



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

UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID – TLEMCEN

THÈSE LMD

Présentée à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Pour l'obtention du diplôme de :

DOCTORAT

Domaine : Physique
Spécialité: *Energies Renouvelables*

Par :

Mr BENGUERGOUR Ibrahim

Sur le thème

Techniques de commande avancées d'un système hybride photovoltaïque-éolien : application au pompage

Soutenue publiquement le

à Tlemcen devant le jury composé de :

Mr MERAD Abdelkrim El Hassaine	Professeur	Université de Tlemcen	Président
Mr ALLAOUI Tayeb	Professeur	Université de Tiaret	Directeur de thèse
Mme RAHMOUN Khadidja	Professeur	Université de Tlemcen	Examineur
Mr AFFIF Bouameur	Maître de Conférences A	Université de Mascara	Examineur

*Unité de Recherche en Matériaux et Énergies Renouvelables (URMER)
BP 119, 13000 Tlemcen - Algérie*

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu et avant tout ALLAH le tout puissant, qui nous donné la force et la patience d'accomplir notre travail dans les meilleures conditions.

*Je tiens tout d'abord à exprimer mes plus vifs remerciements à Monsieur **ALLAOUI Tayeb**, professeur à l'université de Tiaret, qui fut un directeur de thèse attentive et disponible malgré ses nombreuses responsabilités. Il restera pour moi un modèle de professionnalisme, compétence, clairvoyance et de rigueur scientifique. L'idée de voler de ses propres ailes est un peu effrayante, mais à ses côtés j'ai eu l'immense honneur d'apprendre. Quelques lignes ne suffiront évidemment pas à exprimer l'étendue de ma gratitude à son égard.*

*J'adresse mes plus vifs remerciements à Monsieur **MERAD Abdelkrim El Hassaine** Professeur à l'université de Tlemcen pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury.*

*J'exprime mes sincères remerciements à Mme **RAHMOUN Khadidja**, professeur à l'Université Abou-Bakr Belkaïd – Tlemcen, pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail et pour ses conseils avisés et la motivation qu'il a su m'insuffler tout au long de ce travail. Pour avoir accepté de le juger.*

*J'exprime mes vifs remerciements à Monsieur **AFFIF Bouameur**, Maître de Conférences à l'Université de Mascara, pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail en me faisant l'honneur de participer à ce jury.*

*Je voudrais exprimer toute ma gratitude à **Mr. DENAI Mouloud**, Professeur à l'université de Hertfordshire, Hatfield, United Kingdom et **Mr. Kouadria abd Eldjabbar**, Docteur à l'université Ibn Khaldoun, Tiaret, pour leur aides précieuses et surtout pour m'avoir aidé à clarifier et organiser mes idées ainsi que leur disponibilité sans faille.*

A toutes les personnes appartenant au Laboratoire des matériaux et énergies renouvelables de l'université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen ainsi le laboratoire L2GEGI de l'université de Tiaret, qui ont contribué directement ou indirectement à l'aboutissement de ce travail, trouvez ici le témoignage de notre profonde reconnaissance.

Sur un plan plus personnel, J'aimerais maintenant remercier mes proches et en premier lieu mes parents à qui je dédie ce mémoire.

Et ma femme pour le soutien qu'elle m'a apporté.

Et ma fille ROYA, qui est venue dans ce monde,

Et qui m'a donné l'inspiration pour terminer et soutenir ce mémoire.

Je remercie ma sœur AYA et mes frères ZAKARIA et AMINE qui m'ont encouragé et conseillé, qui m'ont lu et fait part de leurs observations.

Nombreux sont celles et ceux qui m'ont apporté aide et encouragements au cours de la préparation de ce mémoire. Qu'ils en soient tous chaleureusement remerciés.

Table des matières

Remerciements	ii
Table des matières	iv
Table des figures.....	ix
Liste des tableaux	xi
Liste des Symboles	xii
Liste des Abréviations	xiv
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables et les systèmes hybrides

I Introduction.....	5
I.1 Energies renouvelables, définitions, ressources et exploitation	5
I.1.1 L'énergie de la géothermie.....	6
I.1.2 L'énergie de la biomasse.....	7
I.1.3 L'énergie solaire thermique	8
I.1.4 L'énergie hydraulique	8
I.1.5 L'énergie solaire photovoltaïque.....	9
I.1.6 L'énergie éolienne.....	9
I.2 Système d'énergie hybride	10
I.2.1 L'origine de la notion du système	10
I.2.2 Définition et missions des systèmes hybrides	10
I.2.3 Importance de l'hybridation	11
I.2.4 La structure du système hybride	12
I.2.5 Exemples de topologies de systèmes hybrides.....	15
I.3 Configuration de bus dans les systèmes hybrides	21
I.3.1 Architecture à bus à CC.....	21
I.3.1.1 Avantages	21
I.3.1.2 Inconvénients.....	21
I.3.2 Architecture mixte à bus à CC/CA.....	22
I.3.2.1 Avantages	23
I.3.2.2 Inconvénients.....	23
I.3.3 Architecture à bus à CA.....	23
I.3.3.1 L'aspect pratique de la configuration de bus exclusivement CA.....	23
I.3.3.2 Avantages	24
I.3.3.3 Inconvénients.....	24

I.4 Type de systèmes hybrides.....	25
I.4.1 Systèmes hybrides autonomes	25
I.4.2 Systèmes hybrides connectés au réseau.....	25
I.5 Conclusion	26

Chapitre II : Modélisation et commande du système de conversion photovoltaïque

II Introduction	28
II.1 Le rayonnement solaire	28
II.2 Système photovoltaïque	29
II.3 Le générateur photovoltaïque.....	31
II.3.1 La cellule photovoltaïque.....	31
II.3.1.1 Principe de fonctionnement.....	31
II.3.1.2 Les semi-conducteurs	32
II.3.2 Le panneau solaire	33
II.4 Modélisation du panneau photovoltaïque.....	35
II.4.1 Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque	37
II.4.1.1 Courant de court-circuit.....	38
II.4.1.2 Tension de circuit ouvert.....	38
II.4.1.3 Facteur de forme.....	38
II.4.1.4 Le rendement.....	39
II.5 Hacheur survolteur (Boost)	39
II.5.1 Modélisation du hacheur survolteur	39
II.6 Poursuite du PPM pour un panneau photovoltaïque.....	40
II.6.1 Principe de la commande MPPT	41
II.6.2 Synthèse des commandes MPPT des systèmes photovoltaïques.....	42
II.7 Commande MPPT d'un système photovoltaïque par mode glissant	44
II.8 La commande par mode glissant.....	44
II.8.1 Systèmes à structure variable.....	44
II.8.2 Choix de la surface de glissement.....	46
II.8.3 Conditions de convergence et d'existence du régime glissant.....	47
II.8.3.1 Approche directe (La fonction discrète de commutation)	47
II.8.3.2 Approche de Lyapunov	47
II.9 Calcul de la commande	48
II.9.1 Commande équivalente.....	48
II.9.2 Commande discontinue.....	49

II.10	Commande MPPT par mode glissant.....	49
II.11	Résultats de simulation et discussion.....	51
II.12	Conclusion.....	58

Chapitre III : Modélisation et commande du système de conversion éolienne

III	Introduction.....	60
III.1	Classement d'éolienne selon l'orientation de leur axe de rotation.....	60
III.1.1	Eoliennes à axe vertical.....	60
III.1.2	Eoliennes à axe horizontal.....	61
III.2	Classement des éoliennes selon leur vitesse de rotation.....	62
III.3	Les Principaux composants d'un système éolien.....	62
III.3.1	La turbine.....	62
III.3.2	Le système électromécanique.....	63
III.3.3	Le système d'interconnexion.....	63
III.3.4	Le système de contrôle.....	63
III.4	Générateurs.....	63
III.4.1	La génératrice synchrone.....	63
III.4.2	La génératrice asynchrone.....	64
III.5	Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique.....	65
III.5.1	Loi de Betz.....	65
III.5.2	Production d'énergie mécanique.....	67
III.5.3	Production optimale d'énergie.....	67
III.6	Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine.....	68
III.7	Modélisation de la chaîne de production d'énergie éolienne.....	70
III.7.1	Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne.....	71
III.7.1.1	Modélisation de la turbine.....	71
III.7.1.2	Modèle du multiplicateur.....	72
III.7.1.3	Equation dynamique de l'arbre.....	73
III.7.2	Modélisation de la partie électrique de l'éolienne.....	74
III.7.2.1	Modélisation de la génératrice synchrone.....	74
III.7.2.1.1	Équations électriques.....	74
III.7.2.1.2	Passage au repère de Park.....	75
III.7.2.2	Modèle de la GSAP dans le repère de Park.....	77
III.7.2.2.1	Équations électriques.....	77
III.7.2.2.2	Équations magnétiques.....	77

III.7.2.2.3	Expression du couple électromagnétique.....	77
III.7.2.2.4	Équations mécaniques.....	78
III.7.2.3	Modélisation de l'association MSAP – Redresseur commandé.....	78
III.7.2.3.1	Modèle mathématique du redresseur commandé.....	79
III.8	Maximisation de la puissance par la vitesse de rotation.....	81
III.9	Maximisation de la puissance par un régulateur RST	82
III.9.1	Application du RST à la régulation de la vitesse de la GSAP.....	85
III.9.2	Résultats de simulation et discussion	87
III.10	Maximisation de la puissance par un régulateur RST adaptative basée sur la logique floue	89
III.10.1	Commande par logique floue.....	90
III.10.1.1	Ensembles flous (fonction d'appartenance)	91
III.10.1.2	Inférence floue	92
III.10.1.3	Defuzzification.....	94
III.10.1.4	Commande adaptative par logique floue.....	94
III.10.1.4.1	Description du mécanisme d'adaptation d'un régulateur RST par la logique floue	94
III.10.1.4.2	Résultats de simulation et discussion.....	95
III.11	Maximisation de la puissance par un régulateur RST optimisé par algorithmes génétiques	97
III.11.1	Optimisation des paramètres du régulateur RST par l'algorithme génétique	97
III.11.2	Résultats de simulation et discussion	99
III.12	Conclusion.....	103

Chapitre IV : Application du système hybride (photovoltaïque - éolienne) au pompage

IV	Introduction.....	105
IV.1	Système de conversion d'énergie hybride.....	105
IV.2	Un contrôleur AFLCType2-PI de tension de liaison CC	107
IV.3	Modélisation de l'onduleur triphasé	108
IV.4	Application du système hybride au pompage d'eau.....	111
IV.4.1	Types de moteurs utilisés	111
IV.4.2	Les pompes.....	111
IV.4.2.1	Type de pompe utilisée	111
IV.4.2.1.1	Les pompes centrifuges	111
IV.4.2.1.2	Les pompes volumétriques	112
IV.4.3	Constitution d'une pompe centrifuge.....	112
IV.4.4	Présentation du modèle mathématique de la motopompe	113
IV.4.4.1	Principe de fonctionnement de la machine asynchrone	113
IV.4.4.2	Hypothèses simplificatrices	114

IV.4.4.3	Modèle du moteur	114
IV.4.4.3.1	Principe du contrôle vectoriel de la MAS.....	115
IV.4.4.3.1.1	Commande vectorielle directe à flux rotorique orienté	117
IV.4.4.3.1.2	Commande vectorielle indirecte à flux rotorique orienté	117
IV.4.4.4	Modèle de la pompe centrifuge.....	120
IV.4.4.4.1	Caractéristique hauteur – débit	120
IV.4.4.4.2	Caractéristique couple vitesse.....	120
IV.4.4.4.3	Les avantages et les inconvénients des pompes centrifuges	121
IV.4.4.4.3.1	Les avantages.....	121
IV.4.4.4.3.2	Les inconvénients	121
IV.5	Résultats de simulation et discussion	121
IV.6	Conclusion	125
	Conclusion générale	127
	Annexe.....	131
	Références Bibliographiques.....	147

Table des figures

Chapitre I

Figure I.1. Classification des systèmes hybrides	13
Figure I.2 Architecture des SEH	14
Figure I.3 Solaire – éolien (Site isolé)	16
Figure I.4 Solaire - éolien, stockage à batteries (Site isolé)	16
Figure I.5 Solaire - éolien, stockage à batteries, réseau	17
Figure I.6 Solaire, réseau, stockage à batteries	17
Figure I.7 Solaire-éolien, stockage à batteries et hydrogène	18
Figure I.8 Solaire - éolien, stockage à hydrogène	18
Figure I.9 Éolien, stockage à hydrogène et super condensateur (site isolé)	19
Figure I.10 Éolien - diesel, stockage à hydrogène (site isolé)	19
Figure I.11 Solaire - diesel - réseau, stockage à batteries	20
Figure I.12 Solaire - éolien - diesel, réseau	20
Figure I.13 Configuration du SHE à bus à CC	22
Figure I.14 Configuration du SHE à deux bus à CC et à CA	23
Figure I.15 Configuration de bus CA	25

Chapitre II

Figure II.1 Spectre de rayonnement solaire	28
Figure II.2 Les différentes étapes de la production d'un système photovoltaïque (Technologie cristalline)	30
Figure II.3 Structure d'une cellule solaire en silicium	32
Figure II.4 La première implantation d'une structure PV	33
Figure II.5 Plusieurs formes de structures PV	34
Figure II.6 Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque	36
Figure II.7 Schéma électrique du convertisseur	39
Figure II.8 Fonctionnement d'un panneau photovoltaïque	41
Figure II.9 Diagramme en circuit d'un système photovoltaïque (PV-boost-MPPT)	42
Figure II.10 Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation (P&O)	43
Figure II.11 Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase	45
Figure II.12 Convergence du système glissant	46
Figure II.13 Fonction « <i>sign</i> » de u_n	49
Figure II.14 Structure du contrôleur MPPT par mode glissant	51
Figure II.15: Courant à la sortie du panneau photovoltaïque	51

Figure II.16: Tension à la sortie du panneau photovoltaïque	52
Figure II.17 Puissance à la sortie du panneau photovoltaïque	52
Figure II.18 Courant à la sortie du Boost	52
Figure II.19 Tension à la sortie du Boost	53
Figure II.20 Puissance à la sortie du Boost	53
Figure II.21 Courant à la sortie du panneau photovoltaïque	53
Figure II.22 Tension à la sortie du panneau photovoltaïque	54
Figure II.23 Puissance à la sortie du panneau photovoltaïque	54
Figure II.24 Courant à la sortie du Boost	54
Figure II.25 Tension à la sortie du Boost	55
Figure II.26 Puissance à la sortie du Boost	55
Figure II.27 Courant à la sortie du panneau photovoltaïque	55
Figure II.28 Tension à la sortie du panneau photovoltaïque	56
Figure II.29 Puissance à la sortie du panneau photovoltaïque	56
Figure II.30 Courant à la sortie du Boost	56
Figure II.31 Tension à la sortie du Boost	57
Figure II.32 Puissance à la sortie du Boost	57

Chapitre III

Figure III.1 Différentes technologies d'éoliennes à axe vertical	60
Figure III.2 Différentes technologies d'éoliennes à axe horizontal	61
Figure III.3 Système éolien basé sur la GS pour un fonctionnement à vitesse variable	64
Figure III.4 Système éolien basé sur la génératrice asynchrone à cage à vitesse constante	64
Figure III.5 Tube de courant autour d'une éolienne	65
Figure III.6 Coefficient de puissance	66
Figure III.7 Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes	67
Figure III.8 Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent	68
Figure III.9 Système mécanique de l'éolienne	69
Figure III.10 Modèle mécanique simplifié de la turbine	70
Figure III.11 Schéma de la turbine éolienne	71
Figure III.12 Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine (λ)	72
Figure III.13 Schéma bloc du modèle de la turbine	74
Figure III.14 Structure de la GSAP	75
Figure III.15 Passage du repère naturel abc du stator au repère dq de Park	76
Figure III.16 Schéma de l'association MSAP – redresseur commandé	79

Figure III.17 Modélisation du redresseur dans un repère lié aux axes dq	81
Figure III.18 Maximisation de la puissance par un régulateur PI	82
Figure III.19 Schéma bloc du contrôleur RST	84
Figure III.20 Schéma block du contrôleur RST appliqué pour la régulation de la vitesse du GSAP	85
Figure III.21 vitesse de vent	87
Figure III.22 Performances du système sous une vitesse de vent aléatoire à l'aide d'un contrôleur RST.	89
Figure III.23 Schéma synoptique d'un régulateur flou de la vitesse	91
Figure III.24 Fonctions d'appartenance pour l'erreur, la variation d'erreur et la commande	91
Figure III.25 Méthodes de définition des règles floues	92
Figure III.26 Principe d'adaptation du RST par la logique floue	95
Figure III.27 Performances du système sous une vitesse de vent aléatoire à l'aide d'un contrôleur RST-flou adaptative	97
Figure III.28 Schéma de principe du contrôleur RST proposé avec l'algorithme génétique	98
Figure III.29 Performances du système sous une vitesse de vent aléatoire à l'aide d'un contrôleur RST-génétique	100
Figure III.30. Performances du système sous une vitesse de vent aléatoire à l'aide d'un contrôleur RST, RST-Génétique et RST-flou	102

Chapitre IV

Figure IV.1 Schéma de principe du système hybride	106
Figure IV.2 Modèle du bus à courant continu	106
Figure IV.3 Un contrôleur PI à logique floue adaptative	107
Figure IV.4 (a) Les fonctions d'appartenance pour l'erreur, (b) changement d'erreur et (c) k_p et k_i .	108
Figure IV.5 onduleur triphasé	109
Figure IV.6 Schéma de principe d'une pompe centrifuge	113
Figure IV.7 Analogie de la machine asynchrone avec la machine à courant continu dans le contrôle vectoriel	116
Figure IV.8 Structure générale de la commande vectorielle de la MAS	116
Figure IV.9 Contrôle vectoriel direct de la MAS	117
Figure IV.10 Schéma bloc de la commande vectorielle indirecte de la MAS	119
Figure IV.11 Tension de bus CC à base de MG	121
Figure IV.12 Tension de bus CC à base de AFLC Type2-PI	122
Figure IV.13 Vitesse de la pompe et son zoom	123
Figure IV.14 débit de l'eau et son zoom	123
Figure IV.15 Hauteur de l'eau et son zoom	124
Figure IV.16 Puissance de pompage et son zoom	125

Liste des tableaux

Tableau I.1 Classification des SH par gamme de puissance15

Tableau III.1 Matrice d'inférence du régulateur flou.....93

Tableau III.2 Paramètres de l'algorithme génétique utilisés dans le modèle.....98

Tableau IV.1 Représentation des règles d'inférence.....108

Liste des Symboles

<i>Abréviation</i>	<i>Signification</i>	<i>Unité de mesure</i>
C_{em}	Couple électromagnétique produit par la génératrice	N.m
C_g	Couple sur l'arbre de la GSAP issu du multiplicateur	N.m
C_{mec}	Couple mécanique total	N.m
C_p	Coefficient de puissance de la turbine éolienne	
C_{vis}	Couple des frottements visqueux	
f	Coefficient de frottements visqueux	
FF	Facteur de forme	
G	Gain du multiplicateur	
H	La hauteur créée par la pompe	
I	Le courant électrique	[A]
I_c	Courant capacitif traversant le condensateur du bus continu	[A]
I_{cc}	Le courant de court-circuit	[A]
I_D	Le courant dans la diode parallèle	[A]
$I_{éol}$	Courant de système éolien	[A]
I_{hy}	Courant de système hybride	[A]
I_L	Le photo-courant du module	[A]
i_{ds}, i_{qs}	Composantes du courant statorique dans le repère (d, q)	[A]
I_{pm}	Courant pour la puissance maximale extraite	[A]
I_{pv}	Courant du panneau PV	[A]
I_R	Le courant dans la résistance parallèle	[A]
K_i	Gain intégral	
K_p	Gain proportionnel	
L_m	Inductance mutuelle de la MAS	
L_r	Inductance propre d'une phase rotorique	
L_s	Inductance propre d'une phase statorique	
M_r	Inductance mutuelle entre deux phases rotoriques	
M_s	Inductance mutuelle entre deux phases statoriques	
P_{in}	Puissance lumineuse incidente	[W]
P_m	Puissance maximum extraite	[W]
P_{mt}	Puissance théorique maximale extractible	[W]
P_m	Puissance mécanique	[W]

P_{mt}	Puissance mécanique théorique	[W]
P_{mg}	Puissance mécanique disponible sur l'arbre de la génératrice	[W]
P_{pv}	<i>Puissance</i> du panneau PV	[W]
Q	Le débit de la pompe	
R_{sh}	Résistance shunt	[Ω]
R_s	Résistance série	[Ω]
s	Opérateur de Laplace	
V	Vitesse du vent	[m/s]
V_{ao}, V_{bo}, V_{co}	Tensions d'entrée de l'onduleur	[V]
V_{an}, V_{bn}, V_{cn}	Tensions des phases de la charge	[V]
V_{dc}	Tension aux bornes du condensateur du bus continu	[V]
V_{CO}	Tension de circuit ouvert	[V]
V_{ds}, V_{qs}	Composantes de la tension statorique dans le repère (d, q)	[V]
V_{no}	Tension de neutre de la charge par rapport au point fictif « o ».	[V]
V_{pm}	Tension pour la puissance maximale extraite	[V]
V_{pv}	Tension du panneau PV	[V]
V_{rd}, V_{rq}	Composantes de la tension rotorique dans le repère (d, q)	[V]
ω_{gl}	Pulsation électrique fondamentale du glissement	
ω_r	Pulsation électrique fondamentale des grandeurs rotorique	
ω_s	Pulsation électrique fondamentale des grandeurs statorique	
τ	Constante du temps	[S]
Ψ_{ds}, Ψ_{qs}	Flux statoriques instantanés dans les axes d et q	
ϕ_{ds}, ϕ_{qs}	Flux statoriques instantanés dans les axes d et q de la MAS	
ϕ_{dr}, ϕ_{qr}	Flux rotoriques instantanés dans les axes d et q	
Ω_1, Ω_2	Vitesse de rotation de l'éolienne avant et après le multiplicateur.	
Ω_{gl}	Vitesse de glissement	
Ω_{mec}	Vitesse mécanique de la GSAP issue du multiplicateur	[rad/s]
Ω_s	<i>Vitesse de synchronisme</i>	
λ	Rapport de vitesse de la turbine	
λ_{opt}	Valeur du rapport de vitesse pour laquelle C_p est maximal	
β	Angle de calage des pales	
η	Le rendement de puissance	
σ	La conductivité d'un matériau	[w.m ⁻¹ .k ⁻¹]
ρ	La densité de l'air	[Kg/m ³]

Liste des Abréviations

<i>MW</i>	MégaWatt
<i>SEH</i>	Système d'Energie Hybride
<i>CC</i>	Courant Continu
<i>CA</i>	Courant Alternative
<i>GD</i>	Générateur Diesel
<i>PV</i>	Photovoltaïque
<i>C-Si</i>	Cristallin Silicium
<i>MPPT</i>	Maximum Power Point Tracking (Suivi du Point Maximal de Puissance - SPMP)
<i>P&O</i>	Perturbation & Observation
<i>GPV</i>	Générateur Photovoltaïque
<i>MG</i>	Mode Glissant
<i>MSAP</i>	Machine Synchrone à Aimants Permanents
<i>GSAP</i>	Générateur Synchrone à Aimants Permanents
<i>GS</i>	Générateur Synchrone
<i>GAS</i>	Génératrice Asynchrone
<i>PI</i>	Proportionnel-Intégral
<i>FMM</i>	Force Magnéto-Motrice
<i>PID</i>	Proportionnel-Intégral-Dérivative
<i>RLF</i>	Régulateur par Logique Floue
<i>AG</i>	Algorithme Génétique
<i>MAS</i>	Machine Asynchrone
<i>DFOC</i>	Direct Field Oriented Control (Commande Direct à Flux Orienté)
<i>IFOC</i>	Indirect Field Oriented Control (Commande Indirect à Flux Orienté)
<i>MLI</i>	Modulation de Largeur d'Impulsion
<i>RST</i>	R, S et T sont des polynômes qui forment le régulateur RST

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie électrique est au cœur de nos sociétés qui seraient en peine si elles devaient s'en passer. Sa facilité de transport et surtout sa transformation en une autre forme d'énergie en font un élément désormais indispensable.

En effet, quel appareil domestique ou industriel n'utilise pas d'électricité que ce soit pour faire de l'éclairage, du chauffage, du pompage, des mouvements de rotation ou de translation, de la transmission de signaux, de l'imagerie médicale et bien d'autres choses encorela liste est presque infinie en fait. C'est pour cela que la production de l'énergie électrique est importante et qu'il est intéressant de pouvoir trouver des solutions afin d'en produire toujours plus mais de manière plus propre et plus durable.

Des solutions alternatives aux énergies fossiles que sont le charbon, le pétrole et l'uranium sont des voies vers lesquelles nos sociétés doivent s'envisager. De plus, la consommation d'énergie, toujours en augmentation, fait réduire les réserves en énergie fossiles et rapproche l'échéance de leur épuisement, ou de moins leur extraction à moindre frais. En effet, pour prendre l'exemple du pétrole, les puits sont désormais beaucoup plus profonds et les gisements plus difficiles d'accès ce qui nécessite plus d'infrastructures et de transformations avant de pouvoir être utilisé comme combustible pour être transformé sous une autre forme d'énergie.

Cet exemple montre qu'un jour viendra où les solutions à base d'énergies renouvelables et alternatives qui sont en ce moment trop coûteuses et peu rentables, se révéleront moins chères que les énergies fossiles. Espérons toutefois que nous saurons développer ces énergies renouvelables avant ce jour.

C'est dans ce cadre qui vient s'insérer notre étude qui porte sur deux des énergies renouvelables en développement en ce moment qui sont les énergies éolienne et solaire. L'utilisation de l'énergie hybride est de plus en plus utilisée dans diverses applications en sites isolés tel l'éclairage, les télécommunications, la réfrigération ou le pompage. Son utilisation au niveau du pompage s'est répandue rapidement surtout dans les régions rurales et sahariennes. L'ampleur de l'utilisation de l'énergie hybride nous amène à étudier un système de pompage éolien-photovoltaïque d'eau composé d'un générateur hybride couplé directement à un moteur asynchrone qui entraîne une pompe centrifuge.

Les systèmes hybrides (photovoltaïques et éoliens) présentent des caractéristiques fortement non linéaires, leur production d'énergie dépend des conditions climatiques qui sont hautement aléatoires. Tout cela rend la conception d'un système hybride optimisé difficile.

L'utilisation des techniques intelligentes connaît un grand essor actuellement dans les systèmes complexes et mal définis, que ce soit pour la modélisation, l'optimisation, l'identification ou la commande des systèmes; ceci grâce à leur adaptabilité face aux changements des paramètres des

Introduction générale

systèmes, et leur robustesse envers les perturbations et les erreurs de modélisation. Ceci les rend très adaptées pour être des solutions viables et performantes pour le problème de l'optimisation des systèmes hybrides [1-2].

Les techniques de commande classique de type PI, PID ou RST (régulateur de polynômes R, S et T) couvrent une large gamme dans les applications industrielles. Ce sont des techniques de commande linéaires et présentent l'intérêt de la simplicité de mise en œuvre et la facilité de la synthèse des gains des régulateurs. Avec le temps, ces applications sont devenues moins efficaces, notamment si les processus à commander ont des structures complexes et non-linéaires.

De plus, l'application de ces techniques exige la connaissance des différents paramètres du modèle de système à commander. Cela peut influencer le fonctionnement du processus et peut entraîner une robustesse médiocre face à la variation de ces paramètres et des dépassements importants lors des régimes transitoires [3].

La commande intelligente est basée sur l'utilisation de l'intelligence artificielle qui permet de reproduire le raisonnement humain [4]. La logique floue, les réseaux de neurones, mode glissant et les algorithmes génétiques sont les grandes familles qui constituent l'intelligence artificielle. L'intégration de la logique floue dans la commande adaptative classique est aussi une solution forte et intéressante pour assurer une régulation optimale qui répond aux exigences de l'utilisateur.

Même dans un environnement difficile et variable, il est nécessaire de développer un mécanisme d'adaptation des gains du RST permettant d'incorporer un certain degré d'intelligence dans la stratégie de régulation [5].

Le travail qui a été défini pour cette étude concerne une application stationnaire de petite taille, isolée du réseau, alimentée par un système hybride autonome. L'objectif assigné est d'étudier des algorithmes avancés d'un système hybride éolien-photovoltaïque qui permettent d'optimiser le fonctionnement du système de pompage basé sur de deux sources différents.

Afin d'accomplir au mieux cette étude, cette thèse est structurée en quatre principaux chapitres en plus de l'introduction générale et de la conclusion générale.

Dans le **premier chapitre**, une recherche bibliographique sur les systèmes hybrides de génération d'énergie renouvelable pour des sites isolés a été faite. Nous nous intéressons à l'état de l'art, en particulier relatif aux sources d'énergie qui composent ces systèmes habituellement. Nous décrivons les différentes solutions technologiques permettant d'exploiter les différentes sources d'énergies renouvelables existantes en site isolé.

Introduction générale

Dans le deuxième chapitre, nous allons étudier la modélisation et la commande de la chaîne de conversion d'énergie solaire (générateur PV, convertisseur DC-DC). Tout d'abord, nous expliquons bien des phénomènes des générateurs photovoltaïques et la modélisation du champ photovoltaïque. Après avoir des connaissances de base, nous parlons des méthodes de la poursuite du point de puissance maximale des panneaux photovoltaïques qui existent dans la littérature. Une nouvelle approche de la commande par mode de glissement contre le phénomène de broutement sera proposée afin d'optimiser la puissance du générateur photovoltaïque. Nous exposons d'abord les concepts de base du mode glissant, nous avons abordé ensuite la conception de l'algorithme de commande avec des différentes étapes, c'est-à-dire une commande robuste donc augmentant la fiabilité, améliorant le rendement énergétique, quelles soient les conditions climatiques et leurs variations. Cette loi de commande sera validée par simulation en utilisant Simulink Matlab.

Le troisième chapitre, est consacré à la modélisation et la commande de la chaîne de conversion d'énergie éolienne. Elle est constituée d'une turbine de petite puissance, une génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP), un convertisseur statique (redresseur MLI), nous allons élaborer et appliquer des nouvelles techniques de commande, pour remplacer les techniques classiques appliquées dans le système éolien choisi. Il est réparti en trois sections. Dans la première, nous avons optimisé les gains du régulateur RST au lieu du régulateur PI, pour optimiser la vitesse de l'éolienne afin d'avoir une commande robuste. La deuxième partie est consacrée à la présentation d'un nouveau contrôleur hybride. Cette approche associant le régulateur RST et le superviseur composé de règles floues. Ce type de commande, dite adaptative, permet donc d'exploiter les avantages présentés par des contrôleurs RST est ceux de la logique floue. L'objectif de la loi d'adaptation est d'améliorer les performances de la commande des systèmes complexes et non linéaires. La troisième partie nous avons exposé, brièvement, la technique d'algorithme génétique (AG). Ensuite, l'implantation de la technique AG, dans le but d'optimiser les gains du régulateur RST. Pour cela, nous avons présenté tout d'abord un rappel théorique sur l'algorithme génétique, nous avons abordé ensuite la conception de l'algorithme de commande avec des différentes étapes

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation des résultats de simulation du système de pompage hybride (photovoltaïque-éolien) proposé, obtenus sous l'environnement MATLAB/SIMULINK. Les performances des stratégies de commande des différentes parties de ce système seront discutées et commentées.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale et des perspectives pour de futurs travaux.

Chapitre I

Généralités sur les énergies Renouvelables et les systèmes hybrides

I Introduction

L'électricité, forme propre de l'énergie par excellence, est aujourd'hui produite, à près de 80 %, grâce à la combustion des carburants fossiles ou de l'uranium 235 (fission nucléaire), ressources épuisables [6].

L'utilisation de combustibles fossiles pour répondre à la demande mondiale croissante d'énergie provoque l'épuisement rapide des sources de combustibles classiques, le réchauffement climatique et d'autres problèmes liés aux émissions [7].

Dans le cadre du développement durable, face au double enjeu planétaire posé les risques de pénurie les matières fossiles et leurs effets sur le changement climatique, les gouvernements engagés dans le *Protocole de Kyoto* doivent donc multiplier leurs actions dans le secteur de la production d'énergie électrique afin de développer des sources *d'Energies Renouvelables*, comme l'énergie solaire, éolienne, biomasse, bio-carburant, hydraulique et géothermique etc, propres et inépuisables, ces dernières représentent un gisement considérable au niveau mondial [8].

Ces sources d'énergies renouvelables ne délivrent pas une puissance constante, et leur combinaison peut permettre de parvenir à une production électrique plus continue, c'est la formation d'un système dit hybride (SH) [9].

Dans ce chapitre on va exposer l'historique et la croissance de l'exploitation des énergies renouvelables et ses applications dans le domaine de production de l'électricité, ainsi que les différentes structures des systèmes hybrides de génération d'énergie électrique et leur état de l'art actuel.

I.1 Energies renouvelables, définitions, ressources et exploitation

Une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future.

C'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau de la terre de la biomasse, à l'échelle de la durée de vie de l'humanité, ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires.

L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle, elles ont été exploitées par l'homme depuis l'aube de l'humanité, bois de feu, traction animale, bateau à voile, moulin à vent, ect. Malheureusement, ces énergies furent délaissées au profit d'autres sources d'énergies que l'on pensait à l'époque plus intéressantes.

