MADA en agissant sur la puissance apparente rotorique via le glissement g .

II.5.3 Application des machines asynchrones à double alimentation

La première application importante de la MADA est le fonctionnement moteur sur une grande plage de variation de la vitesse. Dans les machines synchrones classiques et asynchrones à cage d'écurie, la vitesse de rotation est directement dépendante de la fréquence des courants des bobinages statorique. La solution classique permettant alors le fonctionnement à vitesse variable consiste à faire varier la fréquence d'alimentation de la machine. Ceci est généralement réalisé par l'intermédiaire d'un redresseur puis d'un onduleur commandé. Ces deux convertisseurs sont alors dimensionnés pour faire transiter la puissance nominale de la machine. L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille de ces convertisseurs d'environ 70 % en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotorique [43]. Ce dispositif est par conséquent économique et, contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur.

La même philosophie peut être appliquée au fonctionnement en génératrice dans lequel l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée :

- Génération des réseaux de bord des navires ou des avions. [44]
- Centrales hydrauliques à débit et vitesse variable.
- Eoliennes ou turbines marémotrices à vitesse variable.
- Groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.

II.5.4. Modes de Fonctionnement de la MADA

La MADA est parfaitement commandable si toutefois le flux des puissances est bien contrôlé dans les enroulements du rotor. Puisque la MADA peut fonctionner en moteur comme générateur aux vitesses hypo-synchrones et hyper-synchrones, il y a à distinguer quatre modes opérationnels caractéristiques de la machine. Le principe de la commande de la MADA en ces modes peut être compris à travers la figure II.14. Dans cette dernière, P_s , P_r et P_m désignent respectivement les puissances du stator, du rotor et mécanique. Lorsque la machine fonctionne en moteur, 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, c'est la cascade hypo-synchrone (*quadrant 1*).

En mode moteur hyper-synchrone (*quadrant 2*), une partie de la puissance absorbée par le réseau va au rotor et est convertie en puissance mécanique.

En fonctionnement génératrice, le comportement est similaire, la puissance fournie à la machine par le dispositif qui l'entraîne est une puissance mécanique. En mode hypo-synchrone (*quadrant 3*), une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor. En mode hyper-synchrone (*quadrant 4*), la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à $g.P_m$ est transmise par l'intermédiaire du rotor.

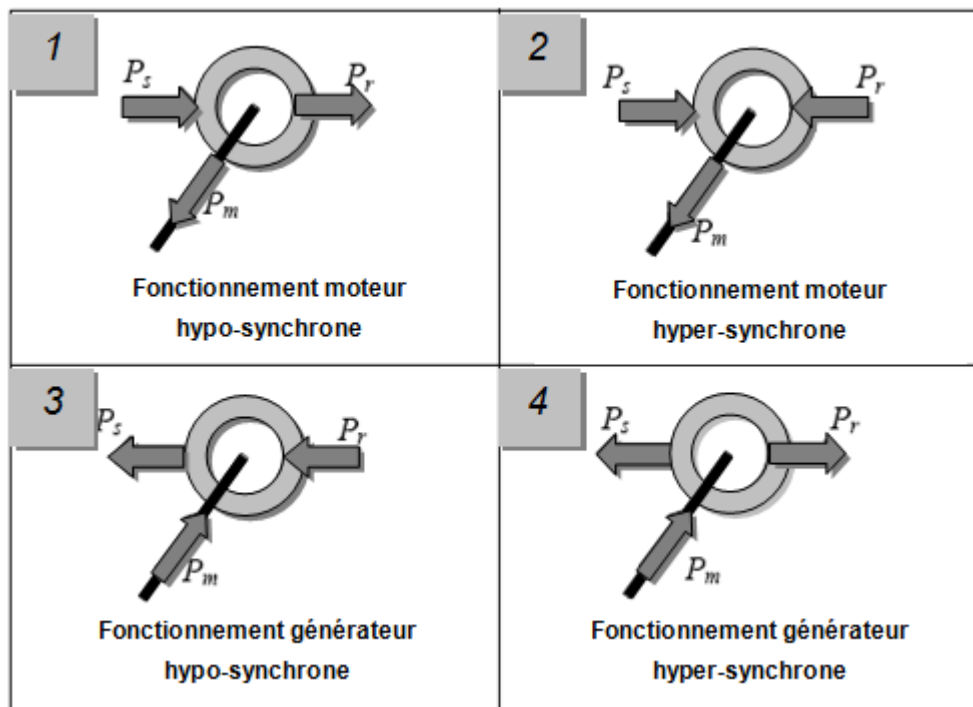


Figure II.14 : Modes de fonctionnement de la MADA.

Pour une utilisation dans un système éolien, les quadrants 3 et 4 sont intéressants. En effet si la plage de variation de vitesse ne dépasse pas $\pm 30\%$ de la vitesse de synchronisme (ce qui représente un compromis entre la taille du convertisseur et la plage de variation de vitesse), la machine est capable de débiter une puissance allant de 0,7 à 1,3 fois la puissance nominale. Le convertisseur est alors dimensionné pour faire transiter uniquement la puissance de glissement c'est à dire au maximum 0,3 fois la puissance nominale de la machine. Il est alors moins volumineux, moins coûteux, nécessite un système de refroidissement moins lourd. [19]

II.5.5. Différentes configurations d'un système éolien à base d'une MADA

Au lieu de dissiper la puissance disponible au rotor par effet Joule, on peut récupérer cette puissance en la renvoyant sur le réseau électrique. Ceci améliore le rendement du système. Dans le passé, on utilisait à cet effet des machines tournantes à courant continu ou alternatif (montages Kramer, Sherbius,..., etc). De nos jours, on utilise, pour cette récupération, un système statique de conversion d'énergie constitué de convertisseurs de puissance ainsi qu'un transformateur. Le convertisseur est dimensionné pour transiter seulement la puissance rotorique, (soit environ 30% de la puissance nominale) pour obtenir un glissement maximal et donc la puissance statorique nominale. C'est un compromis qui mène à une meilleure capture de l'énergie éolienne et à une faible fluctuation de la puissance du côté réseau.

Il faut noter que tous les éléments du circuit de récupération (courants du circuit rotorique) ne sont dimensionnés que pour $g.P_s$, donc, pour une puissance d'autant plus faible que le glissement maximum désiré est plus faible. Ce procédé est intéressant quand on peut se contenter d'une variation de vitesse réduite.

II.5.5.1. MADA avec pont à diodes et pont à thyristors

Cette structure, appelée montage Kramer, utilise un pont à diodes et un pont à thyristors, figure II.15. [46]

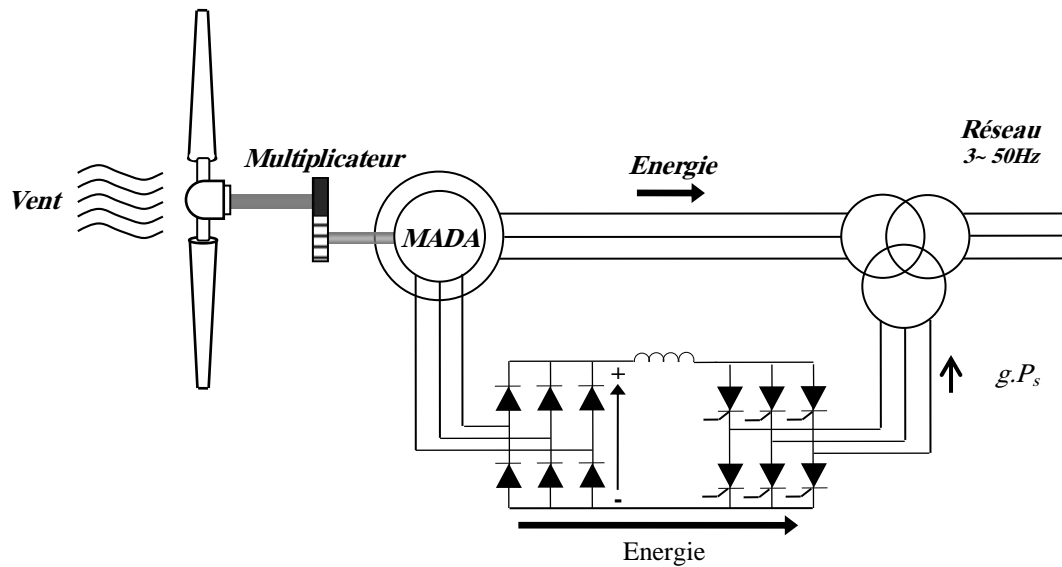


Figure II.15 : MADA avec pont à diodes et pont à thyristors.

Les tensions entre les bagues sont redressées par le pont à diodes. L'onduleur à thyristors applique à ce redresseur une tension qui varie par action sur l'angle d'amorçage des thyristors. Ce dispositif permet de faire varier la plage de conduction des diodes, de rendre variable la puissance extraite du circuit rotorique et donc le glissement de la génératrice asynchrone. Le principal avantage est que l'onduleur est assez classique, et moins coûteux, puisqu'il s'agit d'un onduleur non autonome dont les commutations sont assurées par le réseau.

Cette structure ne permet cependant pas l'asservissement électrique de la vitesse de la MADA. De plus, l'onduleur utilisé injecte des courants harmoniques basses fréquences d'amplitude importante. Cette injection d'harmoniques multiples de 50 Hz est préjudiciable aux appareillages électriques raccordés sur le réseau. D'autres structures sont alors privilégiées.

II.5.5.2. MADA avec pont à diodes et pont à transistors

Dans cette structure, on remplace les onduleurs à commutation naturelle à base de thyristors par des onduleurs à commutations forcées et à MLI, constitués de transistors de puissance. Ce type d'onduleur fonctionnant à fréquence de découpage élevée, n'injecte pratiquement pas de courants harmoniques en basses fréquences.

II.5.5.3. MADA avec cycloconvertisseur

Cette structure, connue sous le nom de topologie statique Scherbius [19], structure autorise un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, figure II.16. Cette structure est utilisée pour des valeurs de fréquence rotorique largement inférieures à celles du réseau autrement dit pour des glissements très faibles. Elle permet l'utilisation de thyristors qui sont intéressants d'un point de vue coût.

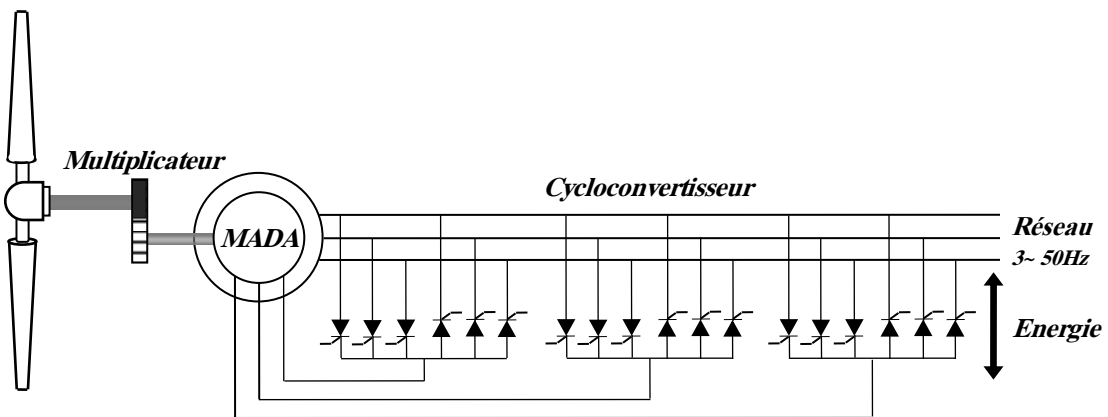


Figure II.16 : MADA avec cycloconvertisseur.

II.5.5.4. MADA avec convertisseurs MLI

Cette structure utilise deux onduleurs de tension en cascade, équipés d'IGBT et connectés au travers d'un bus continu, figure II.17 [46]. Les onduleurs sont commandés en MLI. Ce choix permet d'agir sur deux degrés de liberté pour chaque convertisseur : un contrôle du flux et de la vitesse de la MADA du côté de la machine et un contrôle des puissances active et réactive transitées du côté du réseau. Les avantages de cette cascade de convertisseurs sont les suivants :

- Le flux d'énergie entre le rotor et le réseau est bidirectionnel. Les limites de ce flux reposent sur la marge de variation de la vitesse de rotation. Celle-ci est imposée par les limites électriques et mécaniques du système ;
- Le fonctionnement autour de la vitesse de synchronisme est adéquat ;
- Il y a une faible distorsion des tensions et courants rotorique ainsi que les courants statorique ;

Cette structure de conversion offre un contrôle de quatre grandeurs, à savoir le flux et la vitesse de la génératrice et les flux des puissances transitées au réseau. Cette configuration

permet une variation de 100% de la vitesse en utilisant des pâles orientables. Les convertisseurs ne sont dimensionnés que pour seulement 30% de la puissance nominale de la génératrice donc les pertes dans ces derniers sont peu importantes. Cette structure est par conséquent la plus intéressante en termes de coût et de performances.

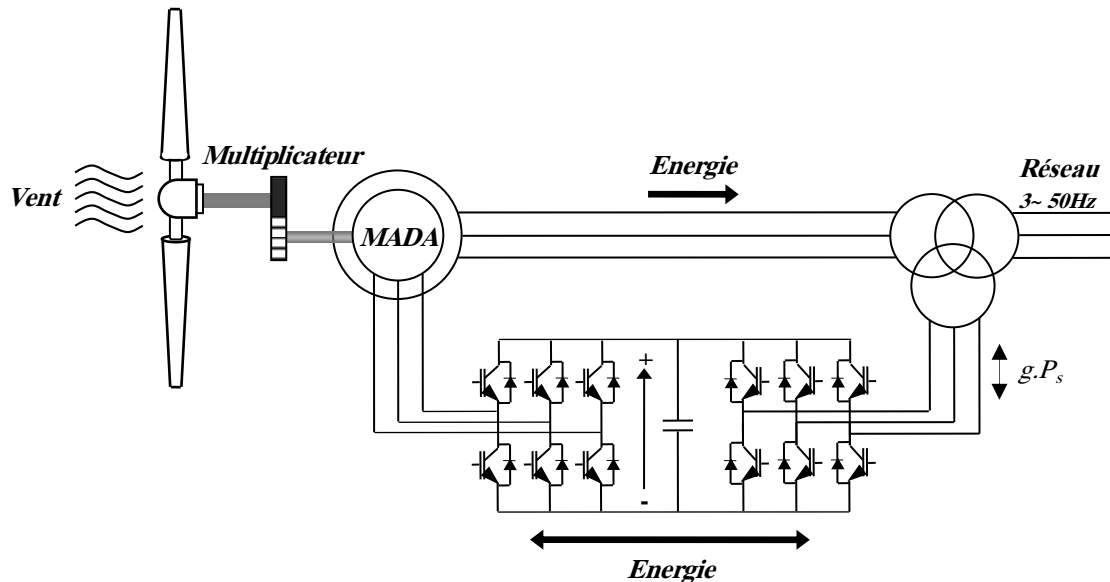


Figure II.17 : MADA avec convertisseurs MLI.

II.5.6. Intérêt de la MADA

L'intérêt porté à la MADA ne cesse de croître surtout dans le domaine des énergies renouvelables. En effet, dans le domaine éolien, la MADA présente bien des avantages : le convertisseur lié à l'armature rotorique est dimensionné au tiers de la puissance nominale du rotor, les pertes dans les semi-conducteurs sont faibles, ...etc. Pour des applications moteur, la machine asynchrone à cage occupe certes la première place, néanmoins la MADA alimentée par deux convertisseurs présente, notamment pour des applications de grandes puissances, de bonnes performances : fonctionnement en survitesse (jusqu'à deux fois la vitesse nominale) sans démagnétisation, bonnes performances à très basse vitesse pour un fonctionnement sans capteur de vitesse,...etc. Par ailleurs, la MADA grâce à sa double alimentation offre plusieurs possibilités de reconfiguration du mode de fonctionnement de la machine. [47]

Dans ce contexte il est clair que la MADA réunit les avantages de la machine asynchrone en plus les avantages envisagé grâce à sa double alimentation, mais comme toutes les machines électrique, la MADA a également des inconvénients.

II.5.7. Avantages et inconvénients de la MADA

II.5.7.1. Avantages

- L'accès au rotor offre la possibilité de contrôler les grandeurs électrique du rotor (courant et tension), ce qui donne une grande flexibilité au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse de synchronisme.
- La configuration dont les deux convertisseurs alimentant la machine permettent de fonctionner en régime dégradé (l'un des deux onduleurs tombe en panne).
- En fonctionnement moteur, la solution avec deux convertisseurs alimentant la machine nous permet d'assurer un partage du courant magnétique entre les deux armatures ainsi que la puissance mécanique fournie a la charge.
- La double alimentation permet de réduire les dimensions des convertisseurs statiques, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement.
- Transfère bidirectionnel de la puissance rotorique.
- Le fonctionnement en hypo ou hyper synchronisme offre une large plage de variation de la vitesse. [5]
- La MADA réunit les avantages de la machine synchrone et la machine asynchrone, à savoir : [45]
- Fonctionnement à vitesse de rotation variable ;
- Régulation découplée des puissances actives et réactives ;

II.5.7.2. Inconvénients

- Machine plus volumineuse que celle de la machine asynchrone classique, généralement elle est plus longue à cause des balais ; [50]
- Utilisation d'un nombre de convertisseurs statiques plus que celle de la machine classique ;
- Le cout total de la machine est plus important par rapport aux autres machines électriques.

II.5.8. Modélisation de la MADA

La modélisation de la machine électrique est une étape primordiale de son développement. Les progrès de l'informatique et du génie des logiciels permettent de réaliser des modélisations performantes et d'envisager l'optimisation des machines électriques.

Cette partie sera l'objectif d'une étude de modélisation de la machine asynchrone à double alimentation dans le référentiel lié au champ tournant. Ce dernier nous a permis d'obtenir un modèle mathématique adapté au réglage découplé des puissances active et réactive au niveau du stator de la MADA.

Pour obtenir le modèle d'un système, trois tâches doivent être accomplies :

- Choisir le modèle.
- Déterminer ses paramètres.
- Et en fin vérifier sa validité.

II.5.8.1. Hypothèses simplificatrices

A cause de la répartition des enroulements de la MADA et la géométrie propre complexe et afin de faciliter les difficultés, on prend quelques hypothèses simplificatrices avancées habituellement pour modéliser les machines électriques en vue de leur commande en général.

Pour notre étude, nous considérons les hypothèses simplificatrices suivantes :

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligeable ;
- La force magnétomotrice à une répartition spatiale sinusoïdale ;
- La machine à une construction symétrique ;
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables ;
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau.
- Pas de régime homopolaire puisque le neutre n'est pas connecté.

II.5.8.2. Modèle mathématique de la MADA

II.5.8.2.1. Equations dans le repère triphasé (a,b,c)

La représentation schématique d'une machine triphasée asynchrone à double alimentation dans le repère triphasé est donnée par la figure II.18.

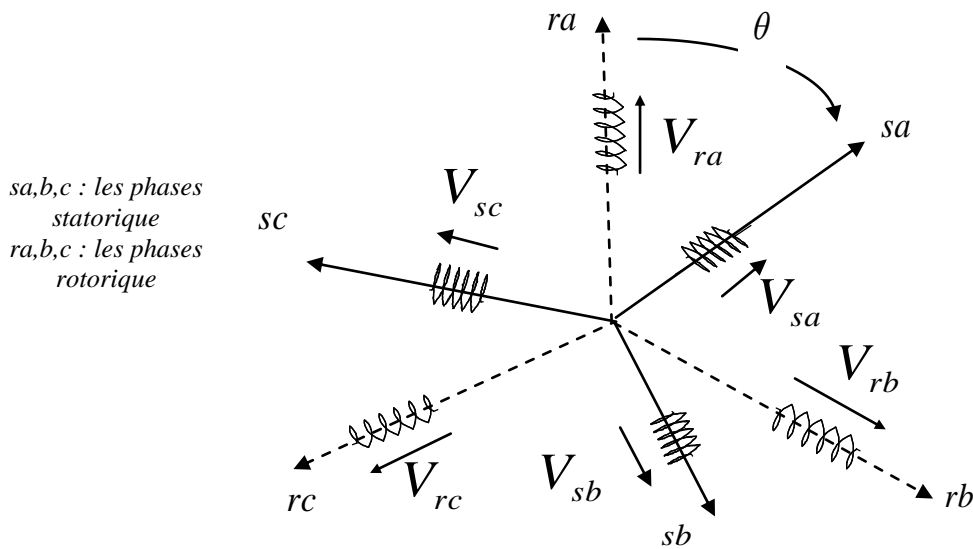


Figure II.18 : Schéma des enroulements de la MADA.

Avec :

$\theta = \frac{2\pi}{3}$: est l'angle définit la position du rotor par rapport au stator.

Les équations générales de la machine asynchrone à double alimentation dans un repère triphasé s'écrivent :

a)- Equations électriques

En tenant compte des hypothèses mentionnées précédemment les équations électriques des tensions statorique et rotorique de la MADA s'écrivent, dans un repère triphasé, de la manière suivante (Loi de Faraday) :

$$\begin{cases} V_{sa} = R_s I_{sa} + \frac{d\varphi_{sa}}{dt} \\ V_{sb} = R_s I_{sb} + \frac{d\varphi_{sb}}{dt} \\ V_{sc} = R_s I_{sc} + \frac{d\varphi_{sc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II-31})$$

$$\begin{cases} V_{ra} = R_r I_{ra} + \frac{d\varphi_{ra}}{dt} \\ V_{rb} = R_r I_{rb} + \frac{d\varphi_{rb}}{dt} \\ V_{rc} = R_r I_{rc} + \frac{d\varphi_{rc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II-32})$$

Avec :

$V_{sa,b,c}$ et $V_{ra,b,c}$: les tensions statorique et rotorique de la machine ;

$I_{sa,b,c}$ et $I_{ra,b,c}$: les courants statorique et rotorique de la machine ;

$\varphi_{sa,b,c}$ et $\varphi_{ra,b,c}$: les flux statorique et rotorique de la machine ;

R_s et R_r : les résistances des enroulements statorique et rotorique de la machine.

b)- Equations magnétiques

Les équations magnétiques sous forme matricielle sont données par les expressions suivantes :

$$\begin{bmatrix} \varphi_s \\ \varphi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M] \\ [M] & [L_r] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} \quad (\text{II-33})$$

Avec :

$$[\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} ; [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} ; [I_s] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{ab} \\ I_{ac} \end{bmatrix} ; [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{ab} \\ I_{rc} \end{bmatrix}$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} ; [L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

$$[M] = [M_{rs}]^t = [M_{sr}] = m \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + 2\Pi/3) & \cos(\theta - 2\Pi/3) \\ \cos(\theta - 2\Pi/3) & \cos \theta & \cos(\theta + 2\Pi/3) \\ \cos(\theta + 2\Pi/3) & \cos(\theta - 2\Pi/3) & \cos \theta \end{bmatrix}$$

Avec:

L_s et L_r : les inductances cycliques statorique et rotorique de la machine ;

M_s et M_r : les inductances mutuelles entre deux phases statorique et entre deux phases rotoriques de la machine ;

M : l'inductance magnétisante (L 'inductance mutuelle cyclique entre le stator et le rotor) ;

m : la valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et une phase du rotor ;

M_{sr} et M_{rs} : les inductances mutuelles entre deux phases statorique-rotorique, et entre deux phases rotorique-statorique de la MADA, respectivement ;

l_s et l_r : Les inductances propres statorique et rotorique.

On a :

$$\left\{ \begin{array}{l} L_s = l_s - M_s \\ L_r = l_r - m_r \\ M = \frac{3}{2}m \end{array} \right. \quad (\text{II.34})$$

Les équations précédentes font apparaître des difficultés pour la résolution analytique du fait que les termes trigonométriques de la matrice des inductances varient en fonction de la position. Cela conduit à l'usage de la transformation de Park, qui permettra de rendre ces termes indépendants de la position.

II.5.8.2.2. Equations dans le repère de Park (d,q,o)

La transformation de Park a pour but de traiter une large gamme de machines de façon unifiée en le ramenant à un modèle unique, Cette conversion est appelée souvent transformation des axes, fait correspondant aux deux enroulements de la machine originale suivie d'une rotation, les enroulements équivalents du point de vue électrique et magnétique. Cette transformation ainsi, pour l'objectif de rendre les inductances mutuelles du modèle indépendantes de l'angle de rotation. La transformation de Park consiste à imaginer de remplacer le repère rotorique tournant par un autre repère fictif équivalent fixe à condition de conserver la force magnétomotrice et la puissance instantanée.

a)- Matrice de Park

L'application de la transformation de Park, s'avère nécessaire, cette transformation appliquée aux : courants, tensions, et flux permet d'obtenir des équations différentielles à coefficients constants. [42]

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} = P(\theta) \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.35})$$

Avec :

x : Peut-être la tension, le courant ou le flux ;

d,q,o : L'axe direct , quadrature et homopolaire.

$P(\theta)$ la matrice de transformation directe de Park donnée par :

$$P(\theta) = 2/3 \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.36})$$

Ou :

θ : représente l'angle de transformation qui dépend du repère choisi et des grandeurs statorique ou rotorique. Pour le repère (dq), on prend la valeur θ_s pour les grandeurs statorique et la valeur (θ_r) pour les grandeurs rotorique.

La transformation de Park inverse est définie par l'expression suivante :

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = P(\theta)^{-1} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} \quad (\text{II.37})$$

Avec : $P(\theta)^{-1}$ la matrice de transformation inverse de Park donnée par:

$$P(\theta)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & 1 \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & 1 \end{bmatrix}. \quad (\text{II.38})$$

La composante homopolaire (o) dans un système équilibré est nulle.

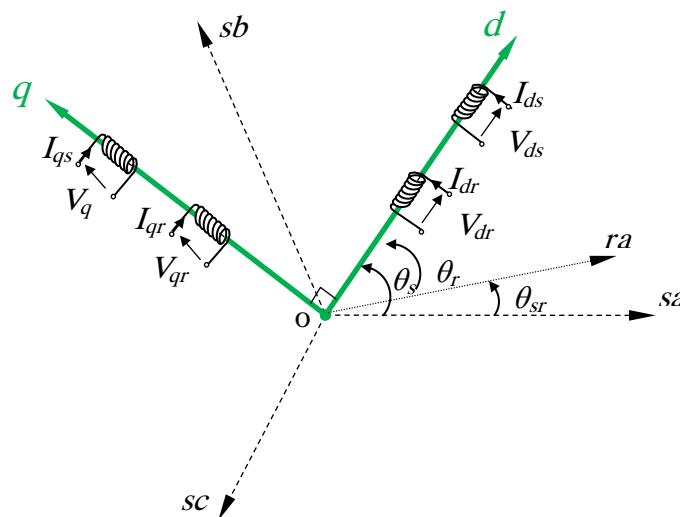


Figure II.19 : Référentiel tournant d'axes (d-q).

b)- Choix de référentiel

Trois types de référentiels peuvent être envisagés à savoir :

- Référentiel lié au *stator* ($\theta=0$) : Ce référentiel est très souvent utilisé dans l'étude des observateurs.
- Référentiel lié au *rotor* ($\theta=\theta_r$) : Ce choix est très utilisé dans l'étude des régimes transitoires.
- Référentiel lié au **champ tournant statorique** ($\theta=\theta_s$) : Ce choix s'adapte parfaitement à la commande vectorielle par orientation du flux statorique (permet d'avoir un découplage parfait entre les puissances active et réactive statorique).

c)- L'application de la transformation de Park

La transformation de Park du système d'équations (II.31) et (II.32), nous donne après tout calcul fait le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.39})$$

Avec:

$$\begin{cases} \theta = \theta_s \Rightarrow \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s & : \text{Pour les grandeurs statorique.} \\ \theta = \theta_s - \theta_r \Rightarrow \frac{d\theta}{dt} = \frac{d(\theta_s - \theta_r)}{dt} = \omega_s - \omega_r & : \text{Pour les grandeurs rotorique.} \end{cases}$$

D'où : ω_s , ω_r et ω_{sr} représentent respectivement : les vitesses de pulsation statorique, rotorique et de glissement de la MADA.

Le système d'équation (II.39) représente le modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère (d, q) lié au champ tournant.

On applique la transformation de Park pour établir les relations entre les flux et les courants d'axes (d,q,o) on obtient :

Au stator :

$$\begin{cases} [\varphi_{dqos}] = [P(\theta)] \cdot [l_s] \cdot [I_s] + [M] \cdot [I_r] \\ [\varphi_{dqos}] = [P(\theta)] \cdot [l_s] \cdot [P(\theta)]^{-1} [I_{dqos}] + [P(\theta)] \cdot [M] \cdot [P(\theta)]^{-1} [I_{dgor}] \end{cases} \quad (\text{II.40})$$

Au rotor :

$$\begin{cases} [\varphi_{dgor}] = [P(\theta)] \cdot [l_r] \cdot [I_r] + [M] \cdot [I_s] \\ [\varphi_{dgor}] = [P(\theta)] \cdot [l_r] \cdot [P(\theta)]^{-1} [I_{dgor}] + [P(\theta)] \cdot [M] \cdot [P(\theta)]^{-1} [I_{dqos}] \end{cases} \quad (\text{II.41})$$

Après les équations (II.40) et (II.41) on obtient le système matriciel suivant :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \\ \varphi_{os} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \\ \varphi_{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s - M_s & 0 & 0 & 3/2(m) & 0 & 0 \\ 0 & l_s - M_s & 0 & 0 & 3/2(m) & 0 \\ 0 & 0 & l + 2M_s & 0 & 0 & 0 \\ 3/2(m) & 0 & 0 & l_r - M_r & 0 & 0 \\ 0 & 3/2(m) & 0 & 0 & l_r - M_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & l_r + 2M_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{os} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \\ I_{or} \end{bmatrix} \quad (\text{II.42})$$

Si on élimine la composante homopolaire du système (II.43) on obtient :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.43})$$

d)- Expressions des puissances

Les expressions des puissances active et réactive statorique sont données par :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} \cdot I_{ds} + V_{qs} \cdot I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} \cdot I_{ds} - V_{ds} \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.44})$$

e)- Expression du couple

A partir de la relation de la puissance active suivant :

$$P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \quad (\text{II.45})$$

En remplace les tensions par leurs valeurs on obtient :

$$\begin{aligned} P_s &= R_s I_{ds}^2 + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} I_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} I_{ds} + R_s I_{qs}^2 + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} I_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} I_{qs} \\ \Rightarrow P_s &= R_s (I_{ds}^2 + I_{qs}^2) + \left(\frac{d\varphi_{ds}}{dt} I_{ds} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} I_{qs} \right) + \omega_s (\varphi_{ds} I_{qs} - \varphi_{qs} I_{ds}) \\ \Rightarrow P_s &= P_j + P_r + P_{em} \end{aligned} \quad (\text{II.46})$$

$$\begin{cases} P_J = R_s (I_{ds}^2 + I_{qs}^2) \\ P_r = \frac{d\varphi_{ds}}{dt} I_{ds} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} I_{qs} \\ P_{em} = \omega_s (\varphi_{ds} I_{qs} - \varphi_{qs} I_{ds}) \end{cases} \quad (\text{II.47})$$

Avec :

P_J : Pertes joule statorique ;

P_r : Pertes rotorique ;

P_{em} : Puissance électromagnétique.

A partir de la relation qui donne l'énergie électromagnétique en fonction du couple :

$$P_{em} = \omega_s C_{em} \quad (\text{II.48})$$

En distingue l'expression du couple :

$$C_{em} = p (\varphi_{ds} I_{qs} - \varphi_{qs} I_{ds}) \quad (\text{II.49})$$

D'après l'équation (II.44) nous avons :

$$\begin{cases} I_{dr} = \frac{1}{L_r} \varphi_{dr} - \frac{M}{L_r} I_{ds} \\ I_{qr} = \frac{1}{L_r} \varphi_{qr} - \frac{M}{L_r} I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.50})$$

On remplace l'équation (II.50) dans l'expression du flux statorique dans l'équation (II.43) et finalement on remplace les tous dans l'expression du couple électromagnétique (II.49) :

$$C_{em} = p \cdot \frac{M}{L_s} \cdot (I_{dr} \varphi_{qs} - I_{qr} \varphi_{ds}) \quad (\text{II.51})$$

II.5.9. Alimentation de la machine

Le développement de l'électronique de puissance a permis la variation de la vitesse, grâce à la réalisation d'une source d'alimentation réglable en fréquence et en valeur efficace. Pour cela on utilise les onduleurs, ceux sont des convertisseurs statiques assurant la conversion continue alternative, on distingue deux types d'onduleur : [48]

- Les onduleurs de tensions ;
- Les onduleurs de courants.

Les premiers sont alimentés par une source de tension continue, et alimentant un récepteur de courant alternatif (exemple MADA), cas de notre étude. Les secondes, par une source de courant continu. L'onduleur sont largement utilisés dans plusieurs applications industrielles (variation de vitesse des moteurs électrique à courant alternatif, chauffage par induction, alimentation sans coupure). [48]

L'alimentation de la machine au niveau rotorique est constituée de deux étages qui sont connectés l'un à l'autre par un circuit intermédiaire constitué d'un condensateur (*DC-Bus*), le premier étage est un redresseur (Convertisseur Côté Réseau-CCR) qui contrôle la tension (bus continu) et la puissance réactive échangée entre le rotor et le réseau et le deuxième étage est un onduleur de tension (Convertisseur Côté Machine-CCM) commandé par une technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) qui permet de contrôler les puissances active et réactive échangées entre le stator de la MADA et le réseau , comme il est représenté dans la figure II.20.

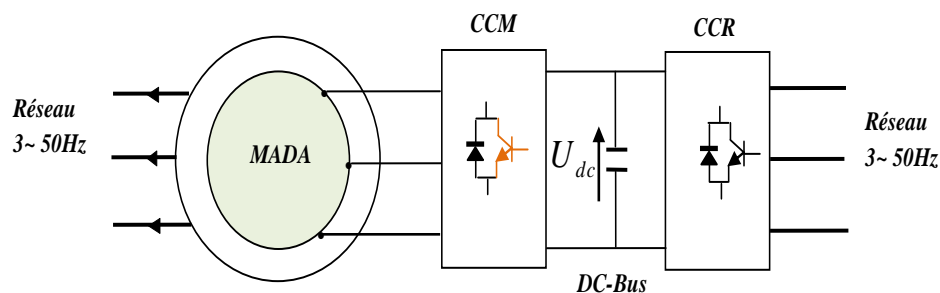


Figure II.20 : L'ensemble convertisseurs - MADA.

II.5.9.1. Modélisation du CCM

L'onduleur de tension est un convertisseur statique constitué de cellules de commutation généralement à transistor ou thyristor. Il permet d'imposer à la machine des ondes de tensions à amplitudes et fréquences variables à partir d'un réseau standard 220/380V-50Hz. Après redressement, la tension U_{dc} est appliquée à l'onduleur. Il est le cœur de l'organe de commande des machines électriques en particulier la MADA.

Dans cette partie, nous nous intéressons à la modélisation d'un onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC, pour alimenter le rotor de la MADA appliquée au système éolien.

Le schéma structurel d'un onduleur triphasé de tension à trois niveaux à structure NPC est illustré par la figure II.21.

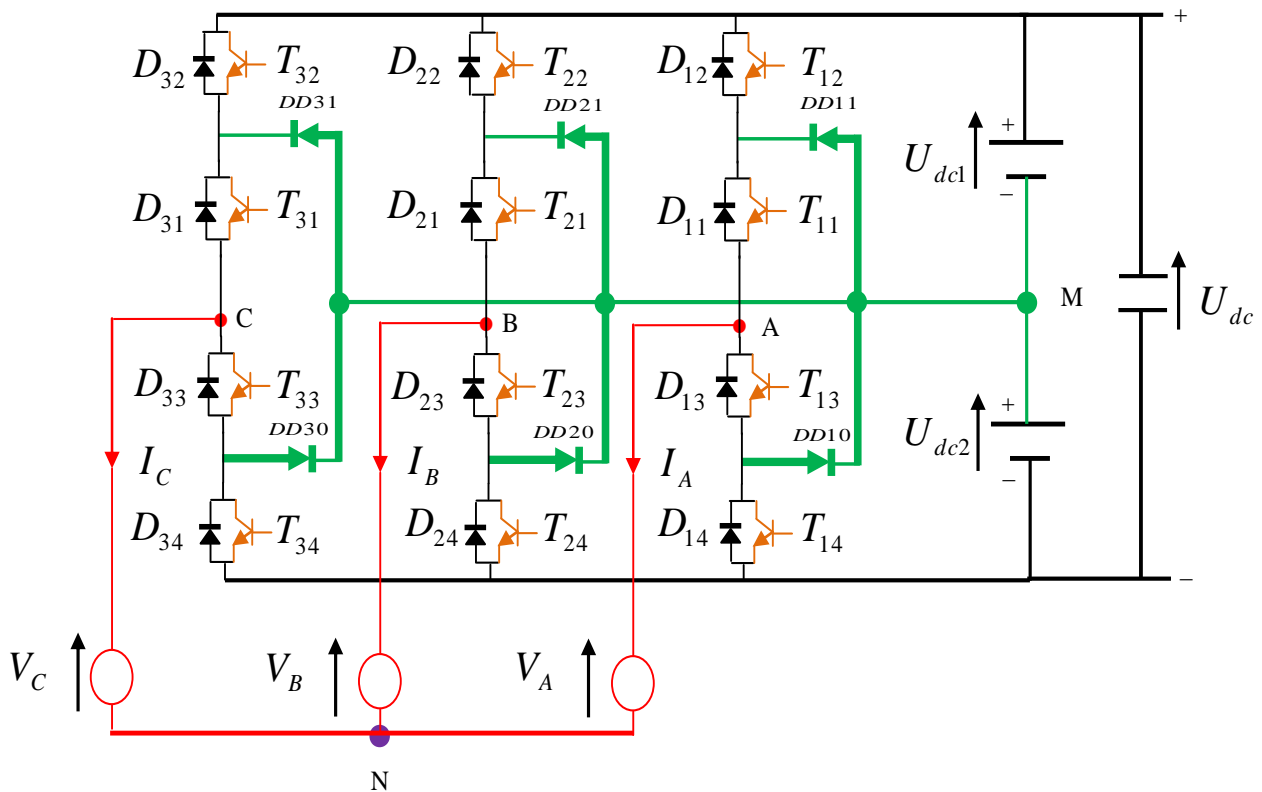


Figure II.21 : Onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC.

Pour l'onduleur à trois niveaux, on définit en plus la fonction de connexion d'un demi-bras notée F_{km}^b .

Où k : Numéro du bras ($k = 1; 2; 3$).

$$m = \begin{cases} 0 & \text{pour le demi bras du bas} \\ 1 & \text{pour le demi bras du haut} \end{cases}$$

Les fonctions de connexion des demi-bras s'expriment au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs comme suit:

$$\begin{aligned} F_{k1}^b &= F_{k1} \cdot F_{k2} \\ F_{k0}^b &= F_{k3} \cdot F_{k4} \end{aligned} \quad (\text{II.61})$$

Avec:

F_{ki} : commande des transistors ($k = 1, 2, 3$ et $i = 1, 2, 3, 4$).

Les tensions simples de charges sont données par le système suivant:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \times \left\{ \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} U_{dc1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} U_{dc2} \right\} \quad (\text{II.62})$$

Plusieurs méthodes sont utilisées pour commander les interrupteurs de l'onduleur. La stratégie la plus utilisée est la Modulation de Large Impulsion (MLI).

Deux catégories ou techniques de MLI :

- la modulation sinus triangle effectuant la comparaison d'un signal de référence a une porteuse.
- la modulation vectorielle ou encore appelée MLI régulière symétrique dans laquelle les angles de commutation sont calculés en ligne.

Dans notre étude, on s'est limité à la première technique de commande.

II.5.9.2. Principe de la commande MLI

Dans certaines applications l'alimentation en tension est préférable. Les grandeurs de sortie de commande dans ce cas sont des tensions désirées aux bornes de la machine. La commande de l'onduleur par la technique de modulation par largeur d'impulsion (M.L.I) permet de reconstituer ces grandeurs à partir d'une source de fréquence et à tension fixe, par l'intermédiaire d'un convertisseur direct. Le réglage est effectué par la durée d'ouverture et de fermeture des interrupteurs, et par séquence de fonctionnement.

L'objectif de la MLI, c'est la minimisation ou la réduction des oscillations sur la vitesse, le couple et les courants. Cela permettra de réduire la pollution du réseau électrique en harmonique, avec minimisation des pertes dans le système par conséquent augmenter le rendement.