Ce n'est que dernièrement, suite à la pollution atmosphérique, le réchauffement climatique dû à l'effet de serre, les risques du nucléaire et les limites des ressources (pétrole, gaz, charbon et uranium) qu'il y a eu prise de conscience qu'un développement économique respectueux de l'environnement est absolument

nécessaire. Les énergies dites renouvelables et propres constituent une alternative aux énergies fossiles sur plusieurs points :

1. Elles respectent l'environnement (sont propres) ne dégagent pas de gaz à effet de serre, ni de déchets toxiques.
2. Elles sont comme leurs noms l'indiquent « inépuisables ».
3. Elles permettent une production décentralisée adaptée aux besoins locaux [10].

Les énergies renouvelables peuvent permettre de produire soit de la chaleur seule : eau chaude pour le chauffage ou la production d'eau chaude sanitaire (géothermie, bois énergie, solaire, biogaz utilisé en chaudière), soit de l'électricité seule (éolien, biogaz utilisé dans des moteurs, solaire photovoltaïque, hydroélectricité, ..) soit en cogénération (biogaz dans des moteurs avec récupération de chaleur sur le circuit de refroidissement, turbines à vapeur à partir de bois, biogaz, géothermie, ..).

Une grande partie de l'énergie consommée par l'humanité est sous la forme de chaleur (chauffage, procédés industriels...). Cette énergie est majoritairement obtenue par la transformation de l'électricité en provenance du nucléaire, gaz ou du pétrole.

Il existe des moyens de remplacer ces sources conventionnelles par des sources renouvelables. Une description et quelques commentaires sont proposés ci-dessous [11].

I.1.1 L'énergie de la géothermie

La géothermie est la seule source d'énergie dont l'énergie ne provient pas du soleil, mais des processus de désintégration à l'intérieur de la croûte terrestre. A part cela il existe également la géothermie volcanique [12].

Il existe dans la croûte terrestre un gradient de température qui est en moyenne de 3°C par 100 mètres. La géothermie vise à étudier et exploiter ce phénomène d'augmentation de la température en fonction de la profondeur.

L'exploitation de cette ressource consiste à extraire l'énergie géothermique contenue dans le sol pour l'utiliser sous forme de chauffage ou pour la transformer en électricité à l'aide de turbines. Cette ressource a l'avantage de préserver l'environnement et d'être indépendante des conditions météorologiques (disponible continuellement), elle est donc fiable et stable dans le temps.

Malheureusement cette ressource nécessite des forages dont les résultats sont parfois aléatoires et dont le temps de mise en place de l'installation pour son utilisation est assez important.

Quatre types de géothermie existent selon la température de gisement : la haute ($>180^{\circ}\text{C}$), moyenne ($>100^{\circ}\text{C}$), basse ($>30^{\circ}\text{C}$) et très basse énergie. Les deux premiers types favorisent la production de l'énergie électrique. La géothermie basse énergie permet de couvrir une large gamme d'usages : chauffage urbain, chauffage de serres, utilisation de chaleur dans les processus industriels... La géothermie très basse énergie nécessite l'utilisation des pompes à chaleur et donc une installation particulière [13].

I.1.2 L'énergie de la biomasse

La biomasse désigne toute la matière vivante d'origine végétale ou animale de la surface terrestre. Généralement, les dérivés ou déchets sont également classés dans la biomasse.

Différents types sont à considérer : le **bois – énergie**, les **biocarburants**, le **biogaz**.

Le **bois – énergie** est une ressource très abondante. C'est la ressource la plus utilisée au monde. En Europe, c'est 51% de la part de l'énergie renouvelable qui appartient à ce mode de production d'énergie. Elle se concentre sur l'utilisation destinée au chauffage. On peut utiliser toutes les ressources du bois : les chutes ou déchets de production des industries de transformation du bois (bois d'élagage, le bois forestier provenant de l'entretien des espaces boisés ou le bois de rebut provenant d'emballages, de palettes etc.). L'utilisation va de petites chaufferies individuelles jusqu'à la production de la chaleur industrielle de plus de 15 MW.

Le développement des **biocarburants** est souvent corrélé aux cycles de variation des prix du baril de pétrole. Aujourd'hui éthanol (betterave, blé...) et biodiesel (colza, tournesol...) offrent des avantages environnementaux appréciables dans le contexte de la lutte contre l'effet de serre. L'Union européenne projette d'atteindre une production de 17 millions de tonnes de biocarburant par an en 2010 par rapport au million produit actuellement.

La principale motivation qui pousse à la production du **biogaz** est environnementale. La production de l'énergie, peut être vue seulement comme une méthode d'élimination des gaz polluants, mais elle représente une ressource renouvelable très importante. Quelle que soit l'origine, le biogaz non valorisé contribue, du fait de ses fortes teneurs en méthane, à l'effet de serre, mais c'est le bilan global du cycle qui doit être considéré. Il peut être utilisé comme source brute ou après le processus d'épuration injecté dans les réseaux de distribution.

Longtemps le biogaz ne servait qu'à la production de la chaleur. De nos jours la filière carburant ainsi que la génération de l'électricité est en pleine expansion.

En 1993, 6 millions de m^3 ont été utilisés dans le monde. 80% provenait des décharges d'ordure ménagères.

L'utilisation du biogaz n'est pas encore à son maximum : une croissance de cette technologie est donc à prévoir [11].

I.1.3 L'énergie solaire thermique

Le solaire thermique utilise le soleil tout comme le photovoltaïque mais de façon différente, puisqu'il récupère de la chaleur qu'il transmet ensuite à un circuit d'eau qui peut alimenter une habitation en eau sanitaire ou en chauffage.

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.

Cette énergie représente un rendement élevé et permet de chauffer de l'eau "gratuitement" après retour sur investissement. La marge de manœuvre, en matière de substitution aux énergies fossiles, est très importante : s'il est certes impossible de se chauffer uniquement par le soleil (la chaleur ne se stocke pas sur de longues périodes), il serait toutefois possible de produire 50% de l'énergie de chauffage dont nous avons besoin.

Ce système est totalement écologique, très peu cher et la durée de vie des capteurs sont 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.

Une autre famille d'énergies renouvelables est celle où l'énergie produite est directement sous la forme électrique. A l'aide des panneaux solaires ou de génératrices hydrauliques et éoliennes, la puissance électrique peut être récupérée et immédiatement utilisée par un récepteur ou bien transportée vers les réseaux de distribution. Nous donnons ici une description sommaire de chaque ressource énergétique et la façon de produire l'énergie électrique [14-11].

I.1.4 L'énergie hydraulique

L'eau, comme l'air est en perpétuelle circulation. Sa masse importante est un excellent vecteur d'énergie. L'énergie hydraulique est produite soit au fil de l'eau soit par le biais du stockage de l'eau (lac de barrage, retenues d'eau) qui permet la constitution d'un stock d'énergie électrique mobilisable à tout moment [14]. Les barrages sur les rivières ont une capacité importante pour les pays riches en cours d'eau qui bénéficient ainsi d'une source d'énergie propre et «stockable».

Son principal avantage est de fournir de fortes puissances et de stocker l'énergie dans les retenues d'eau [11].

Notons également dans le domaine de l'énergie hydraulique, les ressources marémotrices, de la houle et celles des courants marins. Les ressources de la houle sont très importantes et de très nombreux travaux dans le monde ont montré la faisabilité de son exploitation, via de très nombreux principes d'exploitation [15].

On discerne la petite hydraulique (inférieure à 10 MW) et la grande hydraulique (supérieure à 10 MW). Dans le cadre de la production décentralisée on va considérer essentiellement la petite hydraulique.

Cette dernière est constituée en grande majorité par des centrales au fil de l'eau ce qui les rend fortement dépendantes du débit des cours d'eau [16].

I.1.5 L'énergie solaire photovoltaïque

Par des cellules photovoltaïques, l'énergie contenue dans le rayonnement solaire est convertie en courant continu basse tension. Les modules standards fournissent une puissance moyenne de 100 W par m² (rayonnement à 25°). L'énergie solaire photovoltaïque peut présenter un intérêt pour le remplacement du pétrole lampant, des piles électriques ou pour les recharges de batteries. L'énergie solaire photovoltaïque nécessite un suivi technique plus important que pour une installation réseau. D'autre part, elle exige un système de stockage qui ne présente pas la même stabilité que le réseau. Cela explique en partie pourquoi son utilisation est peu répandue pour les besoins de production.

L'avantage des cellules photovoltaïques réside dans la transformation directe de l'énergie solaire en électricité, et dans leur souplesse d'utilisation qui les rend utilisable notamment dans les pays en voie de développement qui ne dispose pas de réseau électrique important. Cependant, leur rendement reste faible.

La production d'électricité par générateur photovoltaïque est liée à l'intensité, la durée de l'ensoleillement et à l'orientation du panneau par rapport au soleil [14-17].

I.1.6 L'énergie éolienne

Parmi toutes les énergies renouvelables contribuant à la production d'électricité, l'énergie éolienne tient actuellement le rôle de vedette. Elle est l'une des plus prometteuses, en termes d'écologie, de compétitivité, de champ d'application et de création d'emplois et de richesses. Son potentiel est énorme, il est estimé à 30.1015 kWh pour l'ensemble du globe et entre 5 et 50.1012 kWh/an pour la part terrestre exploitable.

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

L'utilisation de cette énergie est soit directe (mouture, pompage) soit indirecte (production d'électricité via un générateur). Deux applications sont possibles : la production d'électricité et le pompage éolien.

Parmi toutes les énergies renouvelables l'éolien est l'une des plus prometteuses, l'évolution technologique (augmentation de la taille et de la puissance des installations, optimisation des matériaux) alliée à la baisse continue des coûts de production (effet de série) font actuellement de l'éolien l'une des énergies renouvelables les plus compétitives [17].

I.2 Système d'énergie hybride

Pour les sites isolés et les zones éloignées du réseau électrique classique, la possibilité d'être connecter avec ce réseau reste un problème majeur au faite que le prix d'extension est prohibitif en parallèle avec l'augmentation de prix du combustible aussi. En évidence le prix des générateurs basés sur l'énergie renouvelable connaissent une baisse continue de prix au même temps une fiabilité croissante, ses avantages ont menés à une utilisation importante de génération de l'énergie électrique par les énergies renouvelables.

La relation qui mène ses énergies renouvelables à la limite de l'utilisation à propos la variabilité des ressources et la fluctuation des charges selon les périodes annuelles et journalières liées aux conditions climatiques par exemple font l'objet d'une solution plus générale au niveau de la génération de l'énergie électrique, celle qui entraîne une présence d'un système hybride de génération d'énergie afin de répondre aux exigences de la demande [18].

I.2.1 L'origine de la notion du système

Un système est un ensemble d'objets organisés en fonction d'un but et immergé dans un environnement.

1. Le système est un outil conceptuel.
2. L'ensemble doit former une identité ou une unité cohérente et autonome.
3. Les objets ou éléments peuvent être réels ou conceptuels.
4. La notion d'organisation implique des relations, interrelations, interactions dynamiques entre les objets [19].

I.2.2 Définition et missions des systèmes hybrides

Le problème avec la puissance variable et non garantie produite par les sources d'énergie renouvelables, peut être résolu par la combinaison et l'exploitaient des plusieurs sources disponibles facilement mobilisables [20].

Il consiste en l'association de deux ou plusieurs technologies complémentaires de manière à accroître la fourniture d'énergie par une meilleure disponibilité. Par exemple, les sources d'énergie comme le soleil et le vent ne délivrent pas une puissance constante, et leur combinaison peut permettre de parvenir à une production électrique plus continue. Dans bien de régions, les journées ensoleillées sont en général caractérisées par une activité éolienne faible alors que les vents forts sont observés plutôt lors de journées nuageuses ou la nuit [9].

Les performances d'un SEH (le rendement et la durée de vie) sont influencées d'une part par sa conception, c'est-à-dire le dimensionnement des composants, le type de composants, l'architecture etc., et d'autre part par le choix de la stratégie de fonctionnement. Quelques paramètres permettant d'évaluer ces performances sont : l'économie de carburant, le coût du kW, le nombre et la durée des pannes, le nombre d'arrêts pour l'entretien etc.

La configuration optimale pour les systèmes hybrides devrait être déterminée en minimisant le coût du kilowatt heure.

La durée de vie des composants d'un SEH peut être beaucoup plus courte que la durée de vie normale des composants individuels (fonctionnement en réseaux interconnectés).

Les points les plus critiques sont en général la dégradation des batteries, l'endommagement des démarreurs diesel et du système mécanique de freinage des éoliennes, ainsi que la carbonisation excessive des cylindres du moteur diesel.

Un système hybride doit notamment :

1) assurer, en tout temps, l'énergie suffisante demandée par la charge et, si possible, de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable, tout en maintenant une qualité déterminée d'énergie fournie.

2) obéir à des règles d'exploitation temps réel basées sur une priorisation économique des ressources énergétiques disponibles.

3) compter sur une gestion automatisée des composants du système afin de garantir la stabilité du système en tout temps, y inclus dans les transitions entre les différents modes d'opération du système [21].

I.2.3 Importance de l'hybridation

La combinaison de plusieurs sources d'énergies surtout les renouvelables permet d'optimiser au maximum les systèmes de production d'électricité, aussi bien du point de vue technique qu'économique. Les solutions technologiques nouvelles proposées par les générateurs hybrides, même si elles sont très complexes comparativement aux solutions courantes mono source, présentent par contre un intérêt

évident considérable par leur flexibilité incomparable, leur souplesse de fonctionnement et leur prix de revient vraiment attractif.

De plus, l'hybridation permet de :

1. lisser la puissance délivrée par la source d'énergie. Par exemple, l'absorption des pics aléatoires de puissances positives ou négatives générés par la charge (phases d'accélération ou de freinage de véhicules électriques...). Autrement dit, il s'agit ici d'être capable, d'une manière générale, de délivrer ponctuellement des puissances supérieures à la puissance moyenne du générateur électrique ou de récupérer de l'énergie pour recharger la source de puissance.

2. palier pendant une durée limitée une indisponibilité partielle ou totale de la source d'énergie. Par exemple, pendant le démarrage d'une pile à combustible, ou lorsque le soleil est masqué par des nuages devant le générateur photovoltaïque ou en l'absence de vent [22].

I.2.4 La structure du système hybride

Trois critères peuvent être pris en compte dans le classement en fonction de la structure du système.

Le premier critère est la présence ou non d'une source d'énergie classique. Cette source conventionnelle peut être un générateur diesel, une micro turbine à gaz, et dans le cas d'une étude du réseau électrique complet – une centrale tout entière.

Un second critère possible est la présence ou non d'un dispositif de stockage. La présence d'un stockage permet d'assurer une meilleure satisfaction des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une ressource primaire à convertir en électricité. Les dispositifs de stockage peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène, des volants d'inertie, etc. ...

La dernière classification possible est celle relative au type de sources d'énergie renouvelables utilisées. La structure du système peut contenir un système photovoltaïque, une éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique (centrales hydroélectrique ou utilisation des vagues) ou une combinaison de ces sources. Un critère important pour la sélection de la source utilisée est le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit d'installation du système hybride. Un autre facteur déterminant est le consommateur électrique alimenté. Son importance détermine le besoin d'une source supplémentaire, d'un dispositif de stockage et/ou d'une source conventionnelle etc. [23].

Une généralisation de la classification présentée est illustrée sur la Figure I.1.

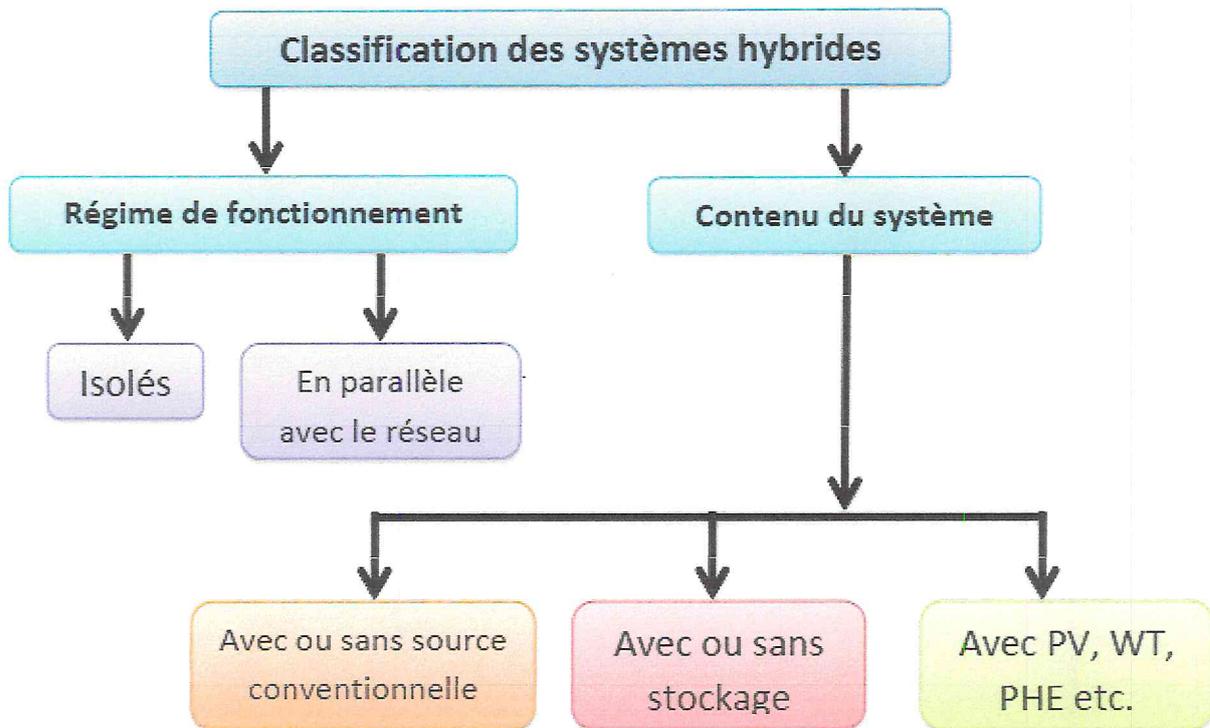


Figure I.1. Classification des systèmes hybrides (SEH)

Dans la plupart des cas, les systèmes hybrides classiques contiennent deux bus : un bus à CC pour les sources, les charges à CC et les batteries et un bus à CA pour les générateurs à CA et le système de distribution [24].

Les sources d'énergie renouvelable peuvent être connectées au bus à CA ou à CC en fonction de la dimension et la configuration du système. L'interconnexion entre les deux bus peut être réalisée par l'intermédiaire de l'électronique de puissance : onduleurs/redresseurs ou convertisseurs bidirectionnels. À part la charge principale, un système hybride peut contenir aussi des charges auxiliaires (charge différée, charge optionnelle, charge de délestage) pour réaliser l'équilibre énergétique. Si la charge principale est alimentée sans interruption, les charges auxiliaires sont alimentées en énergie par ordre de priorité, seulement quand il existe un surplus d'énergie. Ainsi, dans un SEH avec des batteries de stockage et charges auxiliaires, s'il existe un excès d'énergie (venant des sources d'énergie renouvelable et des diesels), celui-ci passera d'abord dans les batteries et ensuite, il sera utilisé pour alimenter les autres charges auxiliaires en fonction de leur priorité. Dans un tel système, les batteries de stockage jouent un double rôle : charge et source. Celles-ci sont résumées dans la Figure I.2 [25].

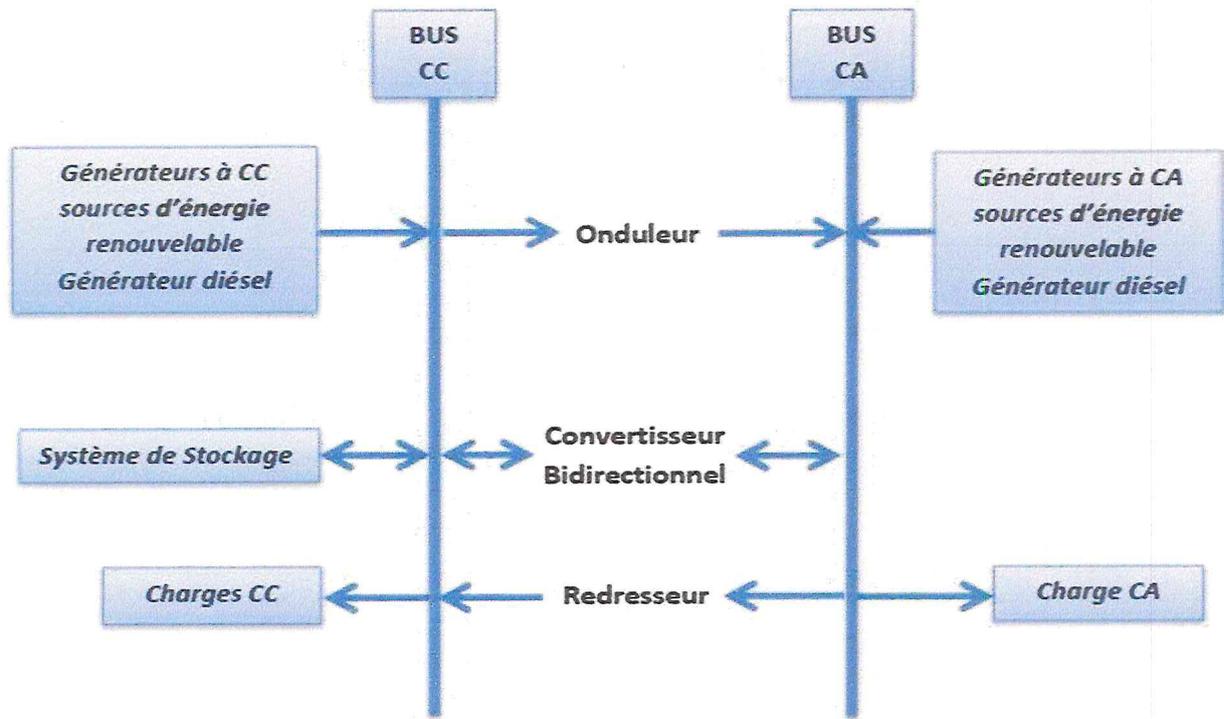


Figure I.2 Architecture des SEH

La puissance délivrée par les SEH peut varier de quelques watts pour des applications domestiques jusqu'à quelques mégawatts pour les systèmes utilisés dans l'électrification de petites îles [26]. Ainsi, pour les systèmes hybrides ayant une puissance en-dessous de 100 kW, la connexion mixte, bus à CA et bus à CC, avec des batteries de stockage, est très répandue [27]. Le système de stockage utilise un nombre élevé de batteries pour être capable de couvrir la charge moyenne pendant plusieurs jours. Ce type de SEH utilise des petites sources d'énergie renouvelable connectées au bus à CC.

Quand il existe une production en CA, elle vient, en principe, des générateurs diesels. Une autre possibilité est de convertir la puissance continue en puissance alternative à l'aide des onduleurs. Les systèmes hybrides utilisés pour des applications de très faible puissance (en-dessous de 5 kW) alimentent généralement des charges à CC.

Les systèmes plus grands, ayant une puissance supérieure à 100 kW, sont centrés sur le bus à CA, avec des sources d'énergie renouvelable conçues pour être connectées aux grands réseaux interconnectés [28]. Si ces systèmes contiennent des sous-systèmes de stockage, ce qui est rare, c'est pour lisser les variations de l'énergie de nature renouvelable.

Le champ d'application des SEH est très large et par conséquent, il est difficile de classer ces systèmes. On peut néanmoins essayer de réaliser un classement par gamme de puissance (Tableau.I.1). Les seuils de puissance donnés ne sont que des ordres de grandeurs.

Puissance du SEH [KW]	Application
Faible : < 5	Système autonome : stations de télécommunications, pompage de l'eau, autre application isolés
Moyenne : 10 – 250	Micro réseaux isolés : alimentation d'un village isolé, des zones rurales...
Grande : > 500	Grands réseaux isolés (ex : réseaux insulaires)

Tableau I.1 Classification des SEH par gamme de puissance [28]

Les grandes installations de SEH en site isolé peuvent être classifiées en fonction du degré de pénétration de l'énergie renouvelable défini par la proportion de la puissance (énergie) produite par les sources d'énergie renouvelable et la puissance demandée par la charge demandée [26].

I.2.5 Exemples de topologies de systèmes hybrides

Nous présentons ici une rapide synthèse des études de quelques topologies possibles pour un système hybride, qui ont été réalisées et qui nous ont conduits à l'étude de ces systèmes.

Ces modèles représentent un exemple typique de système de génération hybride, où sont présents un bus commun électrique et un bus commun thermique (Thermal bus).

La production ou l'utilisation d'énergie électrique est toujours accompagnée par la production et l'utilisation d'énergie thermique : les analogies entre ces deux systèmes énergétiques sont aussi décrites. L'analyse de divers systèmes présents en littérature a permis d'établir un schéma général des systèmes hybrides, suivi par la rationalisation et l'identification des groupes fonctionnels qui constituent ces systèmes. La coprésence d'éléments électriques et d'éléments thermiques, ainsi que les analogies entre systèmes électriques et systèmes thermiques, impliquent la nécessité d'étudier, concevoir et gérer ces systèmes soit du point de vue électrique, soit du point de vue thermique, avec les bénéfices énergétiques et économiques que cela comporte [29].

En effet, l'étude des configurations permet de proposer les structures représentées par les figures 1.3 jusqu'à 1.12.

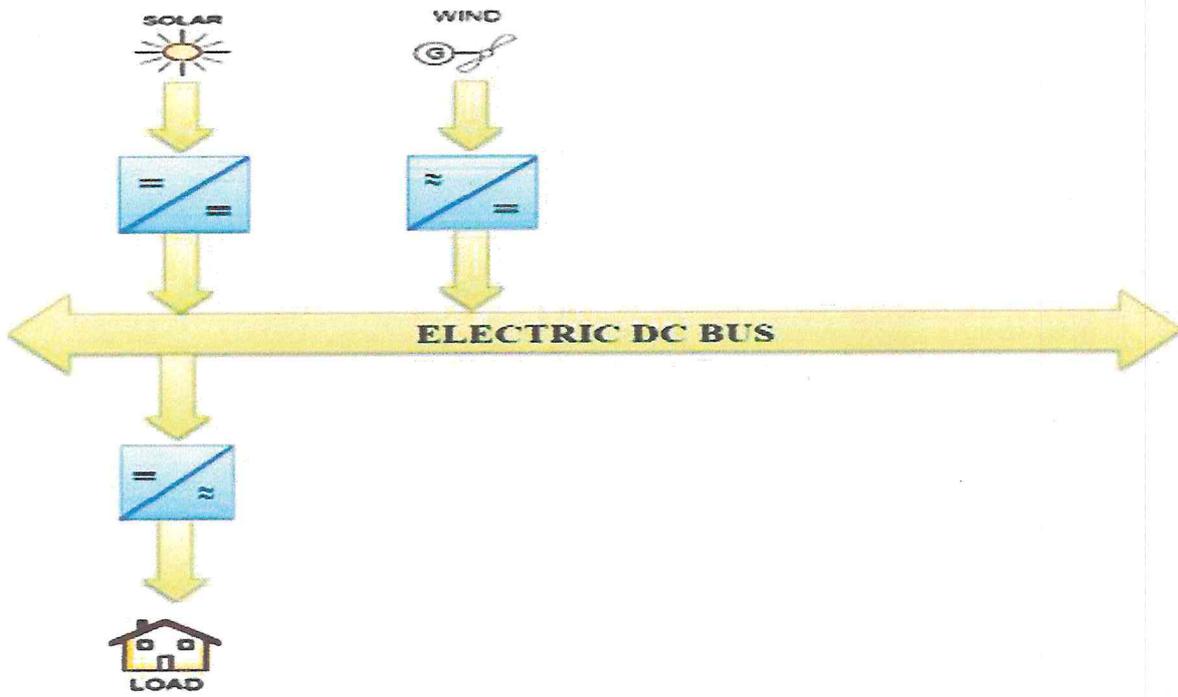


Figure I.3 Solaire – éolien (Site isolé)

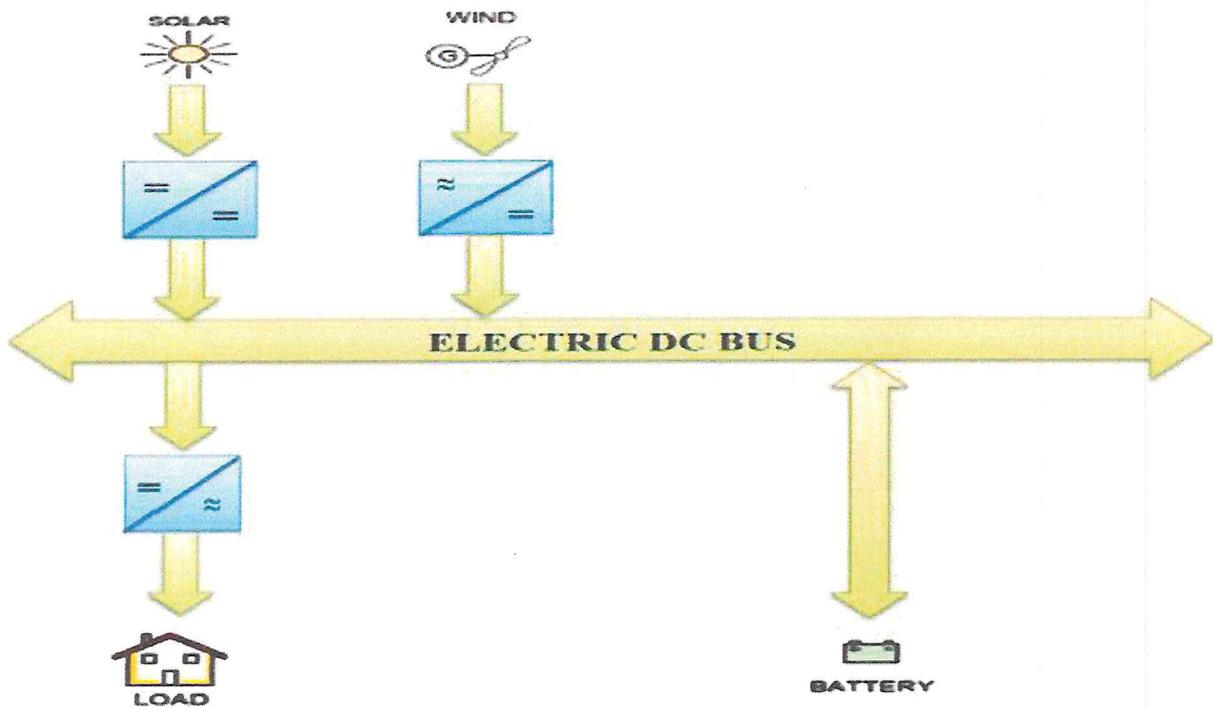


Figure I.4 Solaire - éolien, stockage à batteries (Site isolé)