La M.L.I sinus-triangle est réalisée par la comparaison d'une onde sinusoïdale basse fréquence (référence) à une onde triangulaire haute fréquence (porteuse), les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la référence.

Figure II.22 :

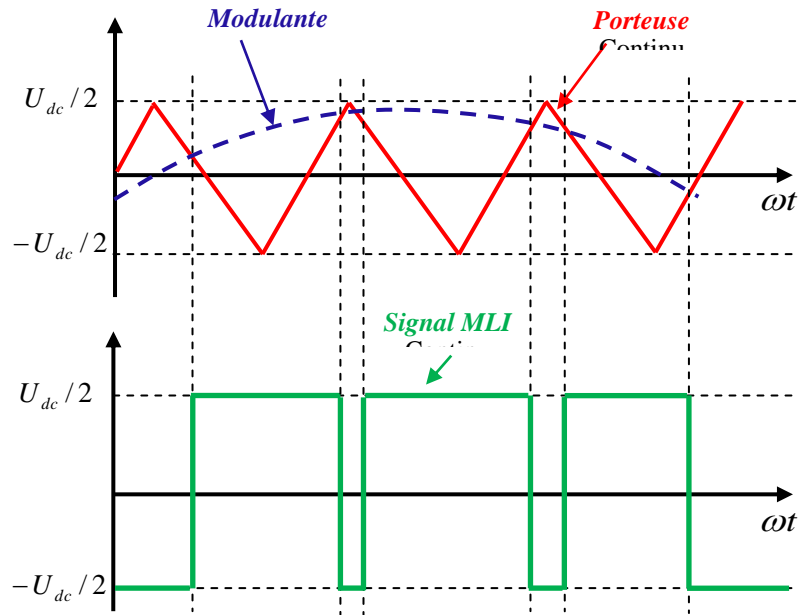


Figure II.22 : Principe de commande en MLI sinus-triangulaire.

Deux caractéristiques de MLI sont nécessaires à savoir :

- Indice de modulation « I_m »: Il est égal au rapport de la fréquence de la modulation (porteuse) sur la fréquence de référence. L'augmentation de la valeur « I_m » conduit au déplacement des harmoniques vers les fréquences élevés, ce qui présente un avantage, mais on constate par contre une augmentation de déchet de tension, d'où il est nécessaire d'optimiser la valeur de « I_m ».

$$I_m = \frac{f_p}{f_{réf}}$$

(II.63)

- Taux de modulation « T_m » : c'est un coefficient de réglage de la tension qui est égale au rapport de l'amplitude de la tension de référence à l'amplitude de la porteuse. [4]

$$T_m = \frac{V_{réf}}{V_p} \quad (II.64)$$

II.5.9.3. Résultats de Simulation obtenus

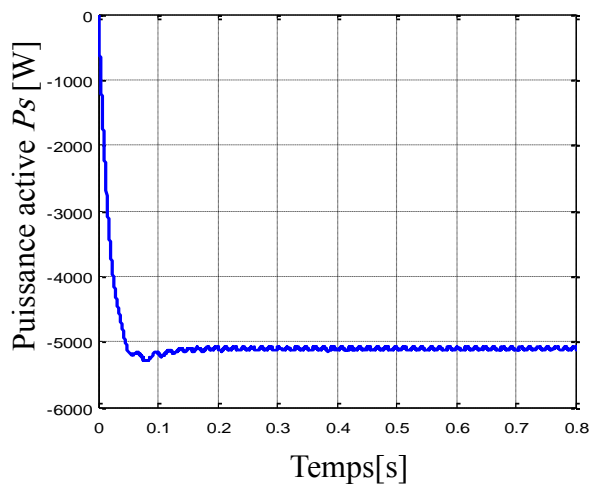
La simulation numérique est devenue à l'heure actuelle le moyen privilégié d'étude, en ce qui concerne les systèmes complexes.

Il s'agit d'un outil puissant pour vérifier la validité de la conception durant ces premières étapes. Plusieurs logiciels sont utilisés pour la simulation, nous utilisons le logiciel

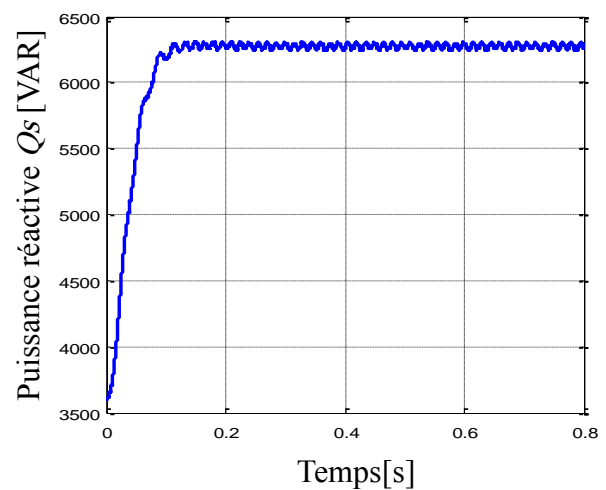
“Matlab/SimulinkTM” pour la simulation de l’ensemble du système de conversion éolienne de 10kw à basse d’une MADA alimentée par onduleur à trois niveaux à structure NPC, dont les paramètres sont donnés en annexe B.

La figure II.23 représente les réponses obtenus de la MADA couplée à la turbine éolienne. Les figures II.23-(a-b-c-d-e-f-g-h-i-j) montrent respectivement : La puissance active, la puissance réactive, le courant rotorique, le courant rotorique (Zoom), le courant statorique , le courant satatorique (Zoom),la tension satatorique , la tension satatorique (Zoom), le couple électromagnétique de la MADA ainsi que le facteur de puissance.

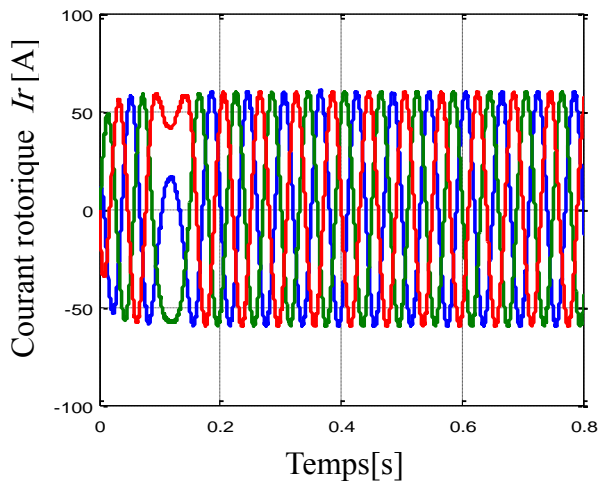
Les réponses obtenus par les figures II.23-a, b montrent que la machine génère plus de l’énergie réactive que l’énergie active ce qui donne un facteur de puissance plus loin de l’unité ($\cos \phi = 0.63$), voir la figure II-j. Dans Les figures II.23-c, d, on observe que le courant rotorique confirme le passage du mode hyposynchrone au mode hypersynchrone de la MADA à l’instant 0.12s. De même pour les figures II.23-e,f, on remarque que le courant statorique généré par la MADA est un courant sinusoïdal. La tension statorique est illustrée par la figure II.23-g, h. ainsi que dans la figure II.23-i on observe des fluctuations au niveau du couple dues à la technique MLI à cause de la commutation des interrupteurs de l’onduleur.



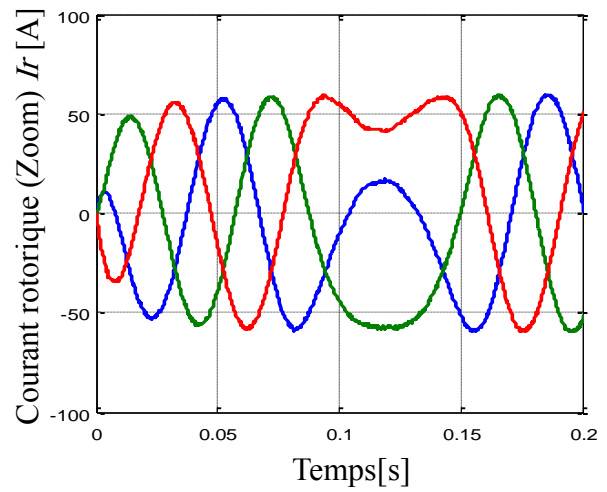
(a)



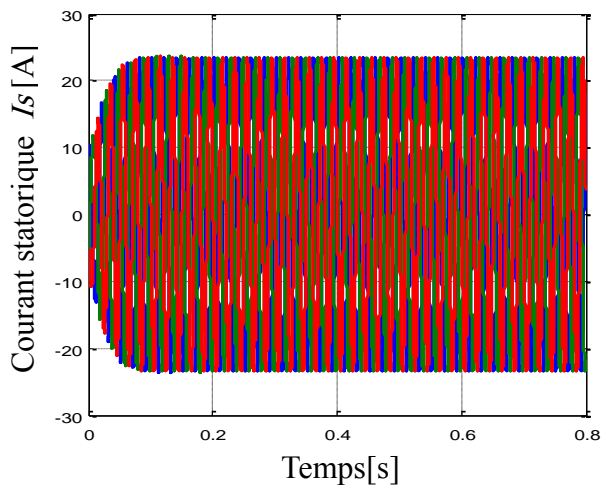
(b)



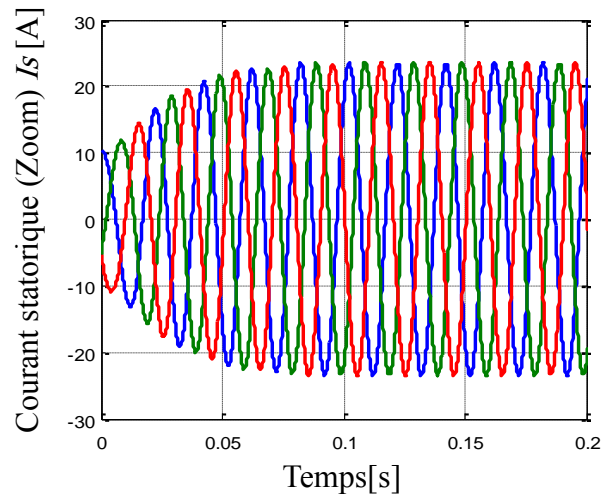
(c)



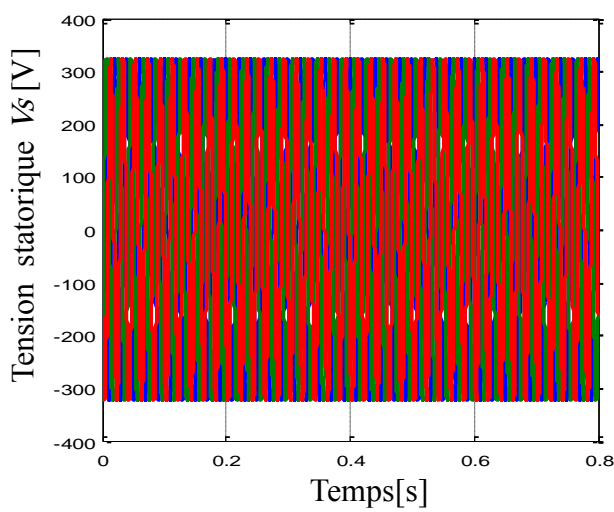
(d)



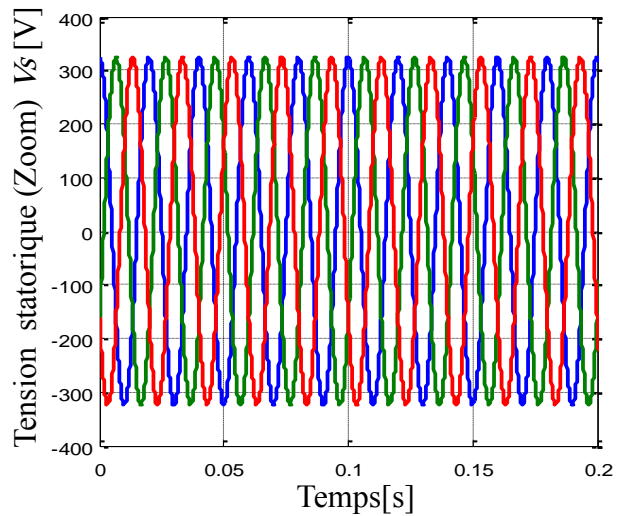
(e)



(f)



(g)



(h)

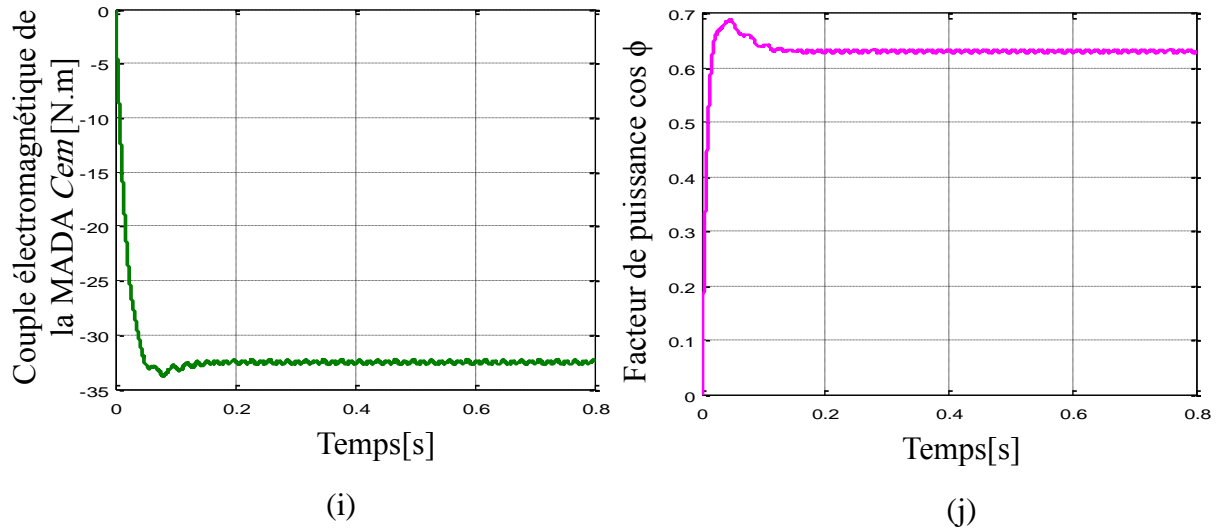


Figure II.23 : Résultats obtenus de la MADA couplée à la turbine éolienne.

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté la modélisation et simulation de la chaîne de conversion éolienne à basse d'une MADA alimentée par onduleur à trois niveaux.

Les résultats obtenus en simulation montrent des fluctuations au niveau des puissances et du couple électromagnétique de la machine dues à la technique MLI à cause de la commutation des interrupteurs. Sachant que le modèle de la MADA est fortement couplé et le facteur de puissance statorique est détérioré, il est utile de trouver une méthode de commande permettant de rendre le contrôle de la puissance active et réactive indépendant en fonctionnement génératrice et qui permet de faire fonctionner la machine à facteur de puissance unitaire au stator (réseau).

Dans le but de contrôler les grandeurs de sortie P_s et Q_s sans interaction entre elles, on a recours à la commande vectorielle par orientation du flux statorique. Cette dernière qui permette d'avoir un contrôle indépendant des puissances fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre III :

Commande vectorielle de la MADA

Chapitre III : Commande vectorielle de la MADA

III.1. Introduction

La difficulté majeure rencontrée dans la commande de la machine asynchrone en générale réside dans le fait que le couple et le flux sont des variables fortement couplées et que toute action sur l'une d'elles se répercute sur l'autre. Dans la machine à courant continu à excitation séparée, ces deux variables sont naturellement découplées, ce qui explique la relative simplicité de la commande de cette machine.

Pour aboutir à un contrôle du même type que celui de la machine à courant continu, Blaschke avait donné naissance en 1971 aux bases de la nouvelle théorie de commande des machines à courant alternatif dite commande par flux orienté ou commande vectorielle. [49]

L'idée fondamentale de cette méthode de commande est de ramener le comportement de la machine asynchrone à celui d'une machine à courant continu. Cette méthode se base sur la transformation des variables électriques de la machine vers un référentiel qui tourne avec le vecteur du flux. Afin d'obtenir un contrôle analogue à celui de la machine à courant continu à excitation séparée, I_{dr} est analogue au courant d'excitation, tandis que le courant I_{qr} est analogue au courant d'induit. Par conséquent, les deux composantes I_{dr} et I_{qr} sont mutuellement découplées. [50]

La figure III.1 illustre l'équivalence entre l'expression du couple que l'on réalise avec la commande découplée classique d'une machine à courant continu et la commande vectorielle d'une MADA.

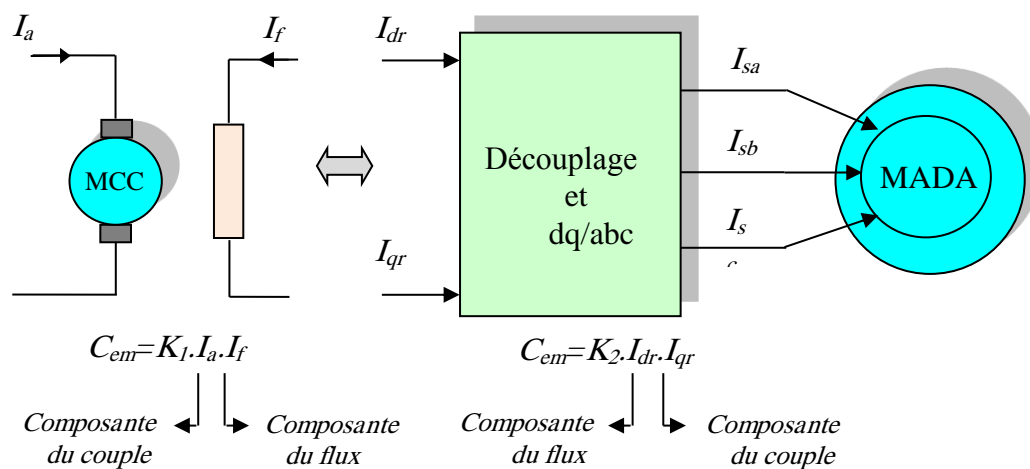


Figure III.1: Equivalence entre la commande d'une MCC et la commande vectorielle d'une MADA.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la commande vectorielle (directe et indirecte) des puissances active et réactive statorique de la MADA, appliquée au système éolien de 10kW, basée sur les régulateurs classiques (réglage à action Proportionnelle et Intégrale-PI).

III.2. Technique d'orientation du flux de la MADA

La commande par orientation du flux, consiste à aligner le flux statorique suivant l'axe « d » du référentiel tournant, figure III.2, [45]. On a donc: $\varphi_{ds} = \varphi_s$ et par suite $\varphi_{qs} = 0$.

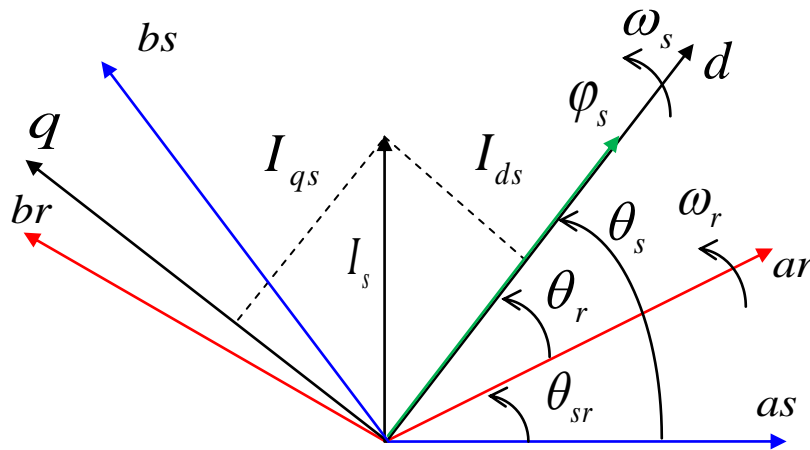


Figure III.2: Orientation de l'axe d sur le flux statorique.

Le couple électromagnétique de l'équation (II.51) s'écrit alors :

$$C_{em} = -p \frac{M}{L_s} I_{qr} \varphi_{ds} \quad (\text{III.1})$$

Et l'équation (II.43) des flux statorique devient :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Si l'on néglige la résistance des enroulements statorique, hypothèse réaliste pour les machines utilisées pour la production éolienne, les équations des tensions statorique de la machine se réduisent à :

$$\begin{cases} V_{ds} = \frac{d\varphi_s}{dt} \\ V_{qs} = \omega_s \varphi_s \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

Avec l'hypothèse du flux statorique constant, on obtient :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

A l'aide de l'équation (III.2), on peut établir le lien entre les courants statorique et rotorique :

$$\begin{cases} I_{ds} = -\frac{M}{L_s} I_{dr} + \frac{\varphi_s}{L_s} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

Les puissances active et réactive statorique s'écrivent :

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

Ou bien encore, d'après l'équation (III.4) par :

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

Pour obtenir l'expression des puissances en fonction des courants rotorique, on remplace dans l'équation précédente les courants par l'équation (III.5):

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{dr} + V_s \frac{\varphi_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

A partir des équations (III.3) et (III.4), nous obtenons, pour le flux statorique, l'expression suivante :

$$\varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad (\text{III.9})$$

L'expression des puissances peut donc se simplifier de la manière suivante :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{dr} + \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

En remplaçant dans l'équation (II.48) des flux, les courants statorique par l'expression (III.5) on obtient :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \left(L_s - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + \frac{M V_s}{L_s \omega_s} \\ \varphi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

Pour le contrôle de la génératrice, des expressions sont établies montrant la relation entre les courants et les tensions rotorique qui lui seront appliquées.

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{dr}}{dt} - g \omega_s \left(L_s - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{qr}}{dt} + g \omega_s \left(L_s - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (III.12)$$

Où g correspond au glissement de la machine.

Les équations précédentes permettent d'établir un schéma bloc du système électrique à réguler donné par la figure III.3.

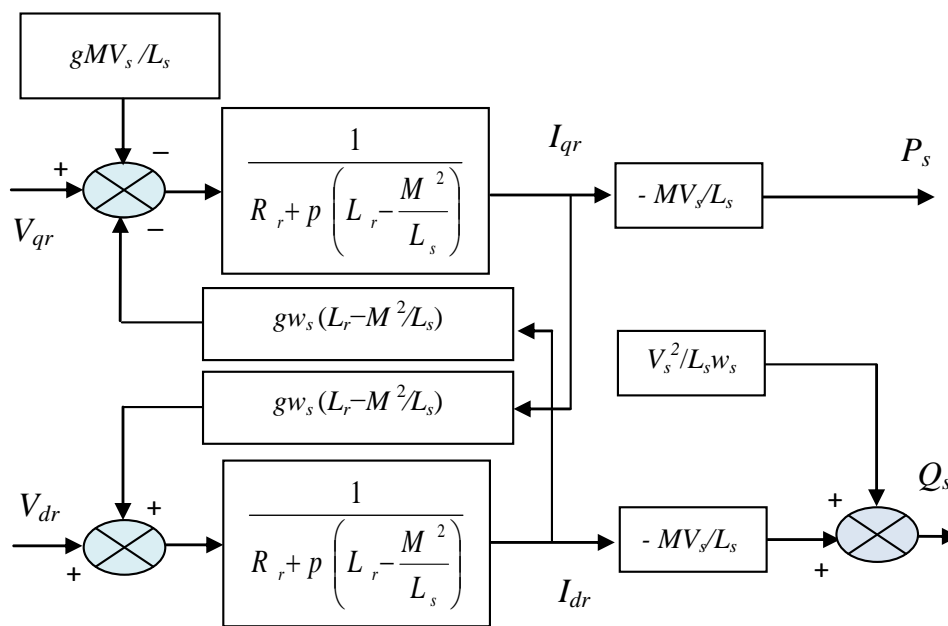


Figure III.3: Schéma bloc du système à réguler.

On remarque que les puissances et les tensions sont liées par une fonction de transfert du premier ordre. De plus, du fait de la faible valeur du glissement g , il sera possible d'établir sans difficulté une commande vectorielle car les influences des couplages resteront faibles et les axes d et q , pourront donc être commandés séparément avec leurs propres régulateurs.

Ainsi, il apparaît deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette machine : [45]

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 active et réactive. Cette méthode sera appelée méthode directe car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotorique de la machine, Figure III. 4.

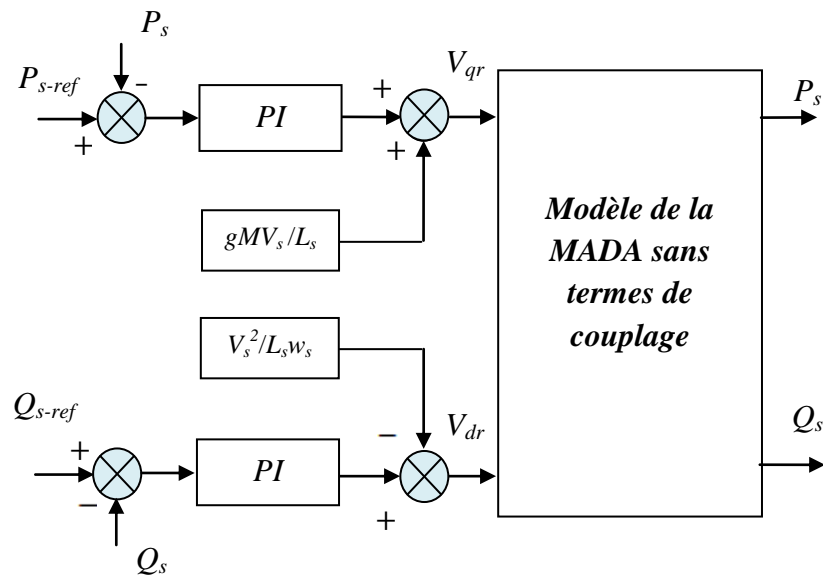


Figure III.4 : Schéma bloc de la commande directe.

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 découle directement des équations (III.10) et (III.12). Figure III. 5.

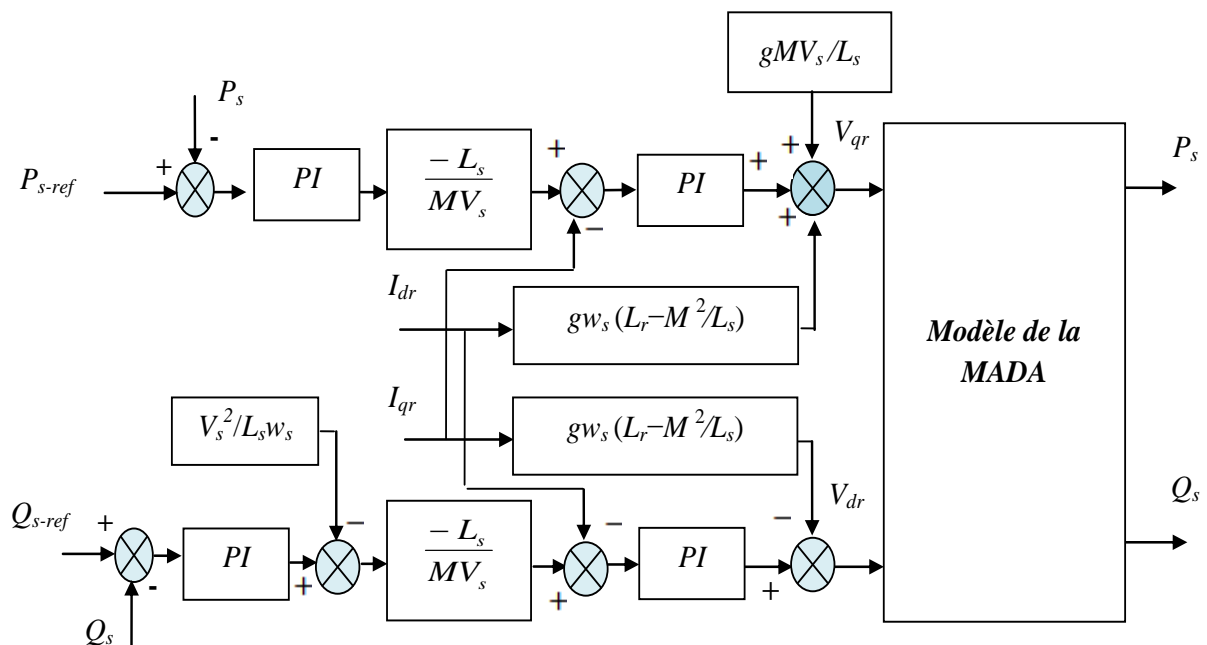


Figure III.5 : Schéma bloc de la commande indirecte.

Ces deux méthodes vont être étudiées et simulées dans la suite de ce chapitre. L'intérêt que présente la méthode directe est que sa mise en œuvre est simple, par contre la méthode

indirecte a l'avantage de contrôler les courants rotorique ce qui permettra de faire une protection de la machine.

III.3. Synthèse du régulateur PI

Le régulateur Proportionnel Intégral PI, utilisé pour commander la MADA en génératrice, est simple et rapide à mettre en œuvre tout en offrant des performances acceptables. L'action proportionnelle sert à régler la rapidité de la dynamique du système, alors que l'action intégrale permet d'éliminer l'écart entre la grandeur de consigne et celle que l'on désire asservir. C'est pour cela qu'il a retenu notre attention pour une étude globale du système. [51]

La figure III. 6, montre une partie du système bouclé et corrigé par un régulateur PI dont la fonction de transfert est de la forme $k_p + \frac{k_i}{p}$ correspondant aux régulateurs utilisés dans la figure III. 4 et figure III. 5.

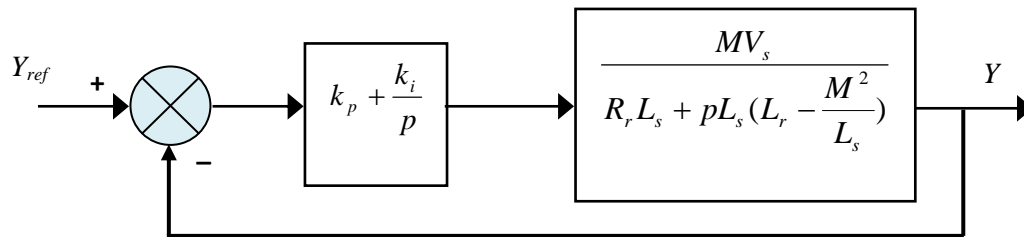


Figure III.6 : Système régulé par un PI.

La Fonction de Transfert en Boucle Ouverte (FTBO) avec les régulateurs s'écrit de la manière suivante :

$$FTBO = \frac{p + \frac{k_i}{k_p} \cdot \frac{M V_s}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{\frac{p}{k_p} \cdot p + \frac{L_s R_r}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}} \quad (III.13)$$

Nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert. Ceci nous conduit à l'égalité suivante :

$$\frac{k_i}{k_p} = \frac{L_s R_r}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \quad (III.14)$$

Si l'on effectue la compensation, on obtient la FTBO suivante :

$$FTBO = \frac{k_p \frac{MV_s}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{p} \quad (III.15)$$

Ce qui nous donne en boucle fermée :

$$FTBF = \frac{1}{1 + p\tau_r} \quad \text{avec} \quad \tau_r = \frac{1}{k_p} \frac{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{MV_s} \quad (III.16)$$

Avec « τ_r » le temps de réponse du système qui d'après des études effectuées par de nombreux chercheurs sur ce type de régulations l'ont fixés à l'ordre de 10ms, 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.

S'imposer une valeur plus faible n'améliorerait probablement pas les performances de l'ensemble, mais risquerait d'engendrer des perturbations lors des régimes transitoires en provoquant des dépassements et des instabilités indésirables.

On peut désormais exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse :

$$K_p = \frac{1}{\tau_r} \frac{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{MV_s}; K_i = \frac{1}{\tau_r} \frac{R_r L_s}{MV_s} \quad (III.17)$$

III.4. Résultats de simulations obtenus

Les stratégies directe (CVD) et indirecte (CVI) de la commande en puissances de la MADA ont été validées par simulation numérique en utilisant le logiciel Matlab/SimulinkTM.

Les paramètres de la génératrice utilisée pour la simulation sont donnés dans l'annexe B.

Les figures III.7 et III.8 représentent respectivement le schéma bloc de la commande vectorielle directe et indirecte de la MADA avec réglage classique PI.

Afin de comparer le comportement des deux méthodes de commande étudiées, trois catégories de tests ont été effectués, à savoir : suivi de consigne, contrôle de facteur de puissance et robustesse vis-à-vis les variations paramétriques de la machine.

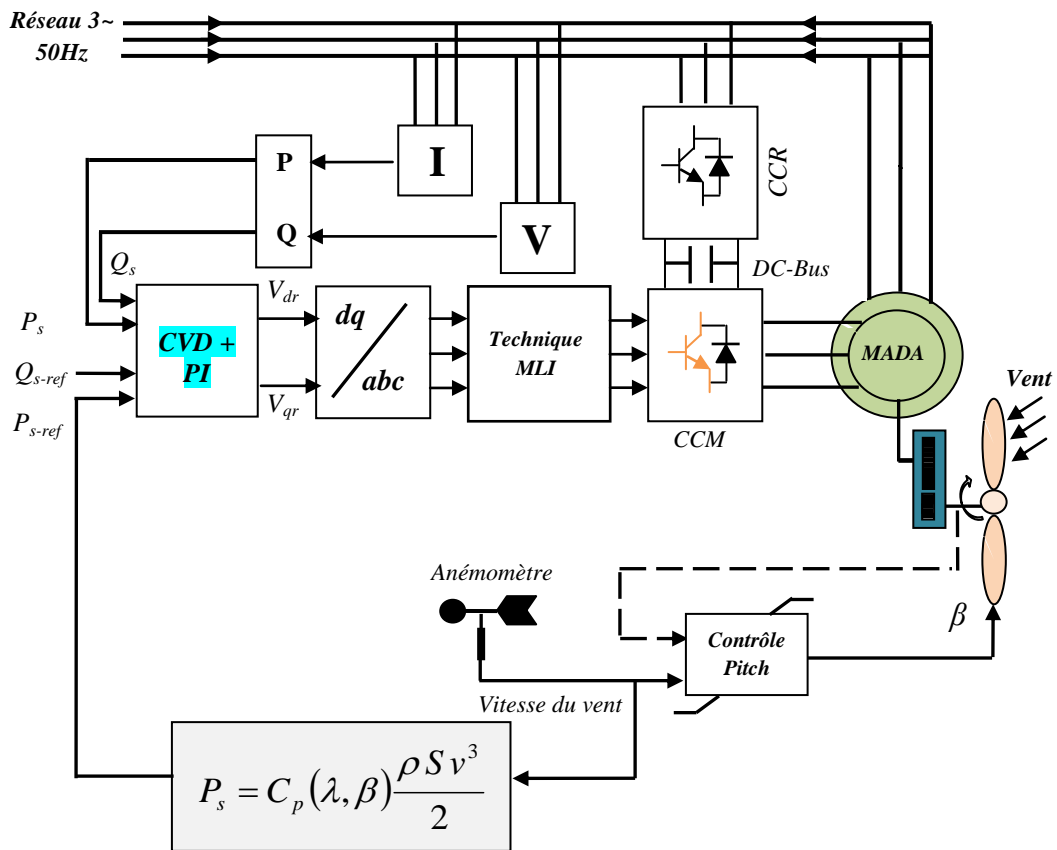


Figure III.7 : Schéma bloc de l'ensemble du système étudié (CVD).

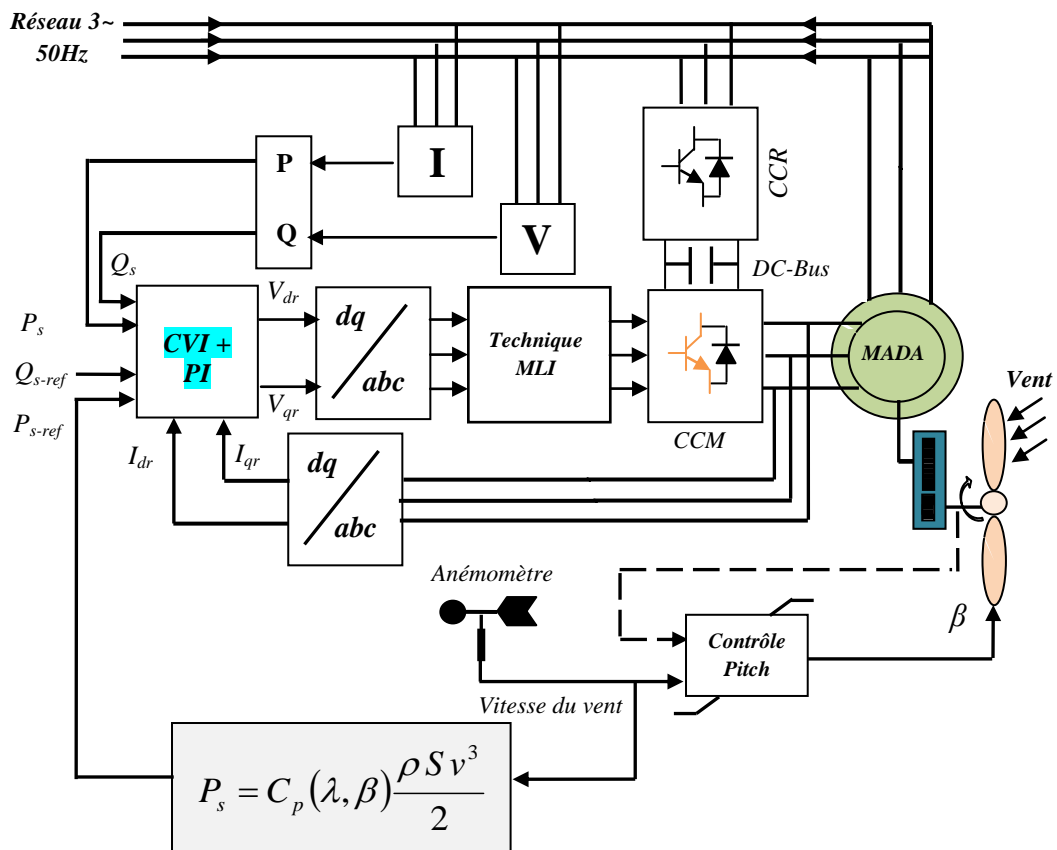


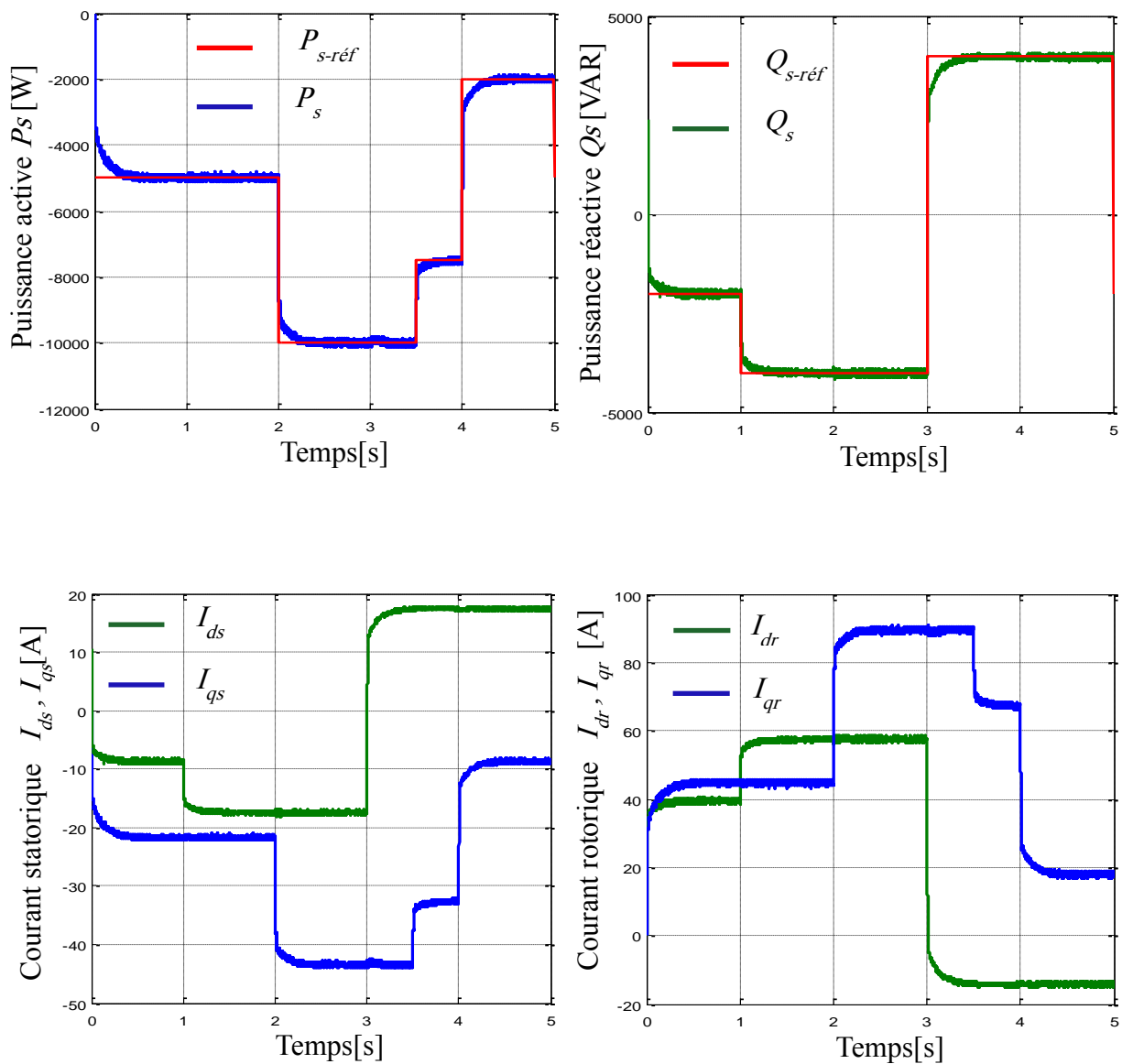
Figure III.8 : Schéma bloc de l'ensemble du système étudié (CVI).

III.4.1. Test de suivi de consigne

a)- Vitesse du vent fixe

Ce premier essai consiste à imposer des échelons de puissance active et réactive alors que la MADA est entraînée par la turbine éolienne à une vitesse du vent fixe. Cet essai nous permet de vérifier le découplage des puissances générées par la MADA.

Les figures III.9 et III.10 représentent successivement, les résultats obtenus de la CVD et CVI des puissances active et réactive de la MADA, relatif à ce premier test.



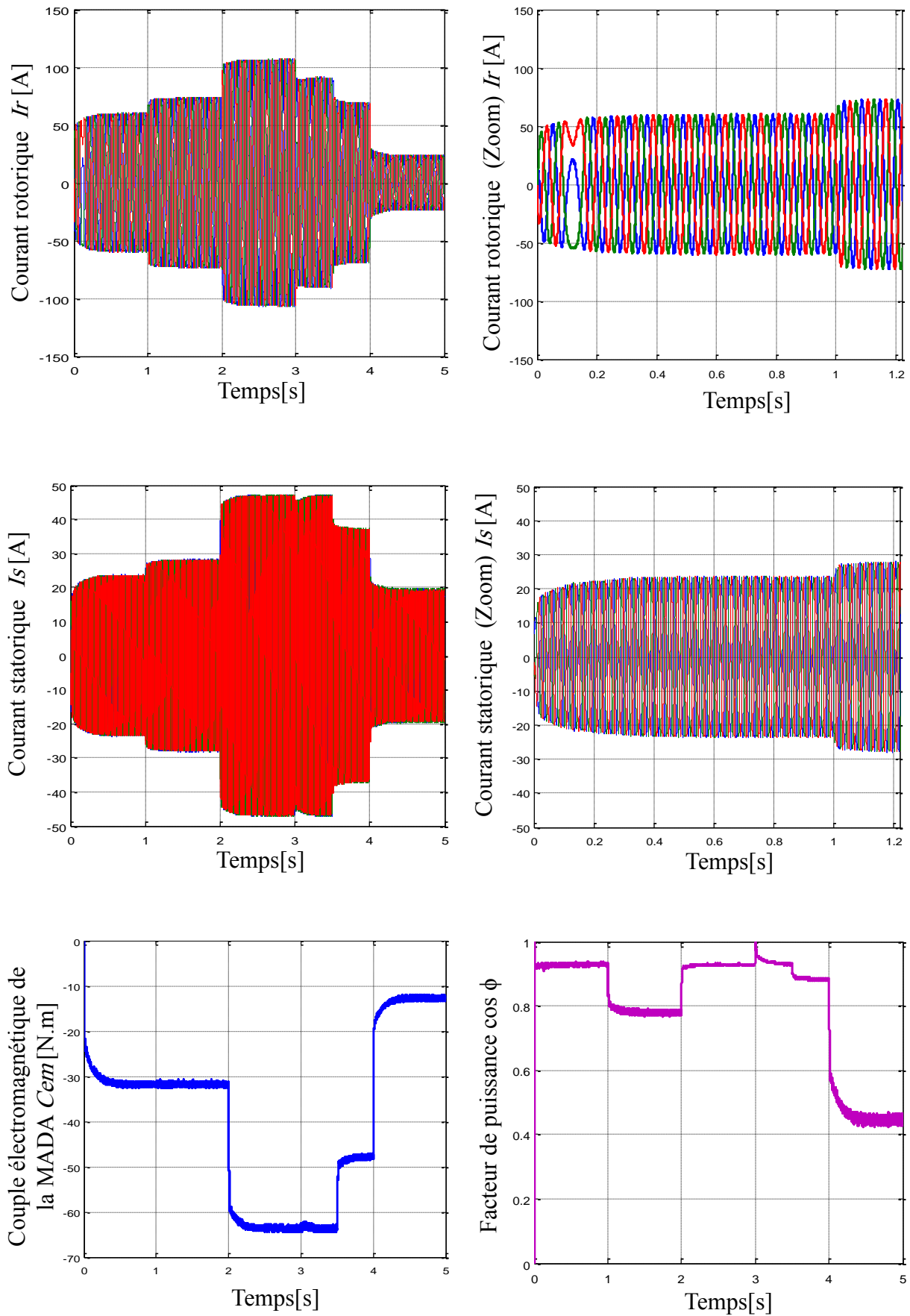
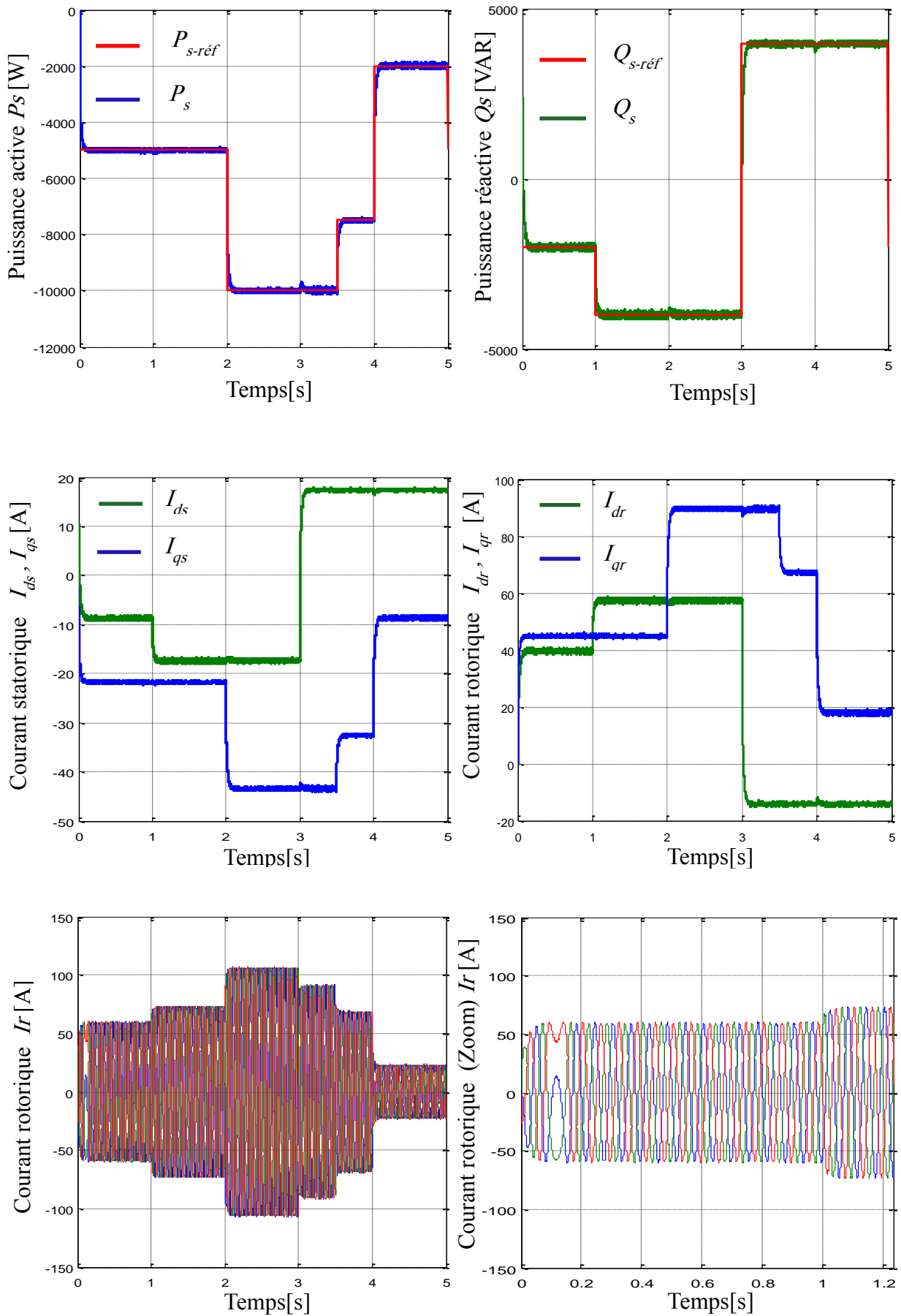


Figure III.9 : Résultats obtenus de la CVD à vitesse fixe de la MADA.



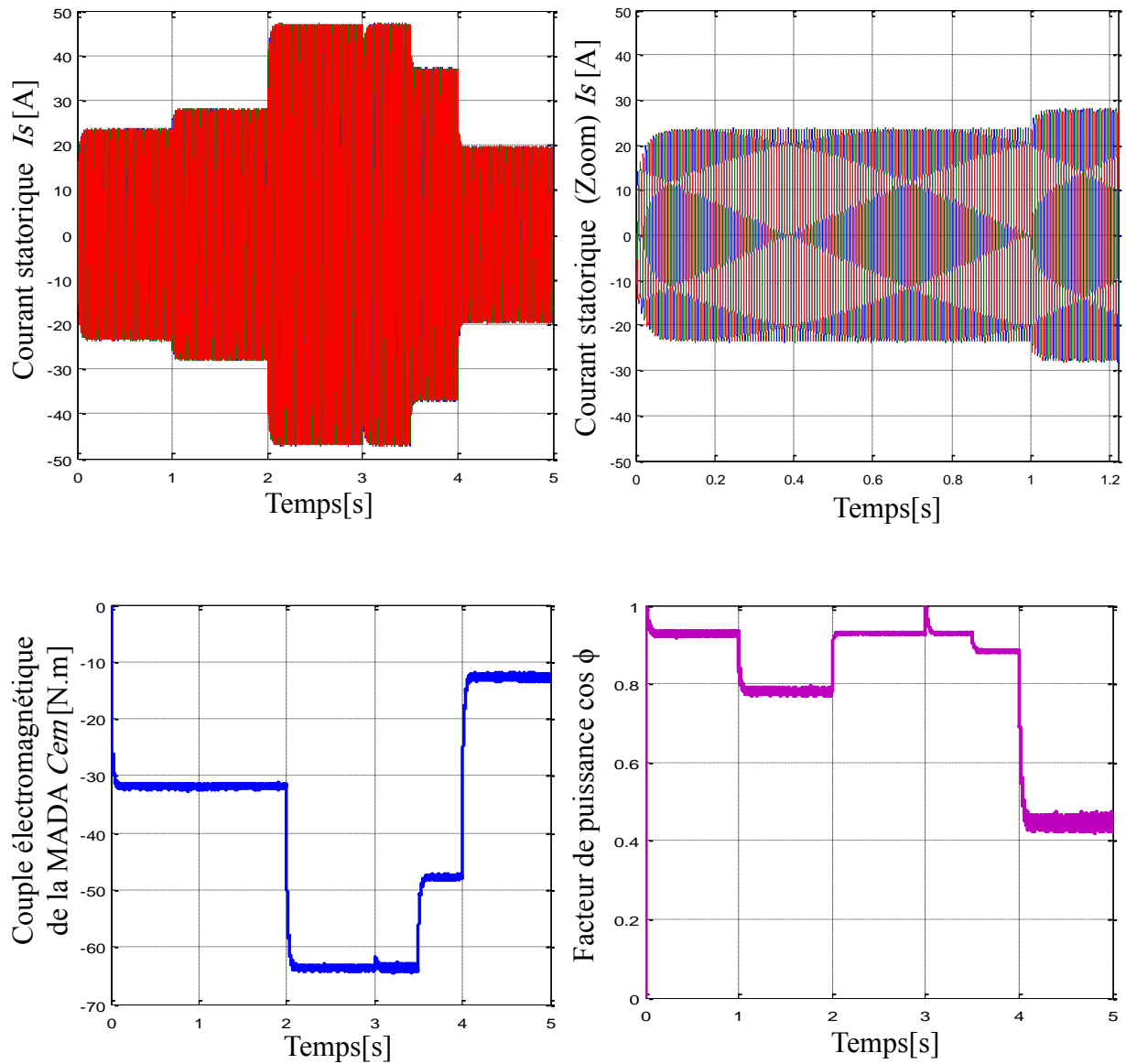
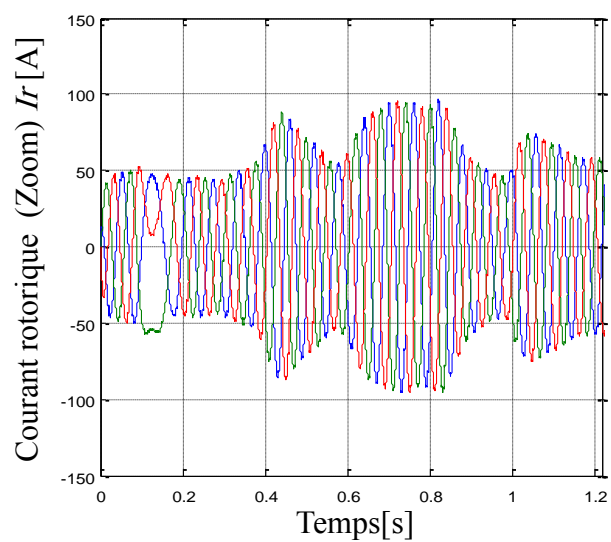
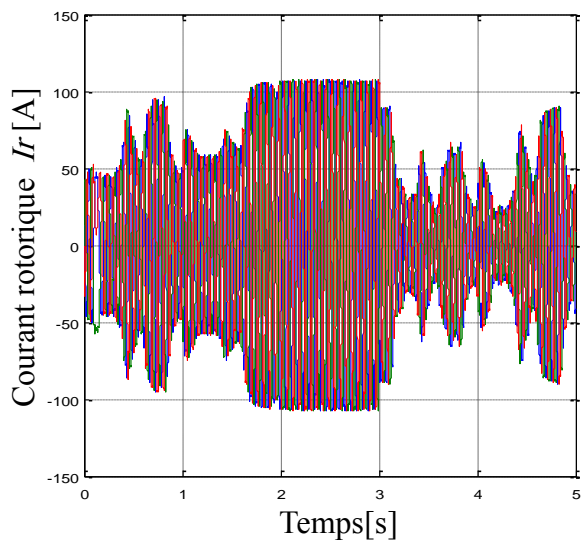
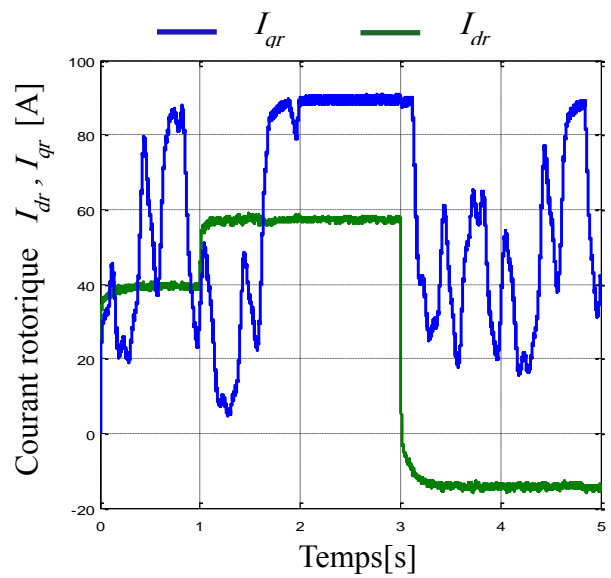
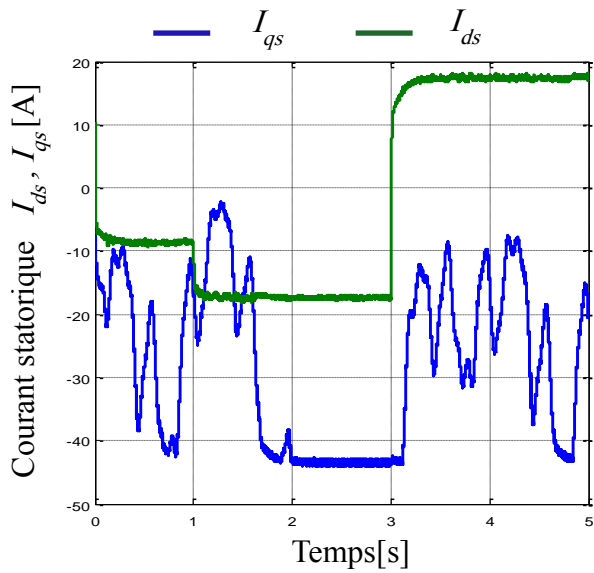
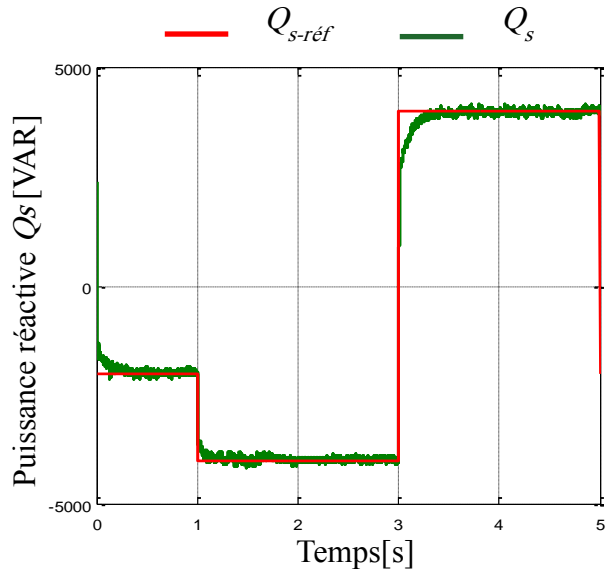
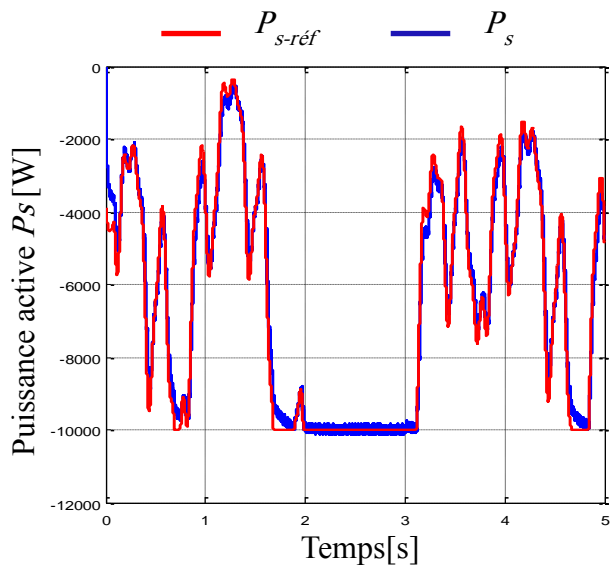


Figure III.10 : Résultats obtenus de la CVI à vitesse fixe de la MADA.

b)- Vitesse du vent variable

Cet essai de simulation a été effectué en utilisant le profil du vent utilisé dans le chapitre précédent, figure II.10. Les figures III.11 et III.12 illustrent respectivement les résultats de simulation de la CVD et CVI de la MADA, en appliquant la stratégie de commande MPPT pour l'ensemble du système éolien.



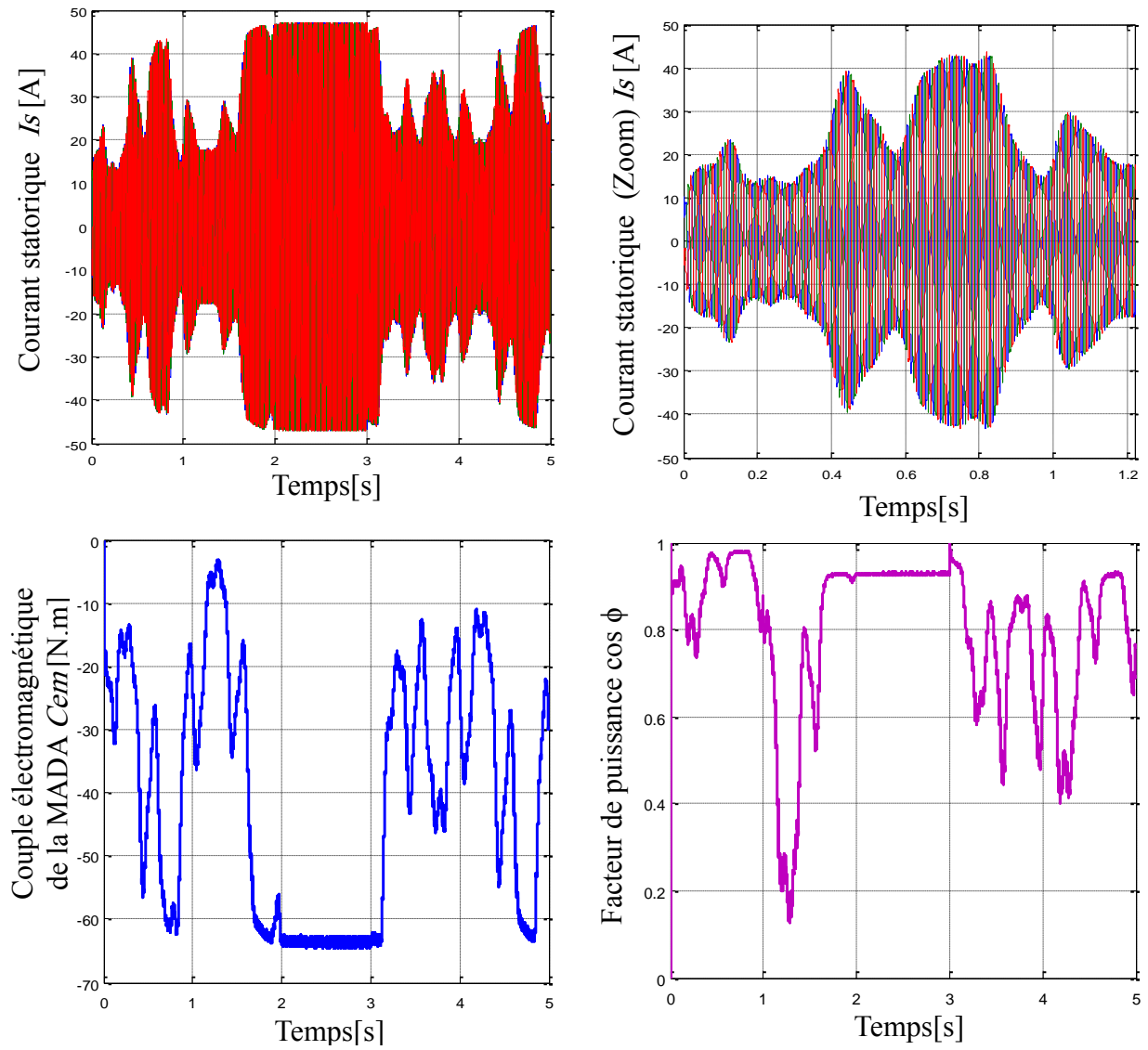
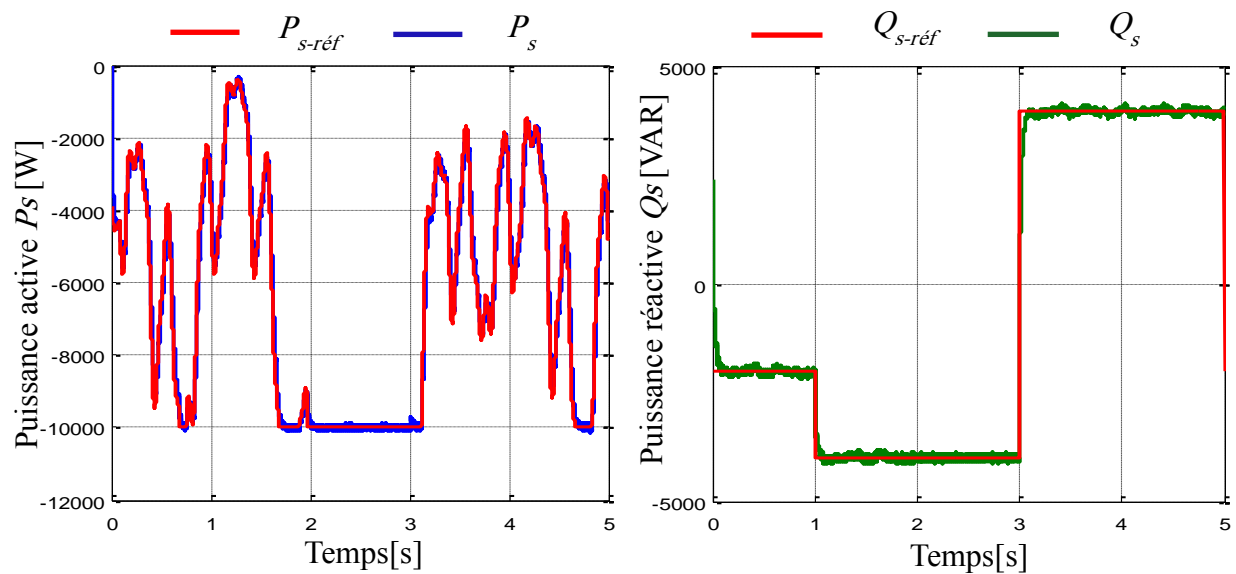
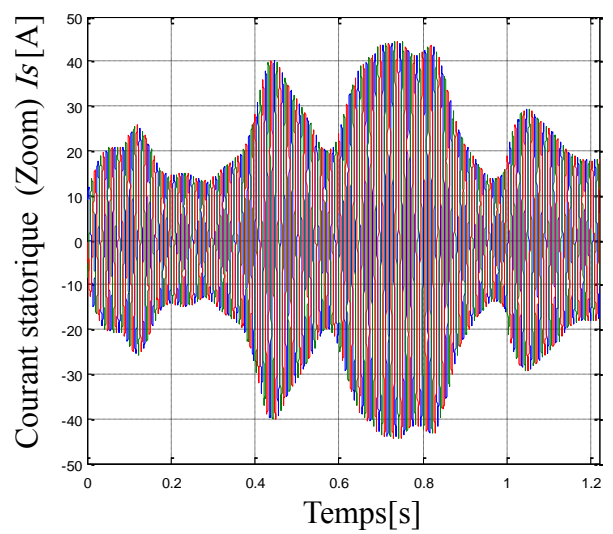
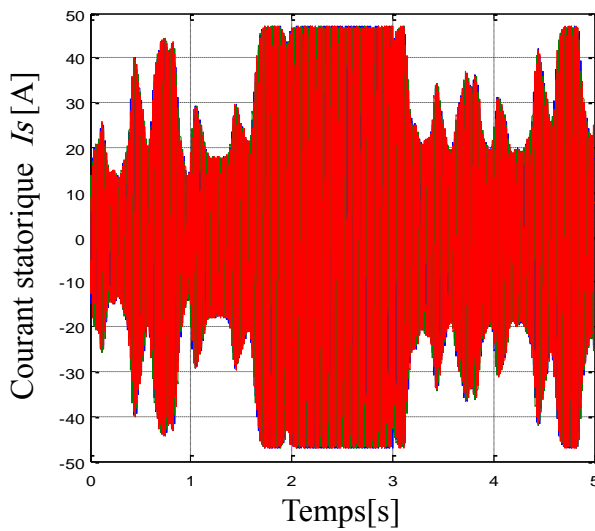
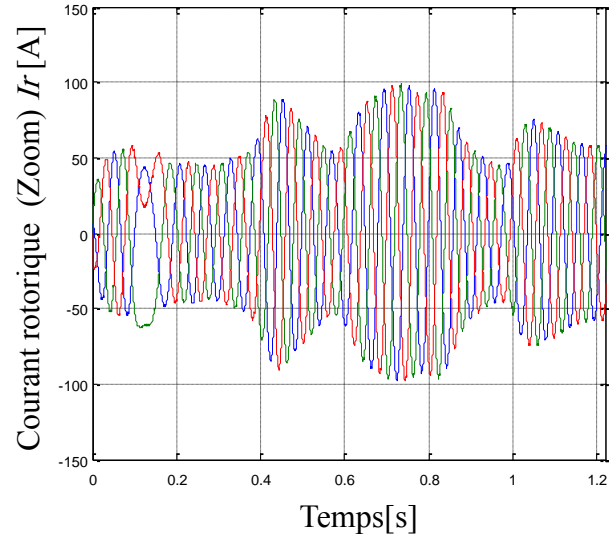
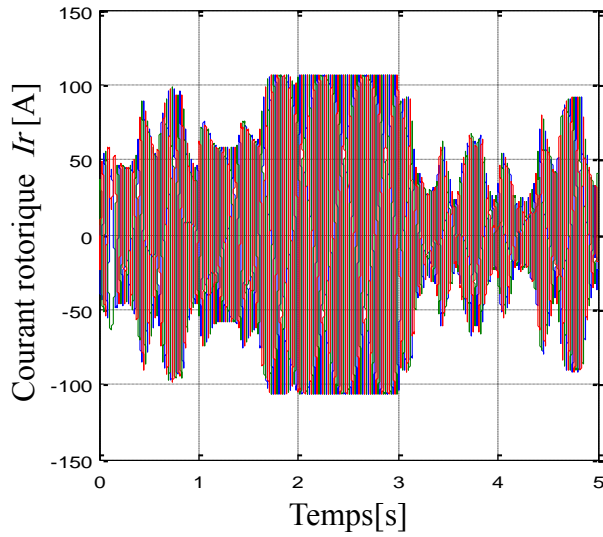
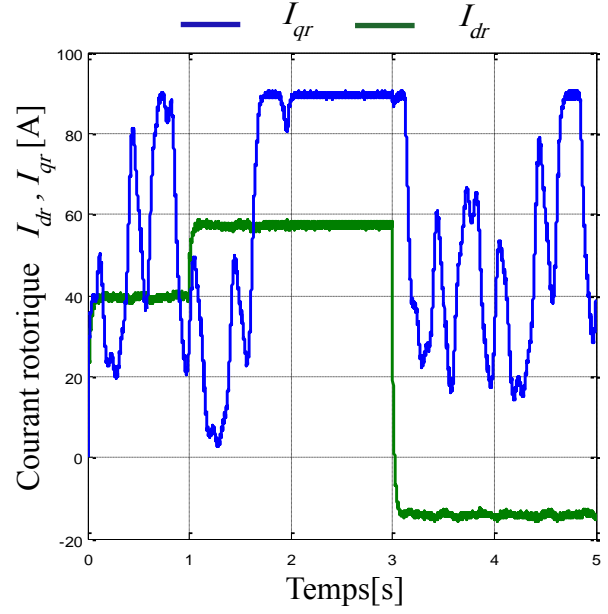
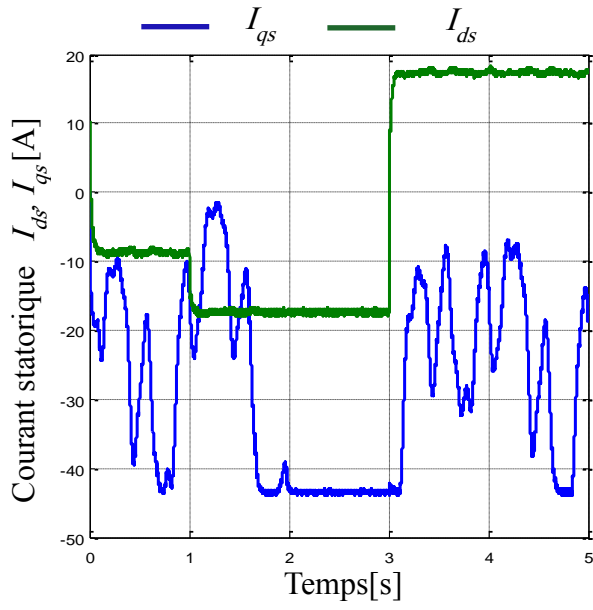


Figure III.11 : Résultats obtenus de la CVD à vitesse variable de la MADA.





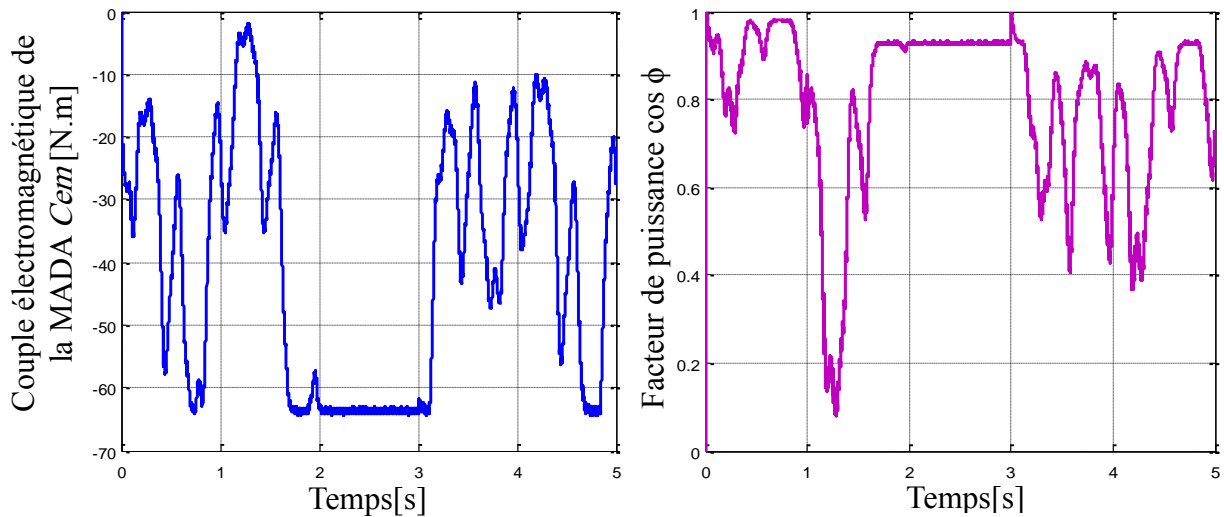


Figure III.12 : Résultats obtenus de la CVI à vitesse variable de la MADA.

c)- Interprétation des résultats

D'après les résultats obtenus, on peut remarquer pour les deux méthodes de commande que les consignes de puissance sont bien suivies par la génératrice aussi bien pour la puissance active que pour la puissance réactive avec un bon rejet de perturbation.

On voit bien que la puissance active statorique P_s dépend du courant rotorique en quadrature I_{rq} et que la puissance réactive statorique Q_s dépend du courant rotorique direct I_{rd} pour les deux techniques de commandes.

Nous constatons aussi que la méthode directe utilisant des correcteurs PI présente un bon découplage et un réglage des puissances active et réactive au niveau du stator et une bonne poursuite des valeurs de références imposées dans le cas d'un fonctionnement à vitesse fixe de la MADA. Cependant, cette méthode est moins performante pour un fonctionnement à vitesse variable. Ceci dû à la présence de certaines perturbations aux niveaux des puissances active et réactive. Par conséquent, cette méthode de contrôle est moins répandue dans les applications à vitesse variable. Par contre la méthode indirecte présente une dynamique satisfaisante et une erreur statique presque nulle, que ce soit pour la puissance active ou réactive, on observe aussi une dynamique qui réagit rapidement et sans dépassement. Le couplage entre les deux puissances est très faible est peu perceptible pour le fonctionnement à vitesse fixe et variable.

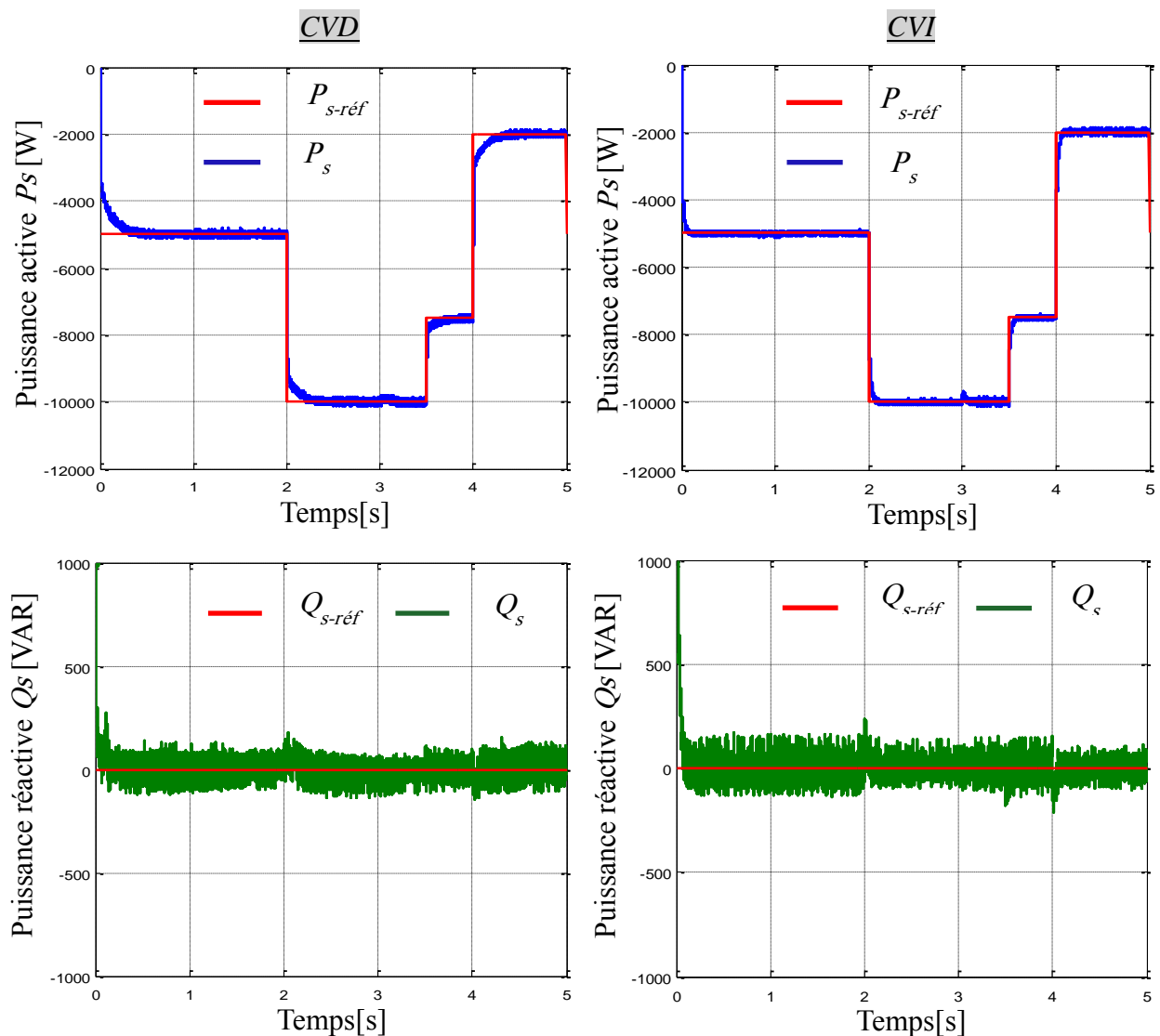
La puissance active du côté statorique est négative ce qui signifie que le réseau dans ce cas est un récepteur de l'énergie fournie par la MADA, La puissance réactive est réglable selon les besoins du réseau.