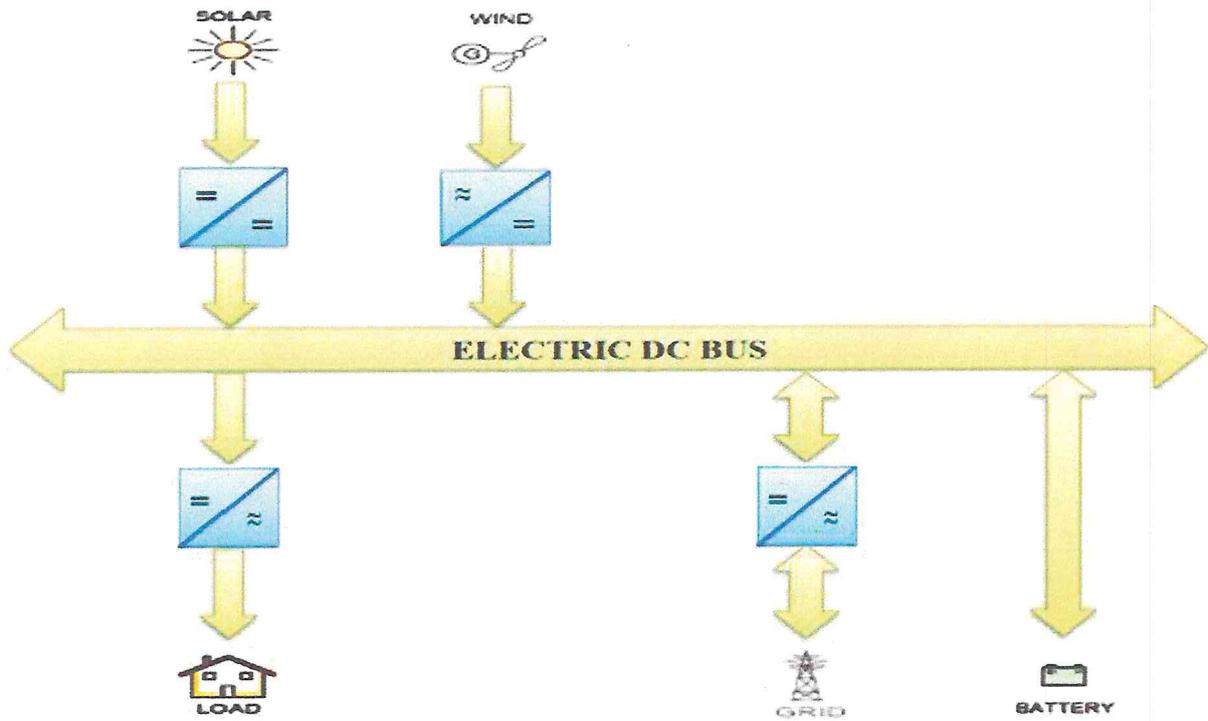


Figure I.5 Solaire - éolien, stockage à batteries, réseau

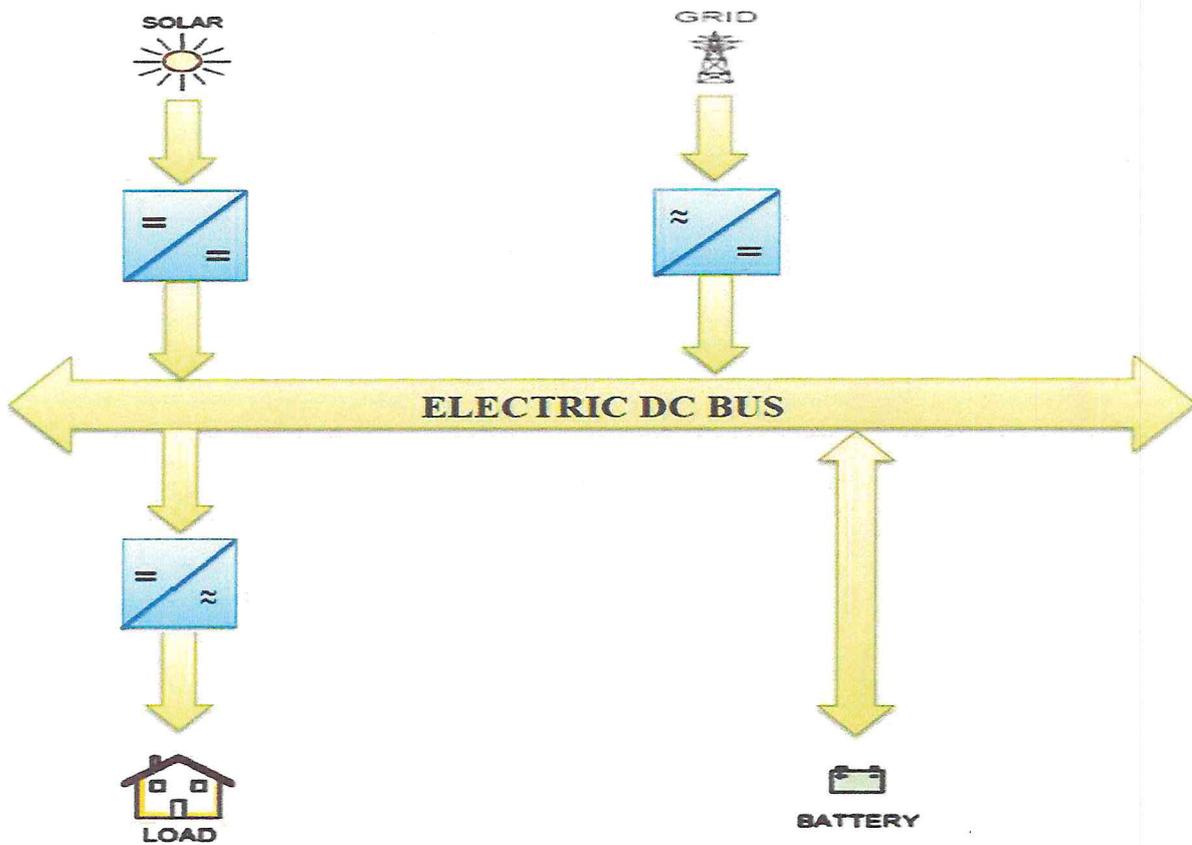


Figure I.6 Solaire, réseau, stockage à batteries

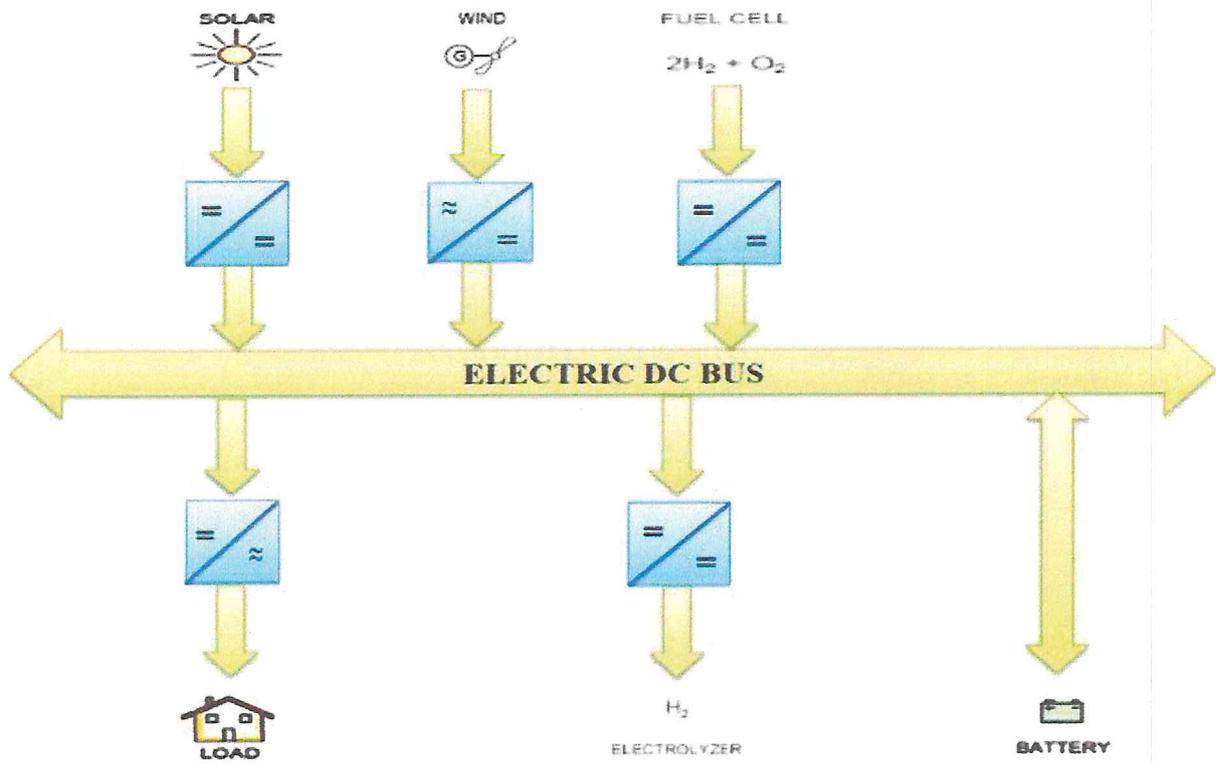


Figure I.7 Solaire-éolien, stockage à batteries et hydrogène

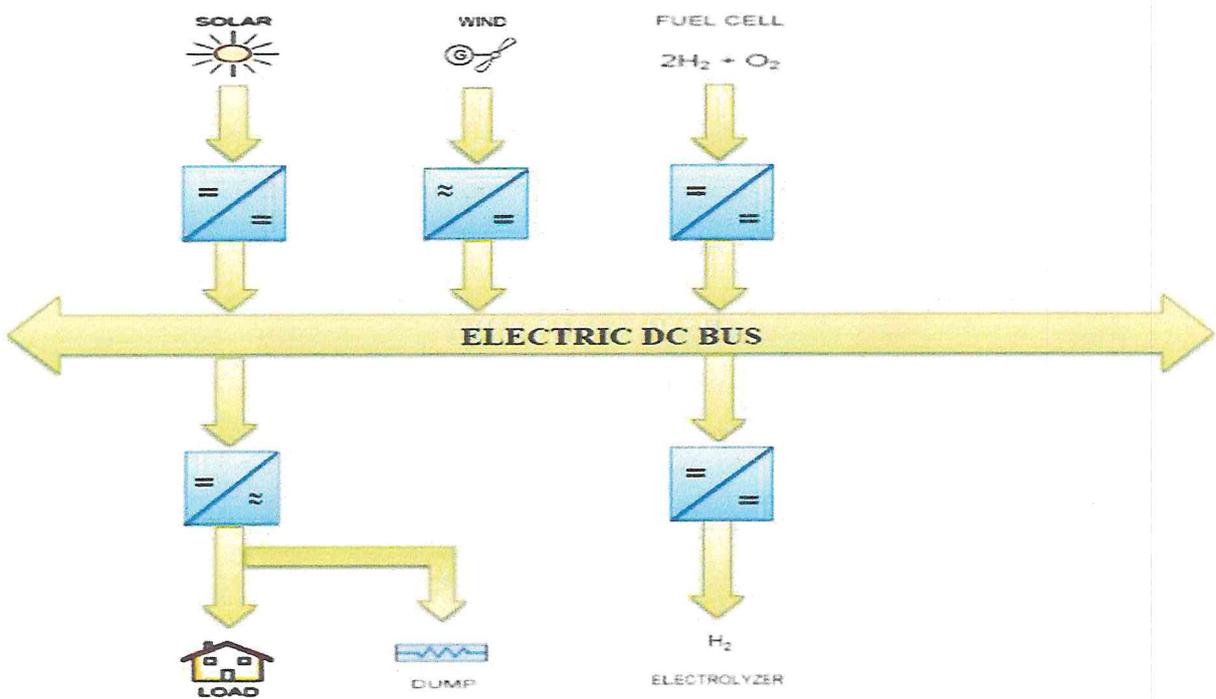


Figure I.8 Solaire - éolien, stockage à hydrogène

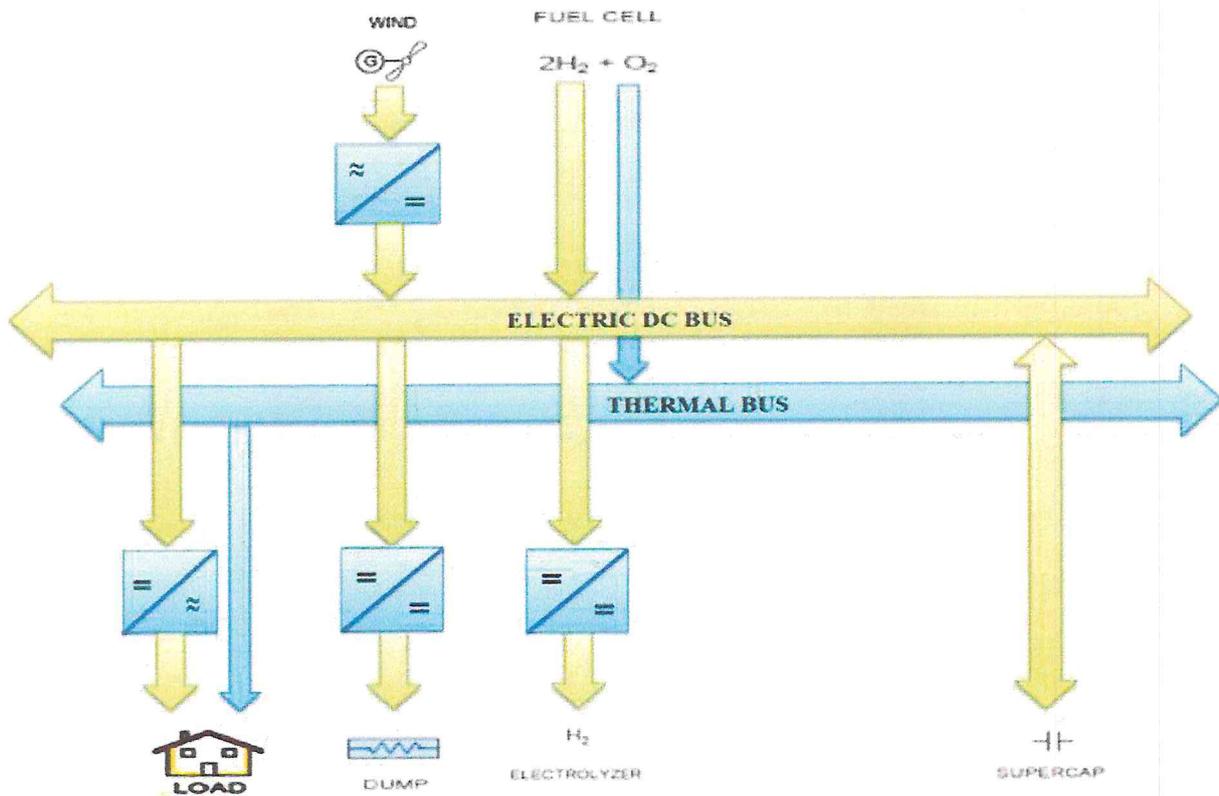


Figure I.9 Éolien, stockage à hydrogène et super condensateur (site isolé)

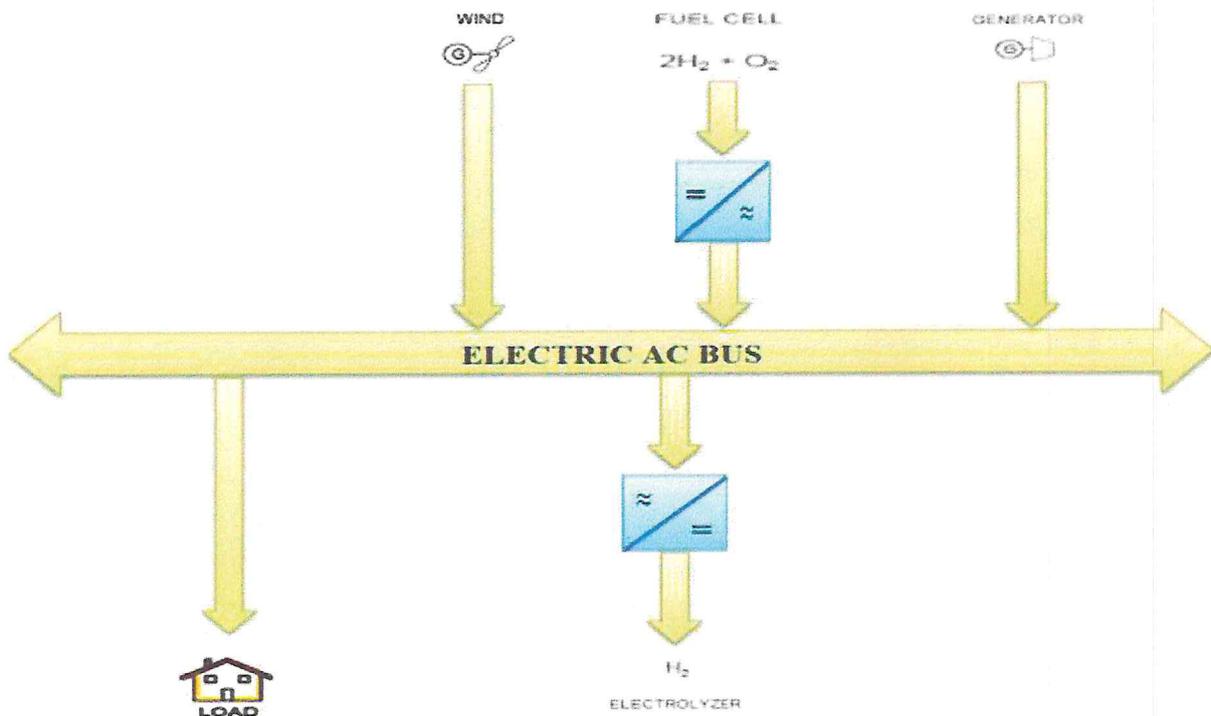


Figure I.10 Éolien - diesel, stockage à hydrogène (site isolé)

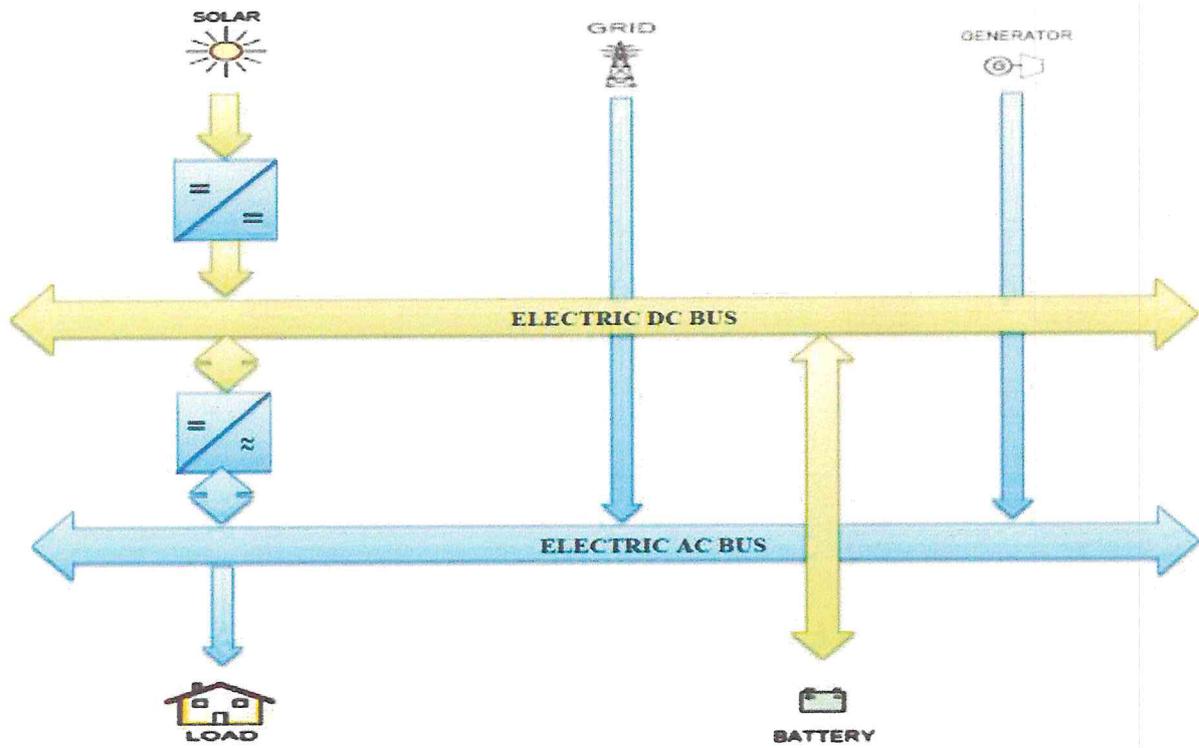


Figure I.11 Solaire - diesel - réseau, stockage à batteries

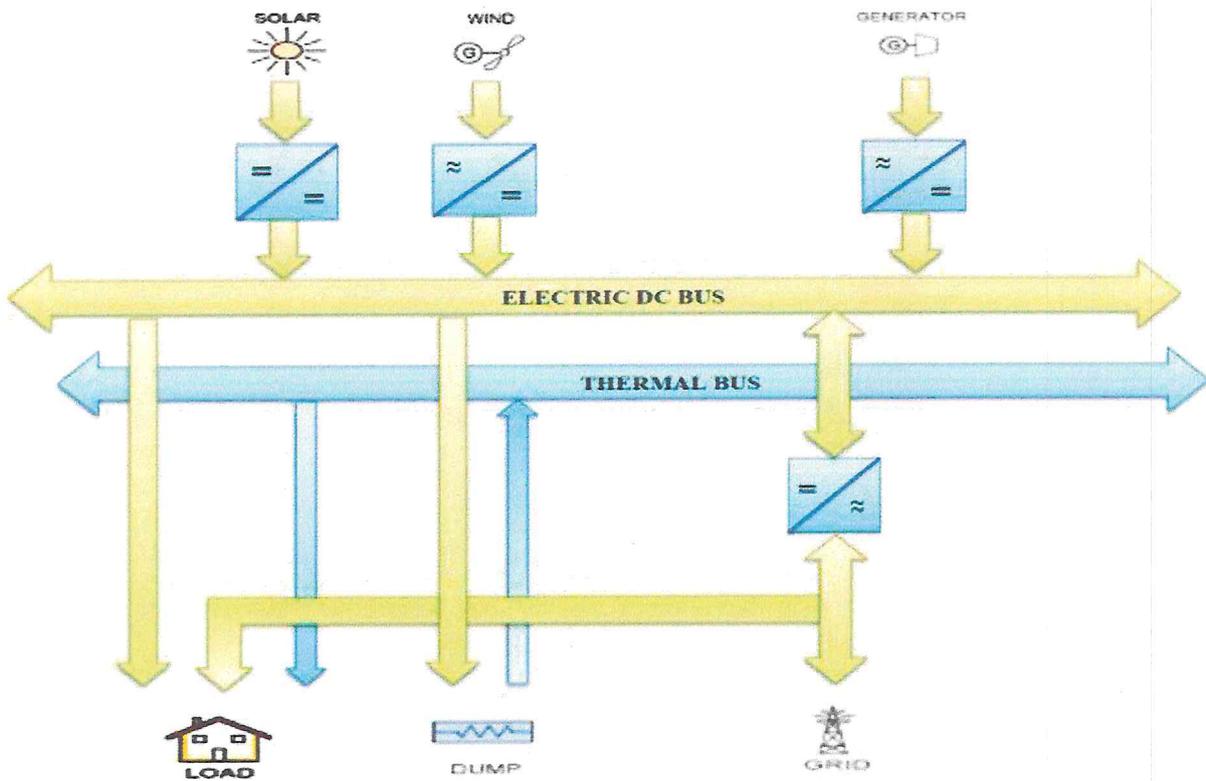


Figure I.12 Solaire - éolien - diesel, réseau

On a présenté un aperçu des topologies des systèmes hybrides les plus répandues. Les figures (I.3 jusqu'à I.12) montrent les diagrammes schématiques de quelques exemples des types de systèmes hybrides.

1.3 Configuration de bus dans les systèmes hybrides

Les générateurs électriques d'un SEH peuvent être connectés en différentes configurations. Ces configurations constituées par des sources d'énergies renouvelables, des batteries et des générateurs diesels se résument en trois types :

Architecture à bus CC (bus à courant continu) et architecture à bus CC-CA (la connexion mixte, bus à CA et bus à CC), architecture à bus CA (bus à courant alternatif) [30].

I.3.1 Architecture à bus à CC

Dans le système hybride présenté dans la Figure I.13, la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus à CC. Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à CA fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie en CC. Le ou les générateur(s) diesel(s) sont connectés en série avec l'onduleur pour alimenter les charges à CA. Les générateurs diesels ne peuvent donc pas alimenter les charges à CA directement. L'onduleur doit alimenter les charges à CA à partir du bus à CC et doit suivre la consigne fixée pour l'amplitude et la fréquence [31]. Les batteries et l'onduleur sont dimensionnés pour alimenter des pics de charge, alors que le générateur diesel est dimensionné pour alimenter les pics de charge et les batteries en même temps. La puissance délivrée peut être contrôlée par la commande du courant d'excitation de la partie électrique du générateur diesel ou en incorporant un régulateur de charge dans les sources d'énergie renouvelable.

I.3.1.1 Avantages

- La connexion de toutes les sources sur un bus à CC simplifie le système de commande.
- Le générateur diesel peut être dimensionné de façon optimale, c'est-à-dire de sorte à fonctionner à puissance nominale pendant le processus de chargement des batteries jusqu'à un état de charge de 75-85%.

I.3.1.2 Inconvénients

- Le rendement de l'ensemble du système est faible, parce qu'une certaine quantité d'énergie est perdue à cause des batteries et des pertes dans les convertisseurs.
- Les générateurs diesels ne peuvent pas alimenter directement la charge, l'onduleur doit donc être dimensionné pour assurer le pic de charge.

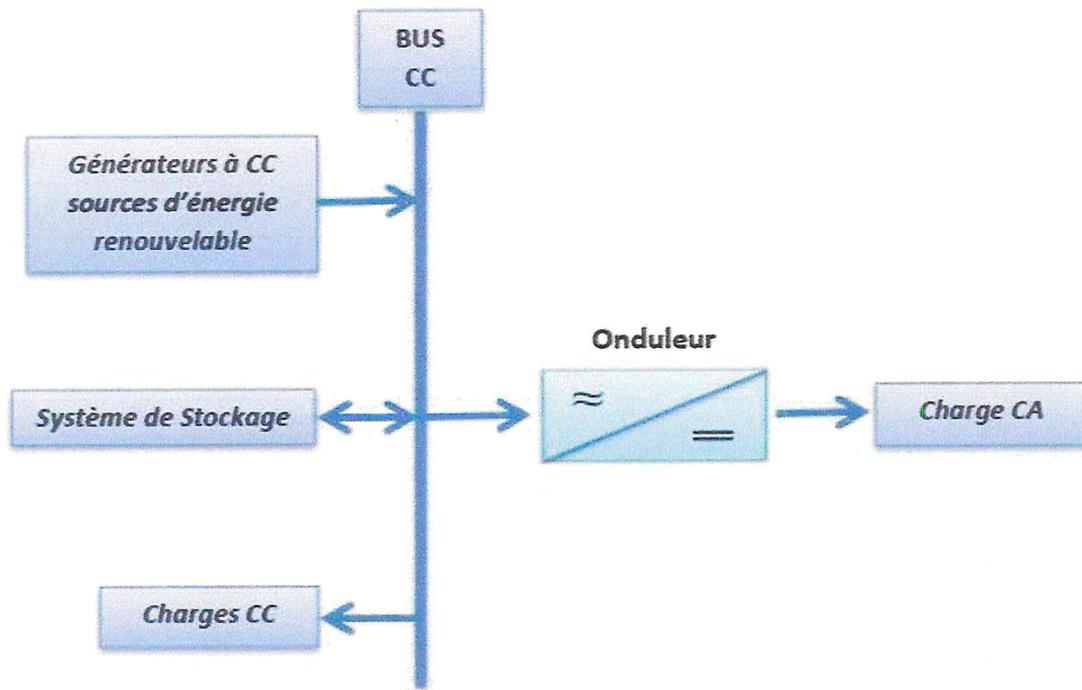


Figure I.13 Configuration du SHE à bus à CC [25]

I.3.2 Architecture mixte à bus à CC/CA

La configuration à deux bus, à CC et à CA, est présentée dans la Figure I.14.

Celle-ci a des performances supérieures par rapport à la configuration antérieure. Dans cette configuration, les sources d'énergie renouvelable et les générateurs diesels peuvent alimenter une partie de la charge à CA directement, ce qui permet d'augmenter le rendement du système et de réduire la puissance nominale du GD et de l'onduleur. Le ou les générateur(s) diesel(s) et l'onduleur peuvent fonctionner en autonome ou en parallèle en synchronisant leurs tensions en sortie. Les convertisseurs situés entre les deux bus (le redresseur et l'onduleur) peuvent être remplacés par un convertisseur bidirectionnel, qui, en fonctionnement normal, réalise la conversion CC/CA (fonctionnement onduleur).

Quand il y a un surplus d'énergie de la part du générateur diesel, il peut aussi charger les batteries (fonctionner en redresseur).

L'onduleur bidirectionnel peut alimenter les pics de charge quand le générateur diesel est surchargé. [31-30].

Pour les systèmes hybrides ayant une puissance en-dessous de 100 kW, la connexion mixte, bus à CA et bus à CC, avec des batteries de stockage, est très répandue.

Les avantages et les désavantages d'un tel système sont présentés ci-après.

I.3.2.1 Avantages

_ Le GD et l'onduleur peuvent fonctionner en autonome ou en parallèle. Quand le niveau de la charge est bas, l'un ou l'autre peut générer le nécessaire d'énergie. Cependant, les deux sources peuvent fonctionner en parallèle pendant les pics de charge.

_ La possibilité de réduire la puissance nominale du GD et de l'onduleur sans affecter la capacité du système d'alimenter les pics de charge.

I.3.2.2 Inconvénients

_ La réalisation de ce système est relativement compliquée à cause du fonctionnement parallèle (l'onduleur doit être capable de fonctionner en autonome et non-autonome en synchronisant les tensions en sortie avec les tensions en sortie du GD).

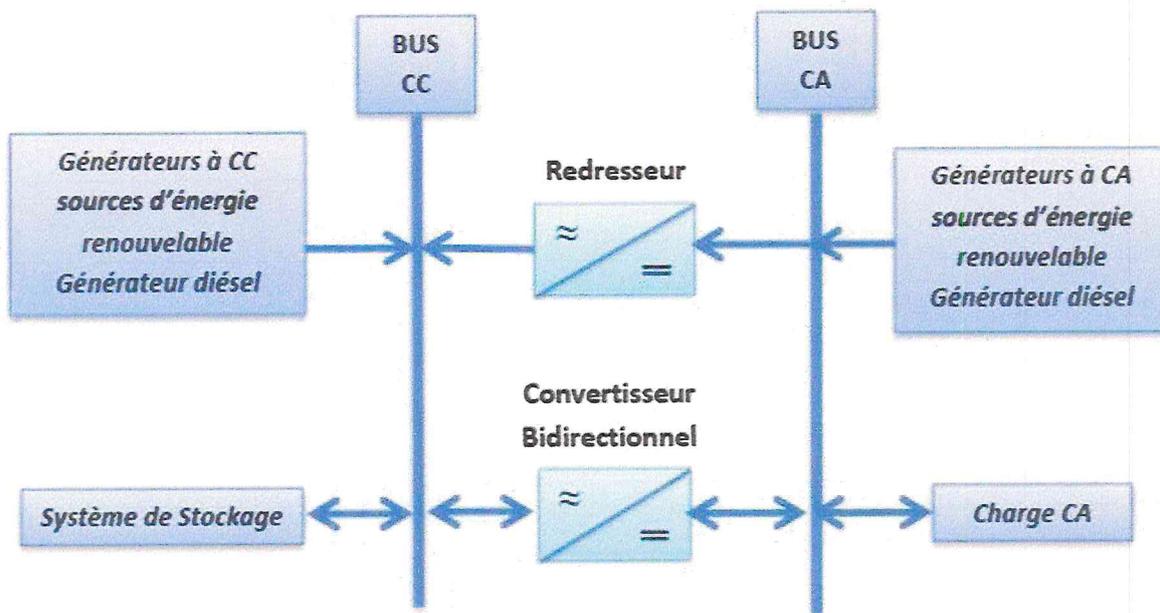


Figure I.14 Configuration du SHE à deux bus à CC et à CA [32-33]

I.3.3 Architecture à bus à CA

De nouvelles approches sont proposées pour améliorer la modularité par un couplage

CA (toute l'énergie converge vers un même bus CA). Toutes les sources de productions sont reliées au bus AC via des convertisseurs sauf le générateur diesel qui peut fixer la fréquence de bus [34].

I.3.3.1 L'aspect pratique de la configuration de bus exclusivement CA.

Un couplage de tous les consommateurs et de tous les générateurs du côté CA (voir figure I.15.) permet désormais de réaliser des systèmes flexibles constitués de composants modulaires. En fonction de

l'application et des sources d'énergie disponibles, il est possible d'intégrer différentes sources énergétiques, aussi bien renouvelables que conventionnelles.

Le système peut en outre être élargi en toute simplicité par ajout de composants ou de générateurs électriques pour répondre à des besoins en énergie croissants.

Ces structures peuvent être utilisées pour l'alimentation de tous les consommateurs électriques, y compris dans les régions rurales des pays en voie de développement et des pays nouvellement industrialisés dans lesquels l'électricité, l'approvisionnement en eau et la purification de l'eau potable sont des besoins vitaux.

L'ingénierie des systèmes modulaires avec couplage du côté CA a été développée pour la première fois par l'Institut national de l'énergie solaire (ISET, Université de Kassel) et par l'entreprise SMA Technologie AG.

L'utilisation du courant alternatif présente plusieurs avantages et inconvénients :

I.3.3.2 Avantages

- Un découplage des différentes sources de production, ce qui permet d'agir de façon assez indépendante les unes sur les autres ;
- Le générateur diesel peut fixer la tension et la fréquence de bus (AC).
- Capacité d'augmenter et de réduire la tension à l'aide d'un simple dispositif passif (transformateur).
- Appareillage de connexion bon marché et disponible facilement.
- Les circuits triphasés produisent un champ magnétique rotatif permettant des moteurs compacts et efficaces.
- La fréquence peut être utilisée comme moyen de contrôle (dérive de fréquence) [35].

I.3.3.3 Inconvénients

- Le rendement de l'ensemble du système est faible, parce qu'une certaine quantité d'énergie est perdue à cause des batteries et des pertes dans les convertisseurs ;
- La connexion de toutes les sources sur un bus à CA complique le système de commande.

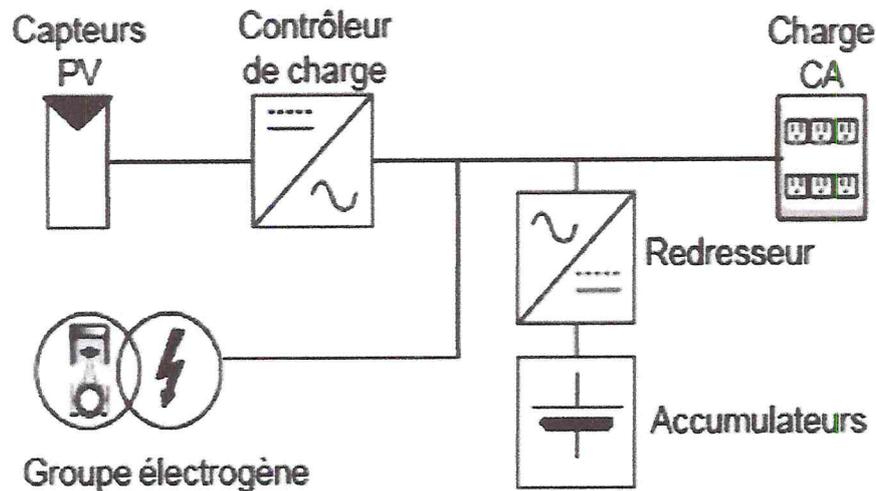


Figure I.15 Configuration de bus CA

I.4 Type de systèmes hybrides

I.4.1 Systèmes hybrides autonomes

C'est un système qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries pour stocker l'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau.

I.4.2 Systèmes hybrides connectés au réseau

Le système hybride est couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur courant continu- courant alternatif (CC-CA). Etant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires à moins que vous ne vouliez une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité.