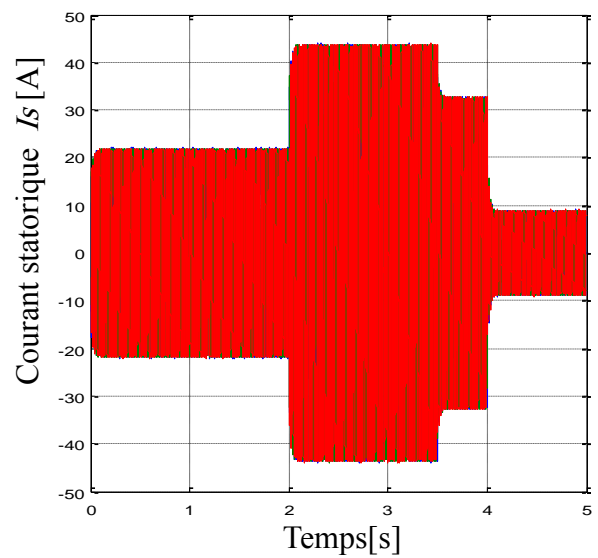
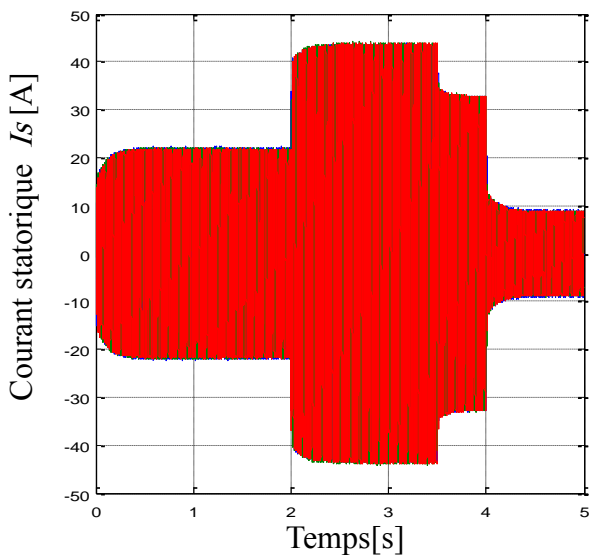
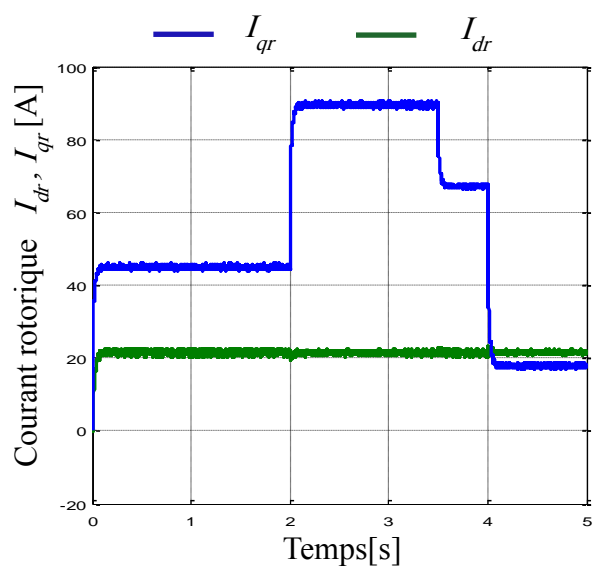
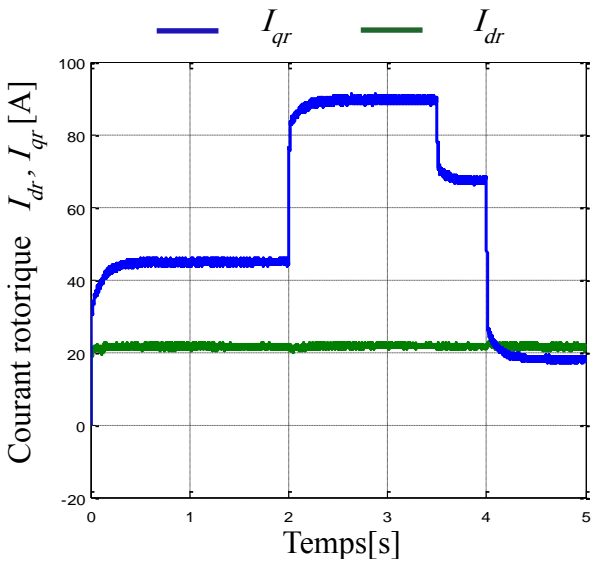
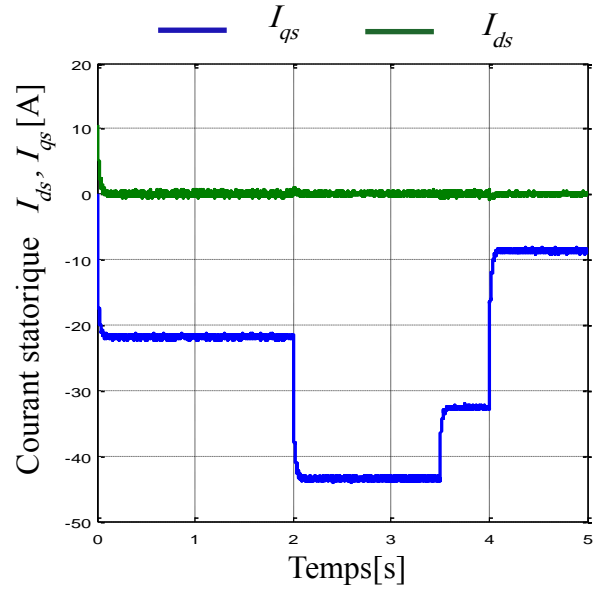
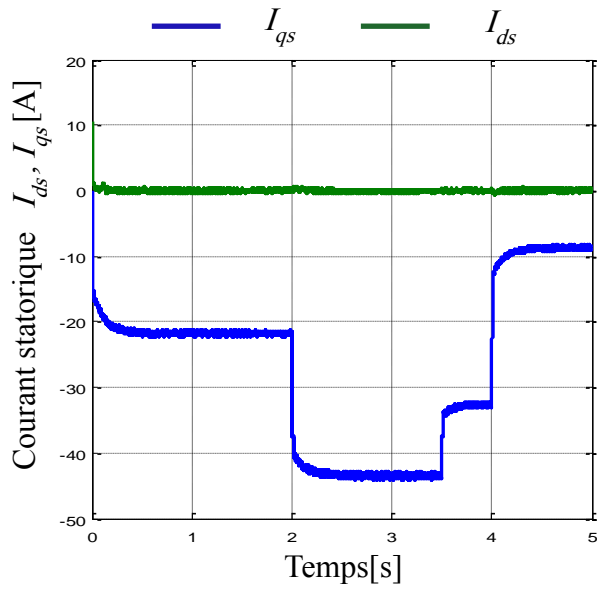
Nous pouvons également remarquer que le facteur de puissance obtenu par les deux stratégies de commandes est variable selon les valeurs des puissances actives et réactives. Pour garder un facteur de puissance unitaire coté réseau, la consigne de puissance réactive statorique sera maintenue nulle ($Q_{s-ref} = 0\text{VAR}$), c'est l'objectif du prochain essai.

III.4.2. Contrôle de facteur de puissance

Dans cette partie la consigne de puissance réactive statorique sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau. La consigne de puissance active devra permettre de garder le coefficient de puissance de l'éolienne optimal.

a)- Vitesse du vent fixe





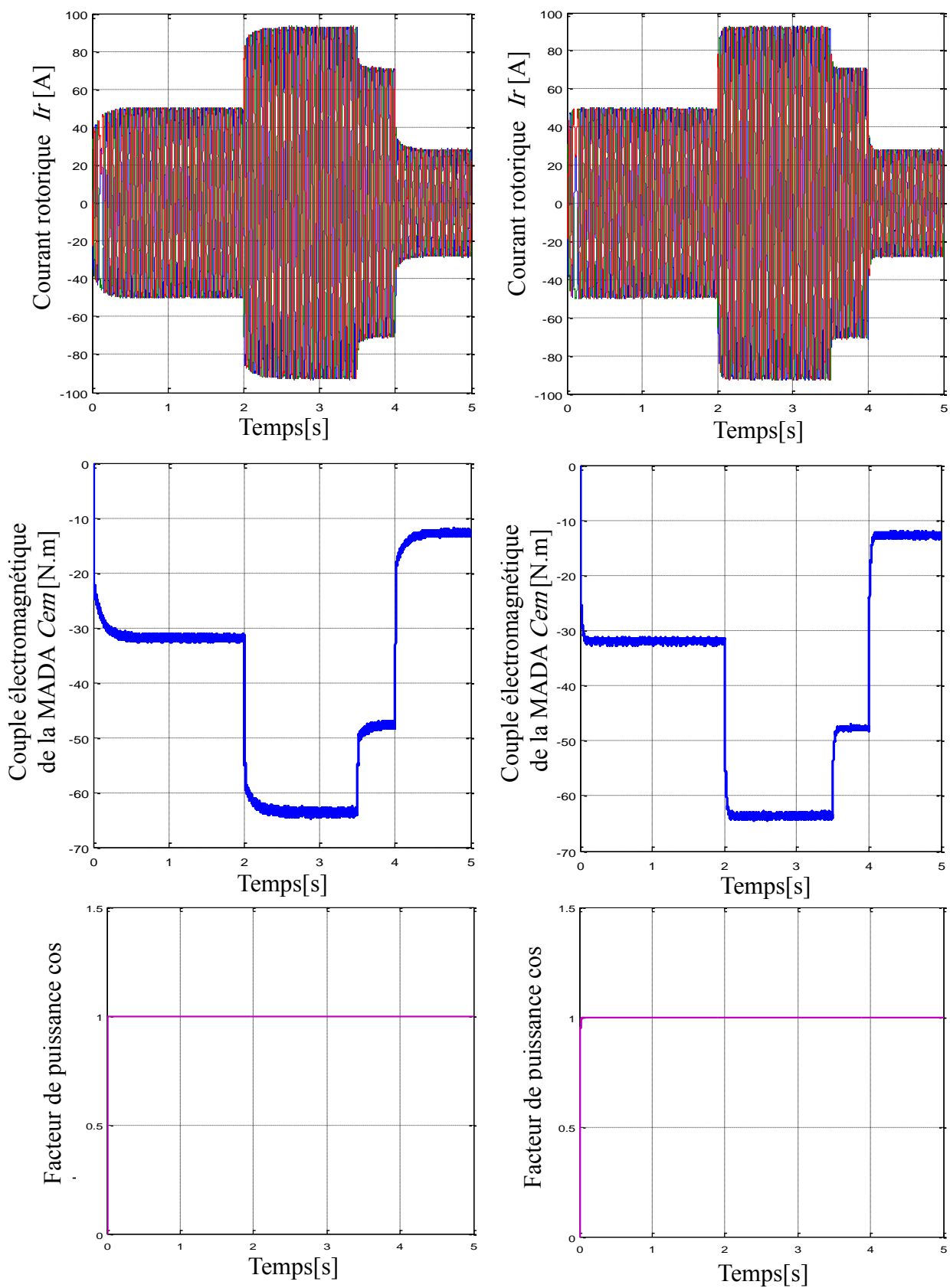
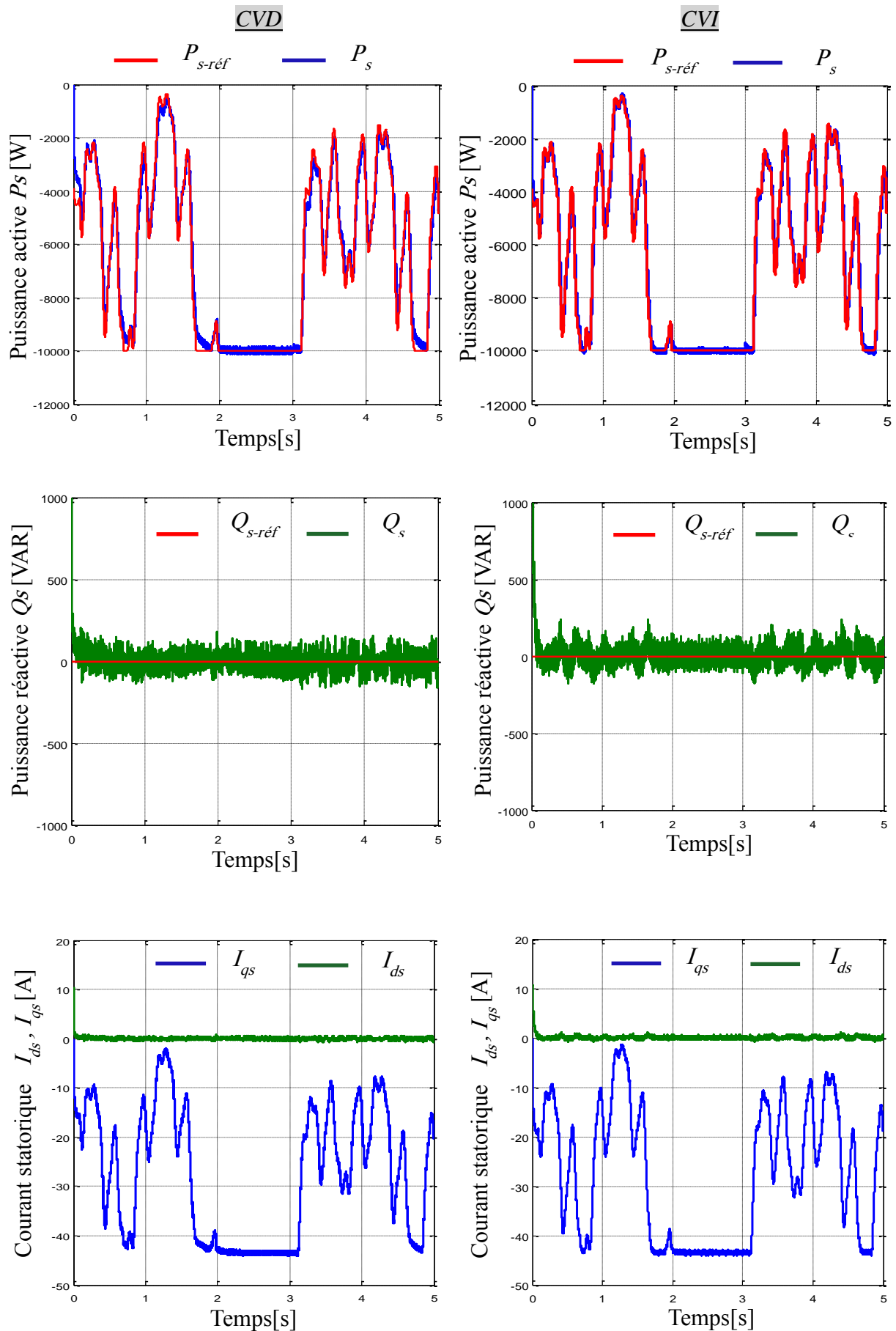
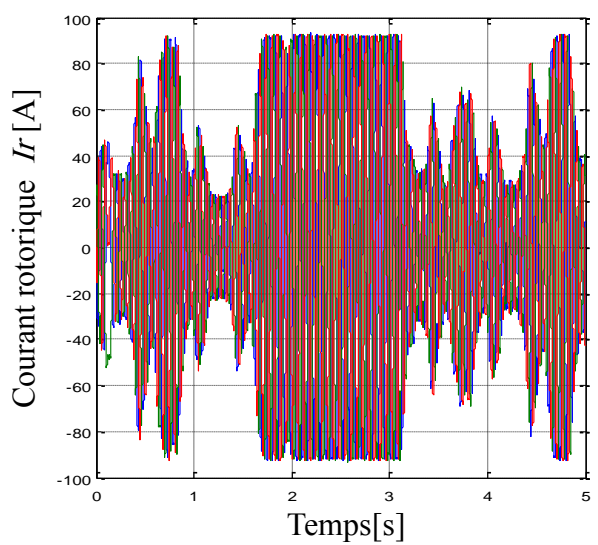
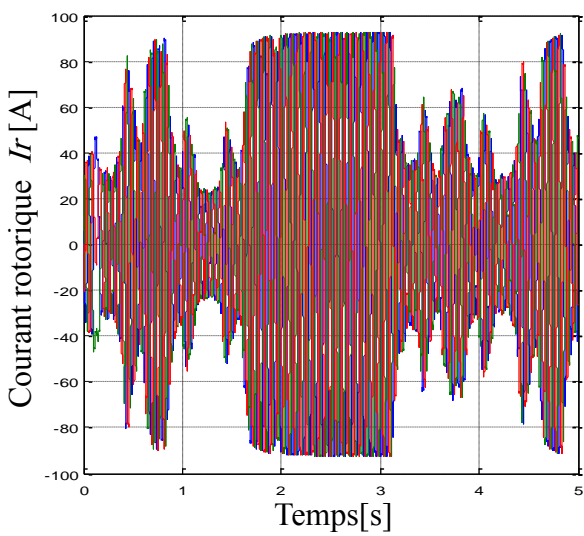
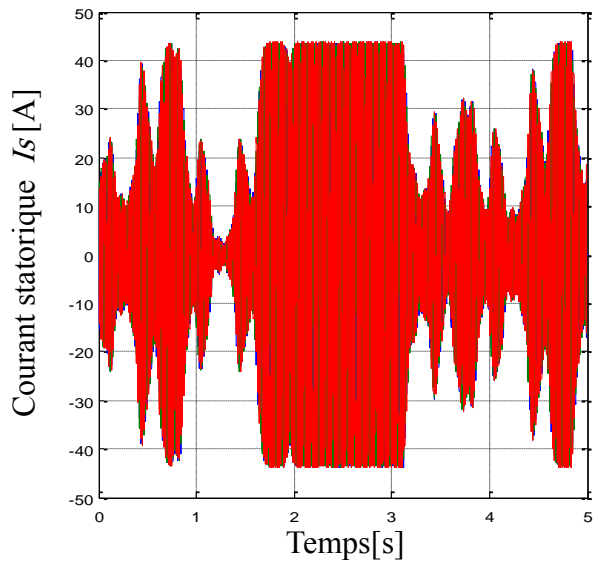
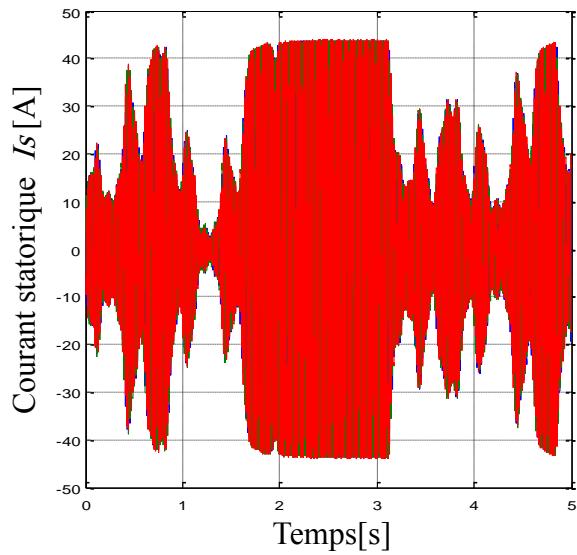
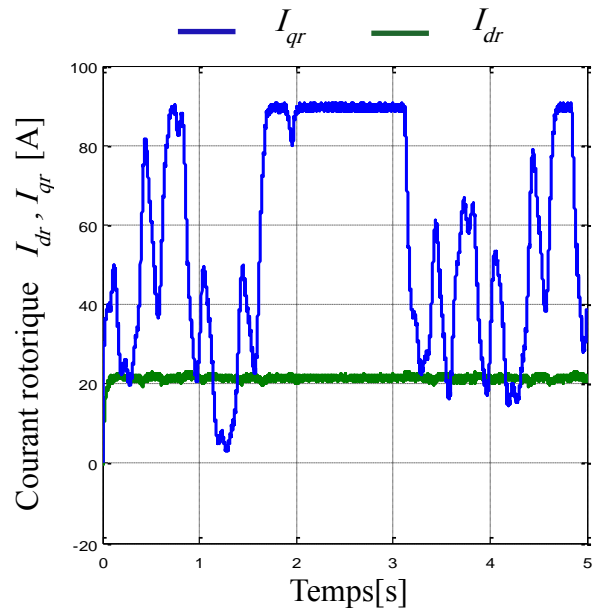
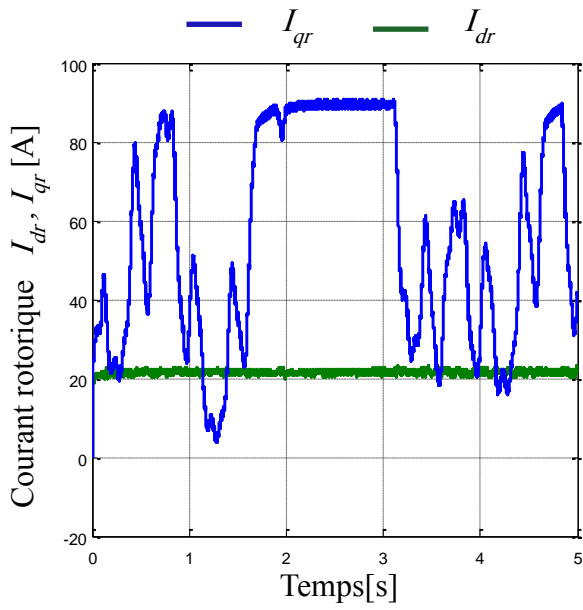


Figure III.13 : Commande vectorielle de la MADA à facteur de puissance unitaire pour un fonctionnement de vitesse fixe.

b)- Vitesse du vent variable





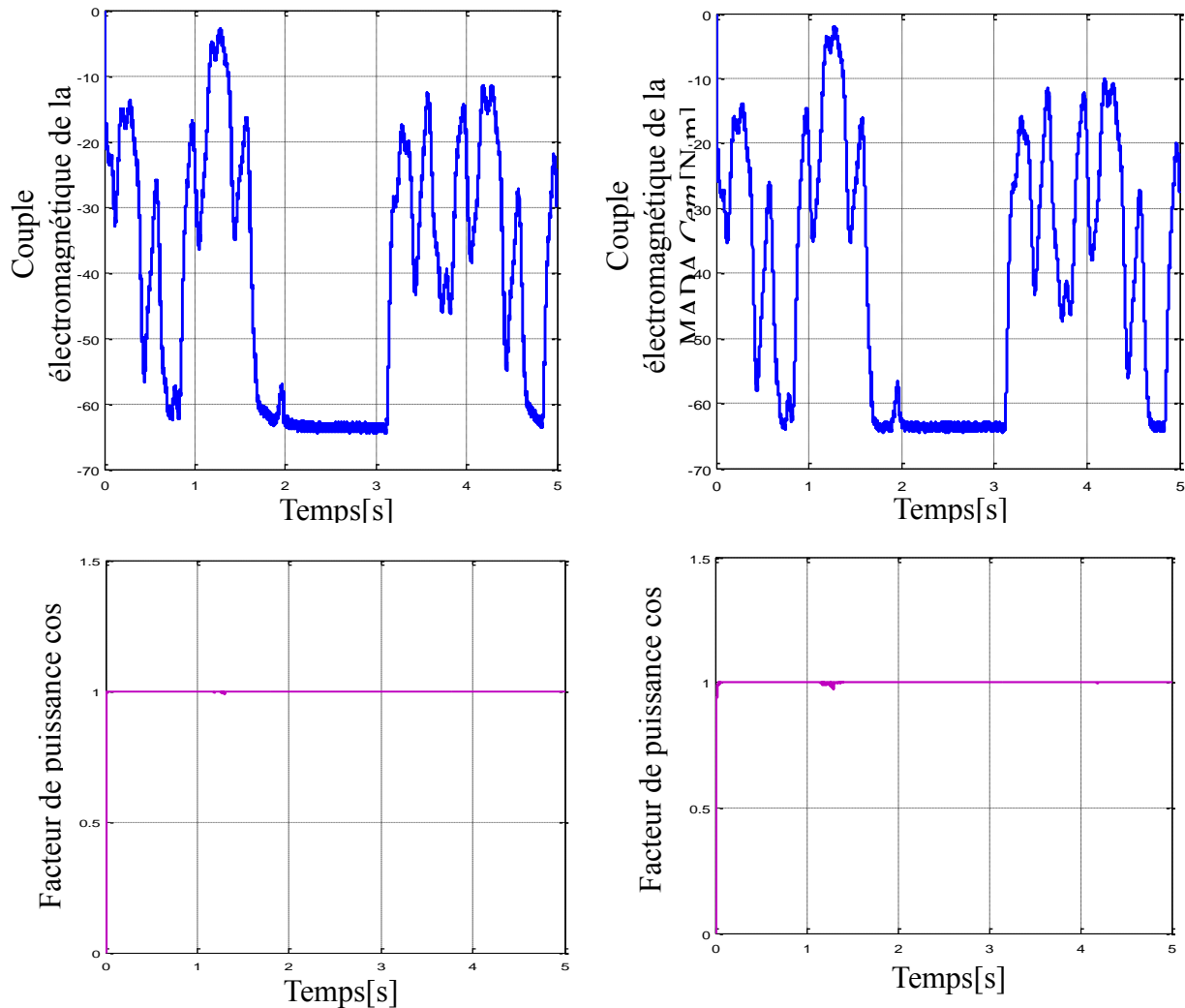


Figure III.14 : Commande vectorielle de la MADA à facteur de puissance unitaire pour un fonctionnement de vitesse variable.

c)- Interprétation des résultats

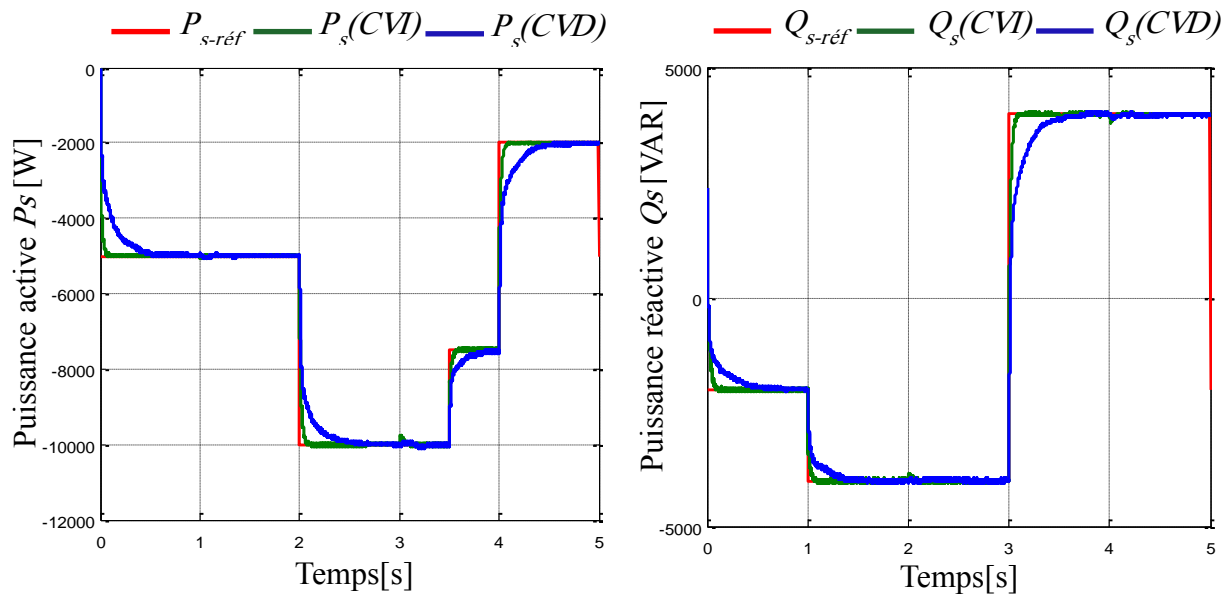
D'après les résultats de simulation obtenus on peut dire que le contrôle de la puissance active pour la génératrice éolienne est parfaitement réalisé à un facteur de puissance unitaire ($\cos \phi = 1$) pour les deux techniques de commande dans le cas d'un fonctionnement à vitesse fixe et variable.

III.4.3. Tests de robustesse

La robustesse des commandes est un point important, surtout pour les systèmes comportant plusieurs entités en interaction ou les systèmes à fortes variations de paramètres.

La figure III.15, représente une comparaison entre la robustesse de la commande vectorielle directe et indirecte avec variations paramétriques de la MADA, (R_r) et (M) varient respectivement de +100 % et +20 % de leurs valeurs nominales.

a)- Vitesse du vent fixe



b)- Vitesse du vent variable

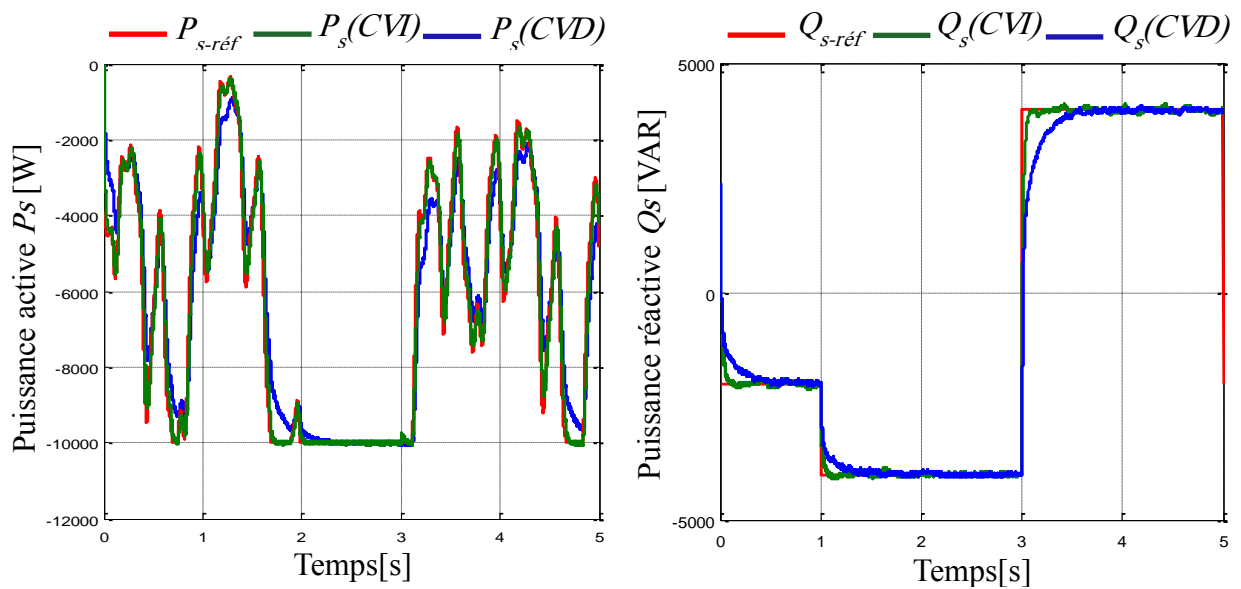


Figure III.15 : Influence des variations paramétriques sur la commande vectorielle directe et indirecte.

c)- Interprétation des résultats

D'après les résultats obtenus par la Figure III.15, on constate que le réglage des puissances active et réactive par la technique indirecte apporte des performances et robustesse remarquables en termes de temps de réponse (*Tableau III. 1*) et suivi de consigne (*Tableau III. 2*), par rapport à la technique directe.

Tableau III. 1 : Comparaison entre les temps de réponse de la commande vectorielle directe et indirecte.

	$t_r(P_s)$	$t_r(Q_s)$
CVD	122 ms	164 ms
CVI	31 ms	42 ms

Tableau III. 2 : Comparaison entre les erreurs statiques de la commande vectorielle directe et indirecte.

	ΔP_s (%)	ΔQ_s (%)
CVD	4.15 (415W)	3.65 (365VAR)
CVI	2.25 (225W)	1.75 (175VAR)

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la commande vectorielle par orientation du flux statorique en puissance active et réactive de la MADA utilisée en génératrice intégrée à un système éolien de 10 kW.

Deux méthodes de commande sont appliquées à la coté du système éolien :

- La commande directe ;
- La commande indirecte.

Effectivement nous avons pu voir que la commande directe est la plus simple à mettre en œuvre, mais pas la plus performante (faible robustesse vis-à-vis les variations paramétriques). En revanche, la méthode indirecte nous permet, avec le bouclage en cascade, d'avoir un système un peu performant. Elle est certes plus complexe à mettre en œuvre par rapport à la commande directe, mais permettra d'avoir un fonctionnement optimal du système de génération électrique en minimisant les éventuels soucis liés aux variations paramétriques de la MADA.

Pour améliorer la robustesse de la commande vectorielle, il est préférable de voir d'autres techniques de commande qui est plus robuste. Ainsi notre prochain chapitre sera consacré à la commande non linéaire par mode glissant.

Chapitre IV :

*Commande par mode
glissant de la MADA*

Chapitre IV : Commande par mode glissant de la MADA

IV.1. Introduction

La commande par mode de glissement (CMG) en anglais : Sliding mode control (SMC), est un mode de fonctionnement particulier des systèmes de réglage à structures variables (S.S.V). Elle est caractérisée par la discontinuité de la commande aux passages par une surface de commutation. Toute repose donc sur le choix approprié de cette surface de commutation appelée encore surface de glissement.

La théorie de ces systèmes a été étudiée et développée en ex-union soviétique, tout d'abord le professeur EMELYANOV, puis par d'autres collaborateurs comme UTKIN, à partir des résultats des études du mathématicien FILIPPOV sur les équations différentielles à second membre discontinu. Ensuite, les travaux ont été repris ailleurs tant aux états unis par SLOTINE qu'au Japon par TONG HARASHIMA et HASHIMOTO. Ce n'est qu'à partir des années quatre-vingt que la commande des structures variables par mode de glissement est devenue intéressante et attractive. Elle est considérée comme une des approches les plus simples pour la commande des systèmes non linéaires et les systèmes ayant un modèle imprécis. [52], [57]

Ce type de commande présente plusieurs avantages tels que robustesse, précision importante, stabilité et simplicité, temps de réponse très faible. Ceci lui permet d'être particulièrement adaptée pour traiter les systèmes qui ont des modèles mal connus, soit à cause de problèmes d'identifications des paramètres, soit à cause de simplification sur le modèle du système.[53]

Dans ce chapitre, seront présentés les bases mathématiques de la commande de système à structure variable ainsi que des concepts généraux sur la technique des modes glissants. Ensuite nous étudions les types de lois de commande utilisés. Après, on présente l'application de cette technique pour le réglage des puissances active et réactive de la GADA dédiée au système d'énergie éolienne de 10kW. Enfin différents résultats de simulation obtenus sont présentés et discutés.

IV.2. Bases mathématiques de la commande à structure variable

Considérons le système suivant décrit par : [54]

$$\dot{x}(t) = A(x, t) + B(x, t)u(t) \tag{IV.1}$$

Où $x \in R^n$ est le vecteur d'état, $u \in R^m$ le vecteur de commande avec $n < m$. La structure d'un système de commande à structure variable est définie par chacune des composantes du vecteur de commande, $u_i (i = 1, \dots, m)$, par :

- m fonctions de commutations représentées sous forme vectorielle par la fonction $S(x)$.
- une commande à structure variable,

$$u_i(x) = \begin{cases} u_i^+(x) & \text{pour } S_i(x) > 0 \\ u_i^-(x) & \text{pour } S_i(x) < 0 \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (\text{IV.2})$$

Pour un système de deuxième ordre (on se limite au cas $n = 2$) :

$$\dot{x} = f = \begin{cases} f^+(x, u^+) & \text{si } S(x, t) > 0; \\ f^-(x, u^-) & \text{si } S(x, t) < 0. \end{cases} \quad (\text{IV.3})$$

Les champs de vecteurs u^+ et u^- sont définis par :

$$u = \begin{cases} u^+ & \text{si } S(x, t) > 0; \\ u^- & \text{si } S(x, t) < 0. \end{cases} \quad (\text{IV.4})$$

Où $S(x, t)$ est la fonction de commutation.

La surface de commutation S_0 est définie comme suite :

$$S_0 = \{x(t) / S(x, t) = 0\} \quad (\text{IV.5})$$

Les trajectoires de f^+ et f^- associées à la fonction f qui convergent vers la surface de commutation, et qui ont la particularité de glisser sur celle-ci. Ce phénomène est appelé « mode de glissement », figure IV.1.

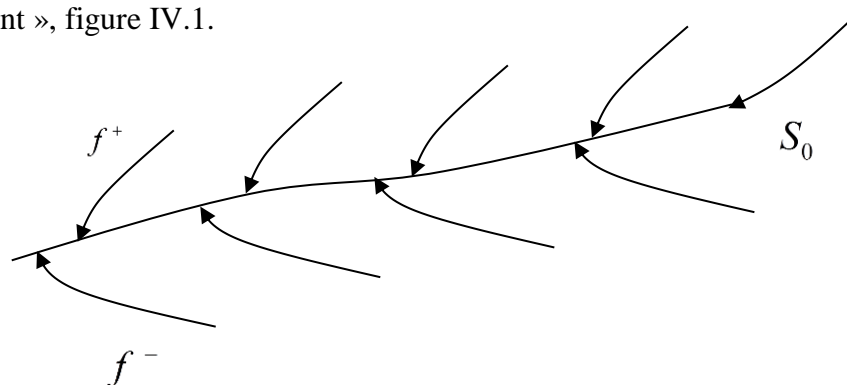


Figure IV.1 : Trajectoires de f^+ et de f^- pour le mode de glissement.

IV.3. Les modes de la trajectoire dans le plan de phase

La technique de la commande par mode glissant consiste à ramener la trajectoire d'état d'un système vers la surface de glissement et de la faire commuter à l'aide d'une logique de commutation approprié jusqu'au point d'équilibre, [55], [56].

Cette trajectoire est constituée de trois parties distinctes, figure IV.2 :

- **Mode de convergence (MC)** : Dont la variable à réguler se déplace à partir du point d'équilibre initial, en d'autres termes c'est le comportement durant lequel la variable à réguler se déplace à partir d'un état initial vers la surface de commutation.
- **Mode de régime permanent (MRP)** : Il est nécessaire pour l'étude du comportement d'un système autour du point d'équilibre.
- **Mode de glissement (MG)** : C'est le mouvement (comportement) du système le long de la surface de commutation. La dynamique dans ce mode du choix de la surface de glissement. Il apparaît quand la commande ramène l'état x sur la surface de commutation et s'efforce de l'y maintenir.

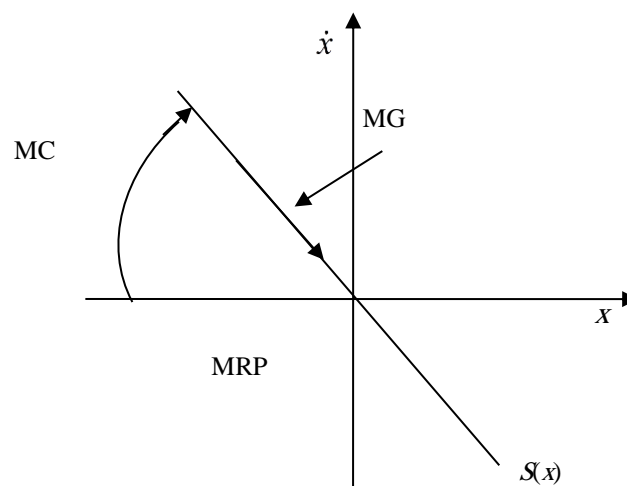


Figure IV.2 : Les modes de trajectoire dans le plan de phase.

IV.4. Conception de la commande par mode glissant

La conception de cette commande peut être divisée en trois étapes principales très dépendantes, ces étapes sont : [58]

- Le choix de la surface de glissement.
- L'établissement de condition d'existence.
- La détermination de la loi de commande.

IV.4.1. Choix de la surface de glissement

Le choix de la surface de glissement concerne non seulement le nombre nécessaire de ces surfaces, mais également leur forme en fonction de l'application et l'objectif visé. La surface de glissement est une fonction scalaire telle que l'erreur sur la variable à régler glisse sur cette surface et tend vers l'origine du plan de phase. Ainsi, la surface représente le comportement dynamique désiré. Dans la littérature, différentes formes de surface sont traitées, dont chacune donne de meilleures performances par certaines utilisations. [56]

Dans notre travail, on s'intéresse à une surface de forme non linéaire donné par J.J.Slotine : [54]

$$S(x) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{r-1} e(x) \quad (\text{IV.6})$$

Avec :

$e(x)$: L'écart sur la variable à régler : $e(x) = x_{réf} - x$

λ : Une coefficient positif qui interprète la bonde passante du contrôle désiré ;

$x_{réf}$: Valeur désiré de référence ;

r : Degré relatif, égale au nombre de fois qu'il fait dériver la sortie pour faire apparaître la commande.

$$S(x) = \begin{cases} e(x) & \text{pour } r = 1 \\ \lambda e(x) + \dot{e}(x) & \text{pour } r = 2 \\ \lambda^2 e(x) + 2\lambda \dot{e}(x) + \ddot{e}(x) & \text{pour } r = 3 \end{cases} \quad (\text{IV.7})$$

L'objectif de cette commande est de garder la surface qui tend vers zéro. Cette dernière est une équation différentielle linéaire dont l'unique solution est $e(x)=0$, pour un choix convenable du paramètre λ . Ceci revient à un problème de poursuite de trajectoire, ce qui est équivalent à une linéarisation exacte de l'écart, tout en respectant la condition de convergence.

IV.4.2. Conditions de convergence et d'existence

Les conditions d'existence et de convergence sont les critères qui permettent aux dynamiques du système de converger vers la surface de glissement et d'y rester indépendamment de la perturbation.

La fonction de Lyapunov est une fonction scalaire positive $V(x) > 0$ pour les variables d'état du système. La loi de commande doit faire décroître cette fonction $\dot{V}(x) < 0$. L'idée est de choisir une fonction scalaire $S(x)$ pour garantir l'attraction de la variable à contrôler vers sa valeur de référence et de construire une commande u tel que le carré de la surface correspond à une fonction de Lyapunov. En définissant la fonction de Lyapunov par : [52]

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x) \quad (\text{IV.8})$$

La dérivée de cette fonction est :

$$\dot{V}(x) = \dot{S}(x).S(x) \quad (\text{IV.9})$$

Pour que la fonction $V(x)$ décroisse, il suffit de s'assurer que sa dérivée est négative. Ceci n'est vérifié que si la condition (IV.9) est vérifiée. L'équation ($\dot{V}(x) < 0$) explique que le carré de la distance vers la surface mesurée par $S^2(x)$ diminue tout le temps, contraignant la trajectoire du système à se diriger vers la surface dans les deux côtés. Cette condition suppose un régime glissant idéal où la fréquence de commutation est infinie.

IV.4.3. La détermination de la loi de commande

Une fois la surface de glissement est choisie, ainsi que le critère de convergence, il reste à déterminer la commande nécessaire pour ramener la variable à contrôler vers la surface et ensuite vers son point d'équilibre en maintenant la condition d'existence des modes glissants. Nous avons donc :

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_n \quad (\text{IV.10})$$

On définit un vecteur commande équivalente u_{eq} comme étant la solution du régime glissant idéal du modèle mathématique de l'équation (IV.1). Ce régime n'ayant lieu que sur $S_i(x) = 0, i=1,2,\dots,m$, on exprime la condition pour l'obtention de la commande équivalente comme :

$$\begin{cases} \frac{dS_i}{dt} = \dot{S}_i = 0 \end{cases} \quad (\text{IV.11})$$

u_n : est un terme introduit pour satisfaire la condition de convergence $S(x)\dot{S}(x) < 0$. Il détermine ainsi le comportement dynamique du système durant le mode de convergence, donc pour garantir l'attractivité de la variable à contrôler vers la surface de glissement et il est donné par : $\dot{S}(x) = u_n$

La commande u_{eq} peut être interprétée comme étant la valeur moyenne que prend la commande u lors des commutations rapides entre $u^+(u_{max})$ et $u^-(u_{min})$, figure IV.3.

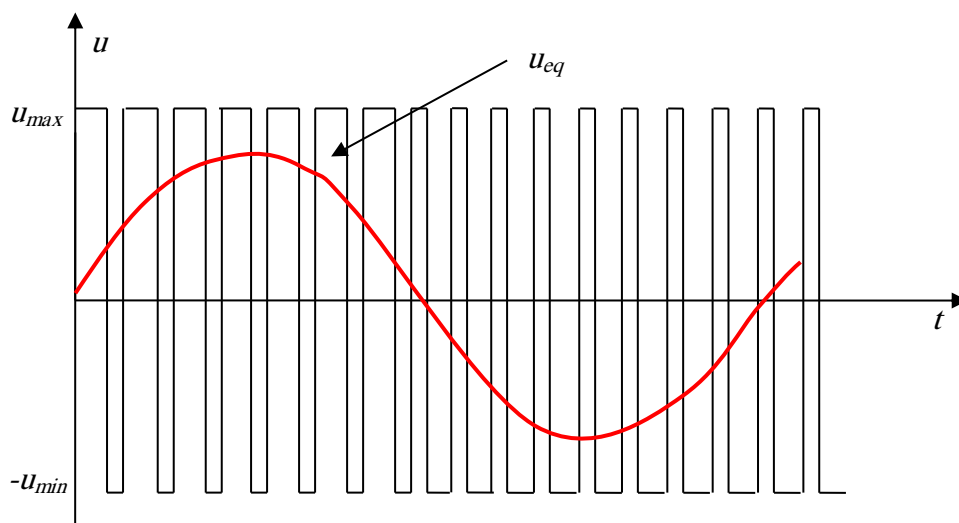


Figure IV.3 : Valeur continue de la commande. u_{eq} .

IV.4.3.1. Commande équivalente « u_{eq} »

Nous nous intéressons au calcul de la commande équivalente et par la suite au calcul de la commande attractive du système défini dans l'espace d'état par l'équation (IV.1).

Le vecteur u est composé de deux grandeurs : u_{eq} , u_n soit :

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_n \quad (\text{IV.12})$$

Nous avons :

$$\dot{S}(x) = \frac{dS}{dt} = \frac{\partial S}{\partial x} \frac{\partial x}{dt} = \frac{\partial S}{\partial x} \{f(x,t) + g(x,t)u_{eq}(t)\} + \frac{\partial S}{\partial t} \{g(x,t)u_n\} \quad (\text{IV.13})$$

En mode glissant et en régime permanent, la dérivée de la surface est nulle (car la surface est égale à zéro). Ainsi, nous obtenons :

$$u_{eq}(t) = \left\{ \frac{\partial S}{\partial t} f(x,t) \right\}^{-1} \left\{ \frac{\partial S}{\partial t} f(x,t) \right\},, \quad u_n = 0 \quad (\text{IV.14})$$

Durant le mode de convergence, en remplaçant le terme u_{eq} par sa valeur (IV.14) dans l'équation (IV.13). Donc, nous obtenons une nouvelle expression de la dérivée de la surface, soit :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial t} \{g(x,t)u_n\} \quad (IV.15)$$

Le problème revient à trouver u_n tel que :

$$S(x)\dot{S}(x) = S(x) \frac{\partial S}{\partial t} \{g(x,t)u_n\} < 0 \quad (IV.16)$$

IV.4.3.2. Commande discontinue de base « u_n »

Plusieurs choix pour la commande discontinue u_n peuvent être faits. La forme la plus simple que peut prendre la commande u_n est :

$$u_n = K \text{sign}(S(x)) \quad (IV.17)$$

Avec : K est un gain positif.

ou $\text{sign}(S(x,t))$ est la fonction définie par :

$$\text{sign}(S(x)) = \begin{cases} -1 & \text{si } S(x,t) < 0 \\ 1 & \text{si } S(x,t) > 0 \end{cases} \quad (IV.18)$$

Ce premier choix de la fonction *discontinue* est représenté sur la figure (IV.4) suivante :

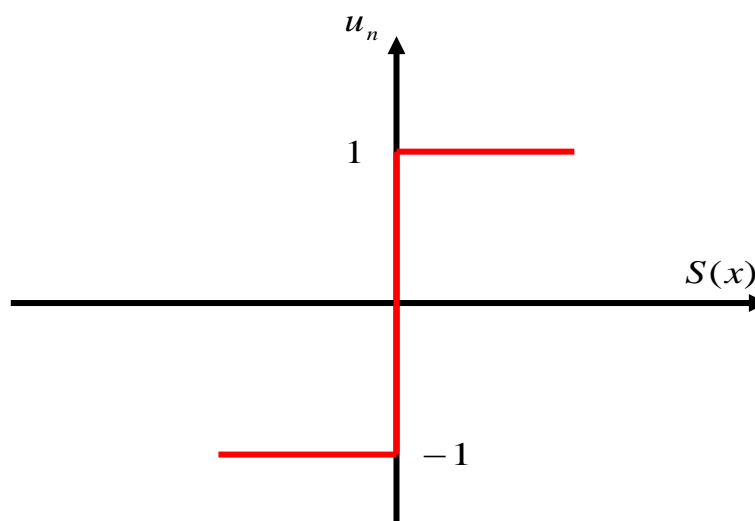


Figure IV.4 : Définition de la fonction « sign ».

L'utilisation de la fonction « *sign* » signifie que la commande entre deux valeurs $\pm K$ avec une fréquence théoriquement infinie si le gain K est très petit. Le temps de réponse sera long si le gain K est très grand, dans le cas contraire le temps de réponse sera rapide mais des oscillations indésirables risquent d'apparaître « Couramment appelées Chattering » sur les réponses en régime permanent, figure IV.5.

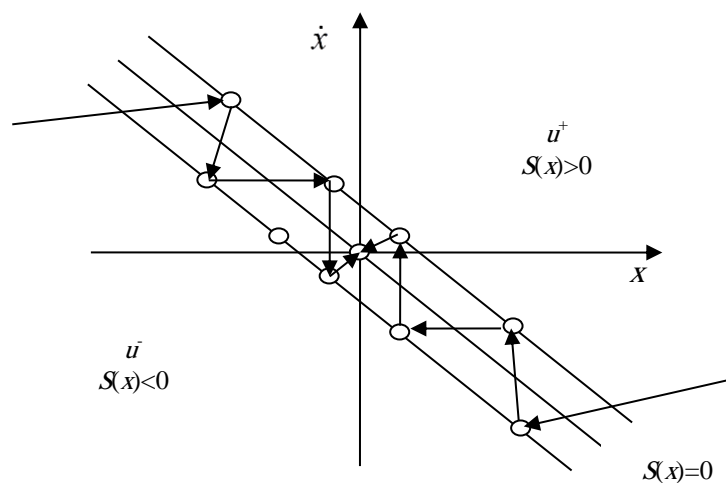


Figure IV.5 : Phénomène de chattering.

Dans le but de réduire les oscillations haute fréquence (indésirables sur les réponses), des solutions classiques consistent à imposer une variation de la valeur de la commande en fonction de la distance entre la variable d'état et la surface de glissement. Cependant, il est possible de réduire ce phénomène par l'introduction de la fonction de saturation adéquate qui filtre les hautes fréquences, figure IV.6.

$$u_n = K \cdot F_{sat} \left(\frac{S}{\varepsilon} \right) \quad (\text{IV.19})$$

Avec : F_{sat} : la fonction de saturation, elle est définie comme suit :

$$F_{sat} \left(\frac{S}{\varepsilon} \right) = \begin{cases} \frac{S}{\varepsilon} & \text{si } \left| \frac{S}{\varepsilon} \right| < 1 \\ \text{sign} \left(\frac{S}{\varepsilon} \right) & \text{si } \left| \frac{S}{\varepsilon} \right| > 1 \end{cases} \quad (\text{IV.20})$$

Avec :

ε : Largeur du seuil de la fonction saturation.

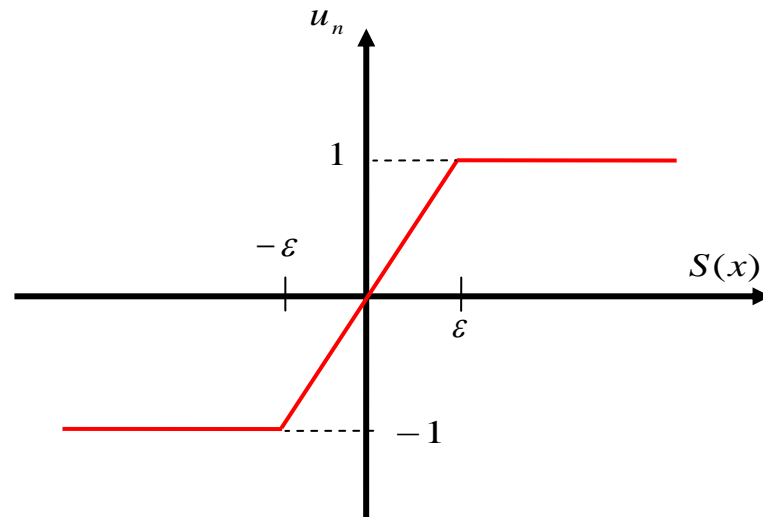


Figure IV. 6 : Définition de la fonction « SAT ».

On peut aussi remplacer la fonction « sign » par des fonctions de commutation douce. On donne ci-dessous un exemple de ce type des fonctions dans la figure IV.7, soit :

$$\text{Smooth}(S) = \frac{S}{|S| + \lambda} \quad (\text{IV.21})$$

Où λ est un paramètre définissant le degré d'atténuation des oscillations. Lorsque λ tend vers zéro, on tend vers la même commande discontinue défini par l'équation (IV.17).

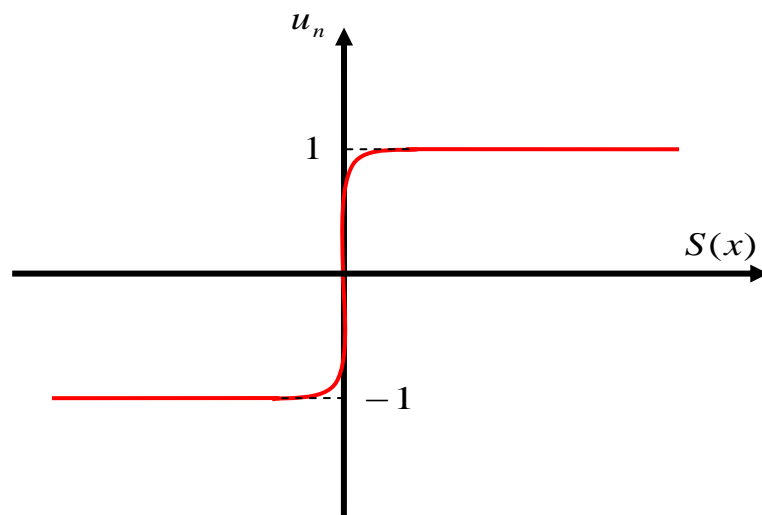


Figure IV.7 : Définition de la fonction « Smooth ».

IV.5. Application de la commande par mode glissant à la MADA [59]

IV.5.1 Contrôle de la puissance active

Pour contrôler la puissance, dans l'équation (IV.6) on choisit $r = 1$, l'expression de la surface de control de la puissance active a pour forme :

$$S(P) = (P_{s-réf} - P_s) \quad (IV.22)$$

La dérivée de la surface est :

$$\dot{S}(P) = (\dot{P}_{s-réf} - \dot{P}_s) \quad (IV.23)$$

On remplace l'expression (III.8) de la puissance active du modèle de la machine pour un contrôle indépendant des puissances traité au chapitre III dans l'équation (IV.23) on obtient :

$$\dot{S}(P) = (\dot{P}_{s-réf} + V_s \frac{M}{L_s} \dot{I}_{qr}) \quad (IV.24)$$

On tire l'expression du courant I_{qr} de l'équation (III.12) de la tension V_{qr}

$$\dot{S}(P) = (\dot{P}_{s-réf} + V_s \frac{M}{L_s L_r \sigma} (V_{qr} - R_r I_{qr})) \quad (IV.25)$$

En introduisant la commande équivalente $V_{qr} = V_{qr}^{eq} + V_{qr}^n$ dans l'équation (IV.25) on obtient :

$$\dot{S}(P) = (\dot{P}_{s-réf} + V_s \frac{M}{L_s L_r \sigma} ((V_{qr}^{eq} + V_{qr}^n) - R_r I_{qr})) \quad (IV.26)$$

Avec :

$$\sigma = 1 - M^2 / L_s L_r$$

Durant le mode de glissement et en régime permanent, on a :

$$S(P) = 0, \text{ donc } \dot{S}(P) = 0, \text{ et } V_{qr}^n = 0 \quad (IV.27)$$

On tire de l'équation précédente la grandeur de commande équivalente V_{qr}^{eq} qui s'écrit :

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

Durant le mode de convergence, pour que la condition $S(P)\dot{S}(P) \leq 0$ soit vérifiée, on pose:

$$\dot{S}(P) = -V_s \frac{M}{\sigma L_s L_r} V_{qr}^n \quad (IV.29)$$

Par conséquent, le terme de commutation est donné par :

$$V_{qr}^n = KV_{qr} \text{ sign}(S(P)) \quad (\text{IV.30})$$

Pour vérifier la condition de stabilité du système, le paramètre KV_{qr} doit être positif.

Afin d'atténuer tout dépassement possible de la tension de référence V_{qr} , Il est souvent utile de rajouter un limiteur de tension qui s'exprime par :

$$V_{qr}^{lim} = V_{qr}^{max} \text{ sat}(P) \quad (\text{IV.31})$$

IV.5.2 Contrôle de la puissance réactive

Pour contrôler la puissance réactive on prend $r = 1$ dans l'équation (IV.6), l'expression de la surface de control de la puissance réactive a pour forme :

$$S(Q_s) = (Q_{s-ref} - Q_s) \quad (\text{IV.32})$$

La dérivée de la surface est :

$$\dot{S}(Q) = (\dot{Q}_{s-ref} - \dot{Q}_s) \quad (\text{IV.33})$$

On remplace l'expression (III.8) de la puissance réactive dans l'équation (IV.33) on obtient :

$$\dot{S}(Q) = (\dot{Q}_{s-ref} - (-V_s \frac{M}{L_s} \dot{I}_{dr})) \quad (\text{IV.34})$$

On tire l'expression du courant I_{dr} de l'équation (III.12) de la tension V_{dr}

$$\dot{S}(Q) = (\dot{Q}_{s-ref} + V_s \frac{M}{L_s L_r \sigma} (V_{dr} - R_r I_{dr})) \quad (\text{IV.35})$$

En introduisant la commande équivalente $V_{dr} = V_{dr}^{eq} + V_{dr}^n$ dans l'équation (IV.35) on obtient :

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

Durant le mode de glissement et en régime permanent, on a :

$$S(Q) = 0, \text{ donc } \dot{S}(Q) = 0, \text{ et } V_{dr}^n = 0 \quad (\text{IV.37})$$

On tire de l'équation précédente la grandeur de commande équivalente V_{dr}^{eq} qui s'écrit :

$$V_{dr}^{eq} = -\dot{Q}_{s-ref} \frac{\sigma L_s L_r}{V_s M} + R_r I_{dr} \quad (\text{IV.38})$$

Durant le mode de convergence, pour que la condition $S(Q)\dot{S}(Q) \leq 0$ soit vérifiée, on pose :

$$\dot{S}(Q) = -V_s \frac{M}{\sigma L_s L_r} V_{dr}^n \quad (\text{IV.39})$$

Par conséquent, le terme de commutation est donné par :

$$V_{dr}^n = KV_{dr} \text{sign}(S(Q)) \quad (\text{IV.40})$$

Pour vérifier la condition de stabilité du système, le paramètre KV_{dr} doit être positif. Afin d'atténuer tout dépassement possible de la tension de référence V_{dr} , Il est souvent utile de rajouter un limiteur de tension qui s'exprime par :

$$V_{dr}^{lim} = V_{dr}^{max} \text{sat}(Q) \quad (\text{IV.41})$$

IV.6. Résultats de simulations obtenus

Pour illustrer les performances de la commande par mode glissant appliquée à une MADA à 10 kW reliés à un réseau 400V / 50Hz, un bloc diagramme du système est proposé dans la figure IV.8.

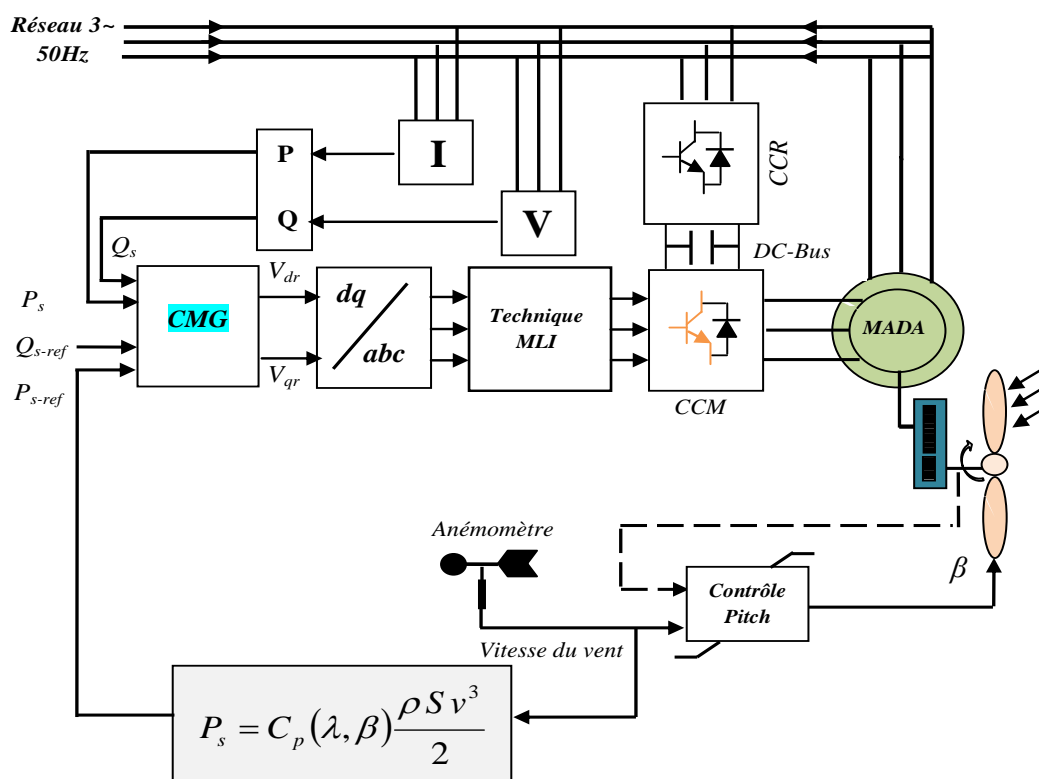
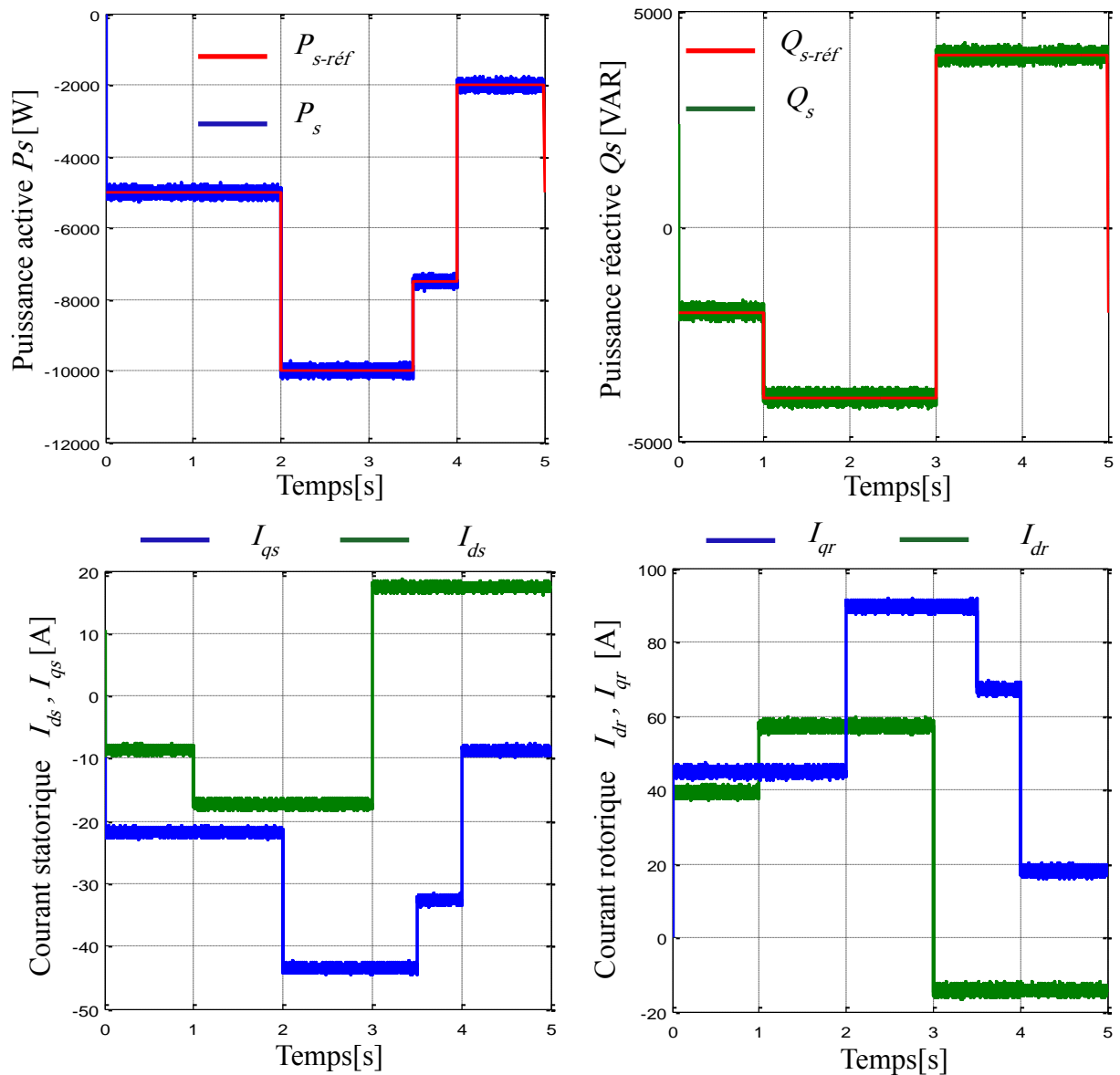


Figure IV.8 : Schéma bloc de l'ensemble du système étudié (CMG).

IV.6.1. Test de suivi de consigne

Les résultats tracés dans les figures suivantes montrent les pouvoirs générés lorsque les signaux de référence sont appliqués. Figure IV.9 montre les réponses du système à vitesse fixe, alors que la figure IV.10 montre les réponses du système à vitesse variable.

a)- Vitesse du vent fixe



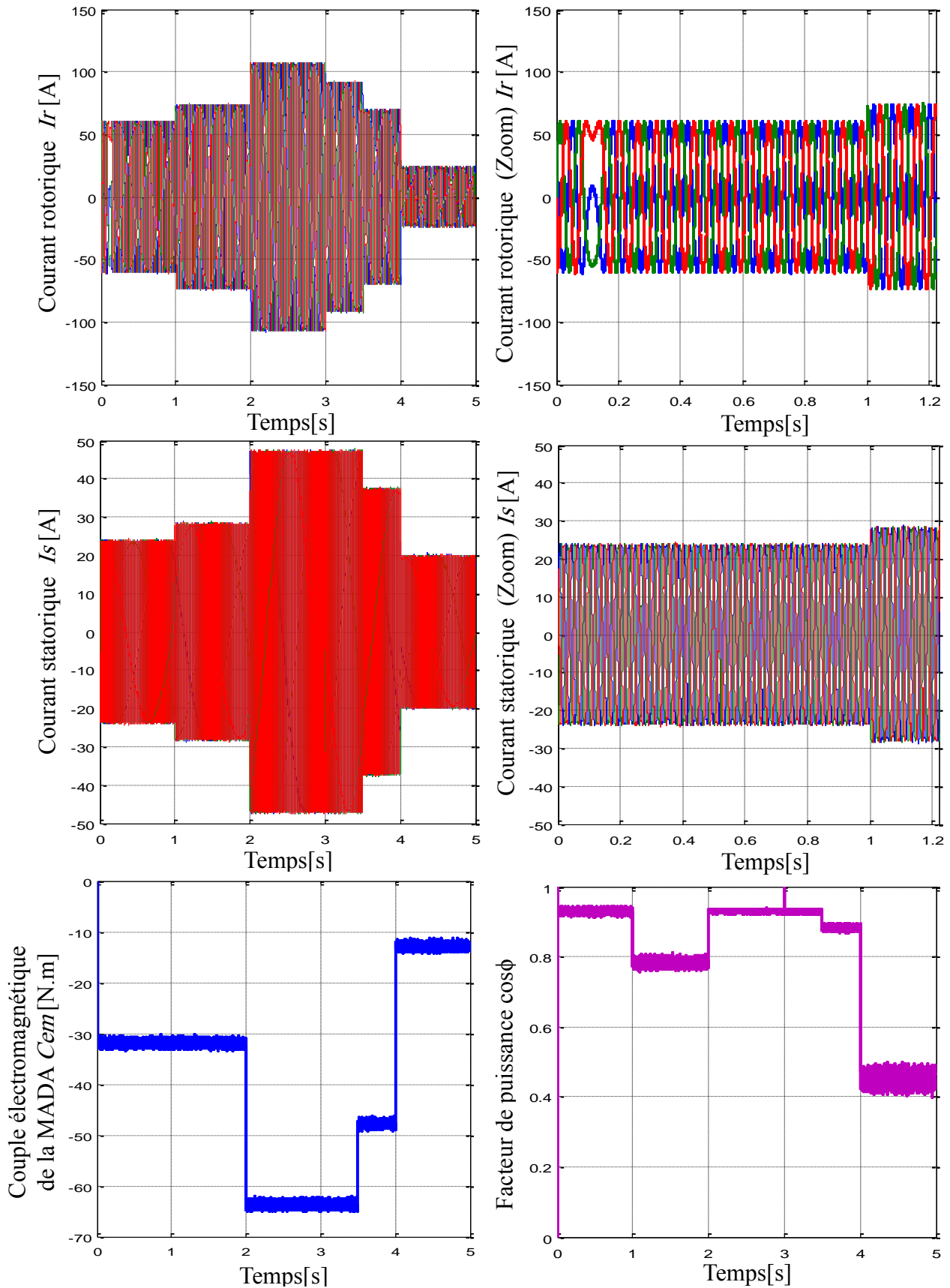
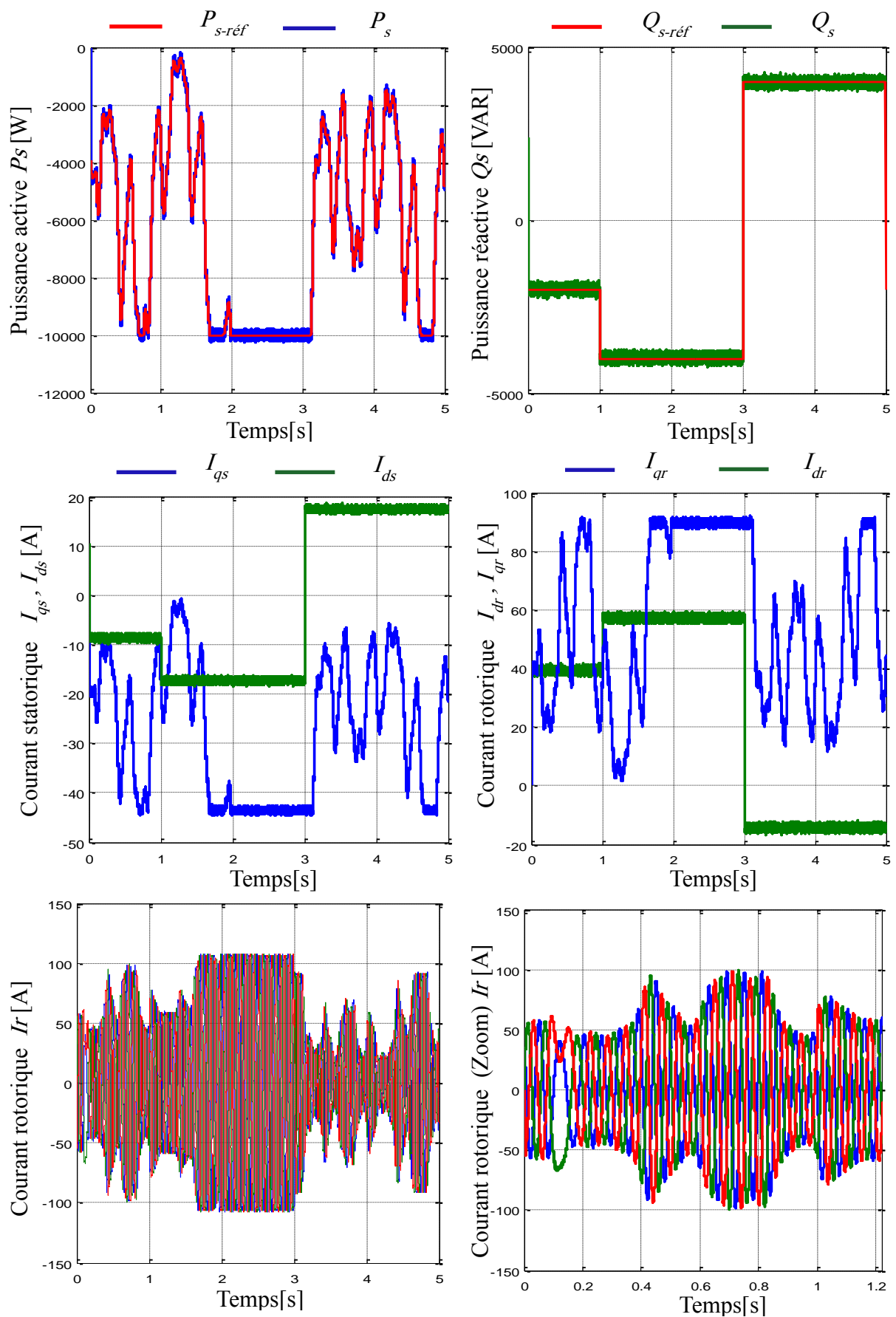


Figure IV.9 : Résultats obtenus de la CMG à vitesse fixe de la MADA.

b)- Vitesse du vent variable



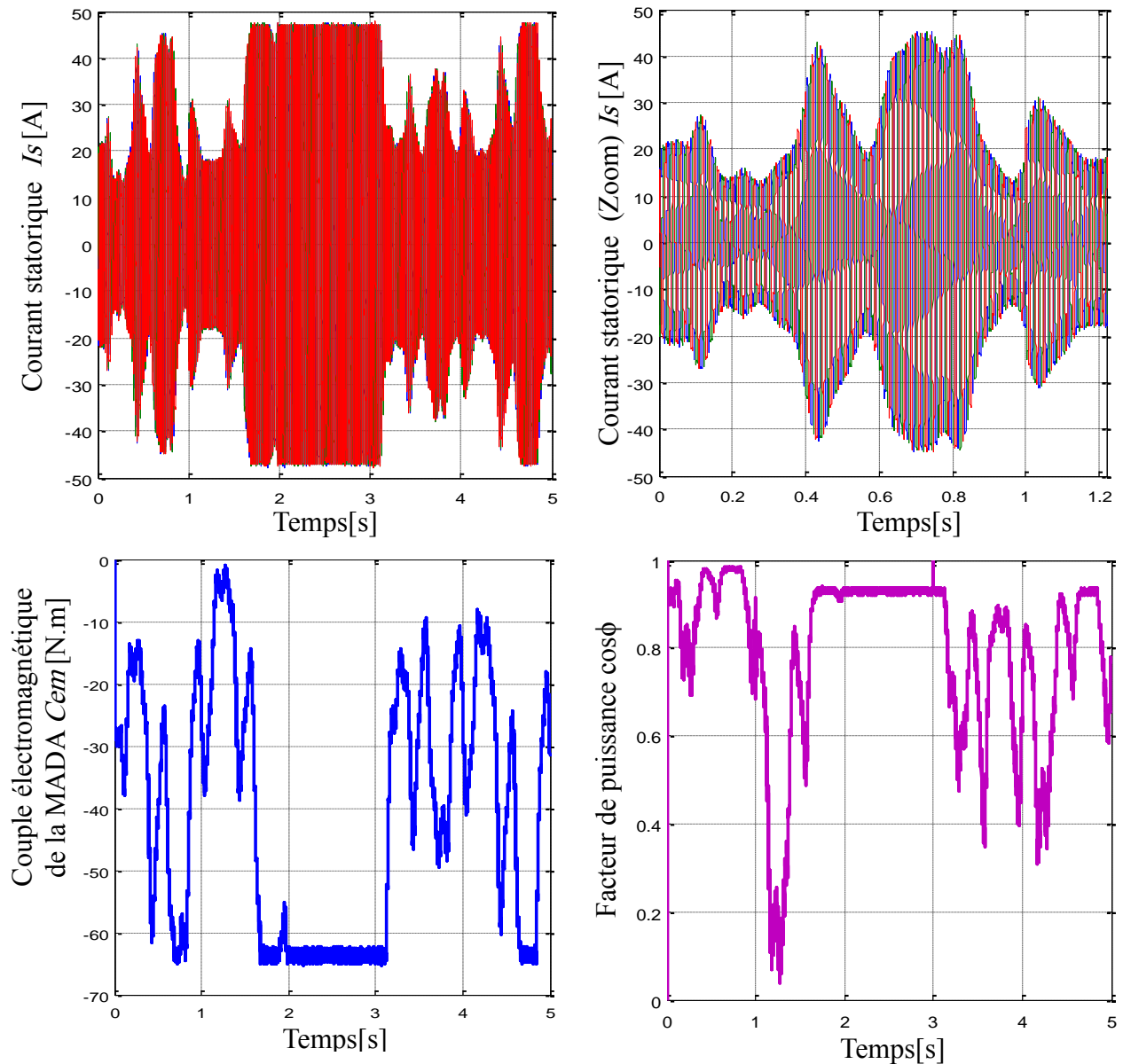


Figure IV.10 : Résultats obtenus de la CMG à vitesse variable de la MADA.

c)- Interprétation des résultats

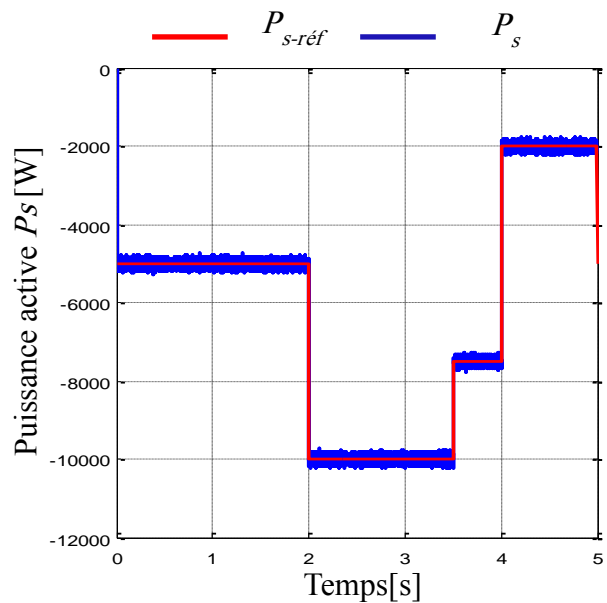
Les résultats de simulations obtenus montrent les grandes performances de la commande robuste par régulateur mode glissant. Ces régulateurs présentent un découplage parfait au réglage des puissances active et réactive au niveau du stator de la MADA que ce soit à vitesse fixe ou variable.

Nous constatons aussi que les réponses sont sans dépassement, rapide en régime transitoire et l'erreur statique tend vers zéro.