L'énergie produite est consommée sur place le surplus étant injecté dans le réseau, qui alimente l'utilisateur pendant la nuit ou pendant les jours sans soleil c.-à-d. l'énergie solaire ou éolienne [36].

I.5 Conclusion

Dans ce qui précède, nous avons énoncé de manière générale, les différentes ressources énergétiques permettant de produire de la chaleur et de l'électricité par sources d'énergie renouvelables. Ces derniers représentent une véritable solution vis-à-vis de l'épuisement des ressources énergétique fossiles.

Compte tenu de la situation énergétique mondiale, il devient primordial d'apprendre à consommer plus efficacement d'énergie. L'utilisation de sources d'énergies renouvelables nécessite le choix d'une architecture hybride appropriée, pour cela nous avons fait un panorama des structures des systèmes hybrides.

Le chapitre prochain sera consacré à la modélisation et la commande d'un système de conversion photovoltaïque.

Chapitre II

Modélisation et commande du système de conversion photovoltaïque

II Introduction

Dans les dernières années, l'utilisation des sources d'énergies renouvelables pour produire de l'énergie électrique est visible partout dans le monde. Ce scénario est le résultat de l'augmentation de la demande d'énergie en relation avec la réduction de l'offre de carburants classiques qu'avec les préoccupations croissantes au sujet de l'environnement [37]. Parmi les sources d'énergie renouvelables on trouve celle qui se produit par les panneaux photovoltaïques (PV), qui sont actuellement considérés comme la source d'énergie naturelle la plus utile, car elle ne produit aucun gaz à effet de serre au cours de la production d'électricité, elle est distribuée sur toute la terre, et participe en tant qu'un facteur primordial de tous les autres processus de production d'énergie sur terre [38].

L'énergie solaire photovoltaïque (PV), qui est la conversion de la lumière en électricité grâce à des cellules solaires, représente un alternatif intéressant et bien adaptée à des besoins limités. Le développement dans le domaine de semi-conducteurs et l'électronique de puissance mènent à une activité de recherche importante afin d'améliorer et maximiser l'efficacité des modules photovoltaïques. Cette optimisation de configuration de commutation de convertisseur à améliorer le rendement de conversion électrique pour le raccordement des PV au réseau ou à un périphérique de stockage pour une installation autonome [39].

Dans ce chapitre on va s'occuper à l'étude de la modélisation, la commande et de la simulation des panneaux photovoltaïques autonomes connectés directement à une charge.

II.1 Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet ($0.2\mu\text{m}$) à l'infrarouge ($2.5\mu\text{m}$). L'énergie totale transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de $1350\text{W}/\text{m}^2$ dans l'espace hors atmosphère terrestre. Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il subit une atténuation et une modification de son spectre à la suite de phénomènes d'absorption et de diffusion dans les gaz, l'eau et les poussières. Ainsi, la couche d'ozone absorbe une partie du spectre lumineux provenant du soleil, et en particulier une partie des ultraviolets dangereux pour la santé [40].

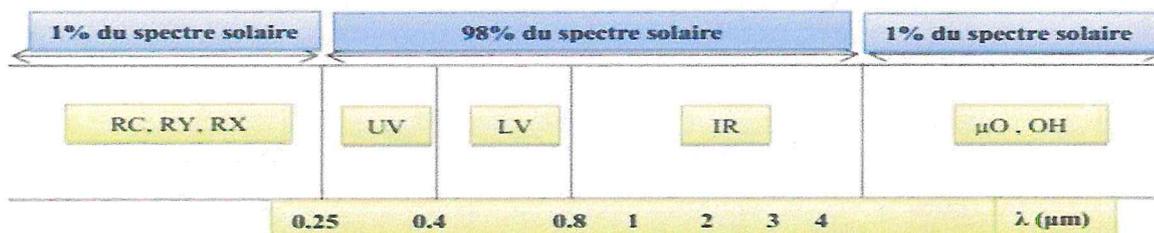


Figure II.1 Spectre de rayonnement solaire

II.2 Système photovoltaïque

Le système photovoltaïque convertit l'irradiante solaire en électricité. Il est composé de :

- cellules μ éléments de base de l'unité collectant la lumière du soleil,
- modules ou panneaux rassemblant un grand nombre de cellules au sein d'une unité,
- batteries connectées via un régulateur de charge.

Quand la lumière atteint la cellule, cela crée un champ électrique à travers les couches, créant ainsi un flux électrique. Plus la lumière est intense, plus le flux électrique est important.

Une cellule photovoltaïque est constituée d'une ou deux couches de matériau semi-conducteur, le plus souvent le silicium. Elle est soit tranchée à partir de lingots, soit sous forme de rubans de silicium, soit en couches minces déposées sur un support à bas coût. Sa performance se mesure en termes de rendement de transformation de la lumière du soleil en électricité. [41]. Il existe différentes technologies des cellules solaires :

➤ Technologie du silicium cristallin

Les cellules en silicium cristallin sont composées de fines tranches coupées à partir d'un seul cristal de silicium (monocristallin) ou d'un bloc de cristaux de silicium (poly cristallin). Leur rendement varie entre 12% et 17%. Il s'agit de la technologie la plus répandue, représentant aujourd'hui environ 90% du marché.

Trois principaux types de cellules cristallines peuvent être distingués :

- monocristallines (Mono c-Si),
- poly cristallines (Poly c-Si),
- rubans (ribbon c-Si).

➤ Technologie des couches minces (Thin Film)

Les cellules en couches minces sont constituées de très fines couches d'un matériau photosensible déposées sur un support à bas coût tel que le verre, l'acier inoxydable ou le plastique. Les coûts de production du procédé des couches minces sont inférieurs à ceux de la technologie cristalline qui nécessite davantage de matière première. Cet avantage en termes de prix est toutefois contrebalancé par des rendements généralement moins élevés (entre 5% et 13%).

Quatre types de cellules en couches minces (en fonction de la matière active utilisée) sont actuellement disponibles dans le commerce :

- Silicium amorphe (a-Si),

- Tellurure de Cadmium (CdTe),
- Cuivre Indium/Gallium Diselenide / disulphide (CIS, CIGS),
- Cellules multi-jonction (a-Si/m-Si).
- Autres types de cellules, de technologies photovoltaïques actuellement commercialisées ou encore à l'étude. En voici, les principales:

- les cellules à concentration Certaines cellules sont destinées à fonctionner avec des rayons solaires concentrés. Elles sont alors placées à l'intérieur d'un collecteur qui concentre la lumière du soleil sur les cellules au moyen d'une lentille. L'idée est d'utiliser le moins possible de matériau photovoltaïque semi-conducteur, et le plus possible la lumière du soleil. Leur rendement se situe entre 20 et 30%.

- **Les cellules flexibles**

Basées sur un processus de production similaire à celui des couches minces, ces cellules sont constituées d'un dépôt de matière active sur un plastique fin, rendant le tout flexible. Cela ouvre la voie à une série d'applications, en particulier pour l'intégration aux bâtiments (toiture) et pour les applications domestiques.

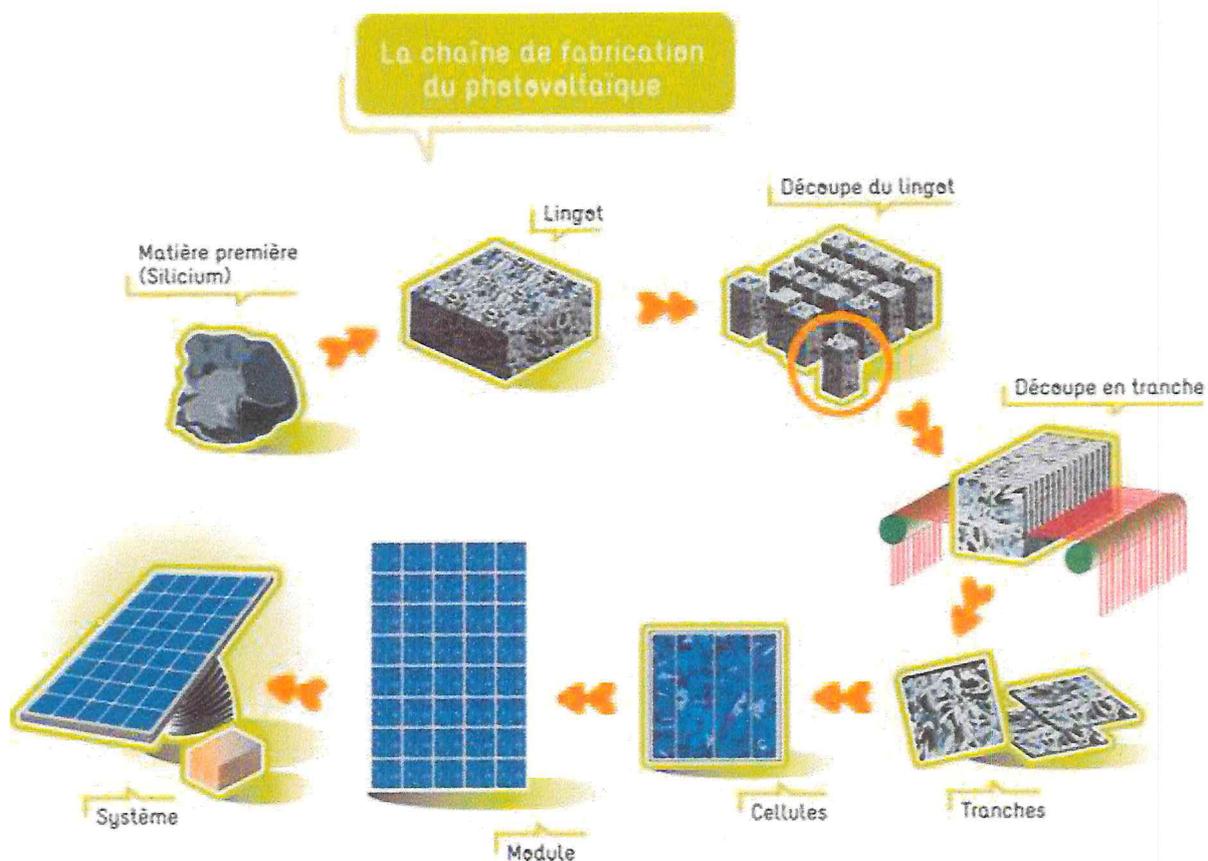


Figure II.2 Les différentes étapes de la production d'un système photovoltaïque (Technologie cristalline)

Dans notre travail, nous allons plutôt utiliser des panneaux poly-cristallins. Ils ont des rendements satisfaisants (13% en application réelle et jusqu'à 20% en laboratoire) et ont l'avantage par rapport au silicium monocristallin de produire peu de déchets de coupe et de nécessiter 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication.

La figure II.2 décrit les différentes étapes de la production d'un système photovoltaïque de cette technologie. Il s'agit de l'extraction et de la purification du silicium, puis de la production des tranches, ensuite du traitement des cellules et du module pour aboutir à la composition du système.

II.3 Le générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est composé de plusieurs panneaux photovoltaïque et chaque panneau est un ensemble des cellules photovoltaïques.

II.3.1 La cellule photovoltaïque

II.3.1.1 Principe de fonctionnement

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3V à 0.7V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule.

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6V pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (V_{CO}). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit (I_{CC}) et dépend fortement du niveau d'éclairement [42].

La figure II.3 illustre une cellule PV.

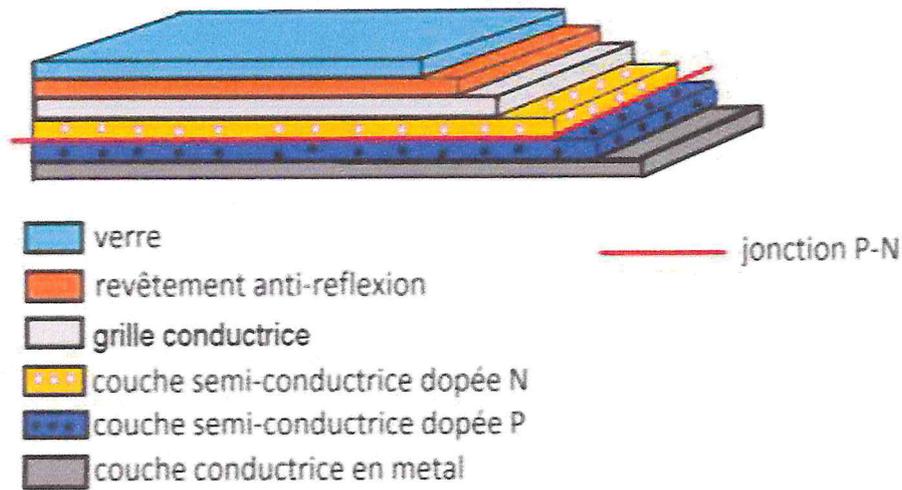


Figure II.3 Structure d'une cellule solaire en silicium

II.3.1.2 Les semi-conducteurs

On appelle semi-conducteur un matériau électriquement intermédiaire entre isolant et conducteur. En effet, les valeurs usuelles de la conductivité (σ) des isolants sont comprises entre $1.e^{-11}$ et $1.e^{-19}$ S/cm et celles des conducteurs entre $6.e^7$ et $1.e^4$ S/cm. Il existe pourtant des corps qui ont une résistivité intermédiaire comprise entre $1.e^3$ et $1.e^{-6}$ S/cm, on les appelle des semi-conducteurs [43].

On sait qu'au sein des structures cristallines de la matière, les électrons ont des énergies distinctes qui appartiennent à certains ensembles de valeurs appelées bandes d'énergies. Les bandes de faible énergie correspondent à des électrons participant au maintien de la structure cristalline. Les bandes de hautes énergies correspondent à des électrons quasi libres, se détachent de la structure et par conséquent peuvent participer à une conduction électrique. On distingue les isolants et les conducteurs par la différence d'énergie qu'il existe entre ces bandes.

Plusieurs matériaux peuvent rentrer dans la catégorie des semi-conducteurs comme le silicium qui prend l'image du matériau semi-conducteur le plus utilisé commercialement, du fait de ses bonnes propriétés, de son abondance naturelle et de son coût de mise en œuvre économique. On peut citer quelques autres matériaux comme le germanium, l'arséniure de gallium ou le carbure de silicium [43].

On prend le nom semi-conducteur intrinsèque lorsque le matériau est pur, dans ce cas il ne comporte aucune impureté et son comportement électrique ne dépend que de la structure du matériau. Ce comportement correspond à un semi-conducteur parfait, c'est-à-dire sans défaut structurel ou impureté chimique. Un semi-conducteur réel n'est jamais parfaitement intrinsèque mais peut parfois en être proche comme le silicium monocristallin pur [37].

II.3.2 Le panneau solaire

Le panneau solaire se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série ou bien en parallèle afin de produire la puissance souhaitable. Les premières implantations des structures étaient fondées sur l'association de plusieurs modules photovoltaïques attachés par un seul convertisseur on l'appelle un onduleur centré comme indiqué dans la figure II.4.

Le rendement de cette structure est faible à cause de l'insertion obligatoire des diodes dans chaque branche parallèle afin d'éviter la dispersion d'énergie. Il y'a d'autre limitation tel que la perte en puissance qui touche la non-application réel d'algorithme MPPT ou chaque branche peut ne pas fonctionner en maximum de production de puissance.

Ce qui concerne la protection des panneaux solaires, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage. Pour cela, deux types de protections sont classiquement utilisées dans les installations actuelles :

1. La protection en cas de connexion en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour).
2. La protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass) et éviter les points chauds [42].

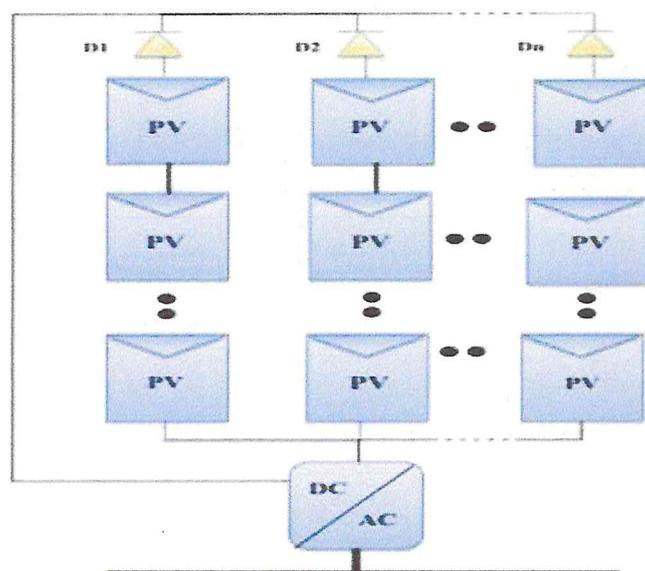


Figure II.4 La première implantation d'une structure PV [37]

Cependant le choix de la structure convenable des modules photovoltaïques reste lié au niveau de la connexion en série comme la montre la figure II.4, cette topologie permet un accroissement d'efficacité et une meilleure utilisation de panneau photovoltaïque.

L'avantage principal de cette structure réside dans la suppression des pertes de puissance à cause d'absence des diodes de retour et l'application parfaite d'algorithme MPPT qui nous permet de produire une puissance maximale. Une autre structure très intéressante applique l'utilisation du micro onduleur lié avec un seul panneau figure II.5, dans ce cas chaque panneau peut fonctionner au point de puissance maximale. Cette topologie touche une production d'une faible puissance typiquement entre 200w et 300w. L'avantage principal de ses micros onduleurs réside dans l'emplacement facile en cas d'une panne, ils présentent aussi une simplicité de raccordement avec le réseau ou bien la charge.

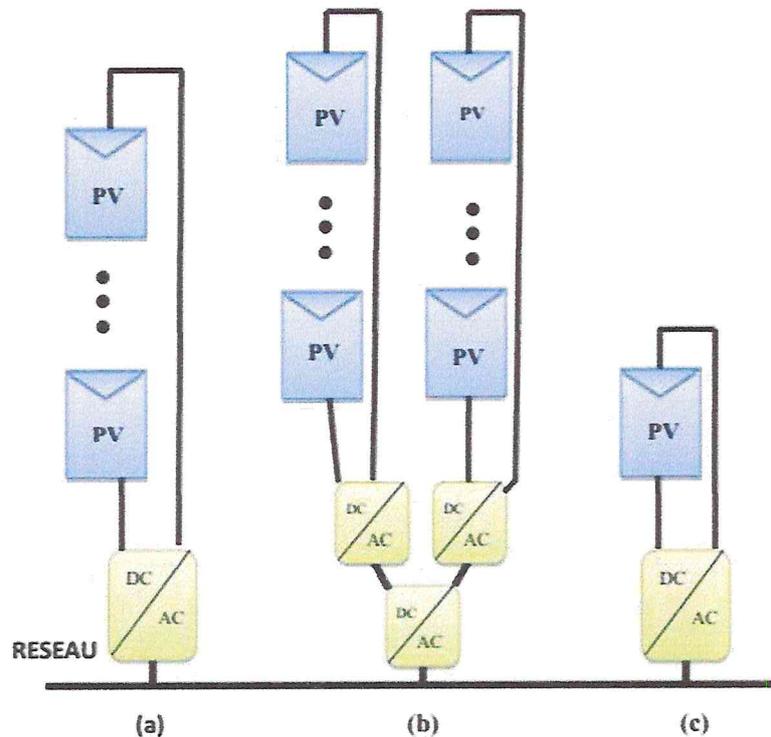


Figure II.5 Plusieurs formes de structures PV [37]

Le système photovoltaïque a beaucoup d'avantages :

- Il est très sûr et d'une grande fiabilité. L'espérance de vie d'un module solaire est d'environ 30 ans. La performance des cellules photovoltaïques est généralement garantie par les fabricants pour une durée de 20 à 25 ans. Au-delà, la puissance d'une cellule reste néanmoins supérieure à 80% de la puissance initiale. Le photovoltaïque est donc une technologie fiable sur le long terme. De plus, la fiabilité des produits est garantie aux consommateurs par des standards de qualité très élevés au niveau européen.

- Les modules photovoltaïques sont recyclables et les matériaux utilisés pour leur production (silicium, verre, aluminium, etc.) peuvent être réutilisés. Le recyclage n'est pas seulement bénéfique pour l'environnement, il contribue également à réduire l'énergie nécessaire pour produire ces matériaux et ainsi à réduire leur coût de fabrication.

- L'énergie solaire photovoltaïque exige peu de maintenance. Les modules solaires ne nécessitent pratiquement aucune maintenance et sont faciles à installer.

- L'énergie solaire photovoltaïque peut être intégrée de manière esthétique dans les bâtiments (BIPV, Building integrated photovoltaics). Les modules solaires peuvent couvrir toits et façades, contribuant ainsi à l'autonomie énergétique des bâtiments.

Ils sont silencieux et peuvent être intégrés de manière très esthétique. Les législations européennes sur les bâtiments sont en cours de révision afin d'intégrer des impératifs d'énergies renouvelables pour les édifices publics et les logements.

Celles-ci permettent d'accélérer le développement des éco-bâtiments et des bâtiments à énergie positive (E+ Bâtiments) et ouvrent la voie vers une meilleure intégration des systèmes photovoltaïques dans le bâti.

- Le temps de retour énergétique d'un module diminue constamment. Cela signifie que le temps mis par un module photovoltaïque pour générer autant d'énergie qu'il en a fallu pour le produire est assez court. Sur sa durée de vie, un module produit plus d'énergie qu'il n'en faut pour le fabriquer.

Quant aux limites des systèmes photovoltaïques, on peut en citer la superficie ou l'emprise. La taille de l'installation doit être en accord avec la surface du toit de l'habitat ou du lieu où elle sera implantée. En ce qui nous concerne, nous supposons que la surface installée ne dépasse pas les 15 m². [44]

II.4 Modélisation du panneau photovoltaïque

L'étude du fonctionnement des systèmes photovoltaïques nécessite des modèles permettant de calculer l'énergie produite par l'installation photovoltaïque. Dans la littérature plusieurs chercheurs ont étudié ses modèles spécifiés. Parmi eux qui ont utilisé Matlab comme outil informatique capable de bien projeter le fonctionnement réel du module photovoltaïque.

Les chercheurs utilisent un modèle physique sous la forme d'un circuit des diodes et des résistances qui vont permettre de fonctionner comme un PV, cette tâche est très utile au recherche dans plusieurs laboratoires pour un PV connecter à un réseau ou bien autonome connecter à un système de stockage ou à une charge.

Les modèles mathématiques de cellules photovoltaïques sont basés sur des équations théoriques décrivant le fonctionnement des cellules photovoltaïques, elles sont généralement associées en série ou bien en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir un module photovoltaïque. Un générateur PV est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel. Les modèles empiriques reposent sur des valeurs différentes

extraites de la courbe $I(V)$ des générateurs photovoltaïques qui se rapprochent de l'équation caractéristique des panneaux solaires à l'aide d'une fonction analytique [45].

La caractéristique $I(V)$ du générateur PV est basée sur celle d'une cellule élémentaire modélisée par le circuit équivalent (figure II.6). Ce circuit introduit une source de courant et une diode en parallèle, ainsi que des résistances série R_s et parallèle (shunt) R_p pour tenir compte des phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule.

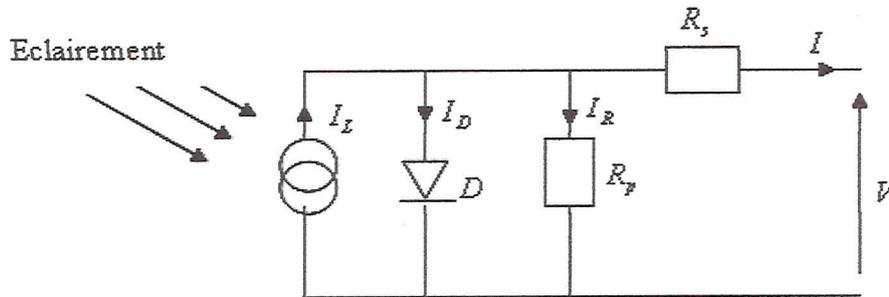


Figure II.6 Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque

La résistance série est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière. La résistance parallèle rend compte des effets, tels que le courant de fuite par les bords de la cellule, elle est réduite du fait de la pénétration des impuretés métalliques dans la jonction (surtout si cette pénétration est profonde).

Ce circuit peut être utilisé aussi bien pour une cellule élémentaire, que pour un module ou un panneau constitué de plusieurs modules [46].

A partir de la figure II.6 la loi des nœuds nous permet d'écrire la relation suivante:

$$I_L = I_D + I_R + I \tag{2.1}$$

Le courant de jonction I_D est donné par :

$$I_D = I_0 \left(e^{q \left(\frac{V + R_s I}{nKT} \right)} - 1 \right) \tag{2.2}$$

Le courant dans la résistance R_p est donné par :

$$I_R = \frac{V + I * R_s}{R_p} \tag{2.3}$$

A partir de l'équation 2.1 on obtient l'expression de courant I :

$$I = I_L - I_D - I_R \quad 2.4$$

Remplaçons dans 2.4 les équations 2.2 et 2.3 l'équation caractéristique deviendra

$$I = I_L - I_0 \left(e^{q \left(\frac{V + R_S * I}{nKT} \right)} - 1 \right) - \frac{V + I * R_S}{R_p} \quad 2.5$$

Où :

Si on suppose que la résistance parallèle est infinie (R_p) l'équation 2.5 devienne:

$$I = I_L - I_0 \left(e^{q \left(\frac{V + R_S * I}{nKT} \right)} - 1 \right) \quad 2.6$$

L'équation 2.6 en termes de I et V n'est pas tellement facile à résoudre comparativement à l'équation du circuit équivalent simplifié. Par conséquent une méthode numérique (Newton-Raphson) doit être appliquée.

Où :

I : Le courant de cellule.

V : La tension de cellule.

R_S : La résistance série de la cellule.

T : La température de la cellule [$^{\circ}$ K].

q : La charge d'électron $e = 1.6 * 10^{-19} C$.

I_0 : Le courant de saturation [A]

K : La constante de Boltzman ($1.3854 * 10^{-2} JK^{-1}$).

$g V$: La tension de seuil de diode (1.1V).

n : Le facteur de qualité de diode.

II.4.1 Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivant [47] :

II.4.1.1 Courant de court-circuit

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_s nulle et R_p infinie), ce courant se confond avec la photo courant I_L dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation 2.5, on obtient:

$$I_{cc} = I_L - I_0 \left(e^{q \left(\frac{R_s * I_{cc}}{nKT} \right)} - 1 \right) - \frac{I_{cc} * R_s}{R_p} \quad 2.7$$

Pour la plupart des photopiles (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme

$$I_0 \left(e^{q \left(\frac{R_s I_{cc}}{nKT} \right)} - 1 \right) \text{ devant } I_L.$$

L'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} = \frac{I_L}{\left(1 + \frac{R_s}{R_p} \right)} \quad 2.8$$

II.4.1.2 Tension de circuit ouvert

C'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_L - I_0 \left(e^{q \left(\frac{V_{co}}{nKT} \right)} - 1 \right) - \frac{V_{co}}{R_p} \quad 2.9$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieur à :

$$V_{co} = \left(\frac{q}{nKT} \right) * \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad 2.10$$

II.4.1.3 Facteur de forme

On appelle facteur de forme FF, le rapport entre la valeur maximale de la puissance pouvant être extraite ($V_{pm} * I_{pm}$) de la photopile sous les conditions de mesures standardisées, et le produit ($I_{cc} * V_{co}$).

Où : I_{cc} intensité de court-circuit et V_{co} tension de circuit ouvert

$$FF = \frac{I_{pm} * V_{pm}}{I_{cc} * V_{co}} \quad 2.11$$

Pour une cellule de fabrication industrielle, le facteur de forme est de l'ordre de 70%.

II.4.1.4 Le rendement

Le rendement (η), des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} .

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF \cdot V_{oc} \cdot I_{cc}}{P_{in}} \quad 2.12$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert [47].

II.5 Hacheur survolteur (Boost)

Le schéma de principe de l'hacheur survolteur est montré dans la figure II.7. Il est utilisé premièrement pour adapter le niveau de tension et deuxièmement pour faire fonctionner le générateur photovoltaïque au point de puissance maximale.

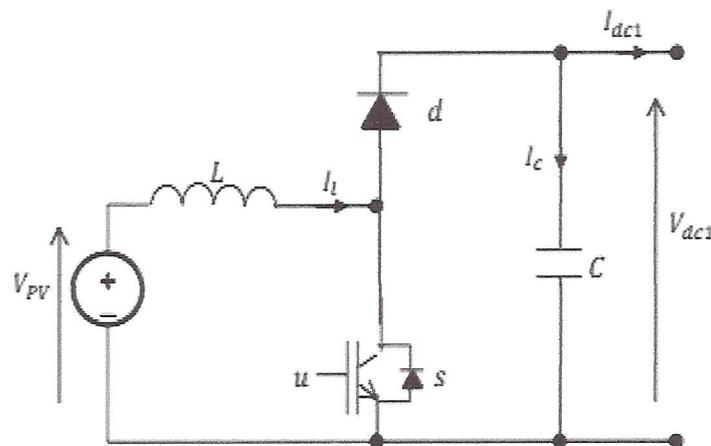


Figure II.7 Schéma électrique du convertisseur

II.5.1 Modélisation du hacheur survolteur

La modélisation de ce convertisseur passe par l'analyse des différentes séquences de fonctionnement que nous supposons de durées fixées par la commande u . Il apparaît deux séquences de fonctionnement selon l'état de l'interrupteur S , que nous pouvons représenter chacune par une équation différentielle.

- Lorsque S est fermé :

$$V_{PV} = L \frac{dI_1}{dt} \quad 2.13$$

$$0 = C \frac{dV_{dc1}}{dt} + I_{dc1} \quad 2.14$$

- Lorsque S est ouvert:

$$V_{PV} = L \frac{dI_1}{dt} + V_{dc1} \quad 2.15$$

$$I_1 = C \frac{dV_{dc1}}{dt} + I_{dc1} \quad 2.16$$

En posant $u = 1$ lorsque l'interrupteur S est fermé et $u = 0$ pour S ouvert, nous pouvons représenter le convertisseur par un système d'équations unique, que nous qualifions de modèle instantané. Nous considérons ici les interrupteurs parfaits.

$$V_{PV} = L \frac{dI_1}{dt} + V_{dc1} (1-u) \quad 2.17$$

$$(1-u)I_1 = C \frac{dV_{dc1}}{dt} + I_{dc1} \quad 2.18$$

Le modèle instantané fait apparaître un comportement non linéaire du convertisseur par l'existence de produits entre la commande u et les variables d'état V_{dc1} et I_1 . Par ailleurs il convient de signaler qu'en remplaçant la variable u par sa valeur moyenne sur une période de découpage $T_d = 1/f_d$ c'est-à-dire le rapport cyclique D ($D = T_{on}/T_d$) nous pouvons obtenir le modèle aux valeurs moyennes. Soit :

$$\frac{dI_1}{dt} = -(1-D) \frac{V_{dc1}}{L} + \frac{V_{PV}}{L} \quad 2.19$$

$$\frac{dV_{dc1}}{dt} = (1-D) \frac{I_1}{C} + \frac{V_{dc1}}{RC} \quad 2.20$$

II.6 Poursuite du PPM pour un panneau photovoltaïque

L'énergie électrique peut être fournie par des panneaux photovoltaïques. En effet, de nombreuses recherches sur les techniques photovoltaïques ont été effectuées afin d'augmenter le rendement de ces panneaux mais aussi afin d'extraire le maximum d'énergie de ceux-ci tout en concevant un système fiable et stable.

La structure d'un système photovoltaïque de production d'énergie électrique comprend un convertisseur d'électronique de puissance afin d'adapter l'énergie fournie à celle demandée mais aussi pour en extraire le maximum de puissance quelques soient les variations de température et d'ensoleillement.

Il existe dans la littérature plusieurs méthodes de poursuite du PPM comme la méthode d'incrément de conductance, la méthode de capacité parasite ou la méthode perturbe et observe (P&O) ... Elles sont basées sur le réglage du courant ou de la tension du générateur photovoltaïque selon les variations des conditions climatiques et/ou d'exploitations. Pourtant, des incertitudes sur ces conditions ont diminué l'efficacité de ces méthodes, notamment sous l'évolution rapide des conditions environnementales ou la variation des paramètres. Les méthodes d'intelligence artificielle (le mode glissant, la logique floue ...) ayant les qualités des mécanismes adaptatifs et flexibles, sont capables d'améliorer l'efficacité en présence de ces incertitudes.

II.6.1 Principe de la commande MPPT

Le fonctionnement d'un panneau photovoltaïque dépend fortement des conditions atmosphériques (température ambiante, ensoleillement) mais aussi des caractéristiques de la charge connectée. En effet, pour une charge, avec sa résistance interne, l'adaptation optimale ne se produit qu'à un point de fonctionnement, appelé point de puissance maximale (PPM). Ainsi, quand une connexion directe est réalisée entre la source et la charge, la sortie du panneau photovoltaïque est rarement maximale et le point de fonctionnement n'est pas optimal figure II.8.