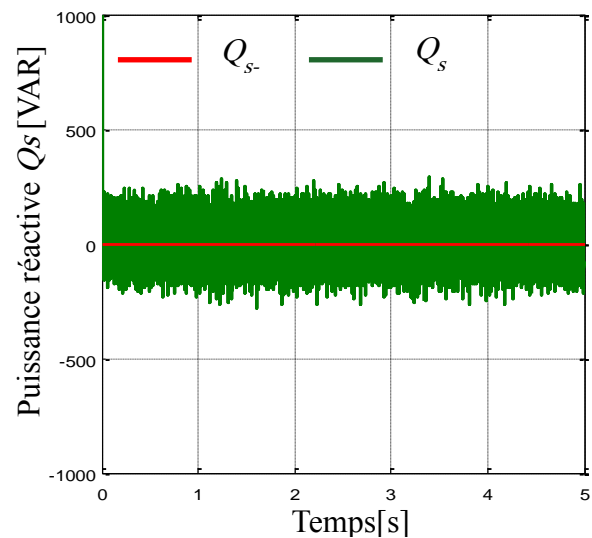
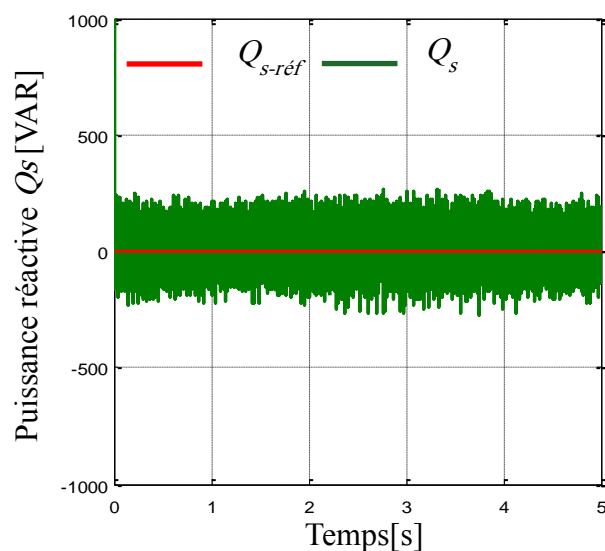
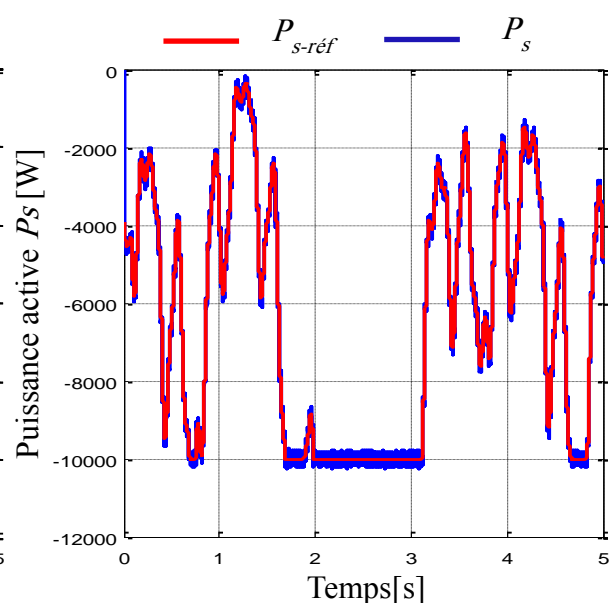
IV.6.2. Contrôle de facteur de puissance

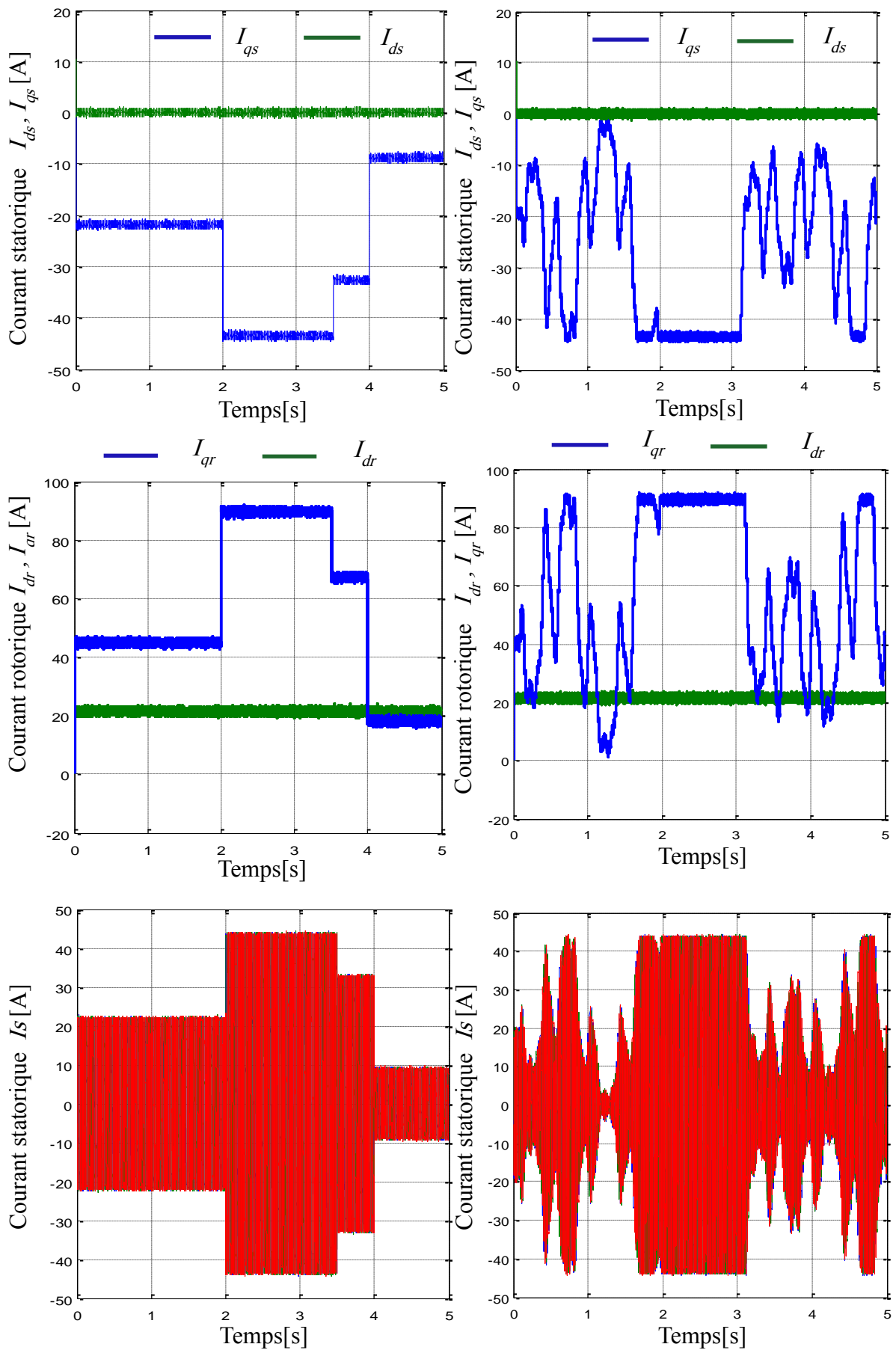
Dans cette partie la consigne de puissance réactive statorique sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau.

a)- Vitesse du vent fixe



b)- Vitesse du vent variable





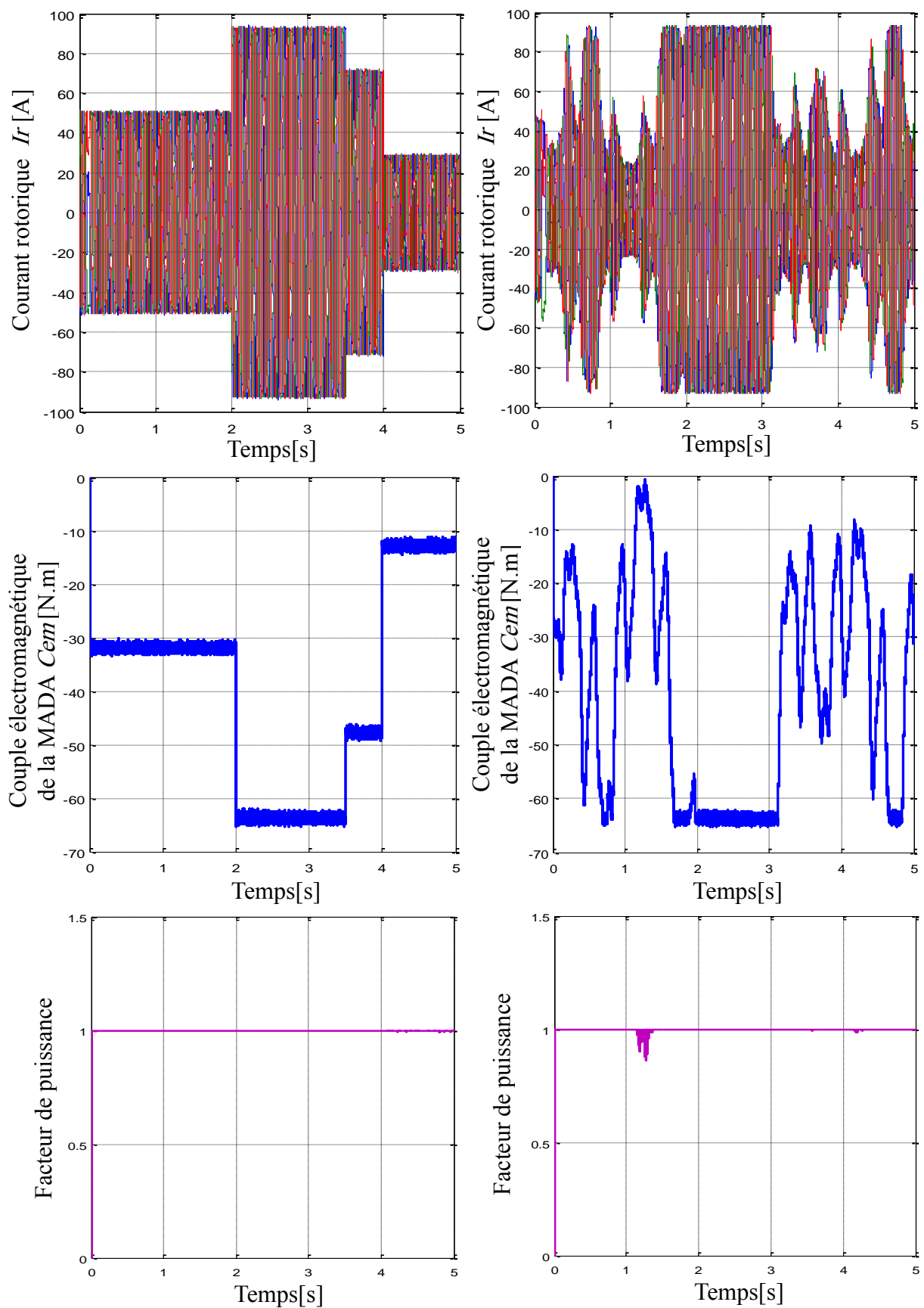


Figure IV.11 : Commande par mode glissant de la MADA à facteur de puissance unitaire.

c)- Interprétation des résultats

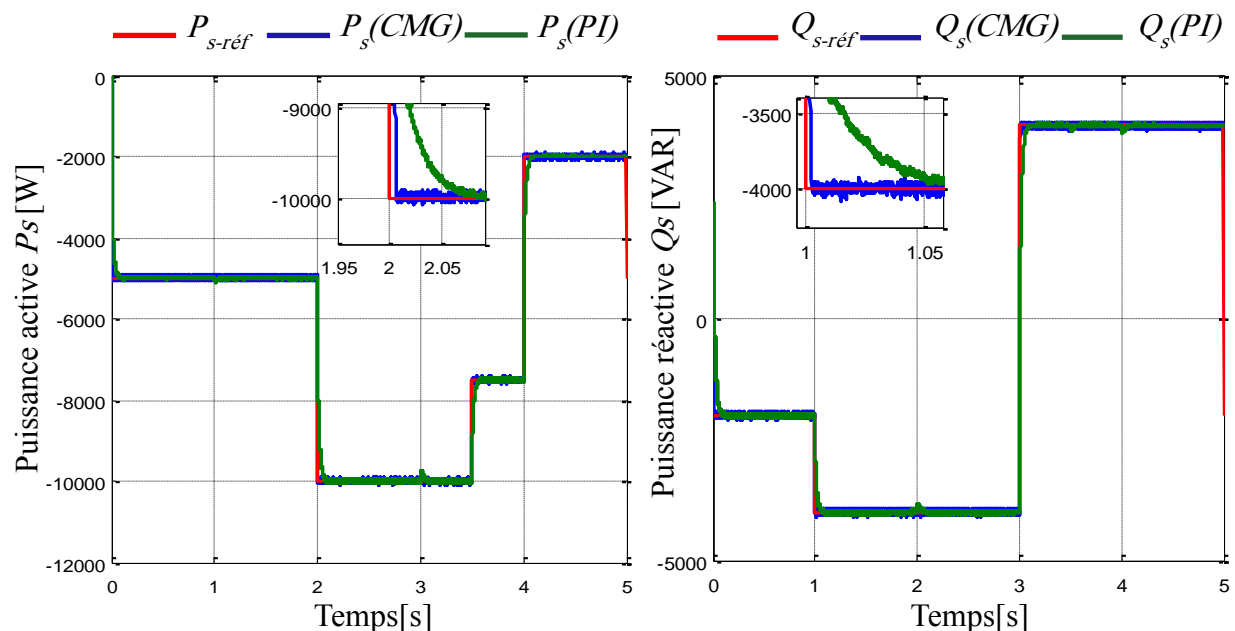
La figure IV.11, représente les résultats de simulations de la commande par mode glissant de la MADA intégrée à un système éolien à facteur de puissance unitaire dans le cas d'un fonctionnement de vitesse et variable.

D'après les résultats de simulation obtenus on peut dire que le contrôle de la puissance active pour la génératrice éolienne est parfaitement réalisé à un facteur de puissance unitaire ($\cos \phi = 1$) par la commande mode glissant dans le cas d'un fonctionnement à vitesse fixe et variable.

IV.6.3. Tests de robustesse

Dans le but de tester la robustesse de la commande par mode glissant de la MADA, nous avons également étudié l'influence des variations paramétriques sur les performances de la régulation. A cet effet, les paramètres du modèle de la MADA ont été variés de la même façon que dans le chapitre précédent. Les résultats de simulation obtenus sont illustrés sur la figure IV.12.

a)- Vitesse du vent fixe



b)- Vitesse du vent variable

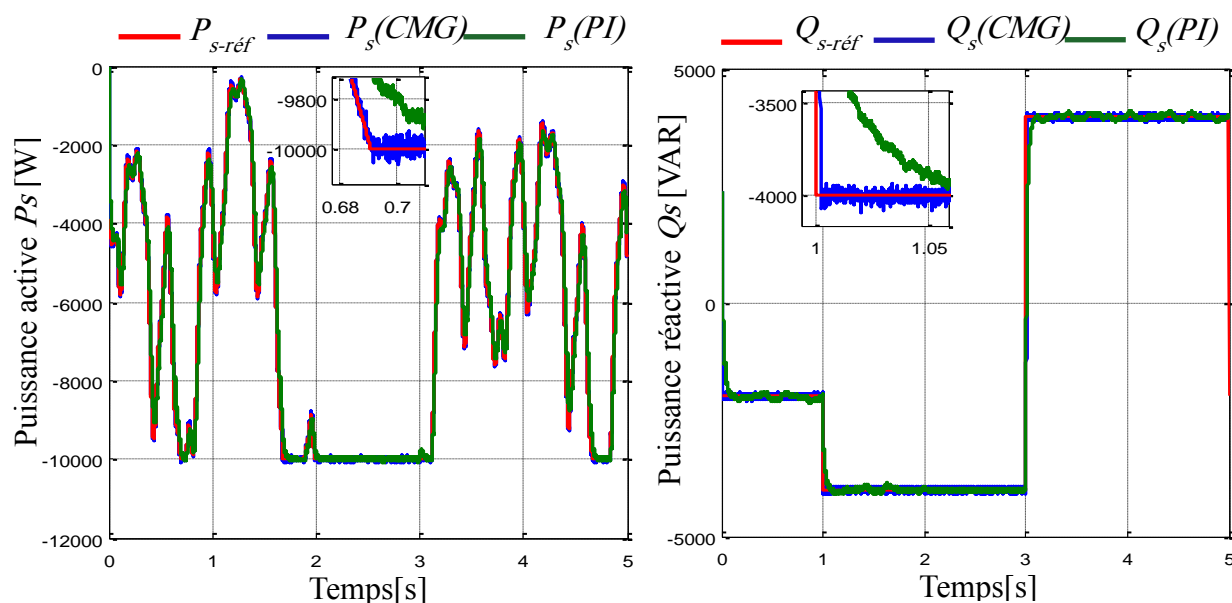


Figure IV.12 : Influence des variations paramétriques sur la commande par mode glissant.

c)- Interprétation des résultats

D'après les résultats obtenus on constate que le réglage des puissances active et réactive par des régulateurs en mode glissant apporte des performances et robustesse remarquables par rapport aux régulateurs classiques PI.

IV.7. Conclusion

Le réglage de la puissance active et réactive par mode glissant, apporte des améliorations remarquables par rapport aux régulateurs PI. Car, les régulateurs par mode de glissement offrent de bonnes performances statiques et dynamiques (stabilité, rapidité et précision), c'est à-dire un temps de réponse plus court et sans dépassement, et ils accordent aussi une meilleure poursuite ainsi qu'un rejet quasi-total de la perturbation.

Les résultats de la simulation montrent les avantages de la commande par mode de glissement se situent à la robustesse qu'elle offre vis-à-vis des variations paramétriques. On peut cependant noter que les performances du système peuvent être altérées à cause des oscillations fortes de l'organe de commande, (l'effet Chattering). Pour remédier ce problème on fait appel à une autre technique de commande qui permet améliorer les performances et de réduire ce phénomène, cette technique est appelée commande hybride par mode glissant floue de la MADA et qui sera l'objet de chapitre suivant.

Chapitre V :

*Commande hybride par
mode glissant floue de
la MADA*

Chapitre V : Commande hybride par mode glissant floue de la MADA

V.1. Introduction

La commande par mode glissant a été utilisée en raison de sa robustesse vis à vis des incertitudes structurelles (variations des paramètres internes) et des perturbations externes. Cependant, la présence de la fonction « *sign* » dans la loi de commande provoque un phénomène de broutement (chattering) qui peut exciter les hautes fréquences jusqu'à endommager le système. Pour garder la robustesse du mode glissant et d'éliminer le phénomène de broutement, sans pour autant détériorer les performances du système plusieurs approches dites "hybrides" ont été proposées dans la littérature. Ces approches concernent la combinaison de différentes techniques de commandes tels que la commande adaptative, floue, et la commande de type H_∞ ...etc, pour obtenir les meilleures performances du système.

Dans ce chapitre, notre but est de d'appliquer une commande hybride par mode glissant floue (CMGF) pour contrôler indépendamment des puissances active et réactive générées par la MADA intégrée à un système éolien de 10 kW afin d'obtenir une commande robuste et lisse. Pour cela, la première partie présente les notions de base nécessaire de la commande par logique floue. Ensuite, l'étude et l'application de la commande par mode glissant floue sera l'objet de la deuxième partie. Enfin, les performances du système à étudier sont testées et comparées par simulation en termes de de suivi de consignes des puissances active et réactive et la robustesse face aux variations paramétriques de la machine à base du logiciel Matlab/Simulink.

A. V.2. Généralités sur la commande par logique floue

V.2.1. Bref historique de la logique floue

La logique floue a été introduite en 1965 par le professeur Lotfi Zadeh. Ses principes ont été appliqués en 1974 par E.H. Mamdani à la construction d'un premier contrôleur flou. La commande floue a été largement développée au Japon à partir du début des années 80. Il existe actuellement de nombreuses réalisations industrielles en électrotechnique. La commande par la logique floue a fait l'objet de plusieurs travaux dans le domaine de la commande des convertisseurs statiques et la commande des machines électriques. Toutes ces applications ont démontré qu'un régulateur à logique floue est plus robuste qu'un régulateur conventionnel classique [60], [61].

V.2.2. Théorie floue

La logique floue traduit le raisonnement humain basé sur des données imprécises ou incomplètes ; c'est une logique qui substitue à la logique binaire une logique fondée sur des variables pouvant prendre, outre les valeurs « vrai » ou « faux », les valeurs intermédiaires « vrai » ou « faux » avec certains degrés. La formulation mathématique de la logique floue donne naissance à une théorie dite théorie des ensembles flous. Cette théorie n'est qu'une extension de la théorie classique des ensembles, sauf que la logique floue est caractérisée par la notion des valeurs intermédiaires, d'où la nécessité de mettre en évidence certaines notions de cette théorie. La logique floue permet de traiter des variables linguistiques dont les valeurs sont des mots ou expressions du langage naturel, telle que grand, petit, lent, rapide, ...etc. [62].

V.2.3 Notions de base sur les ensembles flous

V.2.3.1 Définition d'un ensemble flou

Sur un univers de discours U , un sous-ensemble flou A est défini par la donnée d'une fonction $\mu_A(x)$: [63]

$$\begin{aligned} \mu_A : U &\rightarrow [0, 1] \\ x &\rightarrow \mu_A(x) \end{aligned} \quad (V.1)$$

On définit le sous-ensemble flou A comme suivant : $A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in U\}$, où : $\mu_A(x)$ est une fonction caractéristique d'appartenance qui prend ces valeurs dans l'intervalle $[0, 1]$. Elle indique le degré d'appartenance de l'élément x à A , ainsi x au U pourrait :

- Ne pas appartenir à A $\mu_A(x) = 0$
- Appartenir un peu à A $\mu_A(x)$ est voisin de 0
- Appartenir assez à A entre 0 et 1
- Appartenir fortement à A est voisin de 1
- Appartenir à A $\mu_A(x) = 1$

$$\begin{aligned} A &= \sum_{i=1}^n \frac{\mu_A(x_i)}{x} \\ A &= \int_x \frac{\mu_A(x_i)}{x} \end{aligned} \quad (V.2)$$

Si U est discret, on peut représenter l'ensemble A par :

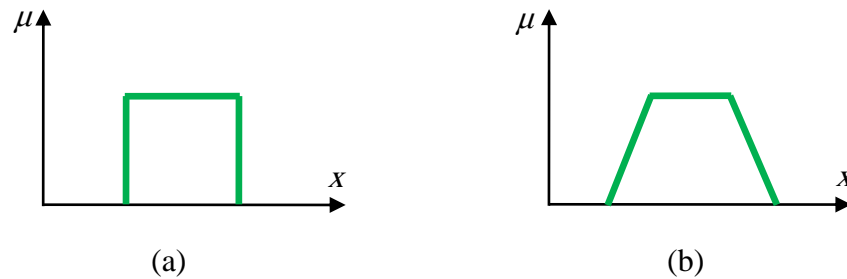


Figure V.1 : Exemple de fonction d'appartenance : (a) Logique classique, (b) Logique Floue.

V.2.3.2. Variable linguistique

La description d'une certaine situation, d'un phénomène ou d'un procédé contient en générale des expressions floues comme [64].

Quelque, beaucoup, souvent ;

Chaud, froid, rapide, lent ;

Grand, petit, ...etc.

Une variable linguistique est généralement décomposée en un ensemble de termes, qui couvrent tout son domaine de variation. Elle sera représentée par un triplé $(x, T(x), U)$ dans lequel x est le nom de variable linguistique, $T(x)$ est ensemble des termes de variable linguistique qui peut prendre la variable x et U est l'univers de discours associé. Par exemple, la variable linguistique température peut avoir comme valeur les termes linguistiques qui appartiennent à l'ensemble $T(x) = \{\text{Très froid, froid, tiède, chaud, très chaud}\}$. L'univers de discours est $U = [0^{\circ}\text{C}, 40^{\circ}\text{C}]$, figure V.2.

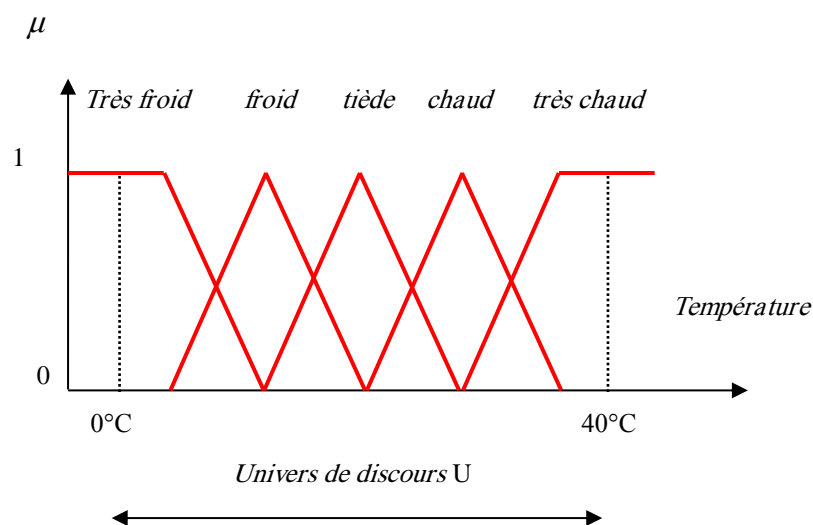


Figure V.2 : Fonctions d'appartenance.

V.2.3.3. Fonction d'appartenance

Afin de pouvoir traiter numériquement les variables linguistiques, il faut les soumettre à une définition mathématique à base de fonctions d'appartenance qui montrent le degré de vérification de ces variables aux différents sous-ensembles. Les représentations graphiques des fonctions d'appartenances les plus utilisées sont illustrées dans la figure V.3, leurs expressions analytiques sont définies de la manière suivante : [6]

- **la fonction triangulaire**, définie par trois paramètres a , b et c , soit :

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (\text{V.3})$$

- **la fonction trapézoïdale**, définie par quatre paramètres a , b , c et d soit :

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (\text{V.4})$$

- **la fonction en cloche**, définie par deux paramètres, x_0 qui détermine la position du sommet ($\mu = 1$) et a qui impose la largeur du domaine, soit :

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-x_0}{a}\right)^2} \quad (\text{V.5})$$

- **la fonction gaussienne**, définie par deux paramètres σ , x_0 , soit :

$$\mu(x) = \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right) \quad (\text{V.6})$$

- **la fonction sigmoïde**, définie par deux paramètres a , x_0 , soit :

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \exp(-a \cdot (x - x_0))} \quad (\text{V.7})$$

On notera que la forme rectangulaire correspond exactement à la logique classique, et que le triangle peut être considéré comme un cas particulier du trapèze, si les deux sommets qui correspondent aux valeurs a et c coïncident.

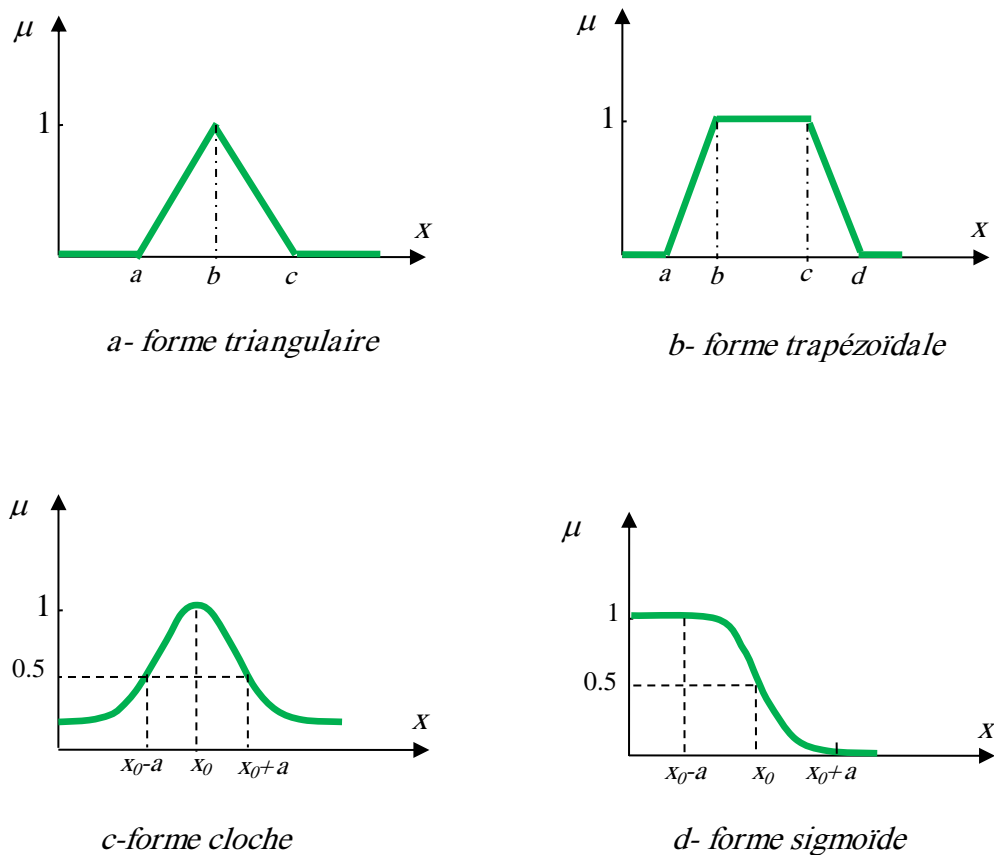


Figure. IV.3: Formes usuelles des fonctions d'appartenance.

V.2.3.4. Opérations sur les ensembles flous

Soient A et B deux ensembles flous dans U ayant respectivement μ_A et μ_B comme fonction d'appartenance, l'union, l'intersection et la complémentation des ensembles flous sont définis à l'aide de leur fonction d'appartenance.

➤ Union (disjonction)

L'union de deux ensembles flous A et B de U est l'ensemble flou constitué des éléments du U affectés de plus grand de leurs deux degrés d'appartenance, elle est définie comme l'ensemble flou : $C = A \cup B$ (A ou B), tel que :

$$\forall x \in U \quad \mu_C(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (\text{V.8})$$

L'opérateur max est commutatif et associatif :

$$\begin{aligned}
\mu_C(x) &= \max[\mu_A, \mu_B, \mu_C] \\
\mu_C(x) &= \max[\max[\mu_A, \mu_B], \mu_C] \\
\mu_C(x) &= \max[\mu_A, \max[\mu_B, \mu_C]] \\
\mu_C(x) &= \max[\max[\mu_A, \mu_C], \mu_B]
\end{aligned} \tag{V.9}$$

➤ **Intersection (conjonction)**

L'intersection de deux ensembles flous A et B de U est l'ensemble flou constitué des éléments U affectés du plus petit de leurs deux degrés d'appartenance.

Elle est définie comme l'ensemble flou : $D = A \cap B$ (A et B), tel que :

$$\forall x \in U \quad \mu_D(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \tag{V.10}$$

L'opérateur min est commutatif :

$$\mu_D(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \min(\mu_B(x), \mu_A(x)) \tag{V.11}$$

➤ **Complémentation**

La fonction d'appartenance $\mu_{\bar{A}}$ du complément d'un ensemble flou A est définie tel que :

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \tag{V.12}$$

➤ **Produit cartésien**

Soient $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ des ensembles flous dans $U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n$ respectivement le produit cartésien de A_1, A_2, \dots, A_n , est un ensemble flou dans l'espace produit de x_1, x_2, \dots, x_n ayant pour fonction d'appartenance :

$$\mu_{A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n} = \min(\mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2), \dots, \mu_{A_n}(x_n)) \tag{V.13}$$

➤ **Egalité**

On dit que A et B sont égaux si et seulement si :

$$\mu_B(x) = \mu_A(x) \tag{V.14}$$

➤ **Inclusion**

On dit que $A \subset B$ si et seulement si :

$$\mu_B(x) \leq \mu_A(x) \tag{V.15}$$

➤ **Relation floue**

Soient U_1, U_2, \dots, U_n des univers de discours, une relation floue est un ensemble flou dans $U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n$ exprimé comme suit :

$$R_{U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n} = \{(x_1, x_2, \dots, x_n), \mu_R(x_1, x_2, \dots, x_n) / (x_1, x_2, \dots, x_n) \in U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n\} \quad (V.16)$$

Composition de deux relations floues

Soient les deux relations floues R_1 dans $U_1 \times U_2$ et R_2 dans $U_2 \times U_3$. On définit la composition (sup^*) de R_1 et R_2 notée $R_1 \circ R_2$ par * :

$$R_1 \circ R_2 = \{(U_1, U_3) \sup(\mu_{R_1}(U_1, U_2)^* \mu_{R_2}(U_2, U_3))\}_{u_i \in U_i} \quad (V.17)$$

Où (*) représente une loi de composition pouvant être min, produit, ... etc.

V.2.4. Structure générale d'un contrôleur flou

La commande par la logique floue est en pleine expansion. En effet, cette méthode permet d'obtenir une loi de réglage souvent très efficace sans devoir faire des modélisations approfondies.

L'avantage de la commande floue par rapport aux commandes classiques est qu'elle ne nécessite pas la connaissance des modèles mathématiques du système. Par contre elle a besoin d'un ensemble de règles basées essentiellement sur la connaissance d'un opérateur qualifié manipulant le système [65].

Le schéma bloc d'un contrôleur flou est illustré par la figure V.4 suivante : [69], [70]

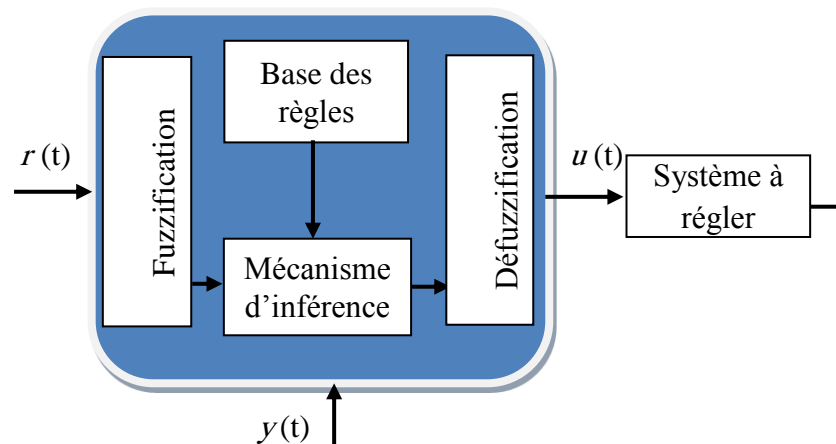


Figure IV.4: Schéma général d'un contrôleur flou.

Où :

$r(t)$: est le signal de référence ;

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

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

Le contrôleur flou comporte essentiellement quatre parties; une interface de *fuzzification*, une *base des règles*, un *mécanisme d'inférence* et une interface de *défuzzification*. [65]

V.2.4.1 Interface de fuzzification

Dans le domaine du contrôle, les données observées sont des grandeurs physiques générées par des capteurs. Il est nécessaire de convertir ces grandeurs réelles en des variables floues. Pour cela, on fait appel à une opération dite fuzzification.

Le bloc de fuzzification effectue les fonctions suivantes :
établit les plages de valeurs pour les fonctions d'appartenance à partir des valeurs des variables d'entrées ;
effectue une fonction de fuzzification qui convertit les données d'entrée en valeurs linguistiques convenables qui peuvent être considérées comme l'étiquette des ensembles flous. Cette opération doit être effectuée dans un domaine normalisé généralement par l'intervalle $[-1, 1]$ afin de faciliter le calcul.

V.2.4.2 Base des règles

Généralement les règles d'inférence peuvent être décrites de plusieurs façons, linguistiquement, symboliquement ou bien par matrice d'inférence : [68]

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

SI (la température est élevée **ET** la vitesse est faible) **ALORS** la tension est grande positive.

OU

SI (la température est moyenne **ET** la vitesse est faible) **ALORS** la tension est positive.

- *Description symboliquement* : il s'agit, dans ce cas, d'une description linguistique où l'on remplace la désignation des ensembles flous par des symboles tels que (GP, P,..., etc) désignant (Grand Positif, Positif,..., etc).
- *Description par matrice d'inférence* : dans ce cas, on rassemble toutes les règles qui sont désignées symboliquement dans un tableau appelé "*Matrice d'inférence*". Dans le cas d'un tableau à deux dimensions, les entrées du tableau représentent les ensembles flous des variables d'entrées (Température : T et Vitesse : V). Et l'intersection d'une colonne et d'une

ligne donne l'ensemble flou de sortie défini par la règle. Le tableau V.1 présente la matrice d'inférence.

Tableau. V.1 : Matrice d'inférence.

u		T		
		F	M	E
V	F	Z	P	GP
	E	Z	Z	P

Les règles que décrit ce tableau V.1 sont (sous forme symbolique).

- SI** (T est F **ET** V est F) **ALORS** $u = Z$, **OU**
SI (T est M **ET** V est F) **ALORS** $u = P$, **OU**
SI (T est E **ET** V est F) **ALORS** $u = GP$, **OU**
SI (T est F **ET** V est E) **ALORS** $u = Z$, **OU**
SI (T est M **ET** V est E) **ALORS** $u = Z$, **OU**
SI (T est E **ET** V est E) **ALORS** $u = P$.

Il s'agit maintenant de définir les degrés d'appartenance de la variable de sortie à ses sous-ensembles flous. Nous allons présenter les méthodes d'inférence qui permettent d'y arriver.

V.2.4.3 Mécanisme d'inférence

Le bloc inférence est le cœur d'un RLF, il possède la capacité de simuler les décisions humaines et de déduire les actions de commande floue à l'aide de l'implication floue et des règles d'inférence dans la logique floue. Le traitement numérique des règles d'inférence qui permet d'obtenir la sortie linguistique ou floue du régulateur se fait par différentes méthodes, on cite principalement [67] :

- la méthode d'inférence max-min ;
- la méthode d'inférence max-produit ;
- la méthode d'inférence somme-produit ;
- la méthode de Sugeno.

Chacune de ces quatre méthodes utilise un traitement numérique propre des opérateurs de la logique floue :

➤ *Méthode d'inférence Max-min*

Cette méthode réalise l'opérateur « ET » par la fonction « Min », la conclusion « ALORS » de chaque règle par la fonction « Min » et la liaison entre toutes les règles (opérateur « OU ») par la fonction « Max ». La dénomination de cette méthode, dite Max-Min ou « implication de Mamdani » est due à la façon de réaliser les opérateurs « ALORS » et « OU » de l'inférence.

La fonction d'appartenance résultante correspond au maximum des deux fonctions d'appartenance partielles puisque les règles sont liées par l'opérateur « OU ».

➤ *Méthode d'inférence Max-produit*

La différence par rapport à la méthode précédente réside dans la manière de réduire la conclusion « ALORS ». Dans ce cas, on utilise le produit.

On remarque que les fonctions d'appartenances partielles ici ont la même forme que la fonction d'appartenance dont elles sont issues multipliées par un facteur d'échelle vertical qui correspond au degré d'appartenance obtenu à travers l'opérateur « ET ». On l'appelle également « implication de Larsen ».

➤ *Méthode d'inférence Somme-produit*

Dans ce cas, l'opérateur « ET » est réalisé par le produit, de même que la conclusion « ALORS ». Cependant, l'opérateur « OU » est réalisé par la valeur moyenne des degrés d'appartenance intervenant dans l'inférence.

➤ *Méthode d'inférence Sugeno*

L'opérateur « ET » est réalisé par la formation de minimum, la conclusion de chaque règle floue a une forme polynomiale. La sortie finale est égale à la moyenne pondérée de la sortie de chaque règle floue.

D'autres méthodes ont été élaborées, ayant chacune une variante spécifique. Néanmoins, la méthode Max-Min est de loin la plus utilisée à cause de sa simplicité, dans notre travail on a utilisé cette méthode.

V.2.4.4 Interface de défuzzification

La défuzzification est la dernière étape dans la commande floue. Elle consiste à transformer les informations floues établies par le mécanisme d'inférence en une grandeur physique ou numérique pour définir la loi de commande du processus. Plusieurs méthodes ont été élaborées pour faire cette opération. Parmi les plus couramment utilisées, on cite : [68]

➤ *Méthode de Maximum*

Cette méthode génère une commande qui représente l'abscisse de la valeur maximale de la fonction d'appartenance résultante issue de l'inférence floue. Cette méthode est simple, rapide et facile, mais présente certains inconvénients lorsqu'il existe plusieurs valeurs pour lesquelles la fonction d'appartenance résultante est maximale et ne tient pas compte de l'effet de toutes les règles ;

➤ *Méthode de la moyenne des maximums*

Cette méthode génère une commande qui représente la valeur moyenne de tous les maximums, dans le cas où il existe plusieurs valeurs pour lesquelles la fonction d'appartenance résultante est maximale;

Méthode du centre de gravité

Cette méthode génère une commande égale à l'abscisse du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante issue de l'inférence floue. Cette abscisse de centre de gravité peut être déterminée à l'aide de la relation générale suivante [67]:

$$\Delta u = \frac{\int x \mu(x) dx}{\int \mu(x) dx} \quad (V.18)$$

Dans notre travail, nous nous sommes intéressés à cette dernière méthode à cause de sa simplicité de calculs et sa sortie unique.

V.2.5. Intérêt de la commande floue

- La commande est simple à réaliser, facilement adaptable aux conditions de fonctionnement. La plupart du temps un petit nombre de règles suffit à décrire le système.
- La coordination de plusieurs objectifs est possible (système multi variable).
- Cette commande est reconnue comme robuste.

V.3. Commande hybride par mode glissant floue de la MADA

On a vu dans le chapitre IV que l'inconvénient majeur de la commande par mode glissant, réside dans la présence du phénomène de chattering. Pour surmonter ce problème et améliorer les performances du système, plusieurs méthodes de commande sont apparues, parmi elles, la commande hybride par mode glissant floue. Cette technique présente la même structure de commande par mode glissant étudiée dans le chapitre précédent, mis à part les

fonctions « *sign* » existantes dans les termes de commandes (équations IV.30 et IV.40), seront remplacées par des fonctions floues.