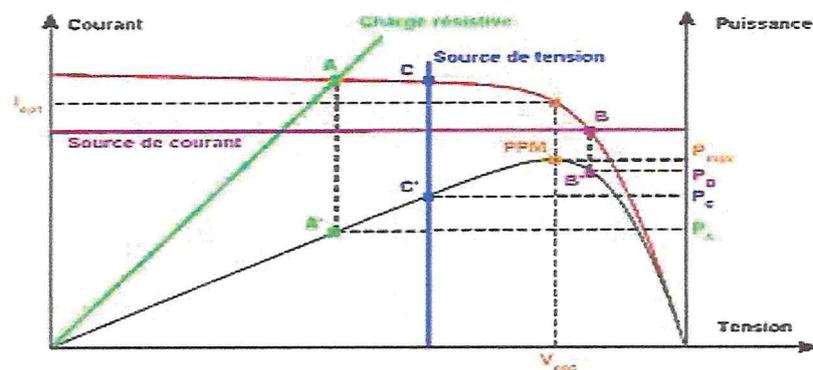


Figure II.8 Fonctionnement d'un panneau photovoltaïque

La commande *MPPT* (*Maximum Power Point Tracking*) est un organe fonctionnel du système *PV* et permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur *PV* dans des conditions météorologiques et de charge stables. Que ce soit une commande analogique ou digitale [48], le principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique D à la valeur adéquate de manière à maximiser la puissance à la sortie du panneau *PV*.

Alors, quand ces conditions changent (la variation peut être rapide), on va fonctionner loin du point de puissance maximale. Pour surmonter ce problème, nous utilisons un convertisseur entre la source et la charge. Ce convertisseur est un hacheur qui peut être de type abaisseur (Buck), élévateur (boost) ou bien abaisseur-élévateur (Buck-boost) selon la nature de la charge ou la nature de la commande qu'on veut derrière.

La structure (panneau PV-boost) permettant l'atteinte du point de puissance maximale est illustrée par figure II.9.

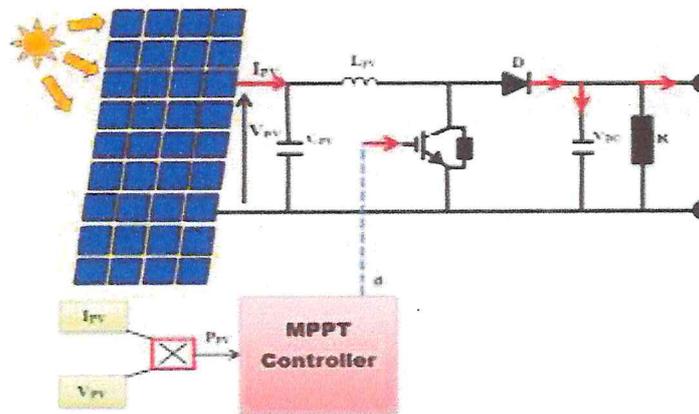


Figure II.9 Diagramme en circuit d'un système photovoltaïque (PV-boost-MPPT).

La réaction de la tension du panneau selon le changement du rapport cyclique peut prendre deux variantes : une augmentation du rapport cyclique implique une diminution de la tension du panneau et inversement, une diminution du rapport cyclique augmente la tension du panneau.

La poursuite du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking ou MPPT en anglais) est basée sur ce principe, elle force le panneau à fonctionner au PPM en variant le rapport cyclique du convertisseur selon les variations de la charge ou des conditions atmosphériques, ainsi la puissance délivrée est toujours à la valeur maximale. [49].

II.6.2 Synthèse des commandes MPPT des systèmes photovoltaïques

La méthode de perturbation et observation (P&O) consiste à perturber l'un des paramètres d'entrées du convertisseur statique (généralement la tension V_{pv}) puis d'observer l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du système, Elle permet d'extraire la puissance maximale même si l'éclairement et la température varient.

Le principe de cette méthode est qu'à partir d'un rapport cyclique initialement petit, on mesure V_{pv} et I_{pv} et on calcule $P(k)$. La valeur obtenue est comparée avec la valeur $P(k-1)$ calculée au cycle précédent, et selon le résultat de comparaison, V_{pv} est ajustée soit dans le même sens que dans le cycle précédent soit

dans une direction opposée. Ainsi, la puissance va augmenter, repasser par le maximum, puis diminuer et dès la détection d'une diminution de la puissance, le sens de la commande est à nouveau inversé,...etc. Cependant, l'oscillation du système autour du maximum permet de suivre le maximum de puissance [50].

Les étapes de la recherche (du point optimal) par la méthode P&O sont illustrées dans le diagramme de la figure II.10.

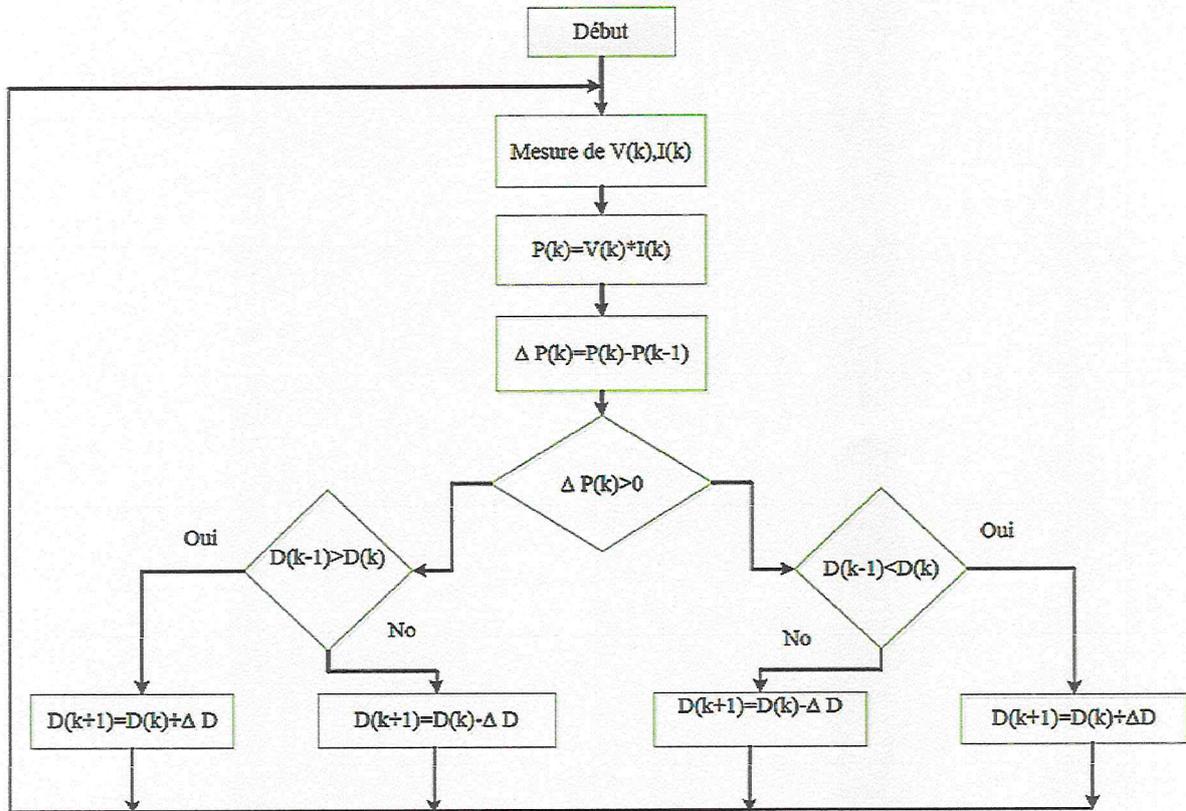


Figure II.10 Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation (P&O)

L'inconvénient de la technique de P&O réside dans le cas de changement rapide des conditions atmosphériques, tel qu'un nuage mobile ; cette méthode peut déplacer le point de fonctionnement dans une fausse direction. L'algorithme de P&O continuera à déplacer le point de fonctionnement du convertisseur plus loin du point réel de puissance maximale, et il y aura d'avantage de puissance perdue. Cet ajustement incorrect continuera jusqu'à ce que le changement de l'éclairement ralentisse ou se stabilise. Un autre inconvénient de cette méthode est l'oscillation autour du point de puissance maximale dans les conditions de fonctionnement normale [51].

A cause de ces problèmes, on présentera une méthode intelligente et innovante (mode glissant), ayant pour objet la poursuite du point de puissance maximale ainsi que l'amélioration des réponses obtenues avec les algorithmes classiques déjà développés, quel que soit la variation des conditions climatiques (ensoleillement, température,etc.) même dans les cas les plus défavorables.

II.7 Commande MPPT d'un système photovoltaïque par mode glissant

Généralement, les techniques de commande sont appliquées dans le but de résoudre le problème des variations paramétriques, d'assurer une erreur statique nulle, de garantir une réponse rapide, et d'avoir donc un système de contrôle stable et robuste. Parmi ces techniques, on trouve la commande par mode glissant (en anglais : sliding mode control).

Ses principaux domaines d'application sont la robotique et la commande des machines électriques [52-53]. Elle est considérée comme l'une des meilleures approches de commande des systèmes non linéaires et des systèmes ayant des modèles imprécis grâce aux avantages qu'elle présente la grande précision, la réponse dynamique rapide, la stabilité, la simplicité de la conception et l'implantation, et la robustesse vis-à-vis de la variation des paramètres internes ou externes [54-55].

Cependant, ces performances sont obtenues au prix de certains inconvénients : l'apparition du phénomène de chattering ou broutement provoqué par la partie discontinue de la commande qui peut avoir un effet néfaste sur les actionneurs. À chaque instant, le système est soumis à une commande élevée afin d'assurer sa convergence vers l'état désiré, et ceci n'est pas souhaitable.

Dans ce chapitre, on montrera comment la commande intelligente par mode glissant peut être appliquée au contrôle du système photovoltaïque (fixe et avec poursuite solaire) dans le but d'extraire le maximum de puissance (*MPPT*) du champ PV dans des conditions de température et d'ensoleillement variables. Pour cela, on procédera tout d'abord un rappel théorique sur la commande par mode de glissement. On abordera ensuite la conception de l'algorithme de commande avec ces différentes étapes. Dans ce système, les différentes étapes de la conception de ce dispositif de commande sont regroupées, avec sa simulation. L'efficacité du système de contrôle proposé est vérifiée par la simulation numérique. Les résultats de la validation numérique du système proposé font ressortir de bonnes performances par rapport à la commande classique de P&O.

II.8 La commande par mode glissant

II.8.1 Systèmes à structure variable

Dans la commande des systèmes à structure variable par mode de glissement, la trajectoire d'état est amenée vers une surface. Puis à l'aide de la loi de commutation, elle est obligée de rester au voisinage de cette surface. Cette dernière est appelée surface de glissement et le mouvement le long de laquelle se produit est appelé mouvement de glissement [56], [57], [58]. La trajectoire dans le plan de phase est constituée de trois parties distinctes, sont illustrées dans la figure II.11. [59-60]:

- **Le mode de convergence -MC-** : c'est le mode durant lequel la variable à régler se déplace à partir de n'importe quel point initial dans le plan de phase, et tend vers la surface de commutation $S(x,y)=0$ (dans le cas de deux dimensions). Ce mode est caractérisé par la loi de commande et le critère de convergence.

- **Le mode de glissement -MG-** : c'est le mode durant lequel la variable d'état a atteint la surface de glissement et tend vers l'origine du plan de phase. La dynamique de ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement $S(x, y)=0$.

- **Le mode du régime permanent -MRP-** : ce mode est ajouté pour l'étude de la réponse du système autour de son point d'équilibre (origine du plan de phase), il est caractérisé par la qualité et les performances de la commande [60], [61].

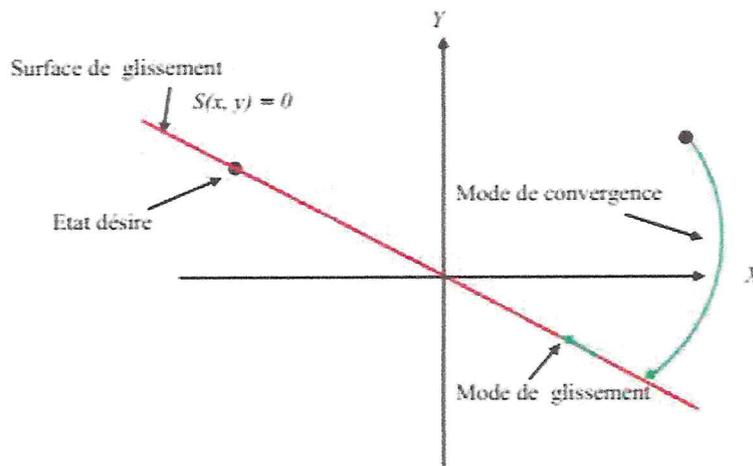


Figure II.11 Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase.

Les avantages de la commande par mode de glissement sont importants et multiples : la haute précision, la bonne stabilité, la simplicité, l'invariance, la robustesse...etc. Ceci lui permet d'être particulièrement adaptée pour les systèmes ayant un modèle imprécis [62], [63], [64].

Souvent, il est préférable de spécifier la dynamique du système durant le mode de convergence.

Dans ce cas, la structure d'un contrôleur comporte deux parties : une partie continue représentant la dynamique du système durant le mode de glissement, et une autre discontinue représentant la dynamique du système durant le mode de convergence. Cette dernière est importante dans la commande non linéaire, car elle a pour rôle d'éliminer les effets d'imprécisions et des perturbations sur le modèle.

La conception de la commande peut être effectuée en trois étapes principales très dépendantes l'une de l'autre figure II.12 :

- Le choix des surfaces de glissement.
- La définition des conditions d'existence et de convergence du régime glissant.
- La détermination de la loi de commande.

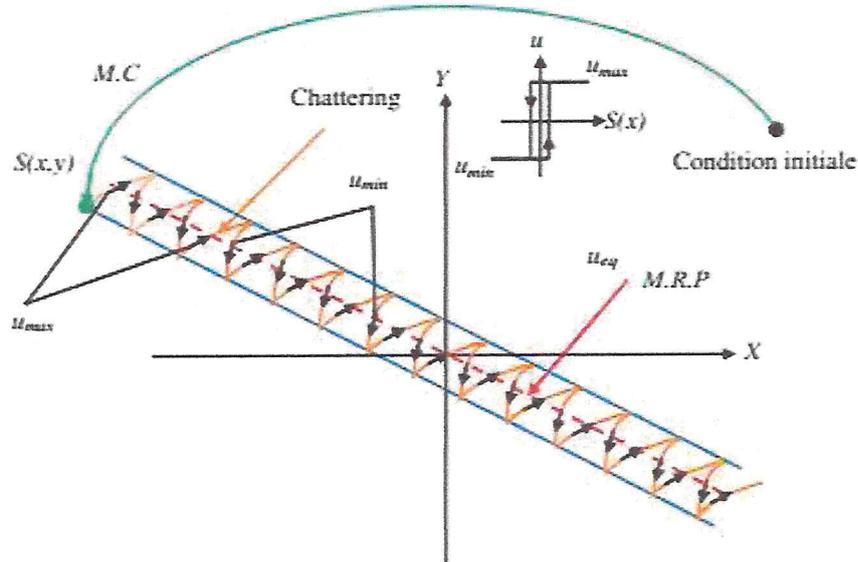


Figure II.12 Convergence du système glissant [65].

II.8.2 Choix de la surface de glissement

Soit le système non linéaire décrit par l'équation différentielle suivante [66] :

$$x(t) = f(x,t) + g(x,t)u(t) \tag{2.21}$$

Où :

- f et g sont des fonctions non linéaires du vecteur d'état décrivant le système.
- $x(t) \in Rn$: Vecteur d'état.
- $u(t) \in Rm$: Vecteur de commande.

Un système d'ordre n avec m entrées peut avoir jusqu'à $(2m-1)$ surfaces. Pour le choix de la forme de la surface de glissement, a proposé une forme générale qui consiste à définir une fonction scalaire des surfaces de glissements dans le plan de phase, donnée par :

$$S(x) = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \lambda_x \right)^{r-1} . e(x) \tag{2.22}$$

Avec :

x : La variable à commander

$e(x)$: est l'écart entre la variable à régler et sa référence $e(x) = x_{ref} - x$.

λ_x : Une constante positive qui interprétera la dynamique de la surface.

r : Le degré relatif du système, il représente le nombre de fois qu'il faut dériver la surface pour faire apparaître la commande.

L'objectif de la commande est de maintenir la surface à zéro. Cette dernière est une équation différentielle linéaire dont l'unique solution est $e(x)=0$ pour un choix convenable du paramètre λ_x .

Ceci revient à un problème de poursuite de trajectoire qui est équivalent à une linéarisation exacte de l'écart tout en respectant la condition de convergence.

II.8.3 Conditions de convergence et d'existence du régime glissant

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

Il existe deux types de conditions d'accès à la surface de glissement et d'assurer le mode de convergence.

II.8.3.1 Approche directe (La fonction discrète de commutation)

Cette approche de convergence est la plus ancienne. Il s'agit de donner à la surface une dynamique convergente vers zéro. Elle est donnée par :

$$\left(\begin{array}{l} \dot{S}(x) > 0 \text{ lorsque } S(x) < 0 \\ \dot{S}(x) < 0 \text{ lorsque } S(x) > 0 \end{array} \right) \Rightarrow \dot{S}(x)S(x) < 0 \quad 2.23$$

II.8.3.2 Approche de Lyapunov

Il s'agit de choisir une fonction candidate de Lyapunov (fonction scalaire positive $V(x) > 0$) pour les variables d'état du système et de choisir une loi de commande qui fera décroître cette fonction

$$\left(\dot{V}(x) < 0 \right).$$

Elle est utilisée pour garantir la stabilité des systèmes non linéaires.

En définissant la fonction candidate de Lyapunov pour le système comme suit [67]

$$V(x) = \frac{1}{2} \cdot S^2(x) \quad 2.24$$

Pour que la fonction de Lyapunov décroisse, il suffit de s'assurer que sa dérivée est négative. Ceci est vérifié si :

$$\dot{V}(x) = S(x) \cdot \dot{S}(x) < 0 \quad 2.25$$

L'équation 2.24 explique que le carré de la distance entre un point donné du plan de phase et la surface de glissement exprimé par $S^2(x)$ diminue tout le temps, contraignant la trajectoire du système à se diriger vers la surface à partir des deux côtés de cette dernière. Cette condition suppose un régime glissant idéal où la fréquence de commutation est infinie [56-57].

II.9 Calcul de la commande

Une fois la surface de glissement est choisie, ainsi que le critère de convergence, il reste à déterminer la commande nécessaire pour attirer la variable à régler vers la surface de glissement, ensuite vers son point d'équilibre.

La structure d'un contrôleur par mode de glissement est constituée de deux termes [68] [69] [70]:

$$u = u_{\text{éq}} + u_n \quad 2.26$$

$u_{\text{éq}}$ correspond à la commande équivalente proposée par Filippov et Utkin. Elle correspond à la commande qui garantit l'attractivité de la variable à contrôler vers la surface et la satisfaction de la condition :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial t} = 0 \quad 2.27$$

En remplaçant (2.21) et (2.26) dans (2.27), nous trouvons :

$$\dot{S} = \frac{\partial S}{\partial x} (f(x,t) + g(x,t)u_{\text{éq}}(t)) + \frac{\partial S}{\partial t} g(x,t)u_n(t) \quad 2.28$$

II.9.1 Commande équivalente

Durant le mode de glissement et le régime permanent, la surface est nulle ($S(x)=0$), et par conséquent, sa dérivée et la partie discontinue sont aussi nulles. D'où nous déduisons l'expression de la commande équivalente :

$$u_{\text{éq}} = - \left(\frac{\partial S}{\partial x} \cdot g(x,t) \right)^{-1} \cdot \frac{\partial S}{\partial x} \cdot f(x,t) \quad 2.29$$

Pour que la commande équivalente puisse prendre une valeur finie, il faut que $\frac{\partial S}{\partial x} \cdot g(x, t) \neq 0$.

II.9.2 Commande discontinue

La commande discontinue u_n qui représente le mode de convergence est la fonction la plus simple qui peut être utilisée pour accomplir la fonction de cette commande est définie par :

$$S(x) \cdot \dot{S}(x) < 0 \quad 2.30$$

Elle est généralement de la forme :

$$u_n = K \cdot \text{sign}(S(x, t)) \quad 2.31$$

Avec :

$$\text{sign}(S(x)) = \begin{cases} 1 & \text{si } S(x) > 0 \\ 0 & \text{si } S(x) = 0 \\ -1 & \text{si } S(x) < 0 \end{cases} \quad 2.32$$

La fonction *sign* peut être représentée par la figure II.13.

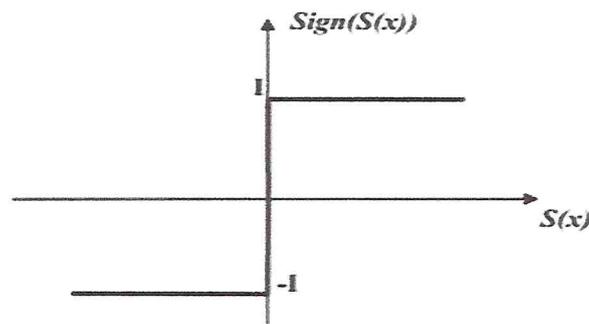


Figure II.13 Fonction « *sign* » de u_n

Cependant, la fonction *sign* génère sur la surface de glissement, un phénomène appelé **broutement** (ou chattering en anglais), qui est en général indésirable car il ajoute au spectre de la commande, des composantes hautes fréquences [71]. Comme l'indique La figure II.13.

II.10 Commande MPPT par mode glissant

Après avoir présentée la théorie de la commande par mode glissant dans la première partie de ce chapitre, nous allons analyser dans cette partie le comportement du système photovoltaïque (fixe et avec poursuite solaire) commandé par mode glissant pour la maximisation de la puissance des panneaux:

La structure d'un contrôleur de mode glissant est définie par

$$U = U_{eq} + U_n \quad 2.33$$

Où:

U_{eq} : est appelé contrôle équivalent.

U_n : est appelé contrôle normal.

[17]:

$$U = \alpha(k+1) \quad \text{Avec} \quad U_{eq} = \alpha(k) \quad 2.34$$

Avec : $\alpha(k+1)$ et $\alpha(k)$ est le rapport cyclique aux instants $k+1$ et k respectivement.

La fonction de commutation (S) définie comme:

$$S = \frac{\partial P_{pv}}{\partial V_{pv}} \quad 2.35$$

Avec :

$$P_{pv} = V_{pv} * I_{pv} \quad 2.36$$

La substitution de l'équation (2.36) dans l'équation (2.35) donne

$$S = \frac{\partial (V_{pv} * I_{pv})}{\partial V_{pv}} = V_{pv} \left(\frac{\partial I_{pv}}{\partial V_{pv}} + \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \right) \quad 2.37$$

Les fonctions de commutation dans l'instant k et $k+1$ deviennent respectivement:

$$S = V_{pv} \left(\frac{I_{pv}(k) - I_{pv}(k-1)}{V_{pv}(k) - V_{pv}(k-1)} + \frac{I_{pv}(k)}{V_{pv}} \right) \quad 2.38$$

Le rapport cyclique du boost est:

$$\alpha = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}} \quad 2.39$$

Le contrôle équivalent du MPPT_MG est l'expression pour le rapport cyclique est obtenu comme suit:

$$U_{eq} = \alpha \quad 2.40$$

Le contrôle normal, il est défini comme:

$$U_n = K * \text{sign}(S)$$

2.41

K est une constante positive, représentant la sortie maximale du contrôleur nécessaire pour surmonter les incertitudes et les perturbations des paramètres [72].

La structure du contrôleur MPPT par mode glissant est illustrée dans la figure II.14

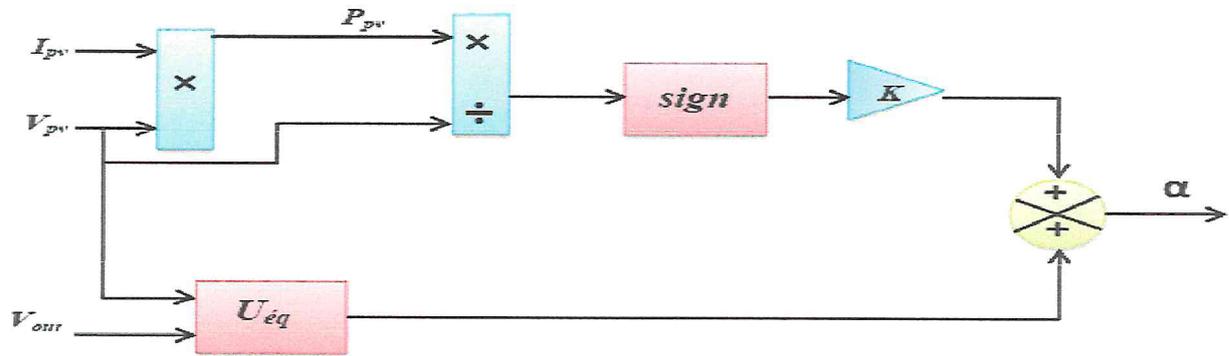


Figure II.14 Structure du contrôleur MPPT par mode glissant

II.11 Résultats de simulation et discussion

Pour montrer l'efficacité des deux algorithmes MPPT proposés (P&O et SMC), on va effectuer plusieurs tests selon les conditions climatiques.

Test1 : Dans ces tests la température de fonctionnement du système est 25°C et l'ensoleillement est 1000 W/m2.

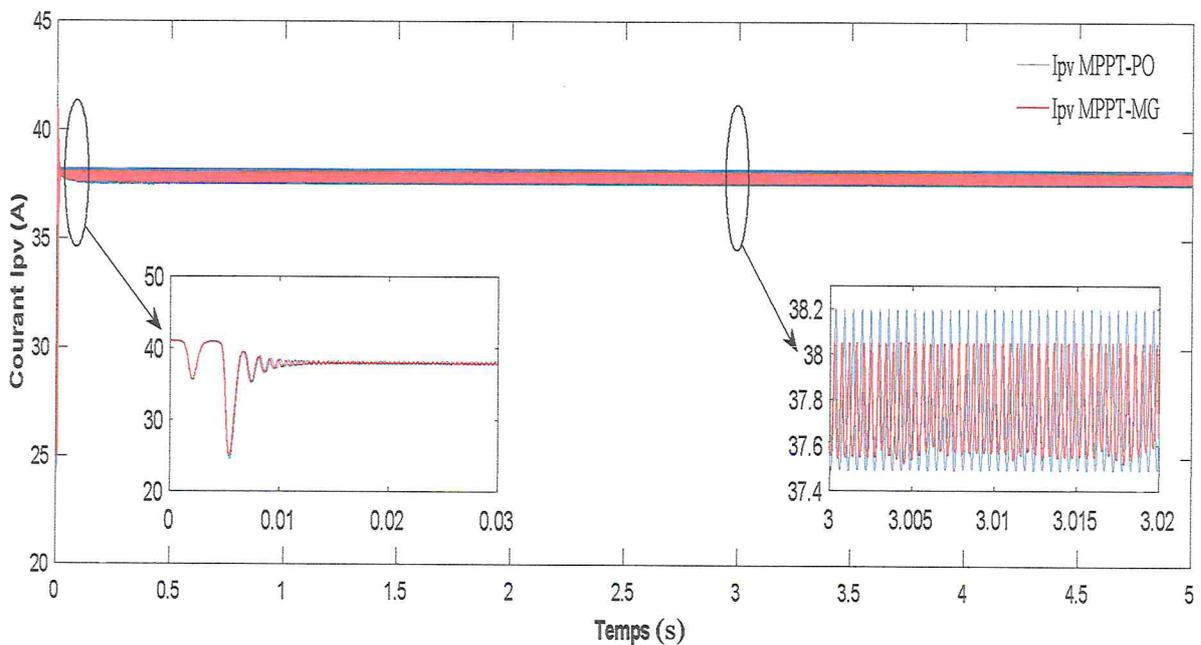


Figure II.15: Courant à la sortie du panneau photovoltaïque

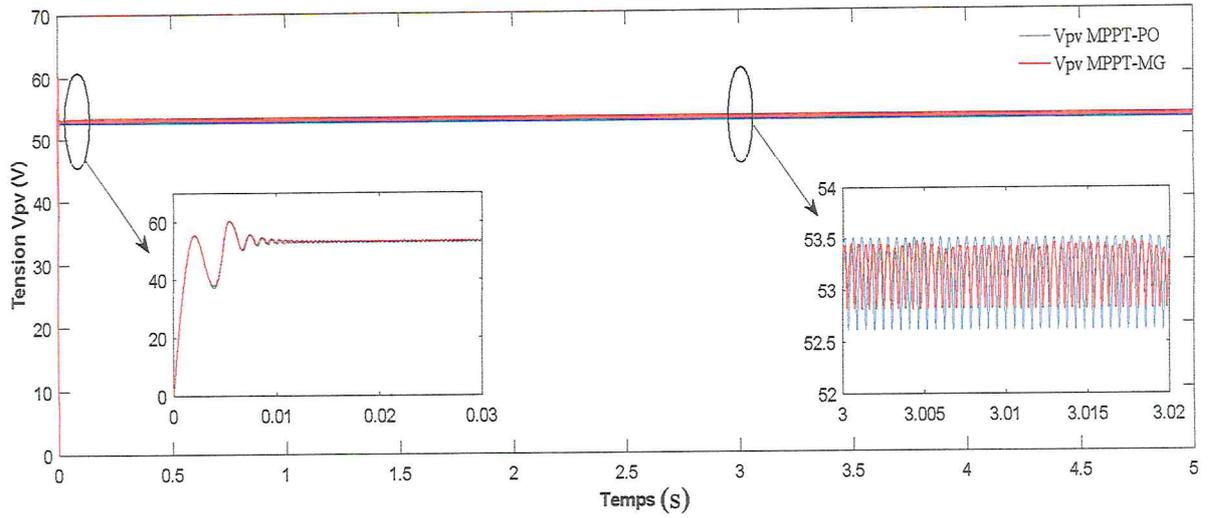


Figure II.16: Tension à la sortie du panneau photovoltaïque

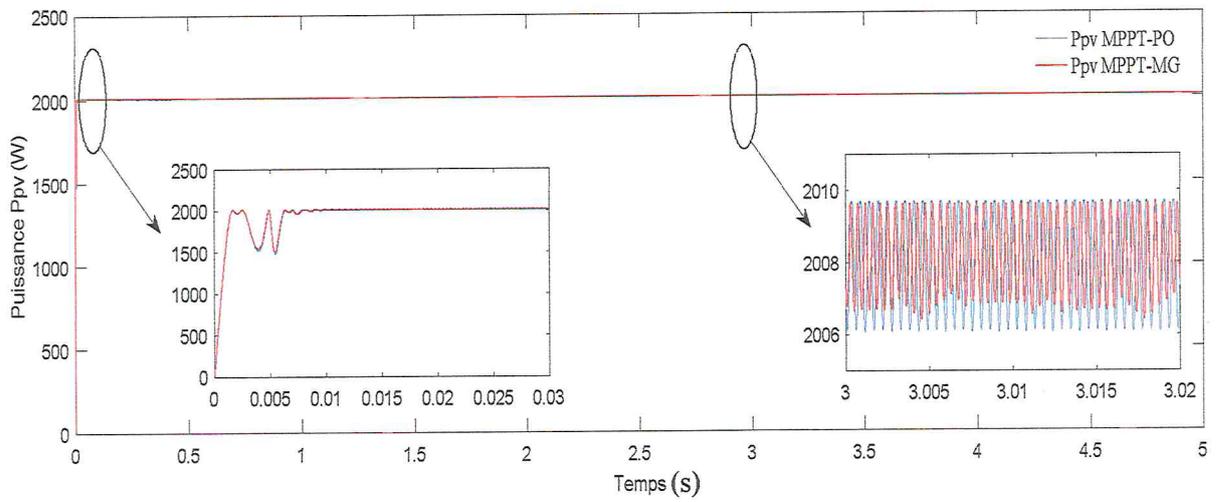


Figure II.17 Puissance à la sortie du panneau photovoltaïque

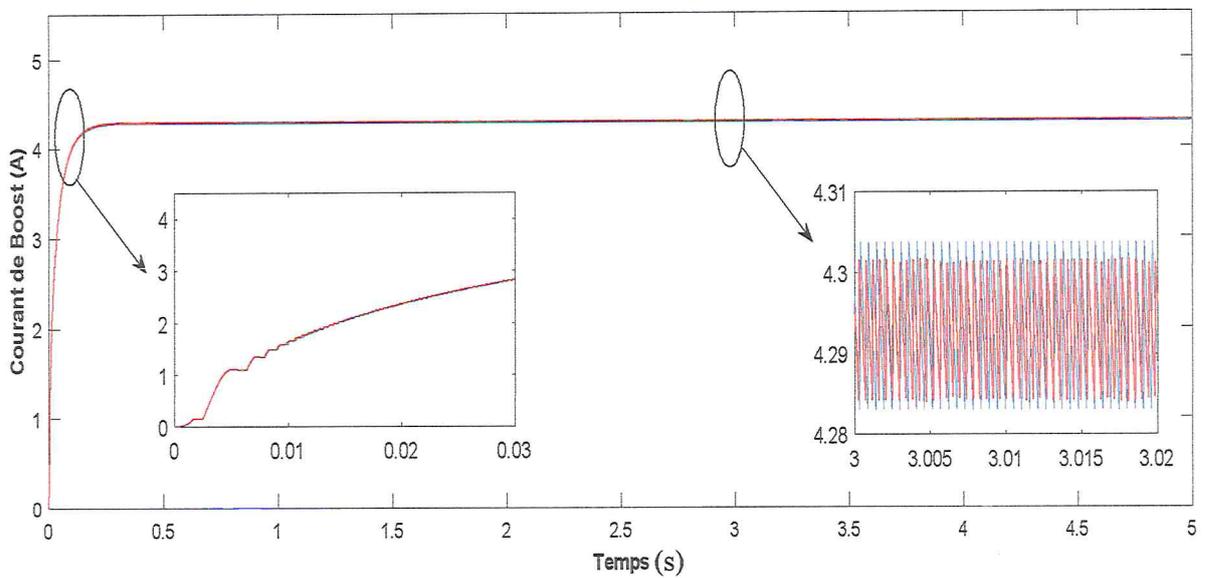


Figure II.18 Courant à la sortie du Boost

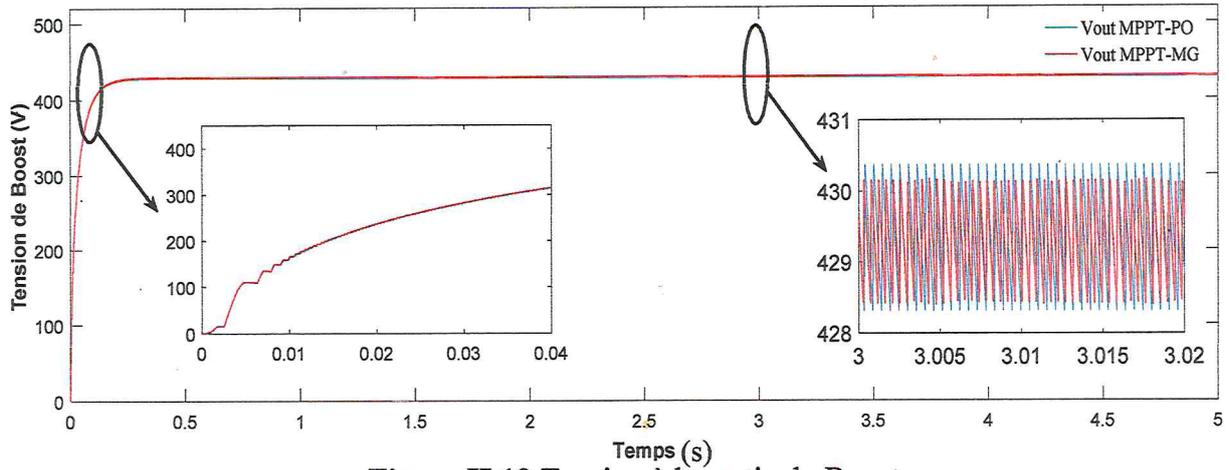


Figure II.19 Tension à la sortie du Boost

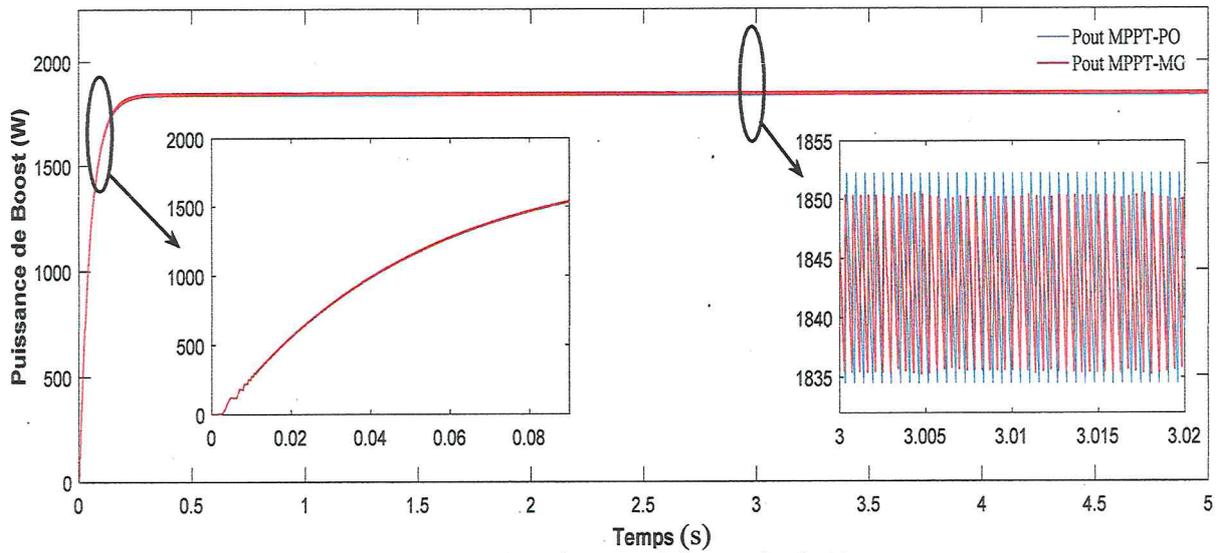


Figure II.20 Puissance à la sortie du Boost

Test2 : Dans ces tests la température égale 25°C et l'ensoleillement égal 800 W/m²

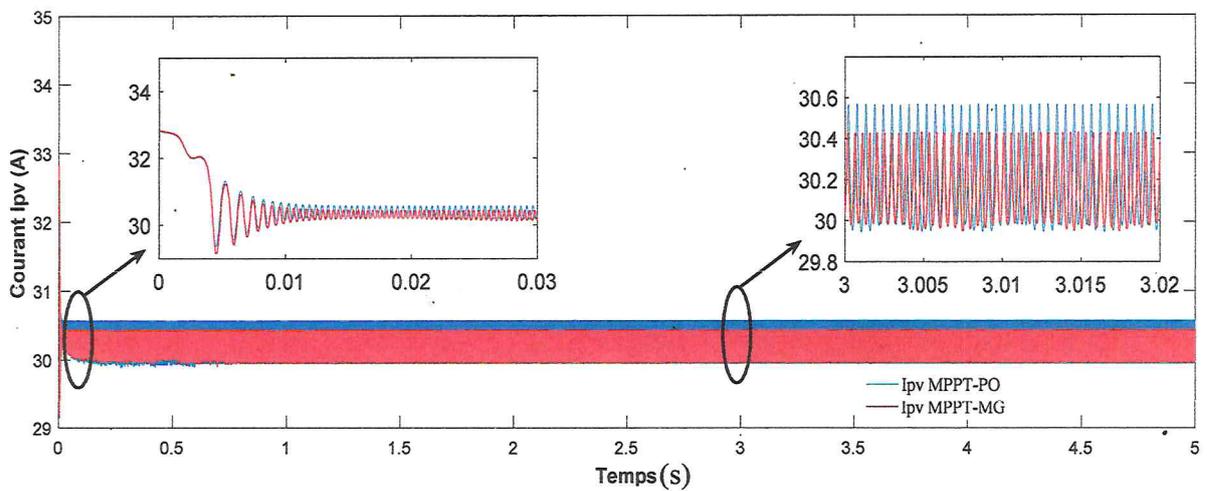


Figure II.21 Courant à la sortie du panneau photovoltaïque

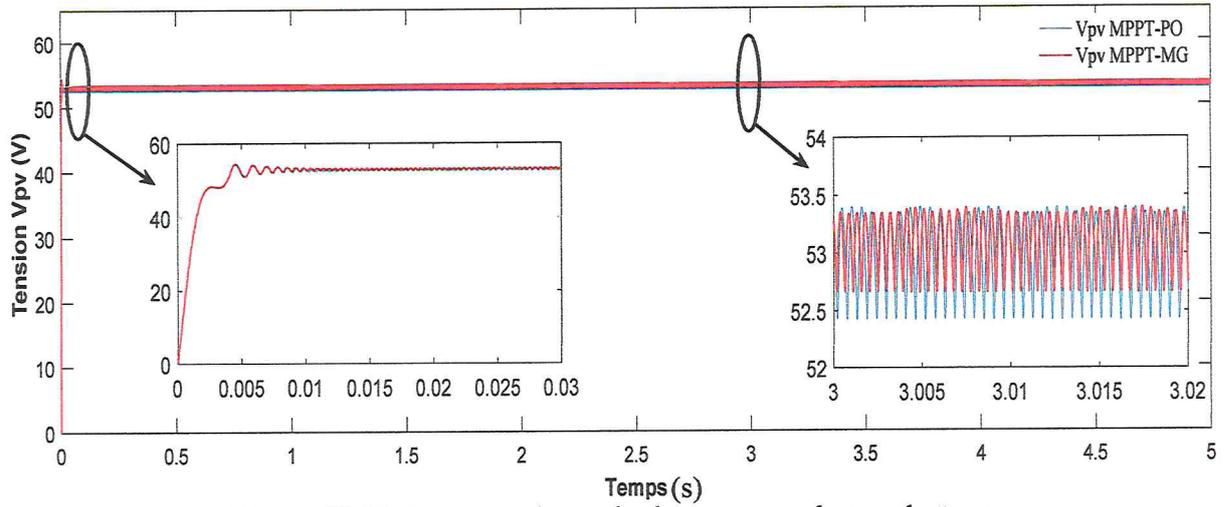


Figure II.22 Tension à la sortie du panneau photovoltaïque

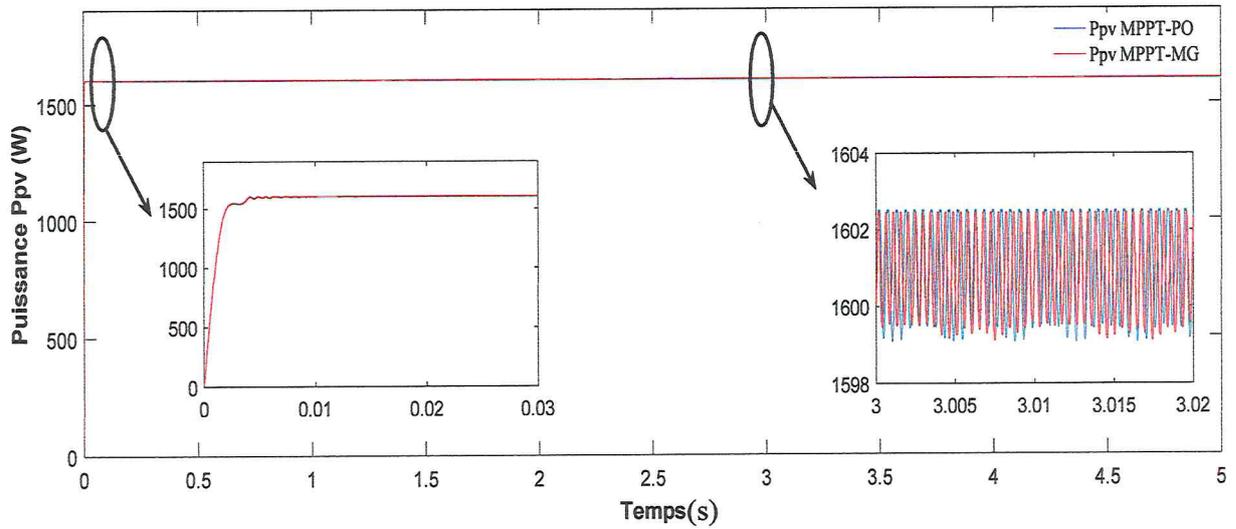


Figure II.23 Puissance à la sortie du panneau photovoltaïque

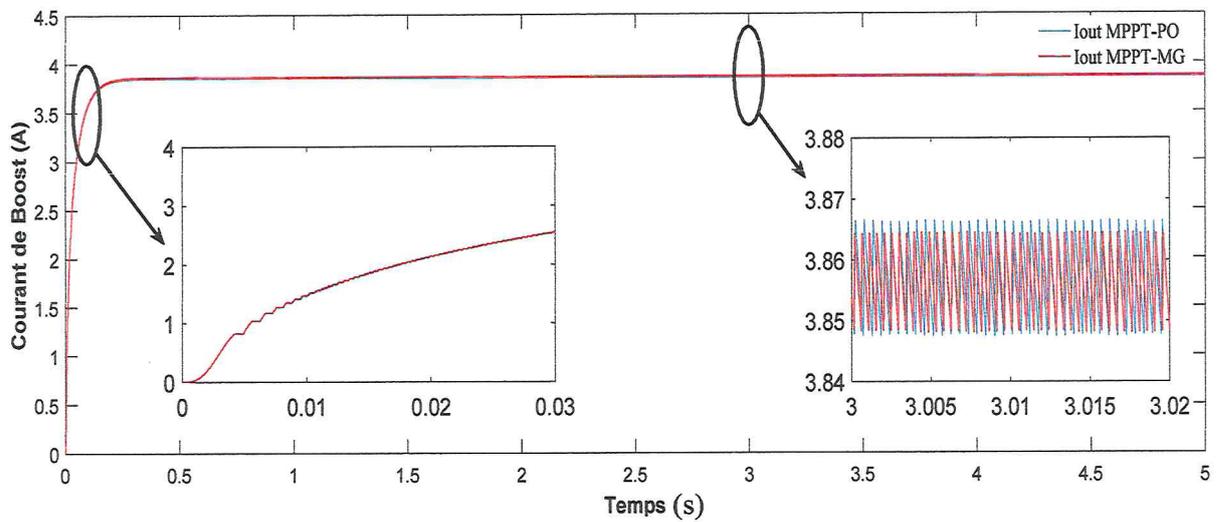


Figure II.24 Courant à la sortie du Boost

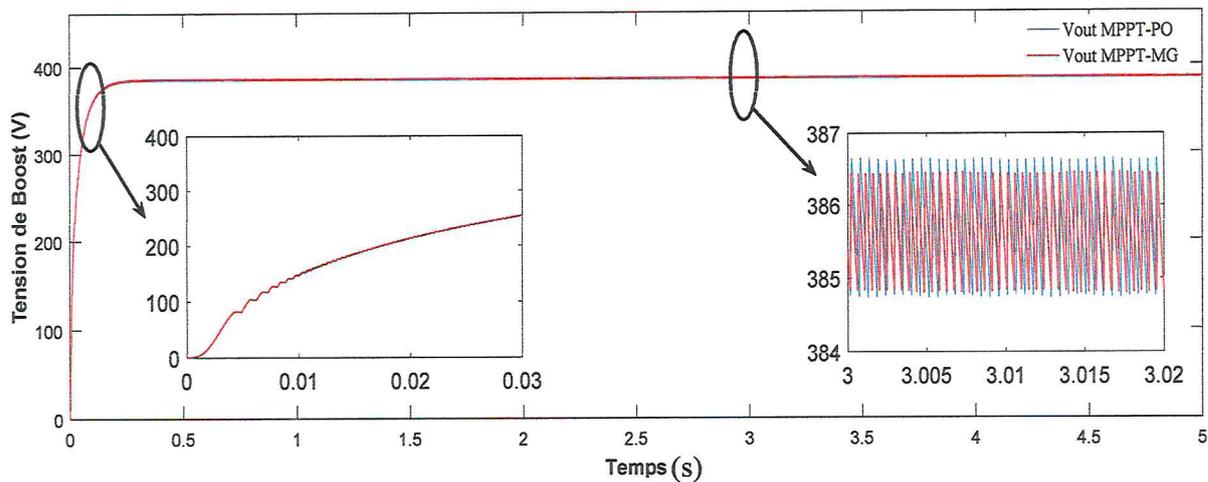


Figure II.25 Tension à la sortie du Boost

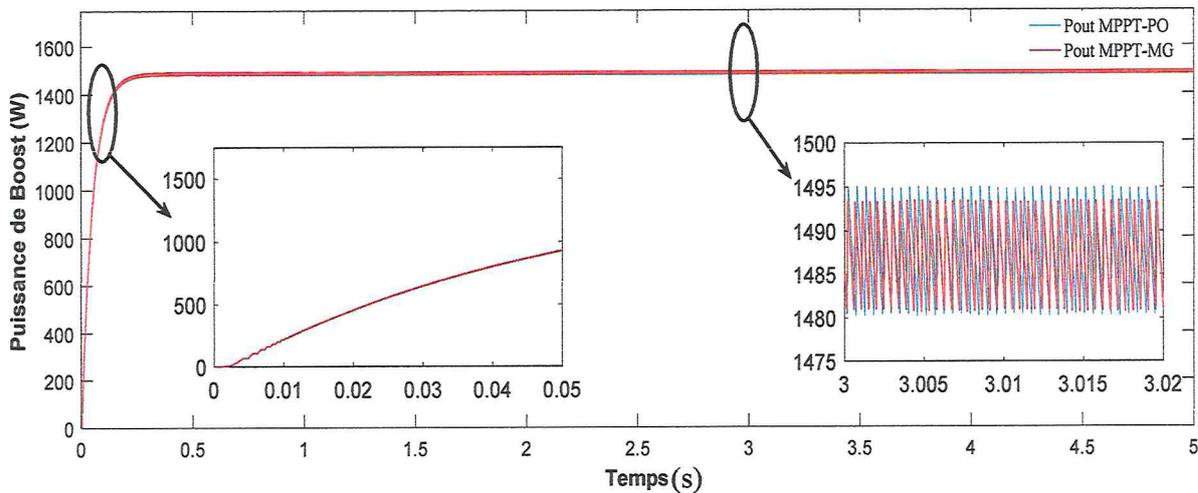


Figure II.26 Puissance à la sortie du Boost

Test3 : Dans ces tests la température égale à 30°C et l'ensoleillement égal à 1000 W/m².

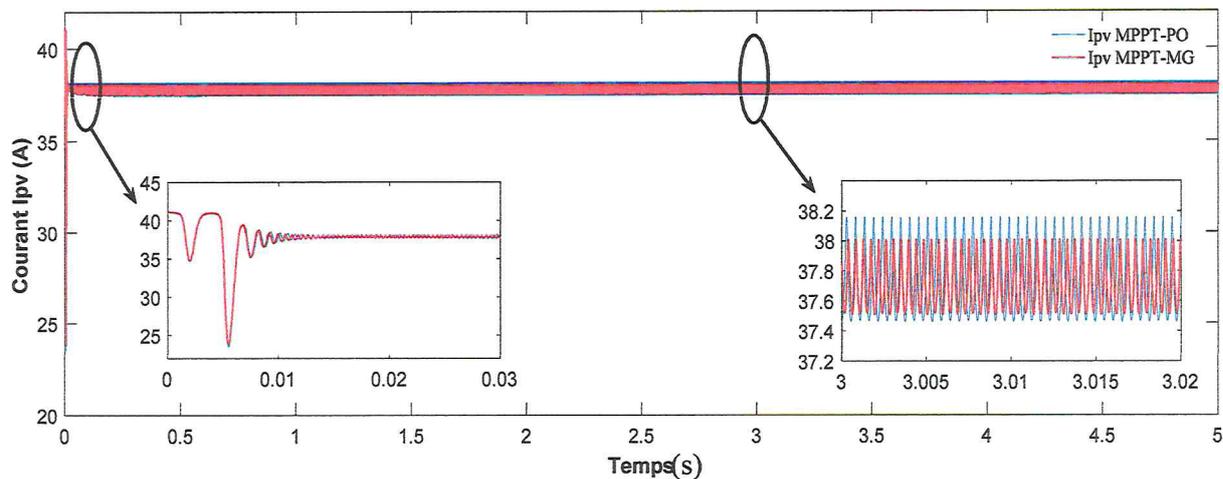


Figure II.27 Courant à la sortie du panneau photovoltaïque

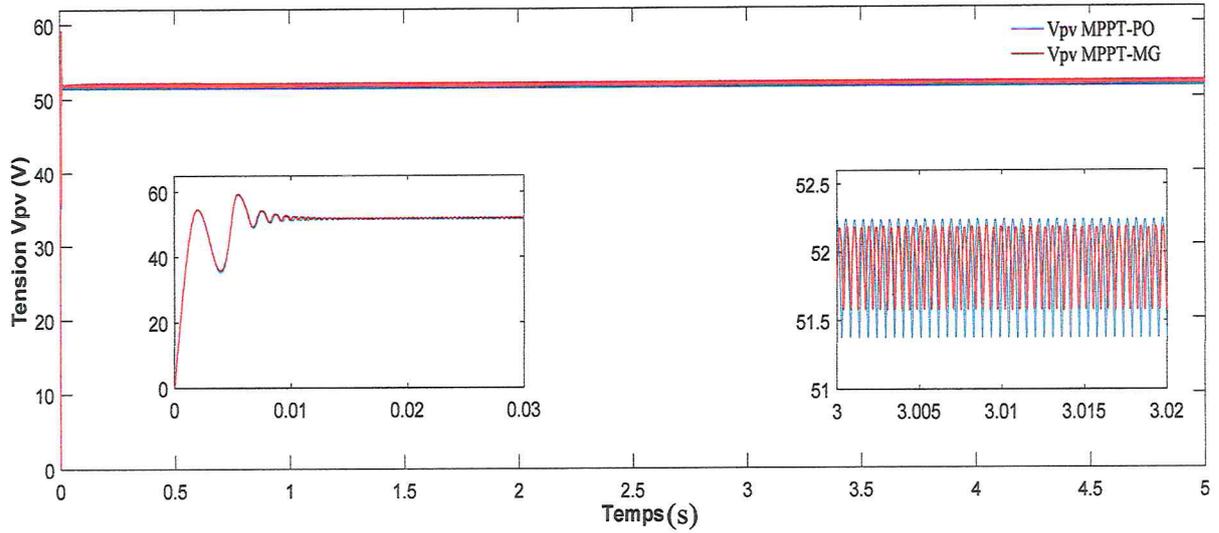


Figure II.28 Tension à la sortie du panneau photovoltaïque

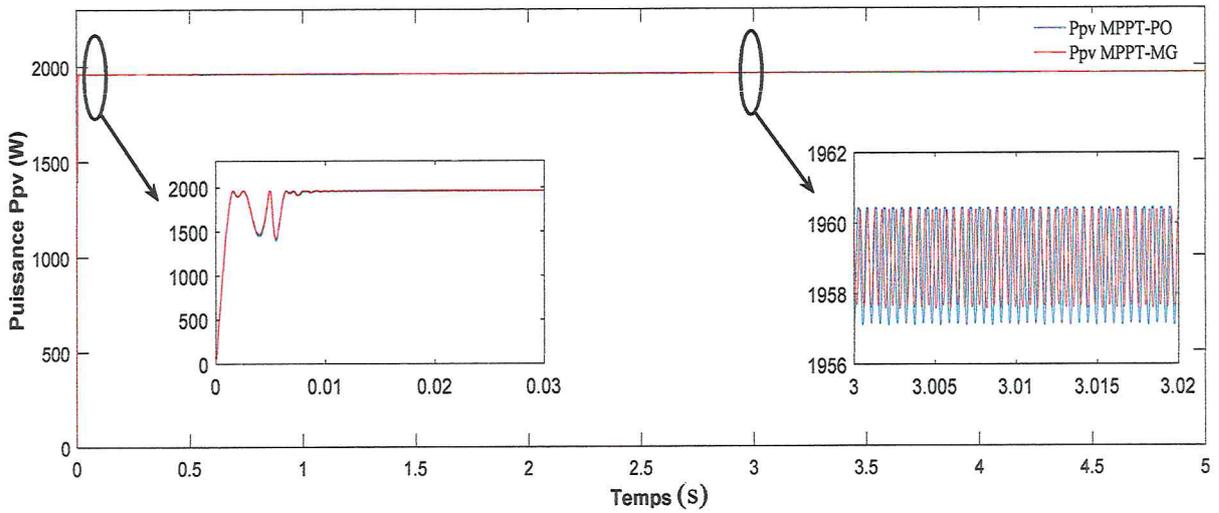


Figure II.29 Puissance à la sortie du panneau photovoltaïque

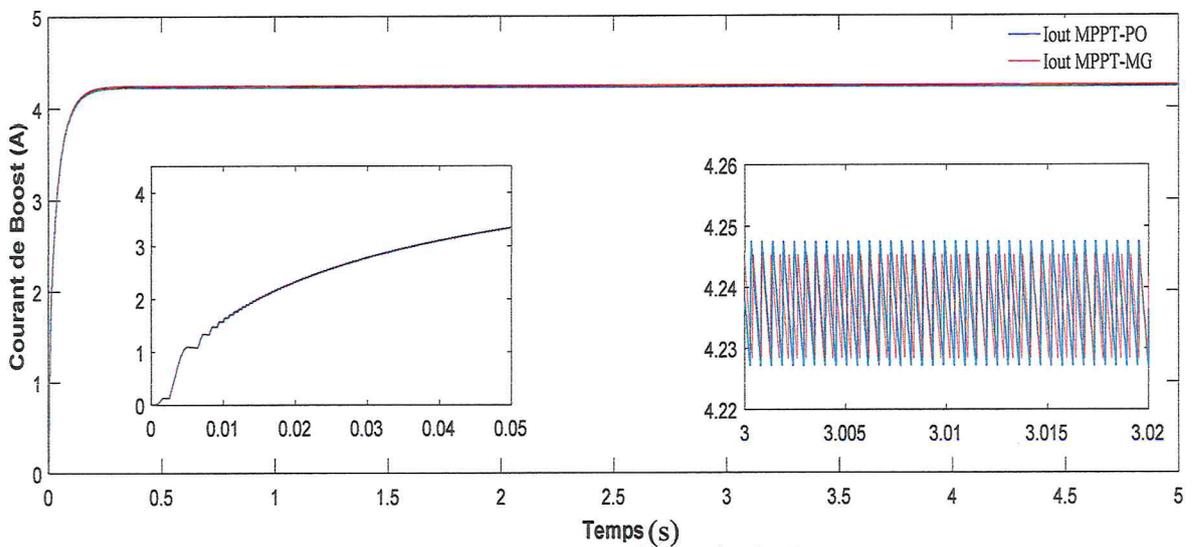


Figure II.30 Courant à la sortie du Boost

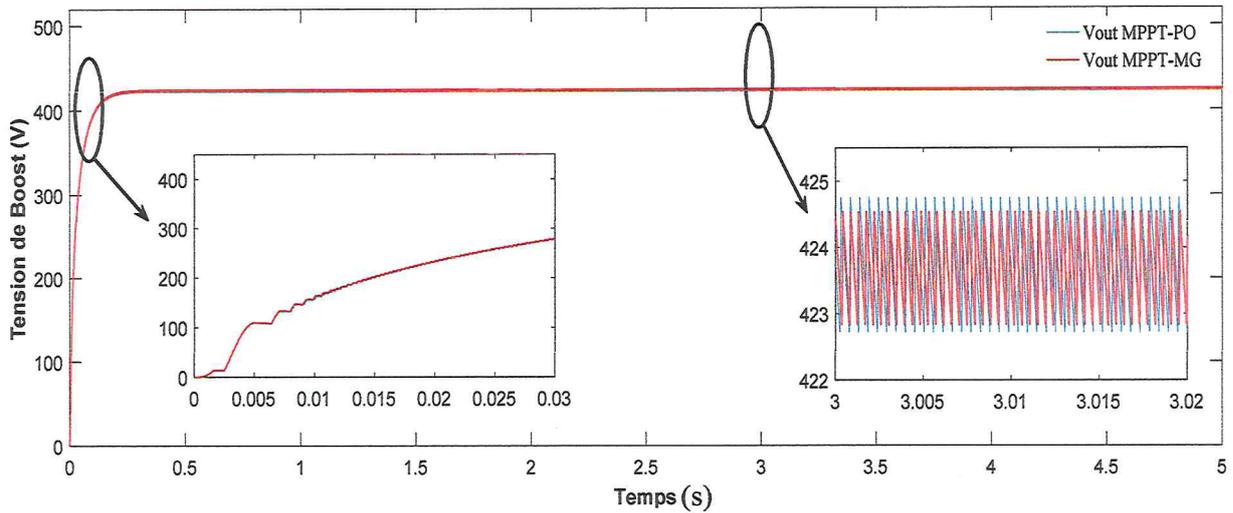


Figure II.31 Tension à la sortie du Boost

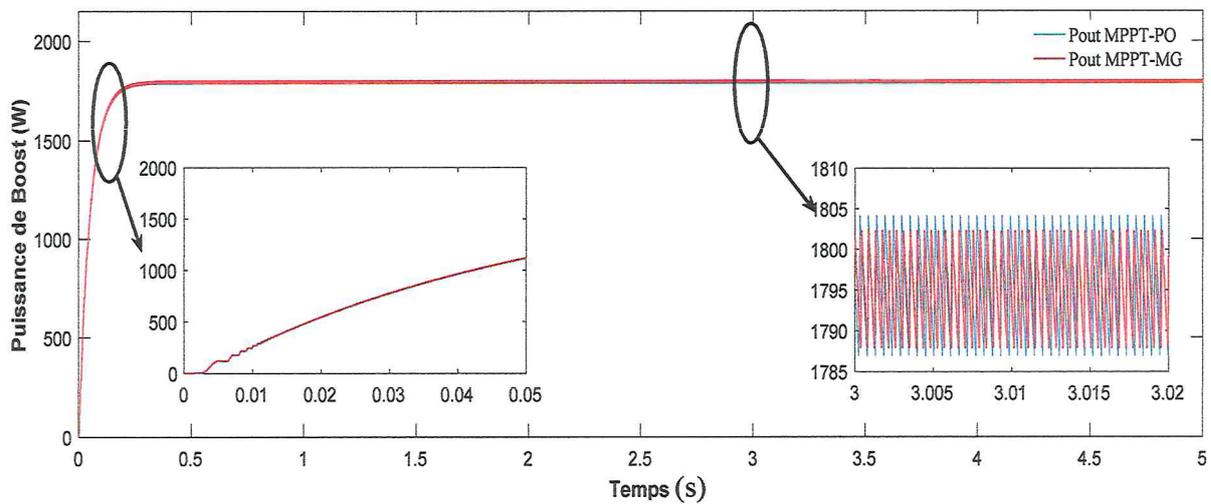


Figure II.32 Puissance à la sortie du Boost

Les figures II.18, II.19 et II.20 illustrent respectivement la tension, le courant et la puissance du système PV à base d'un boost commandé par deux techniques d'optimisation (MPPT-P&O et MPPT-MG) et avec des conditions atmosphériques constantes ($T = 25^{\circ}\text{C}$ et $G = 1000\text{W/m}^2$). On peut constater que les allures des trois grandeurs se stabiliser autour de leurs valeurs nominales ($I = 4.29\text{ A}$, $V = 429\text{ V}$ et $P = 1844\text{ W}$) qu'après un régime transitoire. On peut bien constater que le temps de réponse ne dépasse pas 0.05s pour les deux techniques et un peu rapide pour la technique MPPT-MG. D'autre part, l'effet de chattering (broutement) est significativement réduit par le MPPT-MG par rapport au MPPT-P&O.

On applique un abaissement de l'éclairement à une valeur de 800W/m^2 avec la température est constante égale à 25°C on remarque une diminution des trois grandeurs pour les deux techniques MPPT et se stabiliser autour de leurs valeurs nominales ($I = 3.85\text{ A}$, $V = 385\text{ V}$ et $P = 1482\text{ W}$) comme on

observe la présence de faibles oscillations par le MPPT-MG par rapport au MPPT-P&O, voir les figures II.24, II.25 et II.26.

Lors d'une augmentation de la température à une valeur de 30°C avec l'éclairement est constant égale à 1000W/m², on remarque une faible diminution des trois grandeurs pour les deux techniques MPPT (I = 4.24 A, V = 424 V et P = 1798 W), comme le montrent les figures II.30, II.31 et II.32

Les figures II.15, II.16, II.17, II.21, II.22 et II.23 représentent l'influence de la variation de l'éclairement à une température constante (25°C) sur le fonctionnement d'une cellule PV pour les allures de la tension, courant et puissance, on constate que pour une diminution du niveau d'éclairement entraîne une diminution du courant optimal ainsi qu'une diminution de la puissance maximale. Contrairement à la tension, qui varie très peu en fonction de l'éclairement

Les figures II.15, II.16, II.17, II.27, II.28 et II.29 représentent l'influence de la variation de la température à un éclairement constant (1000 W/m²) sur le fonctionnement d'une cellule PV pour les allures de la tension, courant et puissance, on constate que pour une augmentation de la température provoquent une faible diminution des trois grandeurs.

On peut remarquer que la technique MPPT-MG donne de bonne performance en terme de rapidité, de rejet de perturbation et robustesse par rapport au MPPT-P&O.

II.12 Conclusion

Ce chapitre est consacré à l'optimisation et la commande des systèmes photovoltaïques. On a commencé par une modélisation du générateur photovoltaïque pour passer ensuite à l'étude de certains types de convertisseurs DC-DC utilisés dans les systèmes photovoltaïques.

Nous avons présenté les techniques pour optimiser le processus de production d'électricité photovoltaïque. Nous avons montré comment nous pourrions optimiser la puissance fournie par le générateur avec un convertisseur statique (hacheur survolteur) ayant pour fonction la recherche du point de puissance maximale. Une étude bibliographique des méthodes de poursuite du point de puissance maximale existantes a été présentée. Cette étude a permis de montrer les besoins d'un contrôleur en termes de performances, de robustesse et de flexibilité. Ce contrôleur devrait assurer un fonctionnement aux caractéristiques maximales quelques soient les comportements aléatoires de la source et de la charge résistive avec un haut rendement.

Les résultats de simulation sous MATLAB et "SIMULINK" montrent que le système commandé par le mode glissant s'adapte à l'évolution des perturbations externes et montrent leur efficacité non seulement pour la poursuite du point de puissance maximale mais aussi pour le temps de réponse et la stabilité par rapport à la technique perturbée et observée.

Chapitre III

Modélisation et commande du système de conversion éolienne

III Introduction

Depuis l'antiquité les hommes ont exploités l'énergie éolienne sur différentes formes et pour plusieurs applications. Après l'utilisation de moulin à vent la technologie des capteurs éoliens n'a cessé à se développer. Elle connaît un essor fort d'exploitation ses dernies années.

Les énergies éoliennes sont notamment caractérisées par des déplacements de masse d'air à l'intérieur de l'atmosphère. C'est l'énergie mécanique de ces déplacements de masse d'air qui est à la base de l'énergie éolienne. L'énergie éolienne consiste ainsi à utiliser cette énergie mécanique par l'intermédiaire d'un rotor et de pales. Cette source est non polluante.