V.3.1. Structure générale d'un contrôleur glissant-flou

Les régulateurs des puissances active et réactive sont substitués par un régulateur mode glissant-flou pour obtenir une régulation performante robuste. Une partie de commande équivalente et une partie de commande floue sont contenues dans la présente de la commande glissant floue (CMGF) proposée comme il est montré sur la figure V.5. Les deux parties sont combinées pour assurer la stabilité et la robustesse du système, la méthode de la commande par la logique floue est adoptée pour résoudre le problème de Chattering. [71], [72]

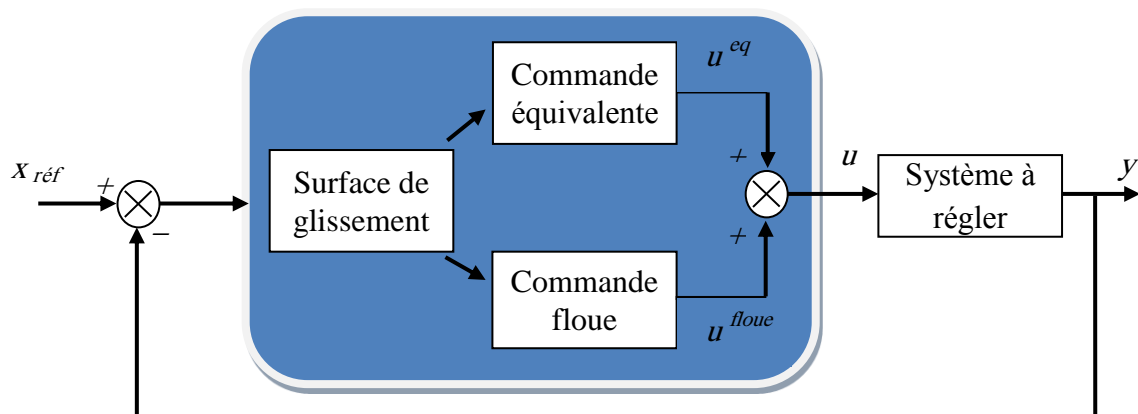


Figure. IV.5: Schéma général d'un contrôleur glissant-flou (CMGF).

Le contrôleur flou possède une entrée $S(x)$ et une sortie u , et la base de règle sert à établir une connexion entre $S(x)$ et u . Ceci, est interprété par des règles de la forme (SI ... ALORS) :

R1 : SI S est **NG** ALORS u est **NG**

R2 : SI S est **NM** ALORS u est **NM**

R3 : SI S est **EZ** ALORS u est **EZ**

R4 : SI S est **PM** ALORS u est **PM**

R5 : SI S est **PG** ALORS u est **PG**

Avec :

NG : Négatif Grand, **M** : Négatif Moyen, **EZ** : Egale Zéro, **PM** : Positif Moyen, **PG** : Positif Grand.

Les fonctions floues utilisées pour le réglage des puissances active et réactive ayant une entrée $S(x)$ et de la sortie u de cinq fonctions d'appartenance sont représentées dans les figures V.6 et V.7 respectivement.

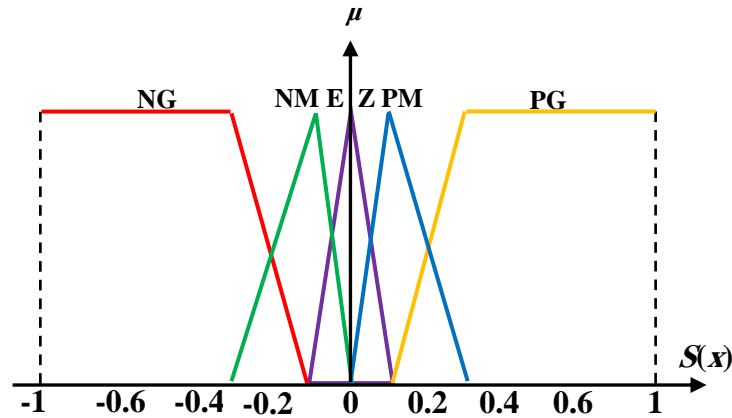


Figure V.6 : Fonctions d'appartenance de l'entrée de la fonction floue.

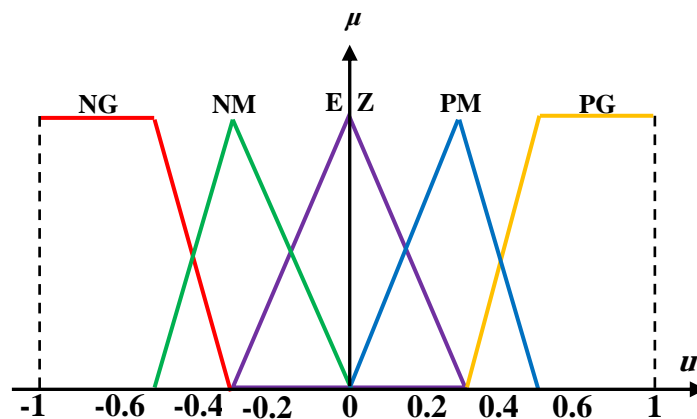


Figure V.7 : Fonctions d'appartenance de la sortie de la fonction floue.

V.3.2. Résultats de simulations obtenus

Pour illustrer les performances de la commande par mode glissant floue appliquée à une MADA à 10 kW reliés à un réseau 400V / 50Hz dédiée à un système éolien, un bloc diagramme de l'ensemble du système est proposé dans la figure V.8. Les différentes simulations envisagées sont similaires à celles réalisées au chapitre précédent.

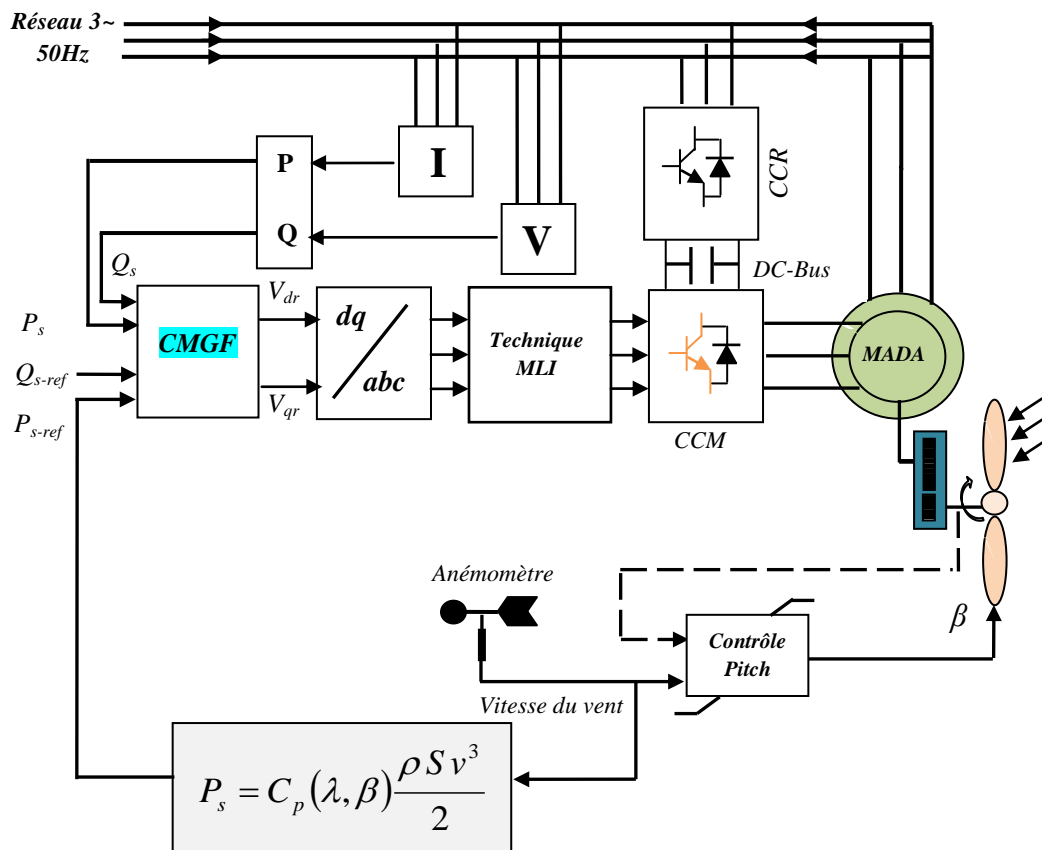
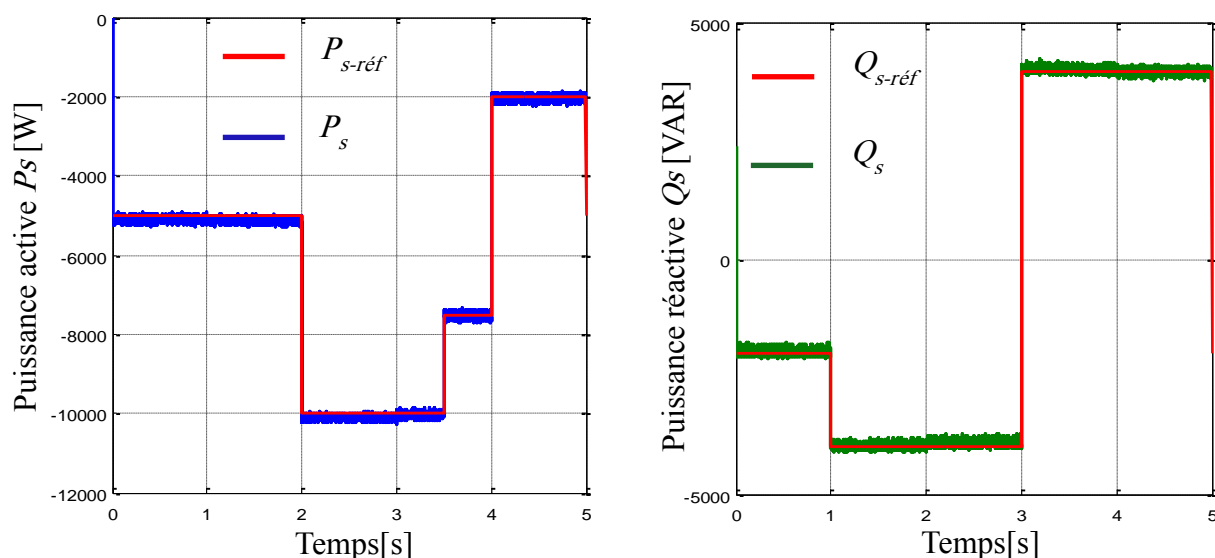


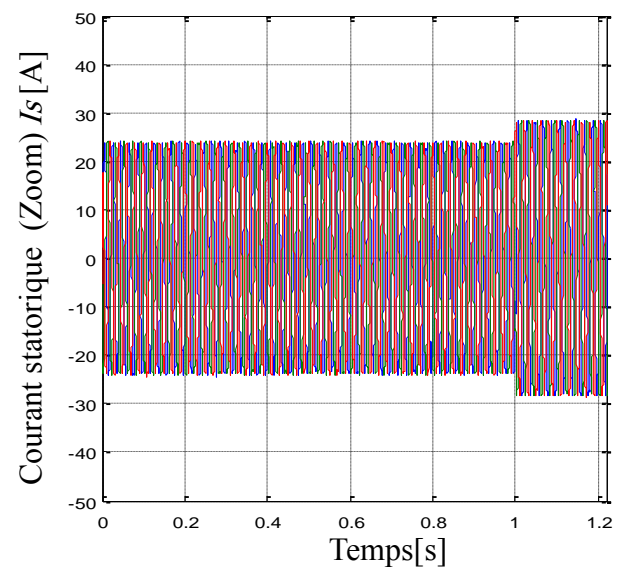
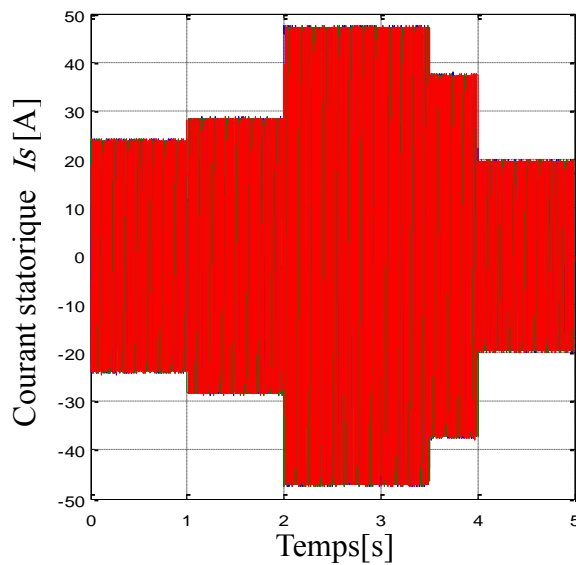
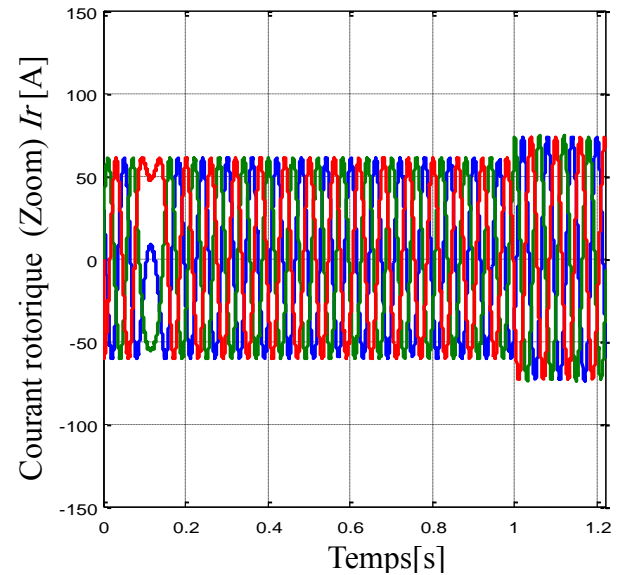
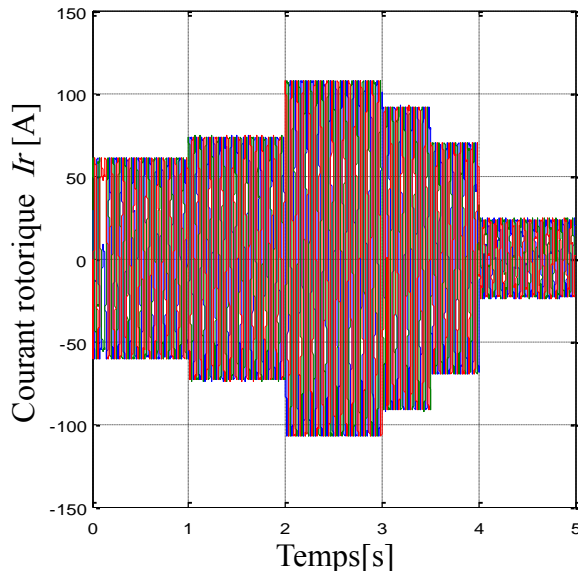
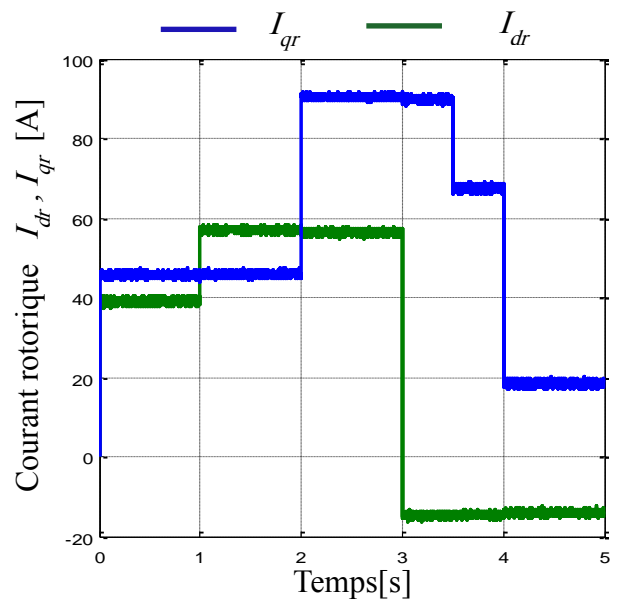
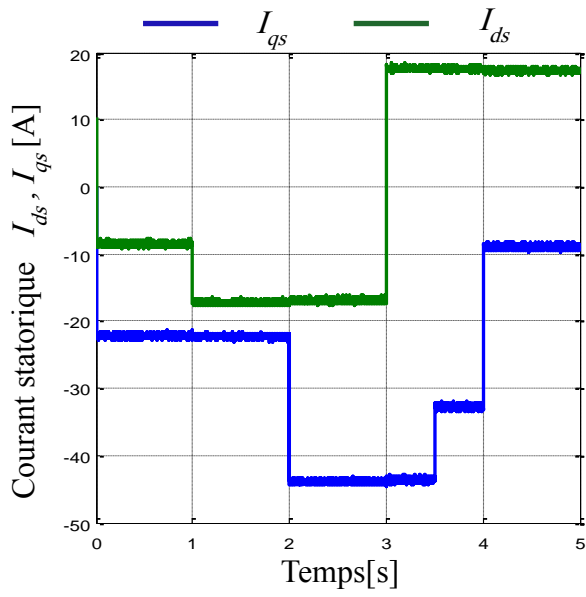
Figure V.8 : Schéma bloc proposé de l'ensemble du système étudié (CMGF).

V.3.2.1. Test de suivi de consigne

Le premier essai consiste à réaliser des échelons de puissance active et réactive alors que la machine est entraînée à vitesse fixe pour la première partie de simulation, Figure V.9. Et pour la deuxième partie la machine est entraînée à vitesse variable, Figure V.10.

a)- Vitesse du vent fixe





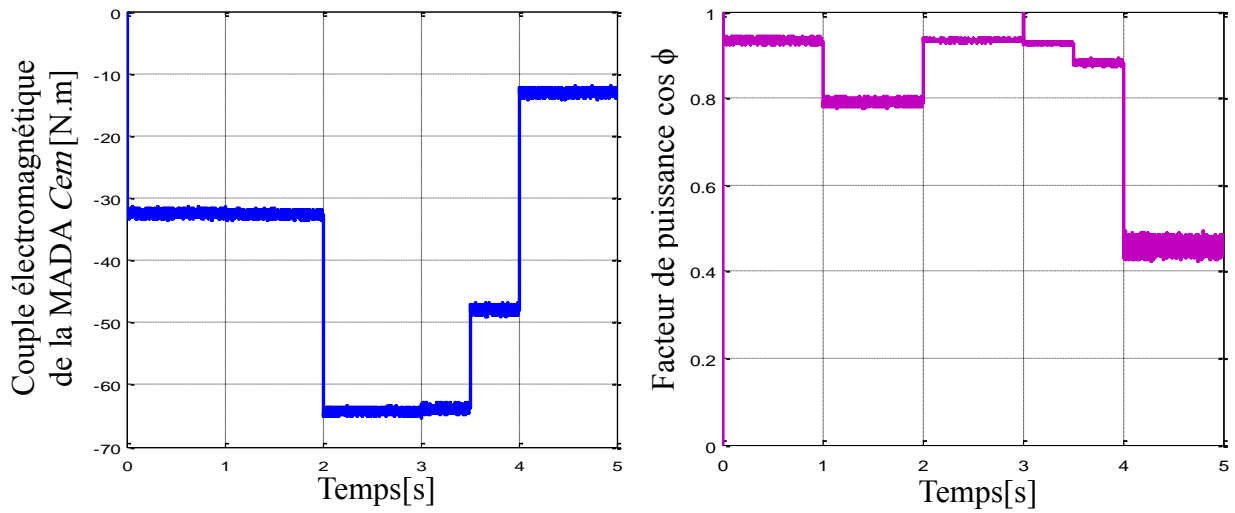
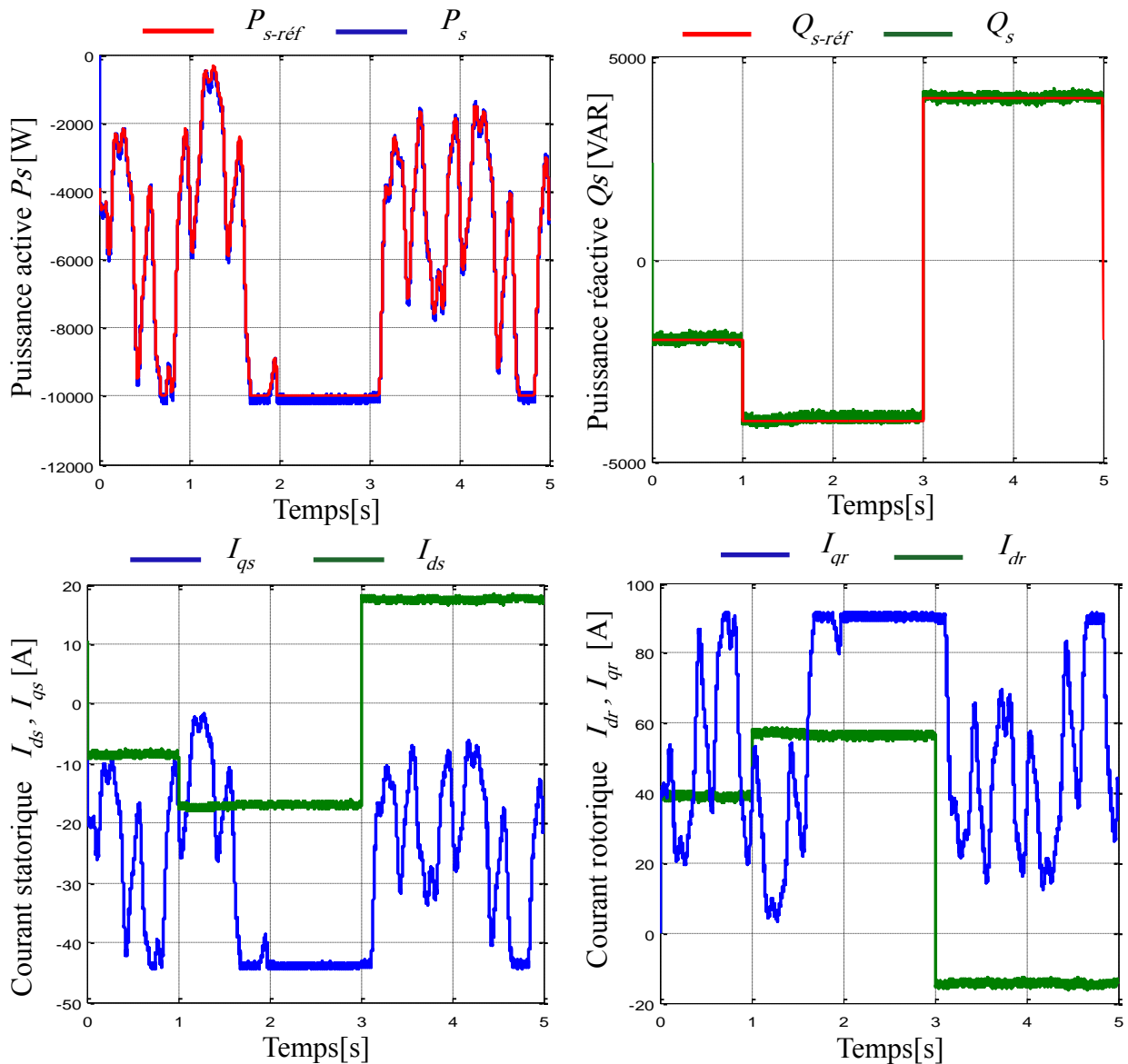


Figure V.9 : Résultats obtenus de la CMGF à vitesse fixe de la MADA.

b)- Vitesse du vent variable



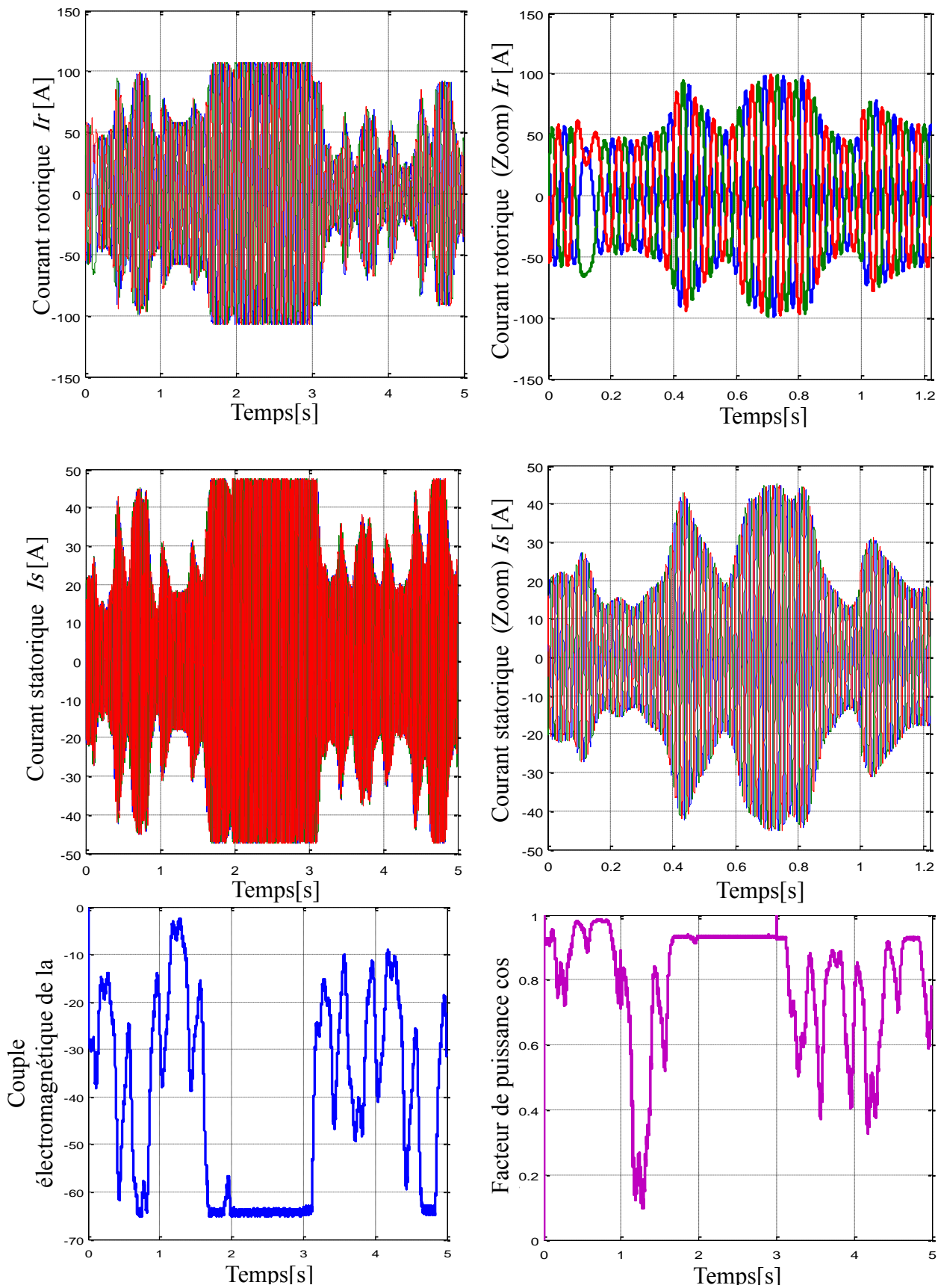


Figure V.10 : Résultats obtenus de la CMGF à vitesse variable de la MADA.

c)- *Interprétation des résultats*

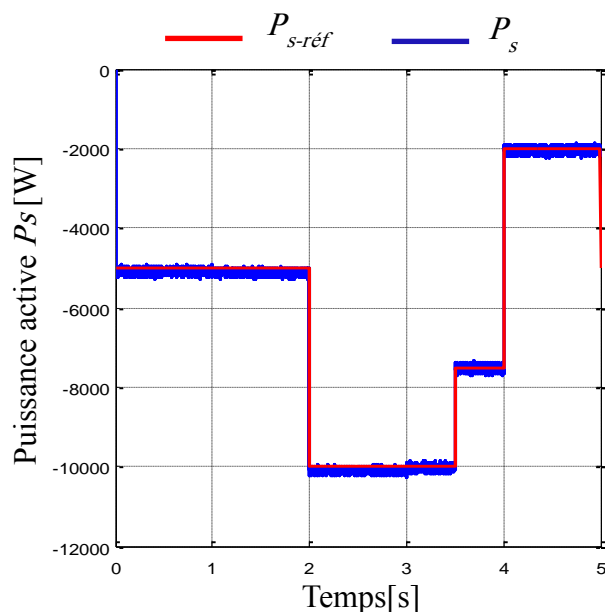
Les résultats de simulation obtenus sont montrés par les figures V.9 et V.10. Comme le montre ces figures, on remarque que les puissances actives et réactives mesurées suivent parfaitement leurs références et avec un découplage parfait entre les deux axes d et q . Nous pouvons également remarquer que le couple électromagnétique dépend directement de la puissance active. Ceci est traduit par sa forme identique à celle de la puissance active. Dans ce cas, nous pouvons conclure que la puissance active est une conséquence du couple électromagnétique ; alors que la puissance réactive est une conséquence de l'excitation du circuit rotorique. Par ailleurs, les résultats obtenus montrent que les courants statoriques de phases ont des formes presque sinusoïdales, ce qui signifie qu'une énergie de bonne qualité est fournie au réseau. Ces résultats nous permettent de conclure que le contrôleur hybride glissant-flou est le plus efficace vis-à-vis la réduction du phénomène de chattering.

V.3.2.2. Contrôle de facteur de puissance

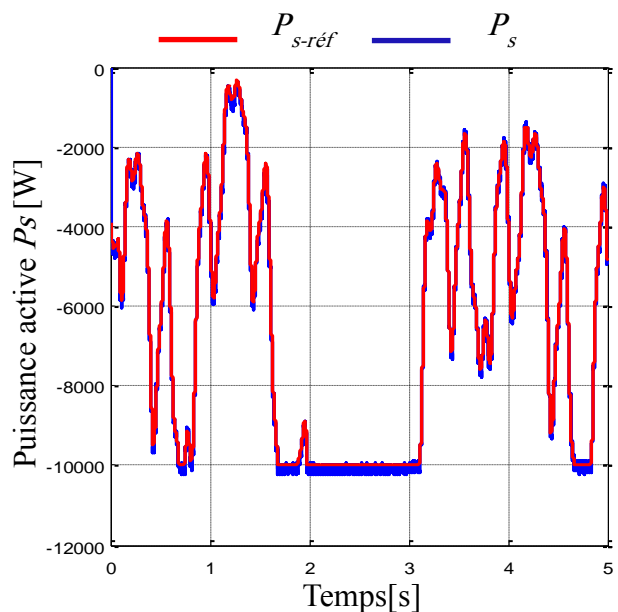
Dans cette partie la consigne de puissance réactive statorique sera maintenue nulle et la puissance active garde toujours sa valeur de référence pour assurer un facteur de puissance unitaire côté réseau.

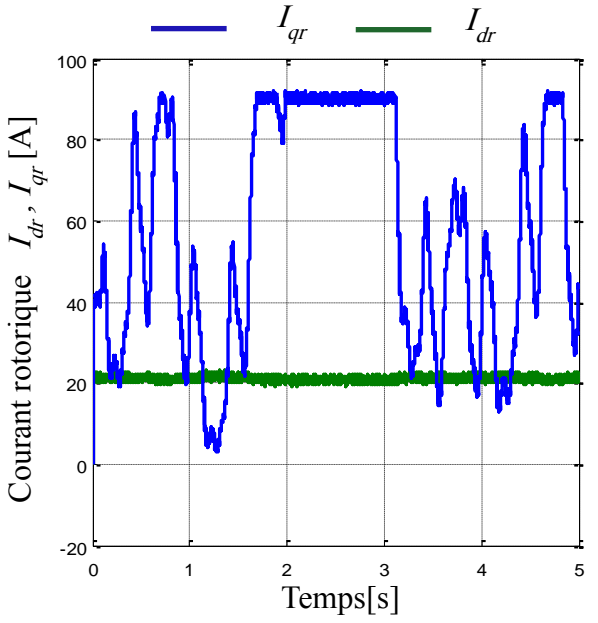
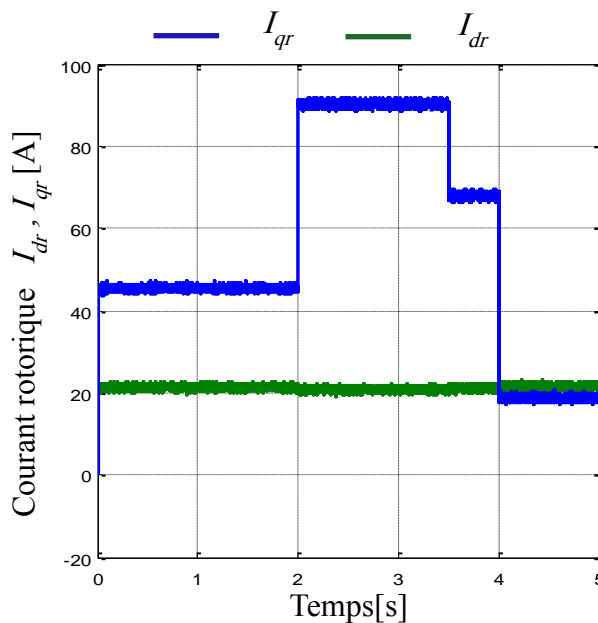
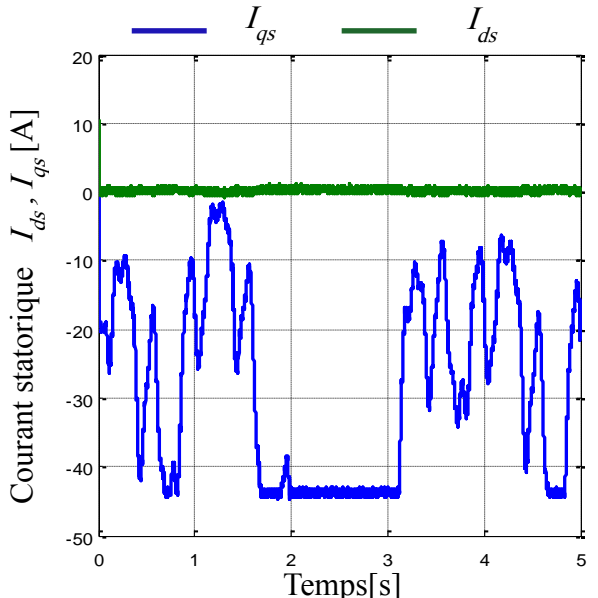
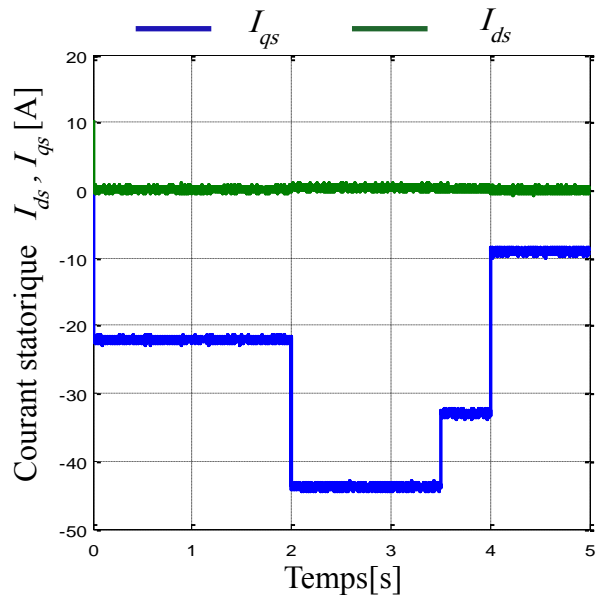
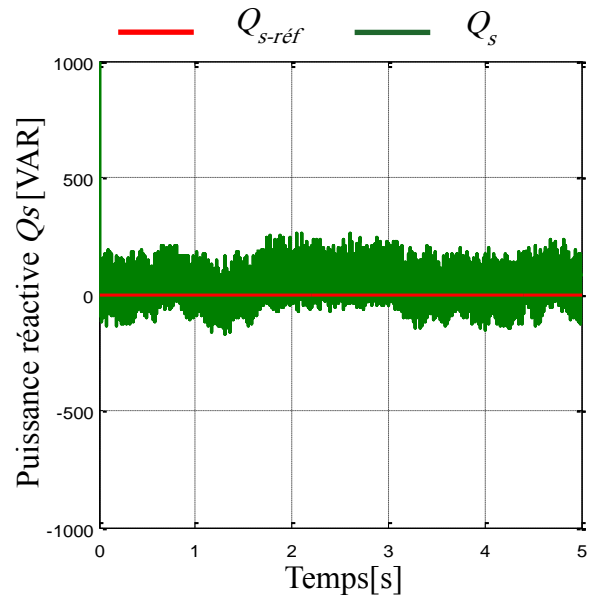
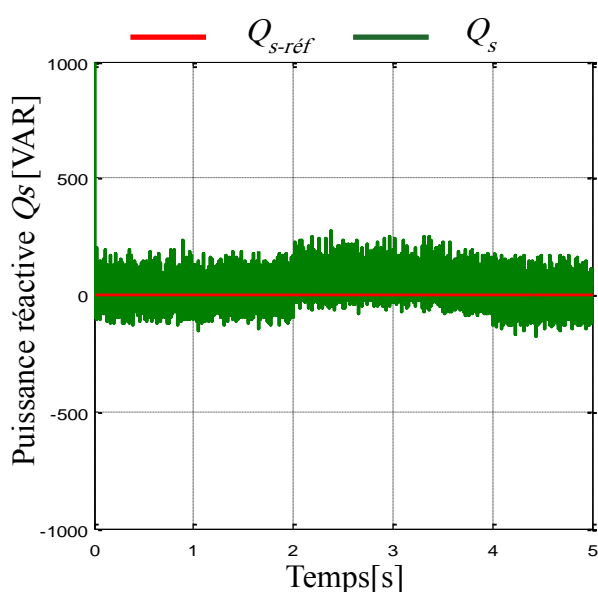
La figure V.11 représente les résultats de simulation de la technique CMGF à facteur de puissance unitaire.