Néanmoins l'énergie éolienne est intermittente, et l'installation de parc éolien engendre des impacts paysagés et sonores [73].

En général un système éolien ou bien un aérogénérateur est défini comme un système composé de plusieurs éléments aptes à transformer les variations de la densité et de la pression de l'air comme étant fluide en mouvement en énergie mécanique puis en énergie électrique [74].

III.1 Classement d'éolienne selon l'orientation de leur axe de rotation

Il existe deux différents types de systèmes éoliens selon l'orientation de leurs axes de rotation par rapport à la direction du vent.

III.1.1 Eoliennes à axe vertical

Parmi les premières structures développées afin de produire de l'énergie électrique sont les éoliennes à axe verticale. Elles possèdent l'avantage d'avoir des organes de commande et une accessibilité plus simple par la situation de générateur au niveau de sol. Elles peuvent également s'intégrer à l'architecture des bâtiments sans aucune complexité. Ses utilités s'adressent aux faibles vitesses du vent et donc pour des petites puissances. Par contre elles ne se conviennent pas autour de la production d'énergie aux grandes puissances.

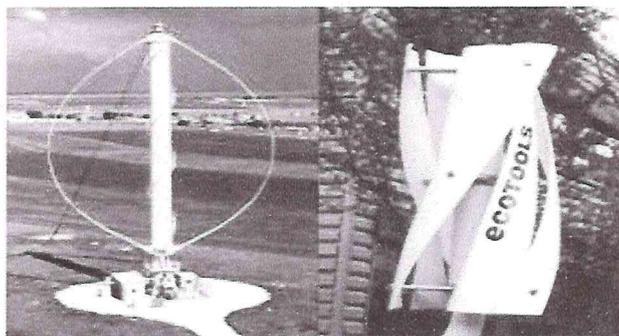


Figure III.1 Différentes technologies d'éoliennes à axe vertical

La figure III.1 montre un type particulier de turbine éolienne à un axe verticale avec un rotor Darrieus fonctionne grâce à la portance, se base sur le principe de la variation cyclique d'incidence [75]. Dans la Figure III.1 on trouve le rotor de Savonius basé sur le principe de la traînée différentielle. Les forces exercées par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes. Il en résulte un couple entraînant la rotation de l'ensemble. Ce type d'éoliennes connaît des avantages remarquables au niveau de faible encombrement de la structure générale. Il démarre à des faibles vitesses du vent contrairement à l'éolienne de type Darrieus, en parallèle le système construit est moins bruyant avec une suppression des contraintes sur la vitesse et la direction du vent. L'inconvénient majeur des unités englobe une diminution de rendement et une masse non négligeable.

En général les éoliennes à axe vertical, restent toutefois marginales et peu utilisées à cause de présence d'un capteur d'énergie près du sol exposé aux turbulences et au gradient de vent ce qui réduit son efficacité. Elles sont de plus reliées à des problèmes d'aéroélasticité dus aux fortes contraintes qu'elles subissent.

III.1.2 Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales, le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien voir la Figure III.2. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité [76].

Dans la littérature, les principales éoliennes étudiées sont à axe horizontal et tripales [77] et c'est bien ce type d'éoliennes qui sera étudié dans ce chapitre.

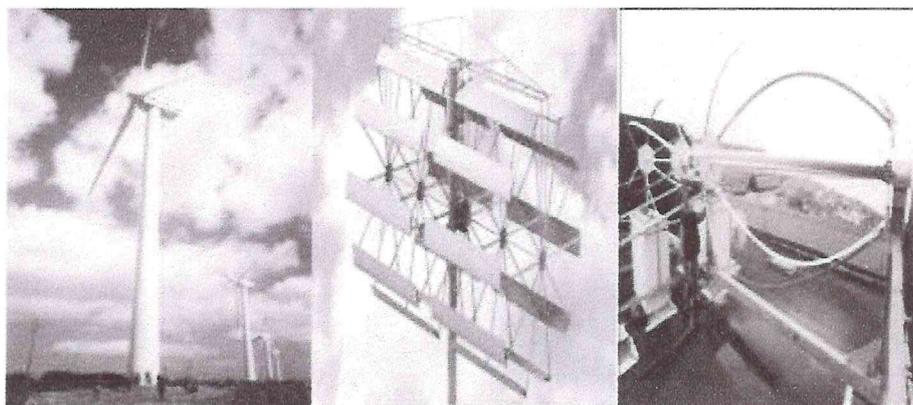


Figure III.2 Différentes technologies d'éoliennes à axe horizontal

III.2 Classement des éoliennes selon leur vitesse de rotation

Les éoliennes peuvent être aussi classées selon leur vitesse de rotation. Celle-ci peut être fixe ou variable. Les premières éoliennes implantées sont des éoliennes à vitesse constante utilisant des génératrices asynchrones liées directement au réseau et c'est la fréquence du réseau qui impose la vitesse de rotation de la machine. Cette technologie est moins chère et utilise un système électrique simple ne nécessitant pas un système électronique de commande.

Contrairement à cette technologie et avec le développement de l'électronique de puissance, les éoliennes à vitesse variable utilisent des convertisseurs statiques pour établir une séparation complète entre la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de l'éolienne qui sera adaptée à la vitesse du vent, afin d'optimiser la puissance fournie au réseau ou bien fournie à une charge dans une installation autonome [78].

III.3 Les Principaux composants d'un système éolien

On s'intéressera dans ce qui suit qu'aux éoliennes à axe horizontal. Une éolienne "classique" est généralement constituée de quatre éléments principaux :

III.3.1 La turbine

Représente l'outil principal pour la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Une éolienne est formée de trois parties principales : le rotor, la nacelle et la tour.

➤ *Mat* : généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur.

➤ *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 synchrone ou 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).

➤ *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 étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit. [79].

III.3.2 Le système électromécanique

Il se trouve dans la nacelle, un outil de transformation d'énergie mécanique transmise par la turbine en énergie électrique, il regroupe une génératrice électrique avec ses détails, plus le système de commande en cas de besoin, avec les outils d'électronique de puissance.

III.3.3 Le système d'interconnexion

C'est le système qui nous permet de voir la relation entre le système producteur de l'énergie électrique et les consommateurs d'électricité. C'est un système simple il contient des câbles en cas d'une énergie mécanique stable, ou bien il sera composé par des redresseurs et des onduleurs en cas d'énergie mécanique instable.

III.3.4 Le système de contrôle

Utile pour les éoliens d'une grande puissance, il comporte un dispositif qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation et essaye aussi de la mettre fonctionner à des puissances maximales. En cas de défaillance le système arrête automatiquement l'éolienne.

III.4 Générateurs

Actuellement la production de l'électricité est l'application la plus fréquente des turbines éoliennes. Et donc l'utilisation d'une machine électrique est indispensable. Différents types de machines électriques peuvent être utilisées pour la génération de puissance éolienne. Des facteurs techniques et économiques fixent le type de la machine pour chaque application.

En général la génératrice asynchrone à cage d'écureuil occupe la grande partie des installations des éoliennes avec ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs la rend appropriée pour l'utilisation en conversion éolienne [80]. On va entamer les différentes génératrices qui rentrent dans le mécanisme d'une conversion d'énergie par les turbines éoliennes, et par la suite on s'intéresse aux génératrices utilisées dans des petites installations orientées pour alimenter des sites isolés.

III.4.1 La génératrice synchrone

C'est une machine qui offre des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elle peut être utilisée en entraînement direct sur les voilures éoliennes.

Le circuit d'excitation de son inducteur demande la présence du réseau et une fourniture d'une puissance réactive. Les sites isolés ne sont pas adaptés à ce type de génératrice qu'en présence d'une batterie de condensateurs ou d'une source de tension indépendante, c'est le cas du travail présenté en [81] dans le cadre d'une étude de modélisation et de commande d'une machine synchrone à aimant permanent associée à une chaîne de conversion d'énergie éolienne de petite taille pour les sites isolés ; un autre travail en [82] présente une modélisation d'une chaîne de conversion éolienne de petite puissance par l'utilisation aussi d'une MSAP, l'ajout des bagues et balais pour un système possédant un type de MSAP

provient un entretien régulier. Par contre la possibilité de réglage de l'inducteur de cette machine offre un moyen supplémentaire d'ajustement du point de fonctionnement énergétique. L'électronique de puissance s'impose pour toutes les applications qui utilisent ce type de machine qui sont donc à vitesse variable.

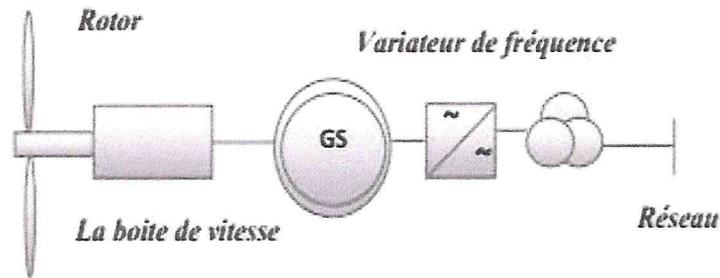


Figure III.3 Système éolien basé sur la GS pour un fonctionnement à vitesse variable

III.4.2 La génératrice asynchrone

Le faible coût et la standardisation de machine asynchrone qui nécessite pas une complexité d'installation a conduit à une très large domination de ce type de génératrices jusqu'à des puissances dépassant les mégawatts. Elle est souvent associée à une batterie de condensateurs et à un démarreur automatique progressif à gradateur ou à résistances permettant de limiter le régime transitoire d'appel de courant au moment de la connexion au réseau. Elle est moins exigeante en termes d'entretien et présente un taux de défaillance très peu élevé. Dans l'aérogénérateur de dimension conséquente, la vitesse de rotation est peu élevée. Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse.

Dans la littérature plusieurs travaux de recherches ont été appliqués pour l'étude de la conversion d'énergie éolienne en utilisant la machine asynchrone comme génératrice.

Dans [83] *K. Idjdarene* a étudié le contrôle de la tension à la sortie d'une génératrice asynchrone connectée à un convertisseur statique dans le cas d'alimentation d'un site isolé, aussi bien et dans [84] l'auteur présente l'ensemble des travaux effectués pour l'utilisation des machines asynchrones pour des systèmes éoliens.

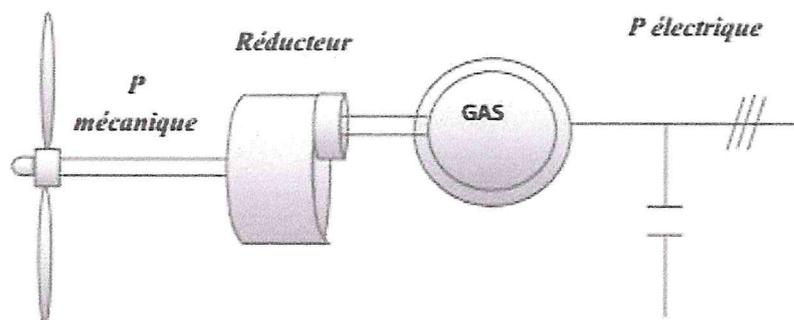


Figure III.4 Système éolien basé sur la génératrice asynchrone à cage à vitesse constante

III.5 Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique

III.5.1 Loi de Betz

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

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure III.5 sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval.

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:

$$m = \frac{\rho S (V_1 + V_2)}{2} \quad 3.1$$

La puissance P_m 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) :

$$P_m = \frac{m (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad 3.2$$

Soit en remplaçant m par son expression dans (3.1):

$$P_m = \frac{\rho S (V_1 + V_2) (V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad 3.3$$

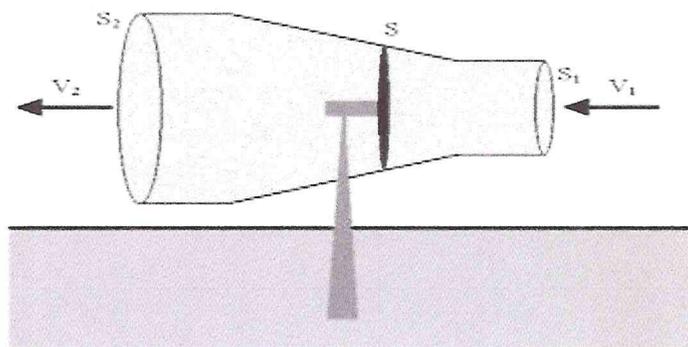


Figure III.5 Tube de courant autour d'une éolienne

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

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad 3.4$$

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

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} \quad 3.5$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (Figure III.6), on s'aperçoit que le ratio P_m / P_{mt} appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maxima de $16/27$ soit $0,59$. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée [85].

L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne.

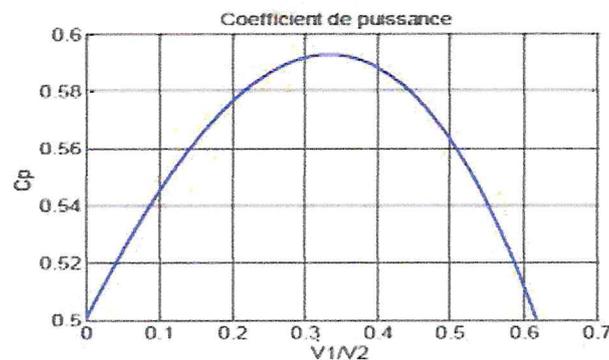


Figure III.6 Coefficient de puissance

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m.

Leur coefficient de puissance (Figure III.7) atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite.

Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique.

Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. [85]

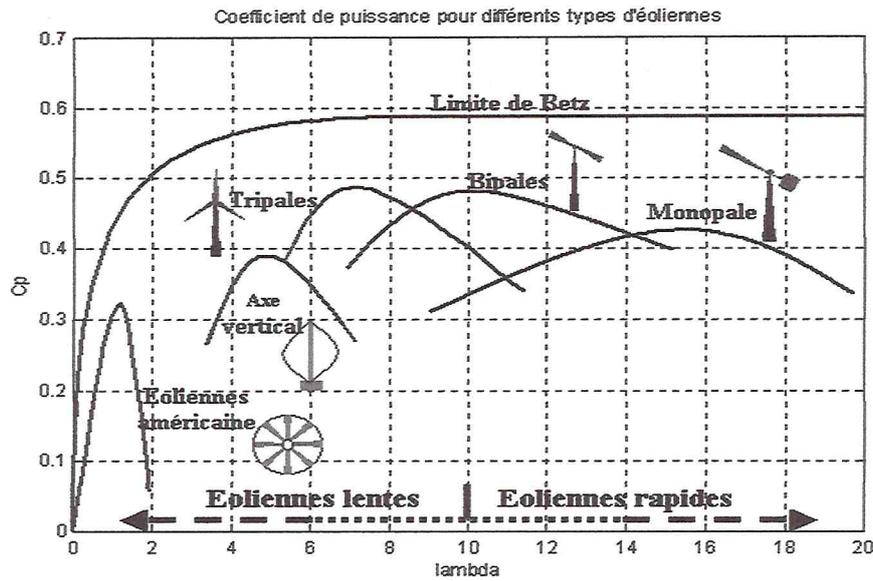


Figure III .7 Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes

III.5.2 Production d'énergie mécanique

En combinant les équations (3.1), (3.4) et (3.5), la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_m = \frac{P_m}{P_{mt}} \cdot P_{mt} = C_p \cdot P_{mt} = \frac{1}{2} C_p (\lambda) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \tag{3.6}$$

Avec:

$$\lambda = \frac{\Omega_1 \cdot R}{V_1} \tag{3.7}$$

Ω_1 : Vitesse de rotation avant le multiplicateur.

R : Rayon de l'aérogénérateur.

Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse K , la puissance mécanique P_{mg} disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

$$P_{mg} = \frac{1}{2} C_p \cdot \left(\frac{\Omega_2 \cdot R}{K \cdot V_1} \right) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \tag{3.8}$$

Avec : Ω_2 Vitesse de rotation après multiplicateur.

III.5.3 Production optimale d'énergie

Si on prend l'exemple d'un système de production d'énergie par éolienne fonctionnant à vitesse variable, on cherchera systématiquement le régime optimal pour un régime de fonctionnement donné

(vitesse du vent fixe), on souhaite que la puissance fournie soit maximale ce qui correspond à une valeur de λ donnée appelée λ_{opt} . La vitesse de rotation optimale λ_{opt} résultante est alors donnée par: [85]

$$\lambda = \frac{\Omega_1 \cdot R}{V_1} \cdot V$$

3.9

Il y a d'autres grandeurs de dimensionnement; V_{min} la vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie et V_{max} la vitesse maximale de vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être arrêtée pour ne pas subir de dégâts.

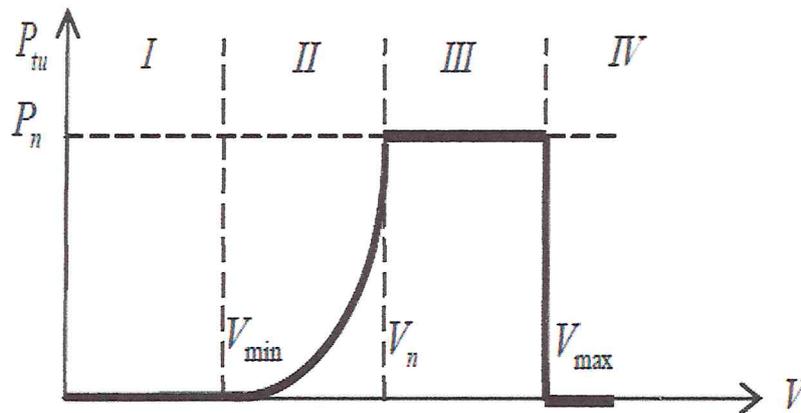


Figure III.8 Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent.

La figure III.8 montre une caractéristique de puissance en fonction de vitesse du vent qui comporte quatre zones :

- ✓ La zone I, ou aucune puissance n'est délivrée pour des vitesses du vent inférieures à la vitesse du démarrage V_{min}
- ✓ La zone II, lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale du vent est appliquée.
- ✓ La zone III, ou généralement la vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation et ou la puissance P_{tu} fournie reste sensiblement égale à P_n .
- ✓ La zone IV, dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête la rotation et le transfert de l'énergie.

III.6 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine

La partie mécanique de la turbine qui sera étudiée comprend trois pales orientables et de longueur R . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse $\Omega_{turbine}$ qui est relié à un multiplicateur de gain G . Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique (Figure III.9).

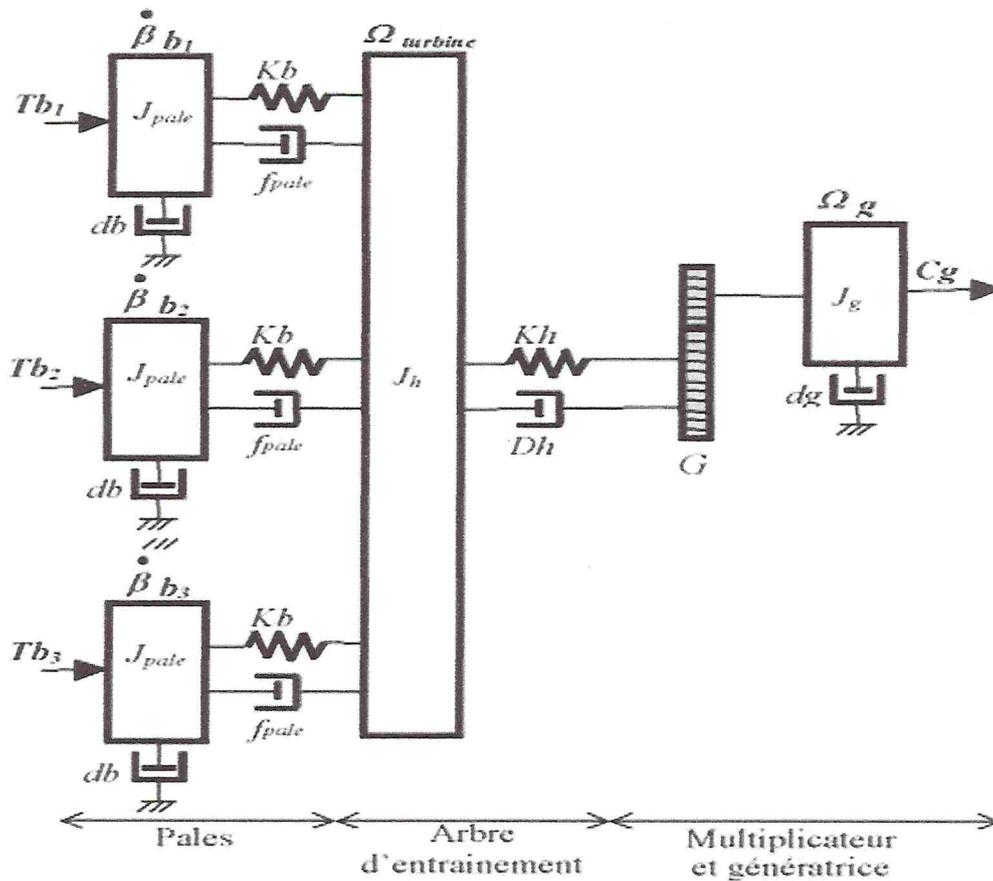


Figure III.9 Système mécanique de l'éolienne

Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc :

- la même inertie J_{pale}
- la même élasticité Kb
- le même coefficient de frottement par rapport à l'air db

Ces pales sont orientables et présentent toutes un même coefficient de frottement par rapport au support f_{pale} .

Les vitesses d'orientation de chaque pale sont notées $\dot{\beta} b_1, \dot{\beta} b_2, \dot{\beta} b_3$.

Chaque pale reçoit une force Tb_1, Tb_2, Tb_3 qui dépend de la vitesse de vent qui lui est appliquée.

L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par :

- son inertie J_h
- son élasticité Kh
- son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur Dh

Le rotor de la génératrice possède :

- une inertie J_g
- un coefficient de frottement dg

Ce rotor transmet un couple entraînant (C_g) à la génératrice électrique et tourne à une vitesse notée Ω_{mec} .

Si l'on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toutes les forces de poussée ($Tb_1 = Tb_2 = Tb_3$) alors on peut considérer l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. De par la conception aérodynamique des pales, leur coefficient de frottement par rapport à l'air (db) est très faible et peut être ignoré. De même, la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes par frottement de la côté de la génératrice.

On obtient alors un modèle mécanique comportant deux masses (Figure III.10) dont la validité (par rapport au modèle complet) a déjà été vérifiée [86].

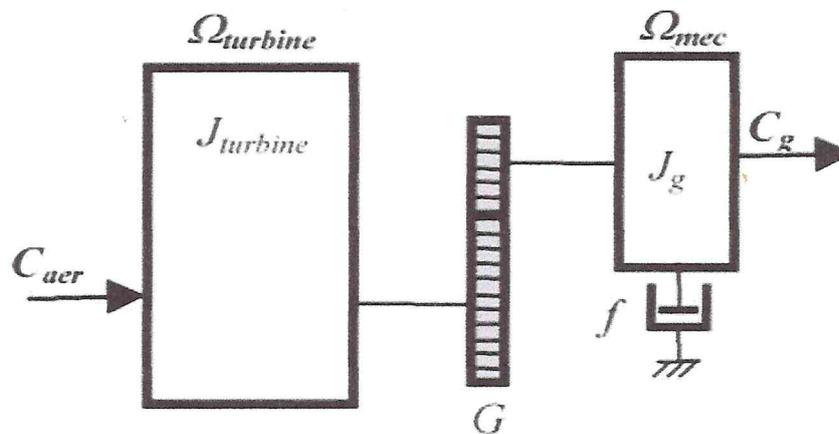


Figure III.10 Modèle mécanique simplifié de la turbine

III.7 Modélisation de la chaîne de production d'énergie éolienne

Cette partie de la thèse est consacrée à la modélisation des éléments constituant un système éolien. Dans ce chapitre, nous avons choisi un système éolien à vitesse variable basé sur une génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP) comme illustré sur la Figure III.11. Du point de vue système, la chaîne de conversion peut être divisée en deux parties interactives qui peuvent être modélisées séparément [87]. Dans un premier temps, nous présentons le modèle de la partie mécanique de l'éolienne incluant le multiplicateur. Ensuite nous présentons une modélisation de la partie électrique concernant la GSAP, À la fin de ce chapitre, nous présentons les résultats de simulation du système éolien.

III.7.1 Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne

Le système mécanique complet est constitué de trois pales reliées au moyeu, couplées à l'arbre lent, relié à son tour au multiplicateur de vitesse qui transforme la vitesse lente de l'arbre du rotor éolien en une vitesse beaucoup plus élevée, compatible avec la plage de vitesse de fonctionnement du générateur électrique.

Le vent qui passe par les pales crée des efforts qui vont générer un couple. Ce couple associé au couple de la génératrice va définir, en fonction de la puissance produite par la génératrice, la vitesse de rotation de l'ensemble. La modélisation du système exige alors la modélisation du vent, du comportement aérodynamique des pales, du système mécanique de transmission, du générateur électrique et du système de commande. La modélisation du vent a été faite dans la partie précédente de ce chapitre.

III.7.1.1 Modélisation de la turbine

Le dispositif, qui est étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G (Figure III.11).

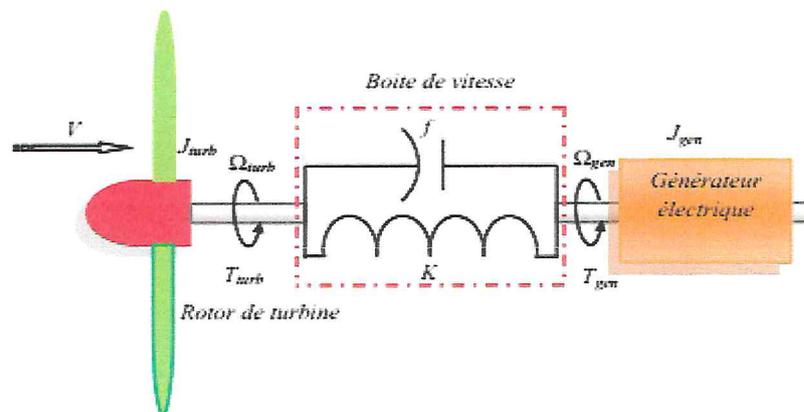


Figure III.11 Schéma de la turbine éolienne

La puissance du vent P_V ou puissance éolienne est définie de la manière suivante :

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \quad 3.10$$

Où

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

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine P_{aer} s'écrit alors :

$$P_{aer} = C_p \cdot P_v = \frac{1}{2} C_p (\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3 \quad 3.11$$

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine [88]. La figure III.12 représente la variation de ce coefficient en fonction du ratio de vitesse λ et de l'angle de l'orientation de la pale β .

Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{v} \quad 3.12$$

Où $\Omega_{turbine}$ est la vitesse de la turbine.

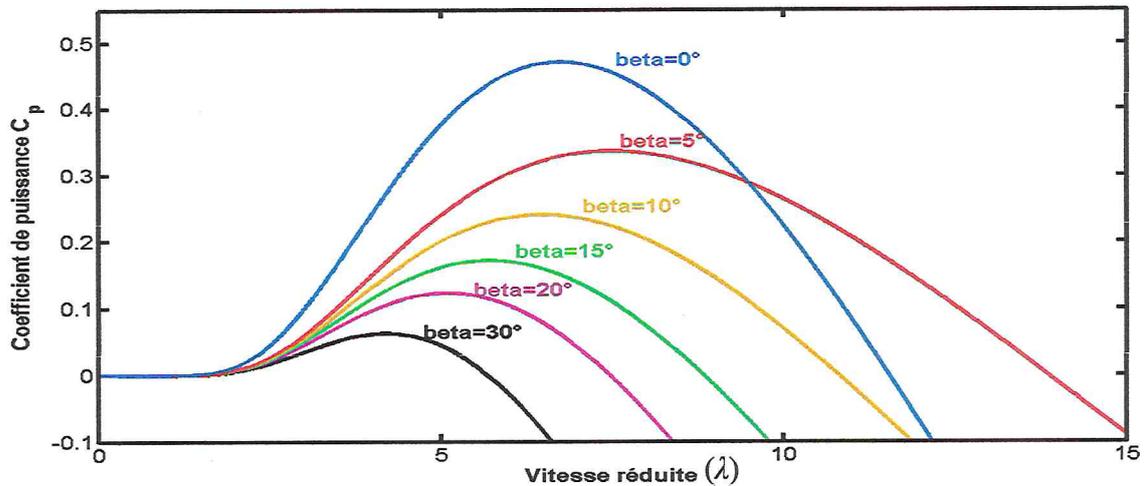


Figure III.12 Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine (λ)

L'expression du coefficient de puissance a été approchée, pour ce type de turbine, par l'équation suivante [89] :

$$C_p = (0.5 - 0.167) \cdot (\beta - 2) \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot (\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)}\right) - 0.00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \quad 3.13$$

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique C_{aer} est donc directement déterminé par :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad 3.14$$

III.7.1.2 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice (Figure III.11). Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad 3.15$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad 3.16$$

III.7.1.3 Equation dynamique de l'arbre

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

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad 3.17$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe [90]. L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total (C_{mec}) appliqué au rotor :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad 3.18$$

Où J est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice. Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{vis} , et le couple issu du multiplicateur C_g .

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad 3.19$$

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

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \quad 3.20$$

Le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine se déduit des équations précédentes et est représenté sur la figure III.13.

Le schéma bloc montre que la vitesse de la turbine peut être contrôlée par action sur deux entrées :

- Le couple électromagnétique de la génératrice.
- La vitesse du vent.

L'angle d'orientation de la pale, est considéré comme une entrée perturbatrice de ce système.

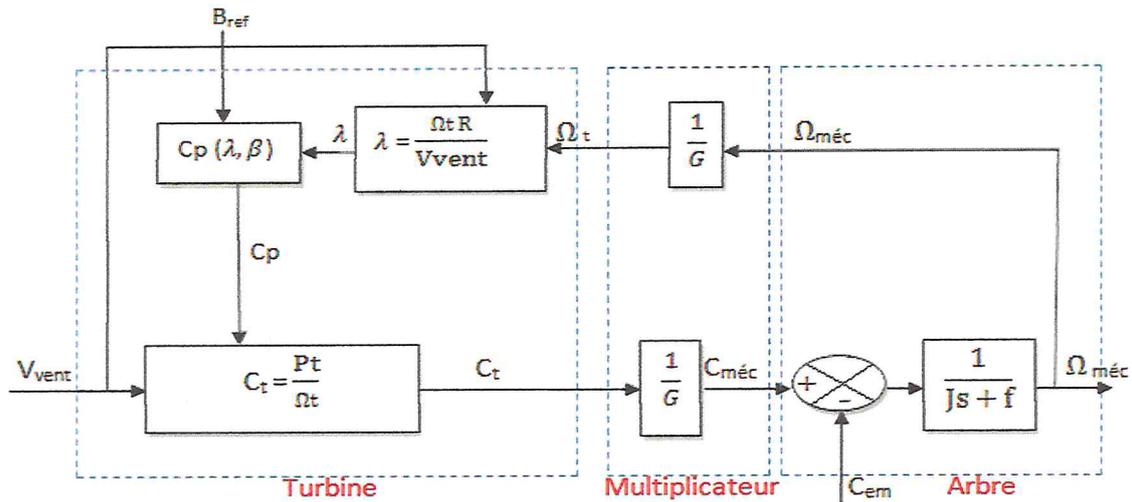


Figure III.13 Schéma bloc du modèle de la turbine

III.7.2 Modélisation de la partie électrique de l'éolienne

III.7.2.1 Modélisation de la génératrice synchrone

Grâce aux nombreux avantages qu'elle a par rapport aux autres types de machines électriques (robustesse, maintenance, prix), la machine synchrone à aimants permanents est intéressante pour l'utilisation comme génératrice couplée à une turbine éolienne. Le modèle mathématique de la machine synchrone à aimants permanents obéit à certaines hypothèses essentielles simplificatrices [91]:

- L'absence de saturation dans le circuit magnétique.
- La distribution sinusoïdale de le FMM créée par les enroulements du stator.
- L'hystérésis est négligée avec les courants de Foucault et l'effet de peau.
- L'effet d'encoche est négligeable.
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température

La structure de la machine synchrone à aimants permanents comporte un enroulement triphasé au stator. L'excitation rotorique est créée par des aimants permanents au rotor. Ces aimants sont supposés rigides et de perméabilité voisine de celle de l'air.

III.7.2.1.1 Équations électriques

Les équations de tensions des phases statorique servent au point de départ pour l'élaboration du modèle dynamique de la MSAP. La structure électrique d'une MSAP triphasée est constituée un stator (enroulement triphasé) représenté par les trois axes (**a**, **b**, **c**) décalés, l'un par rapport à l'autre, d'un angle de 120° électrique.

Les tensions s'expriment en fonction des courants et des flux par les équations suivantes:

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{sa} \\ \psi_{sb} \\ \psi_{sc} \end{bmatrix} \quad 3.21$$

$[v_{sa} \ v_{sb} \ v_{sc}]^T$: Vecteur tension de phases statoriques.

$[i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc}]^T$: Vecteur courant de phases statoriques.

$[\psi_{sa} \ \psi_{sb} \ \psi_{sc}]^T$: Vecteur des flux totaux traversant les bobines statorique.

R_s : la résistance des phases statoriques.

Les enroulements statoriques de la machine synchrone considérée sont connectés en étoile à neutre isolé, d'où la somme instantanée des courants statoriques est nulle, et il n'y a pas de courant homopolaire. Par conséquent, s'il existe une composante homopolaire de tension ou flux, elle n'intervient pas dans le couple [92]. Le comportement de la machine est donc représenté par deux variables indépendantes.