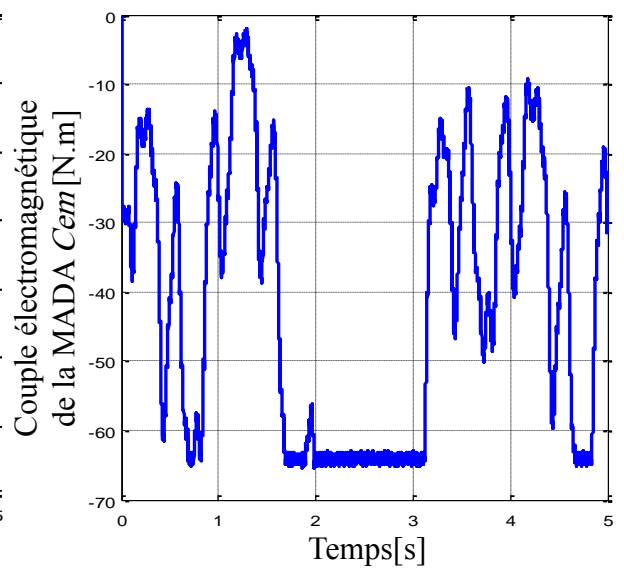
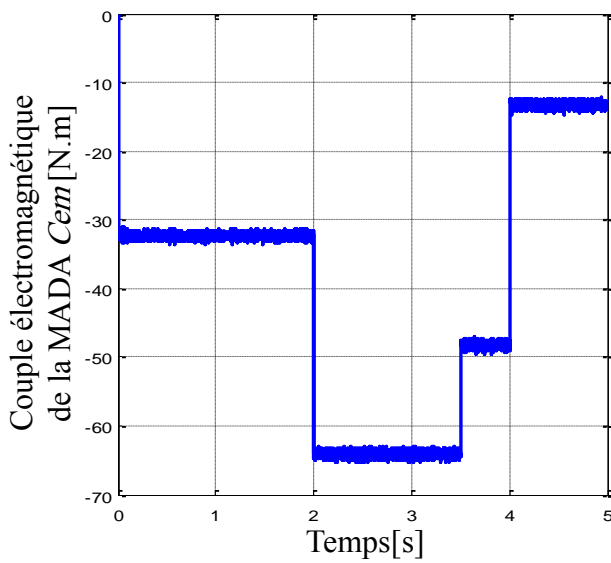
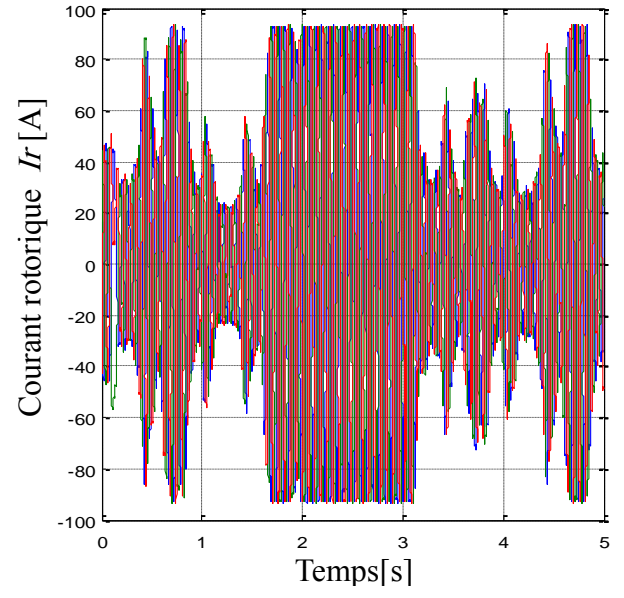
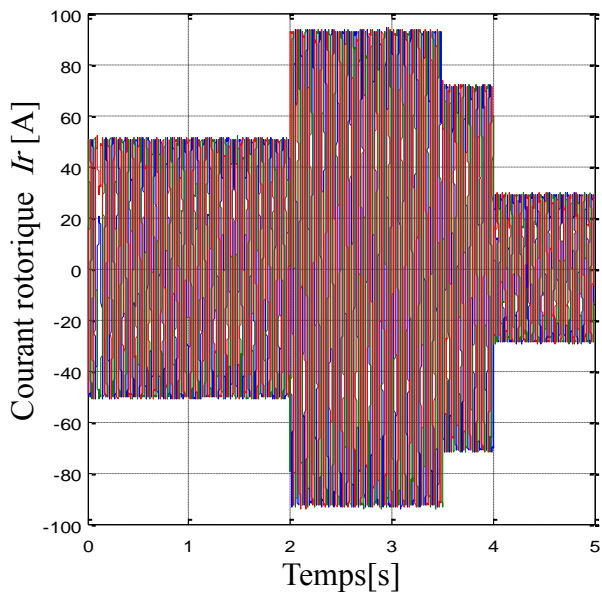
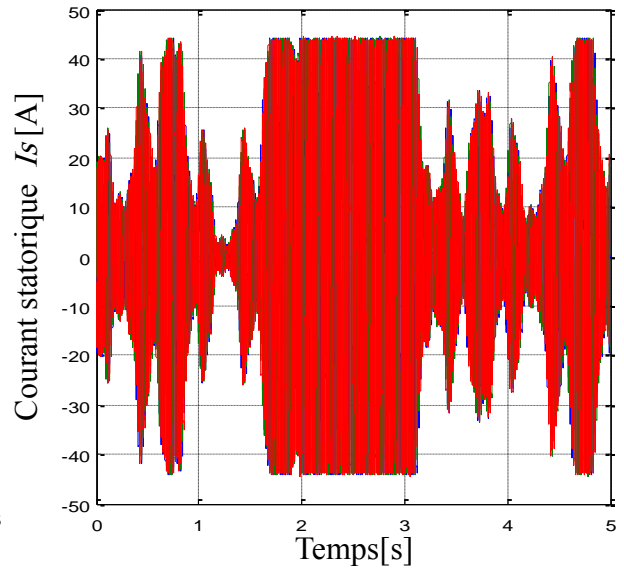
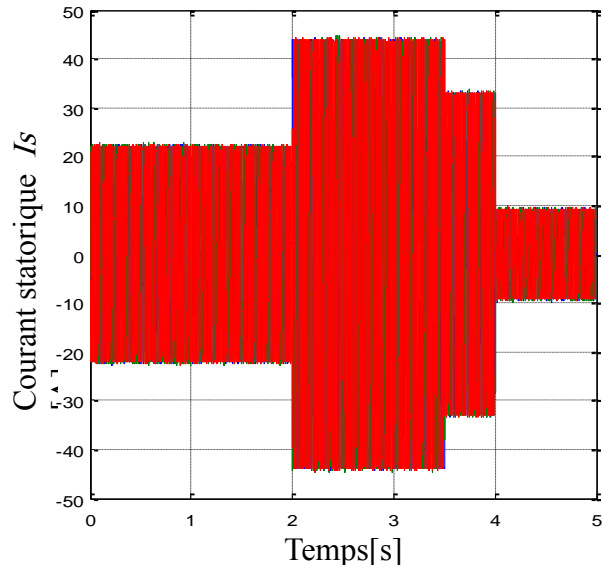
a)- Vitesse du vent fixe



b)- Vitesse du vent variable







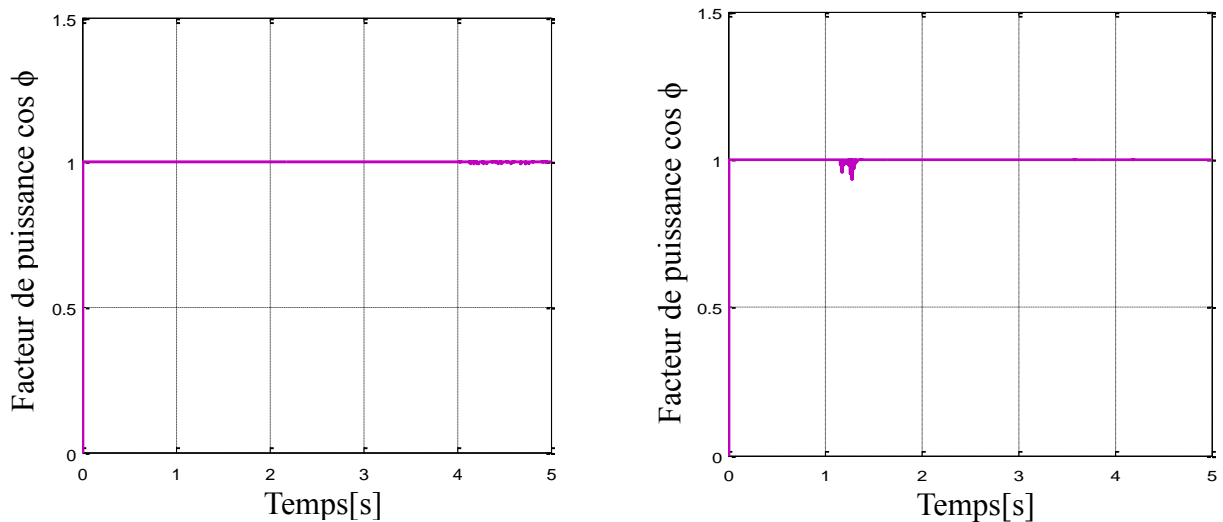


Figure V.11 : Commande par mode glissant floue de la MADA à facteur de puissance unitaire.

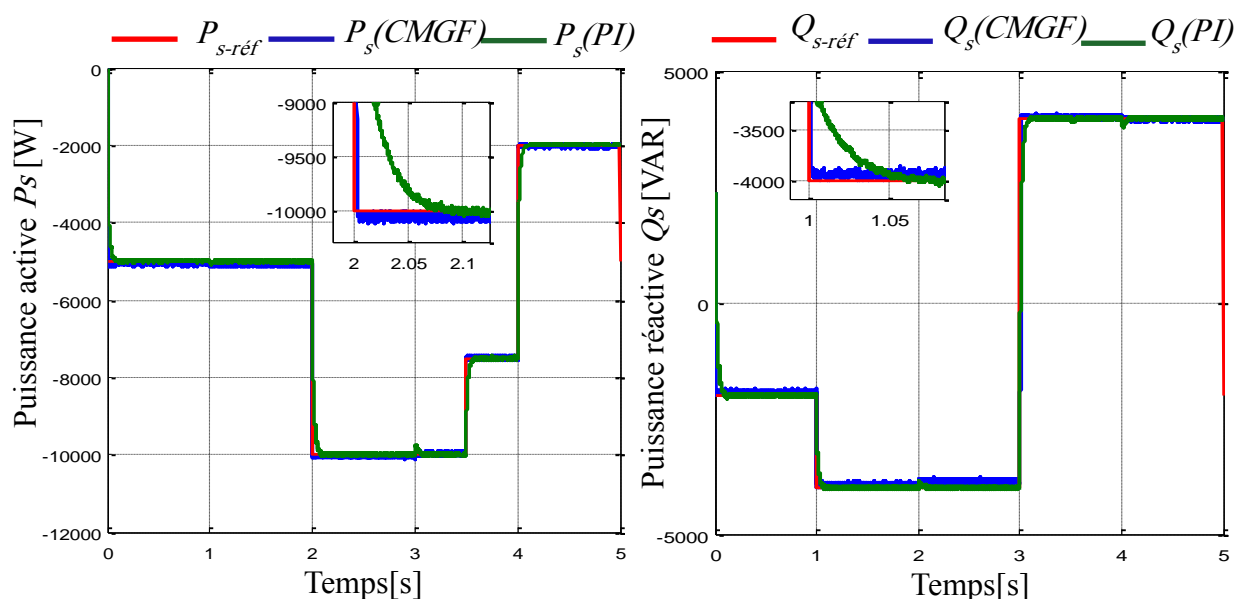
c)- Interprétation des résultats

Les résultats de simulation obtenus montrent que le contrôle de la puissance active pour la génératrice éolienne est parfaitement réalisé à un facteur de puissance unitaire ($\cos \phi = 1$) donc un déphasage nul par la commande mode glissant floue dans le cas d'un fonctionnement à vitesse fixe et variable.

V.3.2.3. Tests de robustesse

Pour tester la robustesse de la commande par mode glissant floue de la MADA, les mêmes tests ont été effectués (R_r et M augmentent respectivement de +100 % et +20 % de leurs valeurs nominales.). Les résultats obtenus sont représentés par la figure V.12.

a)- Vitesse du vent fixe



b)- Vitesse du vent variable

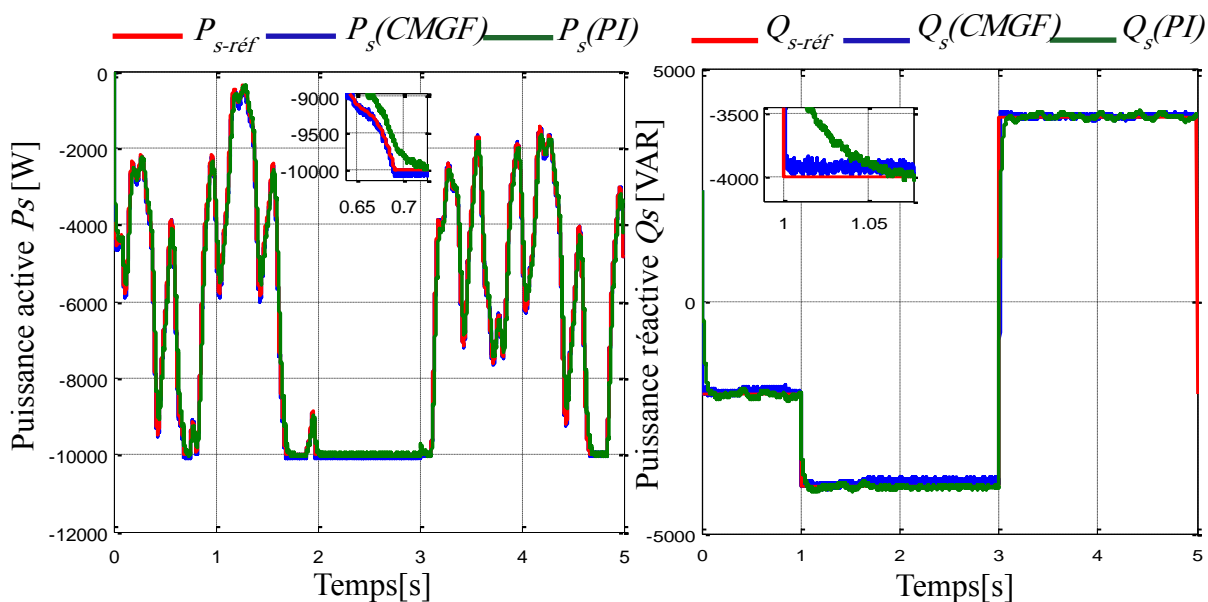


Figure V.12 : Influence des variations paramétriques sur la commande par mode glissant flou.

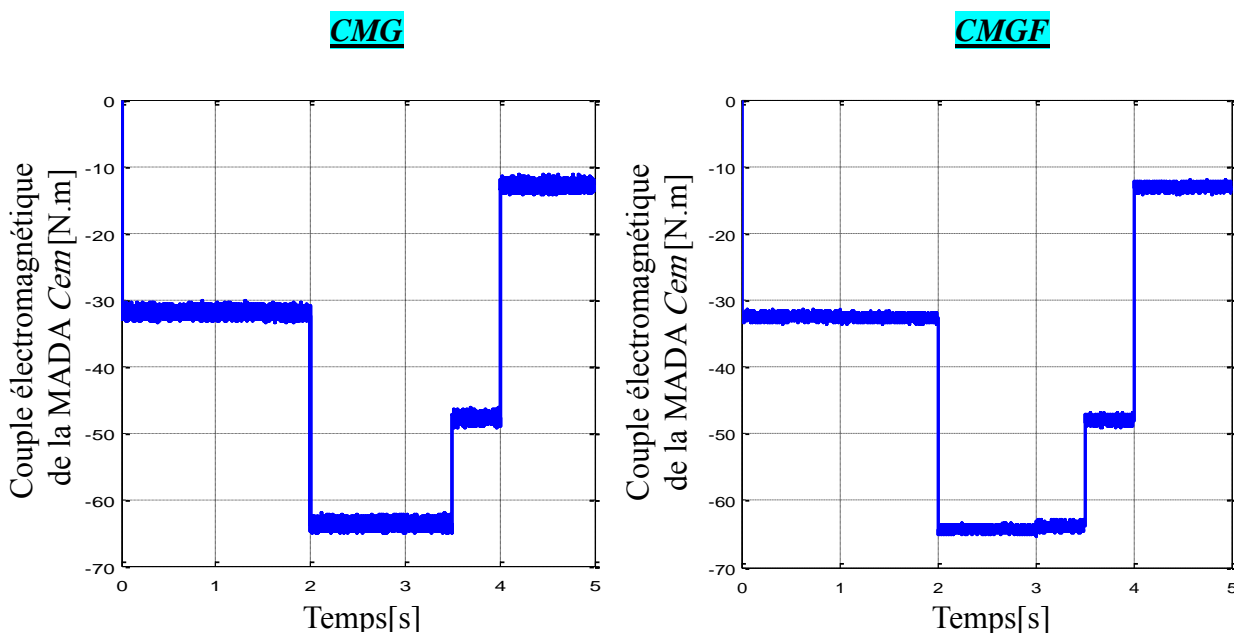
c)- Interprétation des résultats

Les résultats de simulation montrent une grande robustesse de la CMGF vis-à-vis des variations paramétriques de la MADA par rapport au régulateur PI.

V.3.2.4. Comparaison de l'effet Chattering

La figure V.13 présente la comparaison de l'effet Chattering entre la commande par mode glissant et celle par mode glissant flou.

a)- Vitesse du vent fixe



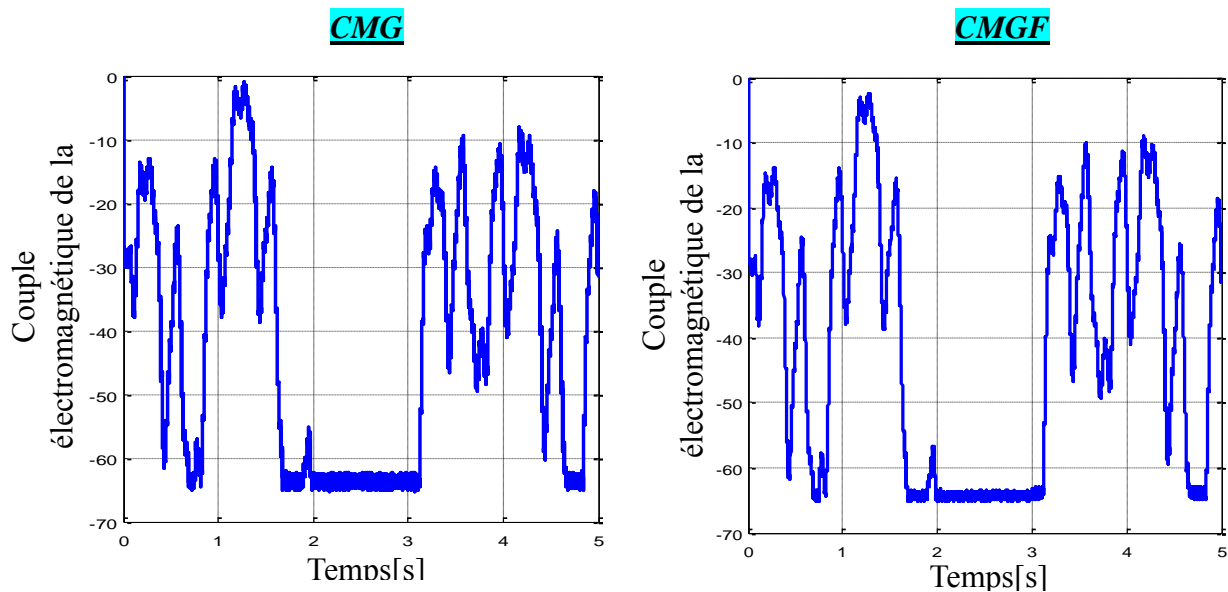
b)- Vitesse du vent variable

Figure V.13 : Comparaison de l'effet Chattering entre CMG et CMGF.

c)- Interprétation des résultats

Les résultats de simulation montrent l'efficacité et les performances de la commande par mode glissant flou. Elle donne de bonnes performances vis-à-vis la poursuite de la consigne sans dépassement, le découplage et l'orientation sont assurés.

Ces résultats nous permettent de conclure que le contrôleur hybride glissant-flou est le plus efficace vis-à-vis la réduction du phénomène de chattering, et le plus robuste vis-à-vis des variations paramétriques de la machine.

V.4. Conclusion

Dans ce chapitre, une commande hybride par mode glissant flou (CMGF) d'une machine à Asynchrone à double alimentation appliquée au système éolienne de 10kW a été présentée. Cette commande a pour but d'exploiter la robustesse et la rapidité du mode glissant durant le régime transitoire, et la flexibilité du contrôleur flou durant le régime permanent. Plusieurs simulations et résultats comparatifs ont été présentés à la fin de chapitre pour valider l'approche proposée. Les résultats obtenus montrent la haute performance et la robustesse du contrôleur sur la présence de la variation des paramètres. Le contrôle de la puissance active et réactive donne une dynamique rapide de réponse sans dépassement, l'erreur statique est nulle et le problème de chattering est diminué grâce à cette technique de commande par rapport à la commande par mode glissant.

*Conclusion
générale
&
Perspectives*

Conclusion générale & Perspectives

L'objectif principal de notre travail est l'application des techniques de commande robustes pour le contrôle indépendant des puissances active et réactive générées par la machine asynchrone à double alimentation (MADA) dédié au système d'énergie éolienne de 10kW.

Afin d'atteindre ces objectifs Nous avons commencé par une généralité sur les systèmes d'énergies renouvelables, on a vu les différentes sources d'énergies renouvelables existantes, ainsi nous avons focalisé notre attention sur la production d'électricité éolienne.

Ensuite, nous avons abordé, dans le deuxième chapitre, la modélisation de la chaîne de conversion éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation et de son alimentation constituée de deux convertisseurs de puissance, un redresseur triphasé, suivit d'un onduleur équipé d'une commande à MLI de type « sinus-triangle ». Ce chapitre nous a permis de donner les équations de la génératrice dans le repère triphasé, puis dans le référentiel biphasé tournant d'axe d, q par la transformation de Park. Une représentation de ce modèle dans l'espace d'état a été défini, en vue de la commande de la génératrice asynchrone à double alimentation.

Dans le troisième chapitre, nous avons résumé brièvement le principe de la commande vectorielle à flux orienté (FOC) et ses deux techniques directe et indirecte. Une commande vectorielle est utilisée afin de contrôler l'échange des puissances statorique active et réactive entre le stator de la machine et le réseau électrique.

Effectivement nous avons pu voir que la commande directe est la plus simple à mettre en œuvre, mais pas la plus performante. En revanche, la méthode indirecte nous permet, avec le bouclage en cascade, d'avoir un système un peu performant. Elle est certes plus complexe à mettre en œuvre par rapport à la commande directe. Les résultats de simulation, nous conduisent à dire que la MADA commandée par orientation du flux statorique constitue un point faible qui réside dans sa faible robustesse vis-à-vis des variations paramétriques.

Pour améliorer la robustesse de la commande vectorielle, on a proposé, dans le quatrième chapitre, la commande à structure variable par mode glissant pour le réglage des puissances active et réactive générées par la MADA. Le point fort de cette technique de régulation est la simplicité de la mise en œuvre et la robustesse par rapport aux perturbations internes et externes de la machine. Cependant le principal inconvénient de cette technique

réside dans l'existence d'une loi de contrôle discontinue produisant l'effet de broutement « chattering » qui peut endommager le système.

Pour garder la robustesse du mode glissant et d'éliminer le phénomène de broutement, sans détériorer les performances du système. Une hybridation entre le mode de glissement et la logique floue a été proposée dans le dernier chapitre. Cette hybridation a donné naissance d'un nouveau régulateur appelé mode glissant-flou (CMGF). Enfin Plusieurs simulations et résultats comparatifs ont été présentés à la fin de chapitre pour valider l'approche proposée. Les résultats obtenus ont montré des performances très satisfaisantes et significatives d'une bonne régulation. Les comportements en poursuite, régulation et robustesse sont nettement meilleurs à ceux observés pour les autres stratégies étudiées.

Ce travail pourra être amélioré et avoir des perspectives en considérant :

- L'application d'autres techniques de commande robuste aux systèmes d'énergies renouvelables tels que : la commande adaptative, les réseaux de neurones, les algorithmes génétiques, ...etc.
- Validation des résultats par d'études expérimentales.

Références

Bibliographique

Références bibliographiques

- [1] <http://www.edfenr.com>
- [2] World Energy Outlook 2002. IEA Publications
- [3] A.Kabouche « Architecture et efficacité énergétique des panneaux solaires : cas d'étude : simulation sous trnsys16.1d'un appartement d'une tour multifonctionnelle à Constantine», Mémoire de Magister, Université Mentouri, 2012.
- [4] Extrait du Portail Algérien des Energies Renouvelables, Centre de Développement des Énergies Renouvelables - CDER, <http://portail.cder.dz>.
- [5] T.Ghennam, « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation », thèse de doctorat de l'Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, 2011.
- [6] Z.boudjema, « Etude et commande d'un système de production d'électricité renouvelable locale (énergie éolienne et photovoltaïque) », Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université de Sidi Bel Abbès, Algérie, 2015.
- [7] Le baromètre du solaire thermique. Systèmes solaires n°163. EurObserv'ER.
- [8] Solar Power Towers. <http://www.wipp.ws/science/energy/powertower.htm>.
- [9] B. Fleche, D. Delagnes, « Energie solaire photovoltaïque », STI-ELT Approche générale, Juin 2007.
- [10] G.Olivier, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », Thèse de doctorat, l'École Normale Supérieure de Cachan, Bretagne 2002.
- [11] M. R. Patel, « Wind and Solar Power Systems », U.S. Merchant Marine Academy Kings Point, New York, 1999.
- [12] M.Adjoudj, « Commande d'une machine asynchrone à double alimentation », thèse de doctorat de l'Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, 2011.
- [13] Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie. <http://www.ademe.fr>.
- [14] Centre d'Information sur l'Energie et l'Environnement. <http://www.ciele.org>.
- [15] C. Darras, « Modélisation de Systèmes Hybrides Photovoltaïque / Hydrogène : Applications site isolé, micro-réseau, et connexion au réseau électrique dans le cadre du projet petite », Thèse de Doctorat, Université de Corse-Pascal Paoli, 2011.
- [16] http://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_hydrolique.

- [17] E.Riolete, « Le mini-éolien » Groupe Eyrolles, 2007.
- [18] E.Hau, « Wind turbines, Fundamentals, Technologies, Applications, Economics », Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [19] 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) », thèses de doctorat, université de Nantes, 2003.
- [20] B. Multon, « Energie électrique : les enjeux », Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2008.
- [21] http://fr.wikipedia.org/wiki/Énergie_éolienne
- [22] <http://www.gwec.net>
- [23] C.O.E.Moctar, « Le secteur des énergies renouvelables en Afrique du Nord : situation actuelle et perspectives », Réunion d'Experts UNECA, Rabat, 12-13 janvier 2012.
- [24] Y.Djeriri, « Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle », Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université de Sidi Bel Abbés, Algérie, 2015.
- [25] P. Leconte, M. Rapin, E. Széchenyi, « Éoliennes », Techniques de l'Ingénieur, BM 4 640-2005.
- [26] B. Multon, « Etat de l'art des aérogénérateurs électriques », Rapport ECRIN, 2002.
- [27] P. Enrici, « Introduction à la conversion d'énergie éolienne », Cours de DEA.
- [28] N.Ait Ramdane, « Commande robuste d'une génératrice asynchrone à double alimentation pour la conversion de l'énergie éolienne », Mémoire de Magister, Université de Tizi-Ouzou, 2012.
- [29] B. Multon, G. Robin, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, « Le génie électrique dans le vent : état de l'art et recherches dans le domaine de la génération éolienne», JCGE'03, Saint-Nazaire, 2003.
- [30] T.Burton, D.Sharpe, N.JenkinS, E.Bossanyi, E.Hassan, « Wind energy Handbook », England, 2001.
- [31] H.J. Wagner, J.Mathu, « Introduction to Wind Energy Systems », Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2009.
- [32] [renewables-made-in Germany.com](http://renewables-made-in-Germany.com)
- [33] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins and E. Bossanyi, « Wind Energy Handbook », John Wiley and Sons, Ltd, 2001.

- [34] L.Y. Pao, K.E. Johnson, « A Tutorial on the Dynamics and Control of Wind Turbines and Wind Farms », American Control Conference, Hyatt Regency Riverfront, St. Louis, MO, USA, 2009.
- [35] B. François, B. Robyns, E. De Jaeger, F. Minne, « Technologies d'éolienne de forte puissance connectée au réseau de moyenne tension », Revue REE, no. 5, pp 65-74, 2005.
- [36] B. Fellah, « Système hybride photovoltaïque-éolien, de production d'électricité. Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah », Mémoire de Magister, Université de Tlemcen, 2012.
- [37] V. Courtecuisse, « Supervision d'une centrale multi sources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique »; Thèse de Doctorat, Université de Lille, France, 2008.
- [38] D.H. Tran, « Conception Optimale Intégrée d'une chaîne éolienne passive : Analyse de robustesse, validation expérimentale », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2010.
- [39] S. Heier, « Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems », Publications John Wiley & Sons, ISBN 0-471-97143-X, 1998.
- [40] L. LECLERCQ, « Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes », Thèse de Doctorale Université de Lille, France, 2004.
- [41] A. Mirecki, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2005.
- [42] S. El Aimani, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies, Lille, France, 2004.
- [43] A. Gaillard, « Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service », Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2010.
- [43] A. Masmoudi, « Contribution à la commande en tension de la machine doublement alimentée », Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie Paris VI, France, 1994.
- [44] V. De Oliveira, E. Monmasson, R. Meuret, J. P. Louis, « Steady-state analysis of a doubly-fed induction generator for aircraft application, Proc. pp. 547-551, 2001.
- [45] A. Boyette, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Thèse de Doctorat en génie électrique, Université Henri Poincaré, Nancy I, France, 2006.

- [46] B. Beltran, « Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation : Du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur », Thèse de Doctorat de l'Université de Bretagne Occidentale, France, 2011.
- [47] S.Khojit el khil, « Commande Vectorielle d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA) », Thèse de doctorat de I.N.P de Toulouse, France, 2006.
- [48] H.Tamrabet, « Robustesse d'un contrôle vectoriel de structure minimal d'une machine asynchrone », Thèse de magister, UHL, Batna, 2006.
- [49] F. Blaschke, « A new method for the structural decoupling of A.C. induction machines », In Conf. Rec. IFAC, Dussesrdorf, Germany, 1971.
- [50] G. Salloum, « Contribution à la Commande Robuste de la Machine Asynchrone à Double Alimentation », Thèse de Doctorat en Génie Électrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2007.
- [51] **M. Allam**, B. Dehiba, M. Abid, Y. Djeriri, et R.Adjoudj, « Étude comparative entre la commande vectorielle directe et indirecte de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) dédiée à une application éolienne », Journal of Advanced Research in Science and Technology, ISSN: 2352-9989, Vol.1, No.2, pp.88-100, 2014.
- [52] H. Buhler, « Réglage par mode de glissement », Presses Polytechniques romandes, Lausanne, [1986].
- [53] T. ZAHARIEVA, « Commande à structure variable appliquée à une moteur synchrone », Diplôme de recherche de L'INSA de Toulouse (DRUT), 2000.
- [54] P.E. Vidal, « Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation, », Thèse de doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2004.
- [55] J.J.E. Slotine, « Applied Nonlinear Control », Edition Prentice Hall, 1991.
- [56] J. J.E. Slotine, « Sliding controller design for nonlinear systems », Int. J. of Cont. Vol. 4, No. 02, pp. 421–434, 1984.
- [57] V.I. Utkin, «Variable Structure Systems with Sliding Modes », IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. AC-22, No. 2, pp. 212-222,1977.
- [58] **M.Allam**, « Étude comparative de la CSV et la commande non linéaire pour l'asservissement de vitesse d'un actionneur à courant alternatif », Mémoire de magister, université djilali liabes de sidi bel abbes, 2011.
- [59] **M. Allam**,B. Dehiba, M. Abid, K. Mouilah, and Y. Djeriri , « A comparative study between field oriented control and sliding mode control for DFIG integrated in wind energy system», Journal of Electrical Engineering, JEE, Romania, ISSN 1582-4594, Vol.15, No.2,pp.01-09, 2015.
- [60] L. A. Zadeh, « Fuzzy sets », Information and Control, pp. 338-353, 1965.
- [61] E. H. Mamdani, S. Assilian, « An experimental in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller », Int. J. Man-Machine Studies, pp. 01-13, 1975.

- [62] S. Radhwane, « Commande par Mode Glissant Flou d'une Machine Asynchrone à Double Etoile », Mémoire de magister, université djilali liabes de sidi bel abbes, 2010.
- [63] F. Chevré, F. Guely, « La Logique Floue », Cahier Technique Schneider, N°191, 1998.
- [64] F. Hamidia, « Contribution à la modélisation et à la commande neuro-floue de machines électriques », Thèse de Doctorat ENP, Alger, 2013.
- [65] A. Miloudi, « Étude et conception de régulateurs robustes dans différentes stratégies de commandes d'un moteur asynchrone », Thèse de Doctorat, Université des sciences et de la technologie Oran, Alegria, 2007.
- [66] M. T. Cao, « Commande Numérique de Machines Asynchrones par Logique Floue », Thèse de Doctorat, Université de Laval, Québec, Canada, 1997.
- [67] H. Buhler, « Réglage Par Logique Floue », Presse Polytechnique et Universitaire Romande, Lausanne-Suisse, 1994.
- [68] L. Baghli, « Contribution à la Commande de la Machine Asynchrone, Utilisation de la Logique Floue, des Réseaux de Neurones et des Algorithmes Génétiques », Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1, Nancy, 1999.
- [69] **M. Allam**, B. Dehiba, M. Abid, R Adjoudj, and Y. Djeriri, « Commande par la logique floue de la machine asynchrone à double alimentation dédiée au système éolien », The First National Conference on Electronics and Technologies, M'Sila, Algeria, Mai 19-20, 2015.
- [70] K. Mouilah, M. Abid, A. NACERI, **M. Allam**, « Fuzzy control of a doubly fed induction generator for wind turbines », Journal of Electrical Engineering, JEE, Romania, ISSN 1582-4594, Vol.14, No.4, pp.01-05, 2014.
- [71] S.A.E. Mahdi Ardjoun, M. Abid, A.G. Aissaoui, A. Nacéri, « A robust fuzzy sliding mode control applied to the double fed induction machine », - IJCSSP, Vol. 5, no.4, pp.315-321, 2011.
- [72] L. K. Wong, F. H. F. Leung, P. K. S. Tam, « A fuzzy sliding controller for nonlinear systems », IEEE Trans. Ind. electronic, Vol. 48, no.1, pp.32-37, 2001.

Annexes

Annexe (A)**Synthèse du régulateur PI pour le contrôle MPPT :**

L'approche la plus classique utilisée dans notre travail consiste à contrôler la vitesse de rotation par un régulateur PI. Dans l'objectif d'annuler l'erreur statique et réduire le temps de réponse tout en conservant la stabilité du système, un correcteur proportionnel intégral est utilisé. Les performances obtenues (stabilité, précision, temps de réponse) sont satisfaisantes pour un tel système électromécanique. Cependant le couple peut présenter un dépassement important qui peut nuire au fonctionnement du système, pour palier à ce problème on utilise une limitation de la référence du couple à la sortie du correcteur, la vitesse à régler se définit à partir de l'équation mécanique, la structure du régulateur de vitesse est montrée sur la figure A.1.

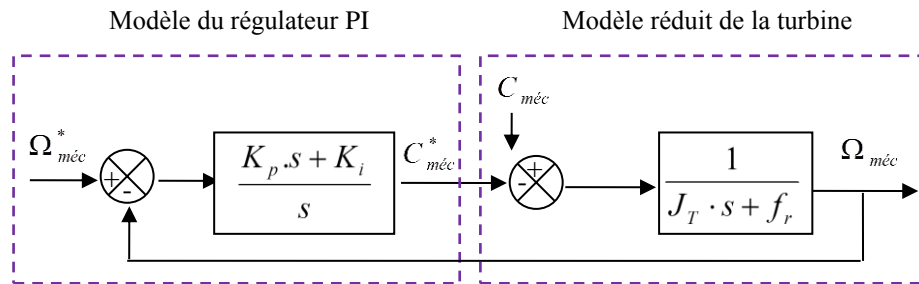


Figure A.1 : Schéma bloc du régulateur PI.

Nous pouvons écrire la fonction de transfert en boucle fermée sous la forme mathématique suivante :

$$\Omega_{méc} = F(s) \cdot \Omega_{méc}^* + G(s) \cdot C_{méc} \quad (A.1)$$

Où $F(s)$ est la fonction de transfert de la référence sur la vitesse :

$$F(s) = \frac{K_p \cdot s + K_i}{J_T \cdot s^2 + (f_r + K_p)s + K_i} \quad (A.2)$$

Et $G(s)$ est la fonction de la perturbation :

$$G(s) = \frac{s}{J_T \cdot s^2 + (f_r + K_p)s + K_i} \quad (A.3)$$

Pour baisser l'effet de la perturbation ($C_{méc}$), nous avons intérêt à choisir une valeur élevée pour le gain K_p . L'autre gain est choisi de manière à avoir une fonction de transfert du 2^{ème} ordre, ayant une pulsation naturelle et un coefficient d'amortissement, déterminés comme suit :

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{\frac{K_i}{J}} \\ \xi = \frac{f_r + K_p}{J_T \cdot 2\omega_n} \end{cases} \quad (A.4)$$

Donc, pour imposer un temps de réponse et un facteur d'amortissement, nous trouvons :

$$\begin{cases} K_i = \omega_n^2 \cdot J_T \\ K_p = 2\xi J_T \omega_n - f_r \end{cases} \quad (A.5)$$

Annexe (B)**Tableau B. I : Paramètres de la Machine Asynchrone à Double Alimentation.**

Désignation des paramètres et symbole	Valeur	Unité
<i>Puissance nominale, P_n</i>	10	<i>kW</i>
<i>Tension nominale, V_s</i>	230/400	V
<i>Courant nominale, I_s</i>	20/30	A
<i>Vitesse nominale, Ω_n</i>	1420	<i>tr/min</i>
<i>Fréquence nominale, f</i>	50	Hz
<i>Résistance statorique, R_s</i>	0.455	Ω
<i>Résistance rotorique, R_r</i>	0.19	Ω
<i>Inductance statorique, L_s</i>	0.07	H
<i>Inductance rotorique, L_r</i>	0.0213	H
<i>Inductance mutuelle, M</i>	0.034	H
<i>Nombre de paires de pôles, p</i>	2	-

Tableau B.II : Paramètres de la turbine éolienne

Désignation des paramètres et symbole	Valeur	Unité
<i>Puissance nominale, P_n</i>	10	<i>kW</i>
<i>Nombre des pales</i>	3	-
<i>Rayon du rotor, R</i>	3	<i>m</i>
<i>Gain du multiplicateur de vitesse, G</i>	5.4	-
<i>Moment d'inertie total, J_T</i>	0.2	<i>kg.m²</i>
<i>Coefficient de frottement, f_r</i>	0.0016	<i>N.m/s</i>
<i>Vitesse du vent de démarrage, v_d</i>	4	<i>m/s</i>
<i>Vitesse du vent nominale, v_n</i>	11	<i>m/s</i>
<i>Vitesse du vent maximale, v_m</i>	25	<i>m/s</i>
<i>Masse volumique de l'air, ρ</i>	1.225	<i>kg/m³</i>

ملخص

Résumé

Abstract

ملخص :

يعرض هذا العمل تقنيات التحكم قوية مخصصة لنظام طاقة الرياح على أساس آلة لا تزامنيه مزدوجة التغذية، بحيث الجزء الثابت متصل مباشرة بالشبكة الكهربائية، اما جزء الدوار مغذى من قبل محول لتوتر كهربائي ذو ثلاث مستويات . الفكرة الرئيسية تعتمد على تطبيق مختلف التقنيات التحكم و التي نذكر منها تقنية النمط الانزلاقي و النمط الانزلاقي الغامض لتحكم منفصل للاستطاعة النشيطة والاستطاعة التفاعلية التي تم انتاجهما بواسطة الآلة المنفصلة بتقنية التحكم الشعاعي هذه الأخيرة تعتمد على التحكم الكلاسيكي (PI) . وأخيرا، التحليل و مقارنة أداء و متانة هذا النظام يتم عن طريق برنامج Matlab / SimulinkTM

الكلمات المفتاحية :

طاقة الرياح ، ، آلة لا تزامنيه مزدوجة التغذية ، تحكم الشعاعي ، تقنية النمط الانزلاقي ، تقنية النمط الانزلاقي الغامض ، محول لتوتر الكهربائي ذو ثلاثة مستويات ذو البنية NPC.

Abstract:

This work presents robust control techniques dedicated to wind power system based on a doubly fed induction machine (DFIM) of 10kW. The stator of the DFIM is directly connected to the grid, by against the rotor is powered by a three-level inverter voltage to NPC structure. The main idea is to apply different control techniques are: control by sliding mode (CMG) and the hybrid control Fuzzy sliding mode (FSMC) for independent control of active and reactive power generated by the DFIM decoupled by vector control technical. The latter based on classical controllers (PI). Finally, the performance and robustness are analyzed and compared by simulation based on the Matlab / SimulinkTM software.

Keywords:

Wind energy, doubly-fed induction machine, vector control, sliding mode control, hybrid control by fuzzy sliding mode, three-level inverter voltage to NPC structure.

Résumé:

Ce travail présente des techniques de commande robustes dédiées au système éolien basé sur la machine asynchrone à double alimentation (MADA) de 10kW. Le stator de la MADA est directement relié au réseau électrique, par contre le rotor est alimenté par un onduleur à trois niveaux à structure NPC de tension. L'idée principale consiste à appliquer les différentes techniques de commande à savoir : la commande par mode glissant (CMG) et la commande hybride par mode glissant flou (CMGF) pour le contrôle indépendant des puissances active et réactive générées par la MADA découplée par la technique de commande vectorielle. Cette dernière est basée sur des contrôleurs classiques (PI). Enfin, les performances et la robustesse sont analysées et comparées par simulation à base du logiciel Matlab / SimulinkTM.

Mots clés:

Energie éolienne, machine induction à double alimentation, commande vectorielle, commande par mode glissant, commande hybride par mode glissant flou, onduleur à trois niveaux à structure NPC.