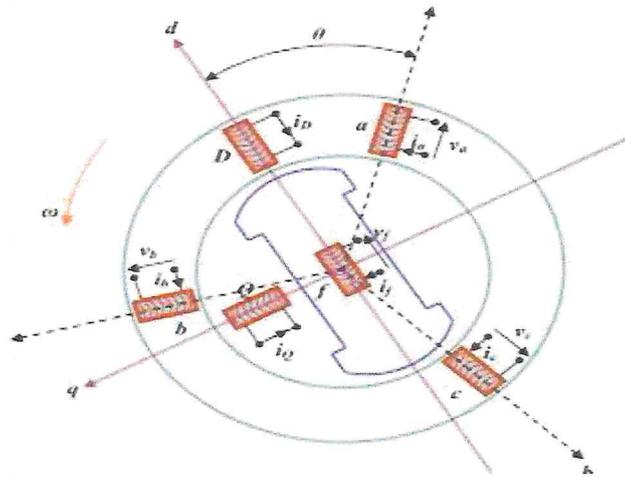


Figure III.14 Structure de la GSAP

III.7.2.1.2 Passage au repère de Park

Afin de simplifier le modèle dynamique de la machine, on applique un changement de repère. Cette transformation mathématique, transforme les trois bobines statoriques déphasées de $\frac{2\pi}{3}$ en deux bobines fictives équivalentes déphasées de $\frac{\pi}{2}$ et situées sur le rotor Figure III.15

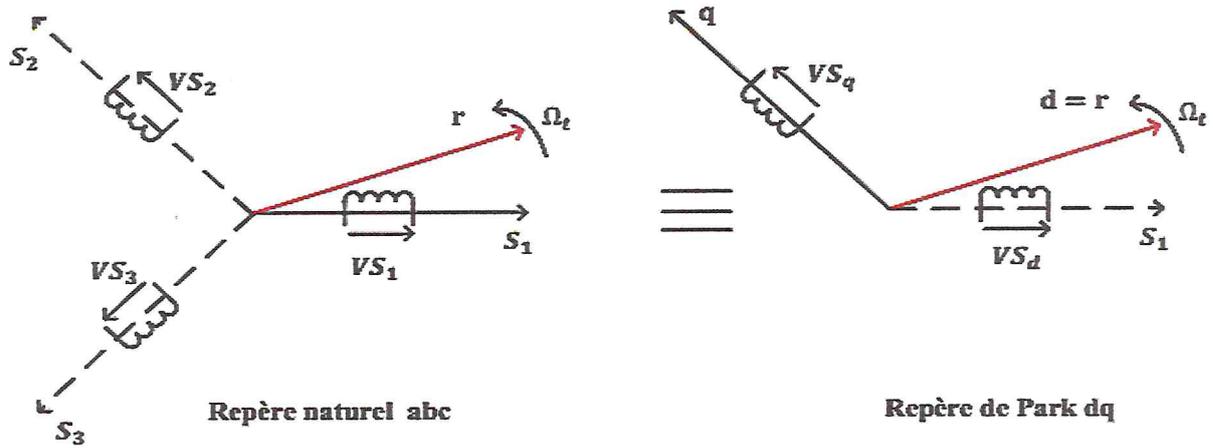


Figure III.15 Passage du repère naturel abc du stator au repère dq de Park

La transformation de Park ($P(\theta)$) est définie par la matrice suivante :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & \cos\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_e) & -\sin\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad 3.22$$

$P(\theta)$ définit le passage du repère a, b, c vers d, q, o

$$P^{-1}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & -\sin(\theta_e) & 1 \\ \cos\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad 3.23$$

$P^{-1}(\theta)$ définit le passage du repère d, q, o vers a, b, c

On définit aussi une autre transformation qui est celle de Concordia qui définit d'autres axes fictifs α et β tel que l'axe α est confondu avec l'axe as ce qui revient à poser $\theta_r = 0$ dans la transformation de Park (équation 3.22)

$$C = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad 3.24$$

III.7.2.2 Modèle de la GSAP dans le repère de Park

Le schéma simplifié du GSAP dans le repère de Park est représenté sur la Figure III.15, le modèle de la MSAP est défini par les différentes équations électriques, magnétiques et mécaniques suivantes :

III.7.2.2.1 Équations électriques

En convention génératrice on inverse le sens des courants on aura donc les équations électriques de la GSAP comme suit :

$$\begin{cases} v_{ds} = -R_s \cdot i_{ds} - L_s \frac{di_{ds}}{dt} + \omega_r \cdot L_q \cdot i_{qs} \\ v_{qs} = -R_s \cdot i_{qs} - L_s \frac{di_{qs}}{dt} - \omega_r \cdot L_d \cdot i_{ds} + \omega_r \cdot \psi_f \end{cases} \quad 3.25$$

III.7.2.2.2 Équations magnétiques

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_d \cdot i_{ds} + \psi_f \\ \psi_{qs} = L_q \cdot i_{qs} \end{cases} \quad 3.26$$

Dans les machines synchrones à répartition sinusoïdale les flux d'axe direct (ψ_{ds}) et de quadrature (ψ_{qs}) sont fonction linéaire des courants (i_{ds} et i_{qs}) respectivement d'axe direct et de quadrature

III.7.2.2.3 Expression du couple électromagnétique

La transformation de Park modifiée utilisée, conserve la puissance dans les deux domaines (abc) et (dq). De ce fait, la puissance électrique sera la même.

$$P_{abc}(t) = P_{dq}(t)$$

$$P_{dq}(t) = (v_{ds} \cdot i_{ds} + v_{qs} \cdot i_{qs}) = \frac{3}{2} \left[-R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) - \left(i_{ds} \cdot \frac{d\psi_{ds}}{dt} + i_{qs} \cdot \frac{d\psi_{qs}}{dt} \right) + \frac{d\theta_r}{dt} (\psi_{ds} \cdot i_{qs} - \psi_{qs} \cdot i_{ds}) \right]$$

$$\frac{3}{2} \cdot R_s \cdot (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) : \text{Représente la puissance dissipée par effet Joule.}$$

$\frac{3}{2} \cdot \left(i_{ds} \cdot \frac{d\psi_{ds}}{dt} + i_{qs} \cdot \frac{d\psi_{qs}}{dt} \right)$: La variation de l'énergie emmagasinée dans les enroulements du stator.

$\frac{3}{2} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} (\psi_{ds} \cdot i_{qs} - \psi_{qs} \cdot i_{ds})$: La puissance électromagnétique.

Sachant que $P = C_{em} \cdot \Omega$ et $\omega = p \cdot \Omega$ (Ω : vitesse mécanique) alors :

$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\psi_{ds} \cdot i_{qs} - \psi_{qs} \cdot i_{ds})$ et après l'affectation des valeurs de flux on aura :

$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \left[(L_d - L_q) \cdot i_{qs} \cdot i_{ds} + \psi_f \cdot i_{qs} \right] \quad 3.28$$

Avec $L_{sd} = L_{sq} = L_s$, Le couple électromagnétique sera :

$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \psi_f \cdot i_{qs} \quad 3.29$$

III.7.2.2.4 Équations mécaniques

L'équation de la dynamique de la GSAP est donnée comme suit [92] :

$$C_m - C_{em} - f\Omega = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} \quad 3.30$$

Tel que :

- C_m : couple moteur.
- Ωf : couple de frottements visqueux.
- f : coefficient des frottements visqueux.
- J : moment d'inertie de la machine.

III.7.2.3 Modélisation de l'association MSAP – Redresseur commandé

Après avoir présenté le modèle de la machine, nous exposerons le système d'entraînement complet où la machine synchrone est associée au redresseur commandé. La figure III.16 illustre le schéma de principe de cette association.

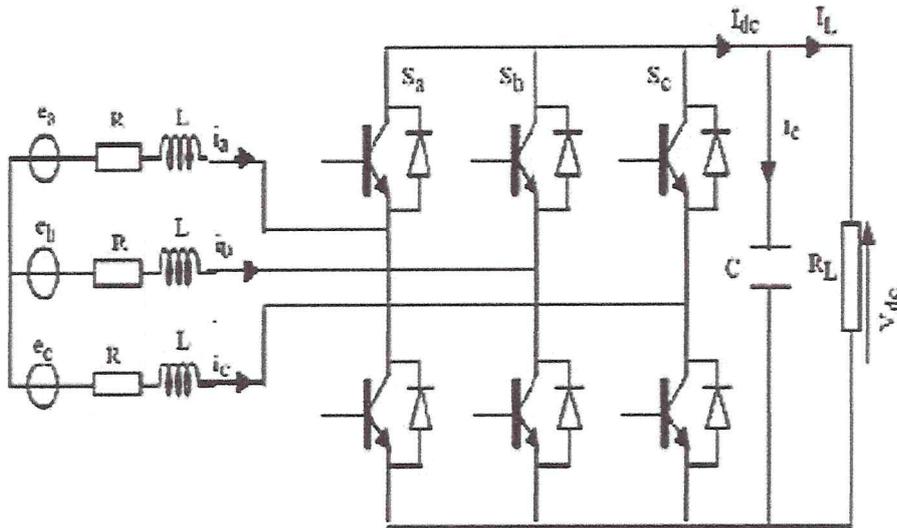


Figure III.16 Schéma de l'association MSAP – redresseur commandé

III.7.2.3.1 Modèle mathématique du redresseur commandé

Dans l'étude de l'ensemble commande – machine – redresseur - charge, nous intéresserons uniquement au comportement dynamique des variables électriques et mécaniques de la machine. On peut faciliter la modélisation et réduire le temps de simulation en modélisant le redresseur par un ensemble d'interrupteurs idéaux: c'est-à-dire résistance nulle à l'état passant, résistance infinie à l'état bloqué, réaction instantanée aux signaux de commande. Pour le modèle dynamique du système, on va diviser l'étude du convertisseur en trois parties: le coté alternatif, la partie discontinue composée par les interrupteurs et le coté continu. Dans ce contexte, la fonction des interrupteurs est d'établir un lien entre le coté alternatif et le coté continu. Ensuite la liaison entre le coté alternatif et le coté continu au travers des interrupteurs ; ces interrupteurs étant complémentaires, leur état est défini par la fonction suivante [93]:

$$s_j = \begin{cases} +1, \overline{s_j} = -1 \\ -1, \overline{s_j} = +1 \end{cases} \quad \text{pour } j = a, b, c \tag{3.31}$$

Puis les tensions de phase d'entrée et le courant de sortie peuvent être écrits en fonction de s_j , V_{dc} et les courants d'entrée i_{sa} , i_{sb} , i_{sc} .

$$i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0 \tag{3.32}$$

Les tensions d'entrée entre phases du redresseur peuvent être décrites par :

$$\begin{aligned} u_{Sab} &= (S_a - S_b)V_{dc} \\ u_{Sbc} &= (S_b - S_c)V_{dc} \\ u_{Sca} &= (S_c - S_a)V_{dc} \end{aligned} \tag{3.33}$$

Les équations de tension pour le système triphasé équilibré sans raccordement neutre peuvent être écrites ainsi :

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + L_s \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{Sa} \\ u_{Sb} \\ u_{Sc} \end{bmatrix} \quad 3.34$$

Avec :

$$\begin{aligned} u_{Sa} &= \frac{2S_a - S_b - S_c}{3} V_{dc} \\ u_{Sb} &= \frac{2S_b - S_a - S_c}{3} V_{dc} \\ u_{Sc} &= \frac{2S_c - S_a - S_b}{3} V_{dc} \end{aligned} \quad 3.35$$

Finalement, on déduit l'équation de couplage des cotés alternatif et continu:

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = (S_a i_{sa} + S_b i_{sb} + S_c i_{sc}) - I_L \quad 3.36$$

Les équations précédentes dans les coordonnées synchrones dq sont:

$$\begin{aligned} V_{sd} &= R_s i_{sd} + L_s \frac{di_{sd}}{dt} - \omega L_s i_{sq} + u_{sd} \\ V_{sq} &= R_s i_{sq} + L_s \frac{di_{sq}}{dt} - \omega L_s i_{sd} + u_{sq} \end{aligned} \quad 3.37$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = (S_d i_{sd} + S_q i_{sq}) - I_L \quad 3.38$$

Avec

$$\begin{aligned} S_d &= \frac{1}{\sqrt{6}} (2S_a - S_b - S_c) \cos(\omega t) + \frac{1}{\sqrt{2}} (S_b - S_c) \sin(\omega t) \\ S_q &= \frac{1}{\sqrt{2}} (S_b - S_c) \cos(\omega t) - \frac{1}{\sqrt{6}} (2S_a - S_b - S_c) \sin(\omega t) \end{aligned} \quad 3.39$$

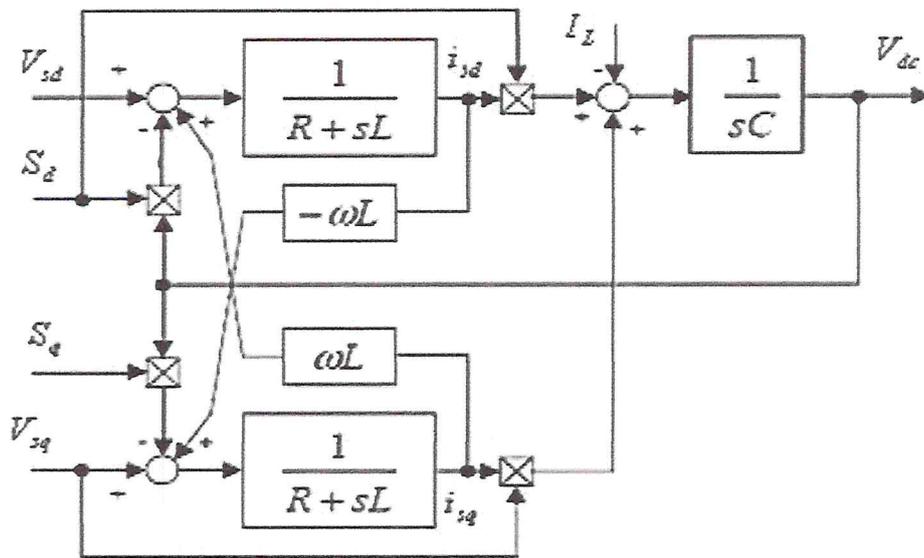


Figure III.17 Modélisation du redresseur dans un repère lié aux axes dq [94]

III.8 Maximisation de la puissance par la vitesse de rotation

En regroupant l'action des trois couples (C_g , C_{em} , C_{vis}) on peut écrire [95].

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f \cdot \Omega_{mec} = C_g - C_{em} \tag{3.40}$$

D'après cette équation, la commande consiste à régler le couple apparaissant sur l'arbre de la turbine C_{turb} de manière à fixer sa vitesse à une référence. Pour réaliser ceci, l'utilisation d'un asservissement de vitesse est indispensable. Alors le couple électromagnétique de référence C_{em_ref} permettant d'obtenir une vitesse mécanique égale à la vitesse de référence Ω_{mec_ref} , qui est basé sur la relation suivante:

$$C_{em_ref} = F(S) (\Omega_{mec_ref} - \Omega_{mec}) \tag{3.41}$$

$$F(S) = \frac{T(S)}{1+T(S)} ; T(S) = \left(K_p + \frac{K_I}{S} \right) \frac{1}{J \cdot S + f} \tag{3.42}$$

$T(s)$: Fonction de transfert du régulateur de vitesse en boucle ouverte.

$F(s)$: Fonction de transfert du régulateur de vitesse en boucle fermée.

Cette vitesse de référence Ω_{mec_ref} dépend de la vitesse de la turbine à fixer Ω_{turb} pour maximiser la puissance extraite. La référence de la vitesse de la turbine correspond à celle de la valeur optimale du rapport de vitesse λ_{opt} (β constant) permettant d'obtenir la valeur maximale de C_{opt} . Alors on peut écrire [95-96]:

$$\Omega_{mec_ref} = \frac{\lambda_{opt} \cdot V_v}{R}$$

3.43

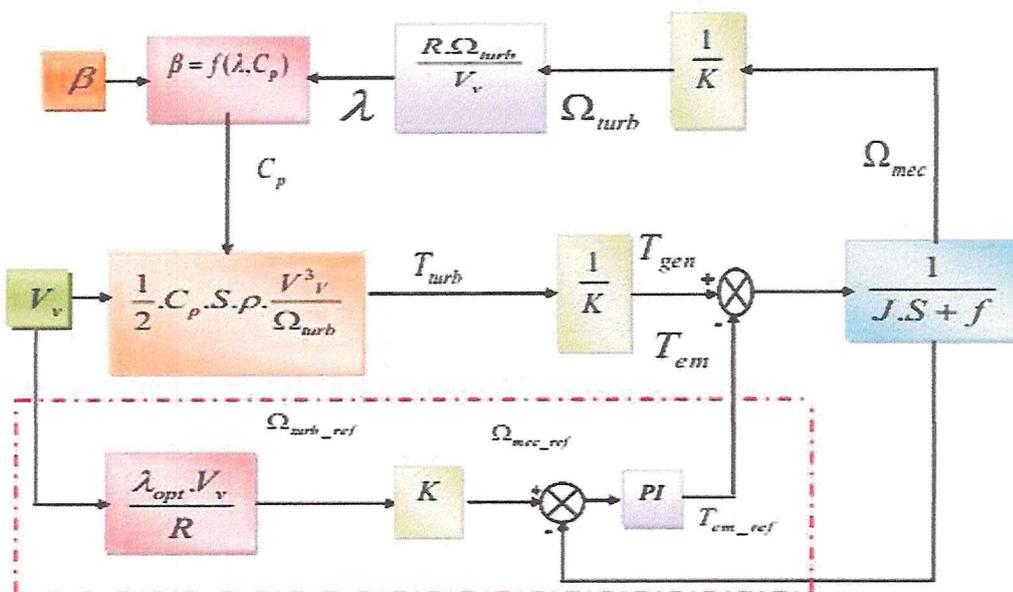


Figure III.18 Maximisation de la puissance par un régulateur PI.

L'optimisation de la puissance éolienne à base d'un régulateur PI est limitée [97], car ce dernier ne tolère pas aux variations paramétriques, c'est-à-dire qu'il n'est pas robuste. Pour remédier à ce problème et afin d'améliorer encore les performances de la boucle de maximisation, on propose d'autres régulateurs tels que : le régulateur RST, le régulateur RST adaptatif basé sur la logique floue et le régulateur optimisé par les algorithmes génétiques.

III.9 Maximisation de la puissance par un régulateur RST

La commande de la GSAP est basée sur un modèle stationnaire soumis à de nombreuses contraintes, telles que des incertitudes de paramètres (température, saturation), qui pourraient détourner le système de son fonctionnement optimal. C'est pourquoi la régulation doit porter sur la robustesse et les performances des techniques de contrôle [98]. Plusieurs techniques de contrôle issues de la théorie du contrôle ont été établies et appliquées à des systèmes réels, en particulier le contrôle polynomial RST en raison de leur structure simple et de leurs bonnes dynamiques performances dans une large gamme de conditions de fonctionnement. Dans les contrôleurs à gain fixe, ces paramètres sont sélectionnés par des méthodes telles que le placement des pôles [99].

Un régulateur RST est un organe de contrôle à trois degrés de liberté permettant d'effectuer une régulation en boucle fermée d'un système industriel, Les régulateurs RST multi variables sont assez complexes à appréhender, et plus encore à synthétiser (dans le contexte multi variable, il est donc

préférable, d'un point de vue pratique, de se placer dans le cadre du formalisme d'état, plutôt que dans celui du « formalisme polynomial » du régulateur RST). Les régulateurs RST sont couramment utilisés dans les systèmes de commande, le plus souvent numériques, car, dans le contexte mono-variable, ce sont les régulateurs qui offrent la plus grande souplesse d'utilisation.

La plupart des boucles d'asservissement mettent en œuvre le classique correcteur PID, bien que relativement facile à régler, le PID ne permet pas toujours d'obtenir les performances requises, en particulier sur les systèmes :

- à retard pur / temps mort important.
- dont les caractéristiques dynamiques varient au cours du fonctionnement.
- d'ordre supérieur à 2 (donc possédant plus d'un mode vibratoire).
- possédant des zones de non-linéarités (frottements, jeu ...).

Le correcteur numérique RST (dont le PID est un cas particulier) est bien adapté à ces types de systèmes. Il permet [89] :

- de gérer, sans module complémentaire, le retard pur
- de commander des systèmes possédant jusqu'à 5 modes vibratoires. (ordre 10)
- de gérer de manières distinctes les dynamiques de suivi de consigne et de rejection de perturbation. La consigne peut être atteinte selon une trajectoire du 2nd ordre entièrement paramétrable (dépassement, temps de montée)
- d'obtenir une excellente robustesse du réglage, pour s'affranchir des variations dans la dynamique du système (gain, retard, inertie).

On utilise un correcteur RST pour assurer et maintenir des performances optimales d'asservissement / régulation dans les régimes de fonctionnement variables des systèmes et procédés d'ordre supérieur à 2.

Les éléments R, S et T sont des polynômes qui forment le correcteur dont le degré est fixé selon le degré de la fonction de transfert de la régulation en boucle ouverte, ils sont calculés en utilisant la stratégie de placement de pôles.

Soit le système avec la fonction de transfert $\frac{A}{B}$ à Y_{ref} qui est distribué depuis la variable Y .

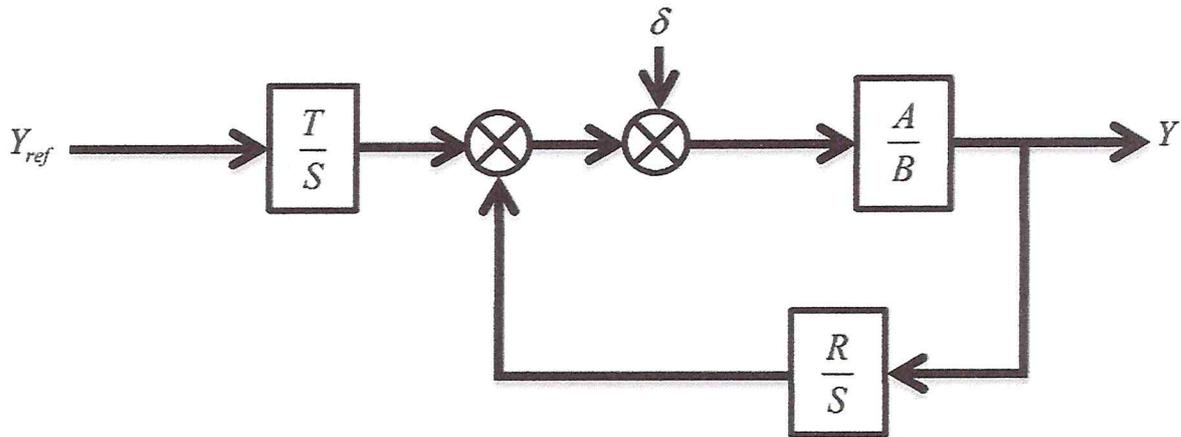


Figure III.19 Schéma bloc du contrôleur RST

La fonction de transfert du système est écrite comme suit :

$$Y = \frac{B.T}{A.S + B.R} Y_{ref} + \frac{A.S}{A.S + B.R} \delta \tag{3.44}$$

On appliquant l'équation de Bézout [101] :

$$A.S + B.R = D \tag{3.45}$$

On a choisit un régulateur strictement propre, alors si A est un polynôme de degré n on doit avoir :

$$\begin{aligned} d^{\circ}(S) &= d^{\circ}(A) + 1 \\ d^{\circ}(D) &= 2d^{\circ}(A) + 1 \\ d^{\circ}(R) &= d^{\circ}(A) \end{aligned} \tag{3.46}$$

Alors que la fonction de transfert du système est écrite comme suit :

$$FT_{\Omega} = \frac{1}{J.s + f_v} \tag{3.47}$$

Où :

$$A = J.s + f_v ; \quad d^{\circ}(A) = n = 1 ;$$

$$B = 1 ; \quad d^{\circ}(B) = m = 0 ;$$

Selon l'équation (III.41) on peut écrire :

$$\begin{aligned} d^{\circ}(S) &= d^{\circ}(A) + 1 = 2 \\ d^{\circ}(D) &= 2d^{\circ}(A) + 1 = 3 \\ d^{\circ}(R) &= d^{\circ}(A) = 1 \end{aligned} \tag{3.48}$$

III.9.1 Application du RST à la régulation de la vitesse de la GSAP

Dans la régulation polynomiale avec le contrôleur RST appliqué à la vitesse et concernant le couple de charge perturbant, le schéma bloc du système de contrôle est donné par la figure ci-dessous [85] :

$$G_0(s) = \frac{1}{s + \frac{f_v}{J}} = \frac{B}{A} \tag{3.49}$$

Avec :
$$\begin{cases} b_1 = \frac{1}{J} \\ a_1 = \frac{f_v}{J} \\ a_0 = 1 \end{cases} \quad \text{Et} \quad \tau_A = \frac{J}{f_v} ; \tag{3.50}$$

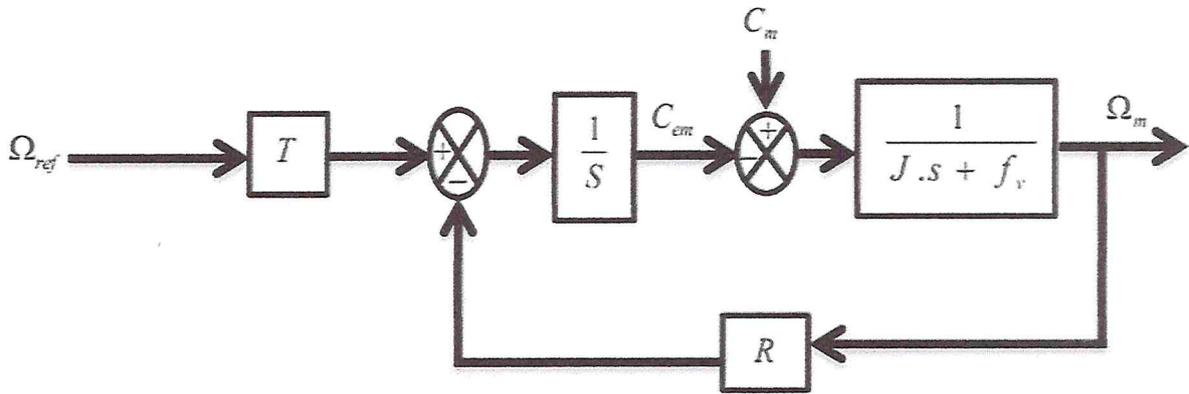


Figure III.20 Schéma block du contrôleur RST appliqué pour la régulation de la vitesse du GSAP

Le polynôme T dans ce cas est fixé à une valeur constante, alors on a :

$$\begin{aligned} R(s) &= r_0.s + r_1 \\ S(s) &= S_0.s^2 + S_1.s \\ D(s) &= d_0.s^3 + d_1.s^2 + d_2.s + d_3 \end{aligned} \tag{3.51}$$

L'équation de Bézout à quatre inconnus où les coefficients du polynôme D sont liés avec les coefficients des polynômes R et S par la matrice du système :

$$\begin{aligned} AS + BR &= D \\ \Rightarrow (a_0.s + a_1).(S_0.s^2 + S_1.s) + b_1(r_0.s + r_1) &= d_0.s^3 + d_1.s^2 + d_2.s + d_3 \end{aligned} \tag{3.52}$$

Alors :

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ a_1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & b_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ r_0 \\ r_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_0 \\ d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} \quad 3.53$$

Avec :

$$\begin{cases} b_1 = \frac{1}{J} \\ a_1 = \frac{f_v}{J} \\ a_0 = 1 \end{cases} \quad 3.54$$

On trouve :

$$\begin{cases} S_0 = \frac{1}{J} \\ S_1 = d_1 - a_1 \cdot d_0 \\ r_0 = \frac{d_2 - a_1 \cdot S_1}{b_1} \\ r_1 = \frac{d_3}{b_1} \end{cases} \quad 3.55$$

Selon à la stratégie robuste de placement de pôle, le polynôme $D(s)$ est écrit comme suit :

$$D(s) = CF = \left(s + \frac{1}{T_c}\right) \cdot \left(s + \frac{1}{T_f}\right)^2 \quad 3.56$$

Tel que $P_c = -\frac{1}{T_c}$ est le pôle du polynôme d'ordre C et $P_f = -\frac{1}{T_f}$ est le pôle du polynôme du filtre F .

Le pôle P_c doit accélérer le système et est généralement choisis 2 à 5 fois plus grand que le pôle de A , P_f est généralement choisis 3 à 5 fois plus petit que P_c .

D'où on choisit T_c et T_f comme suit [100] :

$$T_c = \frac{\tau_A}{4} ; \quad \text{Et} \quad T_f = \frac{T_c}{5} ; \quad 3.57$$

D'autre part :

$$D(s) = \left(s + \frac{1}{T_c}\right) \cdot \left(s^2 + \frac{2}{T_f}s + \frac{1}{T_f^2}\right) \quad 3.58$$

$$D(s) = s^3 + \left(\frac{2}{T_f} + \frac{1}{T_c}\right)s^2 + \left(\frac{1}{T_f^2} + \frac{2}{T_f \cdot T_c}\right)s + \frac{1}{T_f^2 \cdot T_c} \quad 3.59$$

$$\Rightarrow \begin{cases} d_0 = 1 \\ d_1 = \frac{2}{T_f} + \frac{1}{T_c} \\ d_2 = \frac{1}{T_f^2} + \frac{2}{T_f \cdot T_c} \\ d_3 = \frac{1}{T_f^2 \cdot T_c} \end{cases} \quad 3.60$$

III.9.2 Résultats de simulation

Afin d'analyser les performances de l'algorithme RST proposé, le système éolien à base de GSAP dont les paramètres sont donnés en Annexe C est simulé avec MATLAB/SIMULINK. La commande vectorielle est assurée à base d'un régulateur PI.

Les résultats de simulation sont obtenus comme suit :

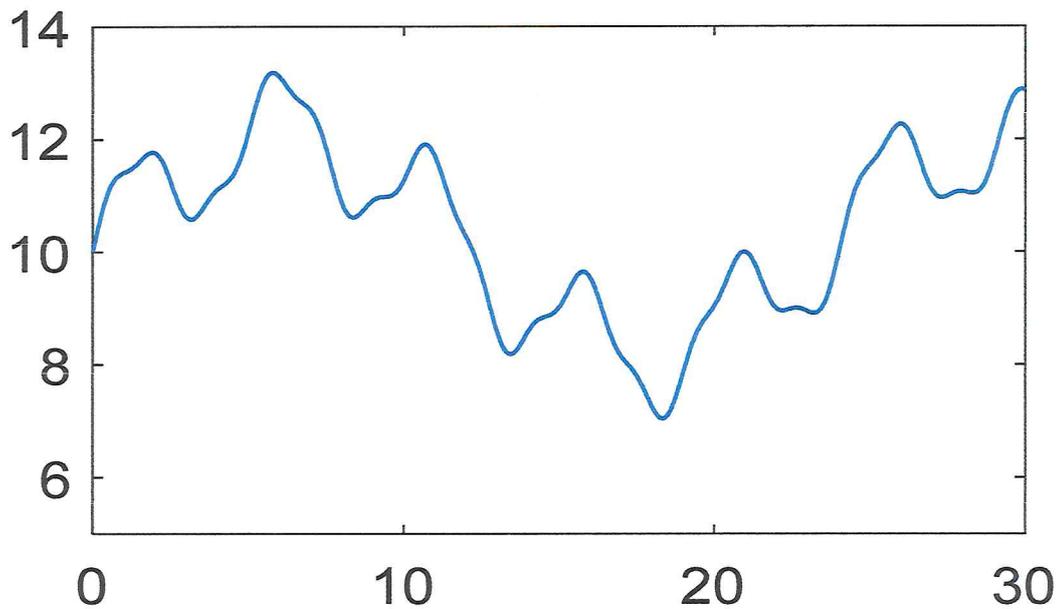
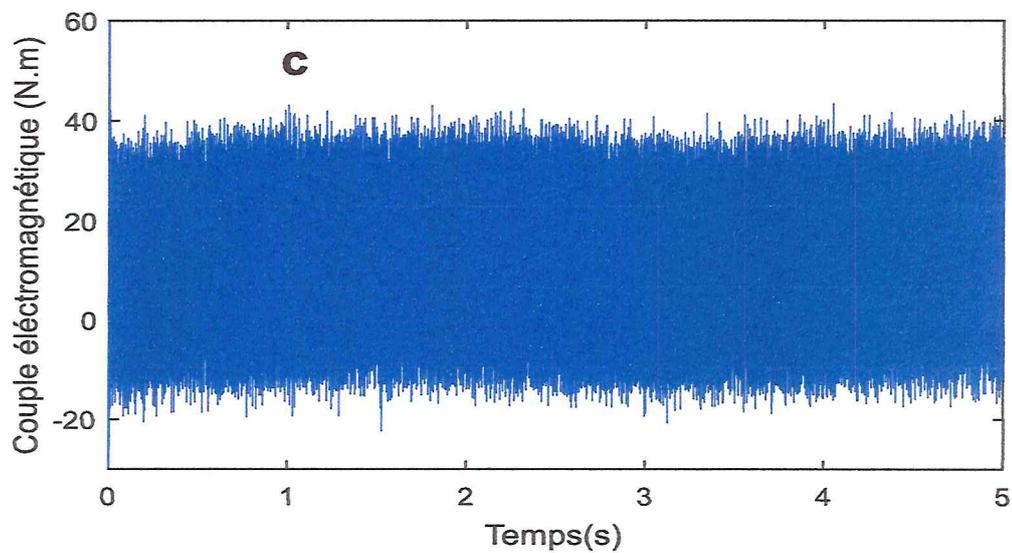
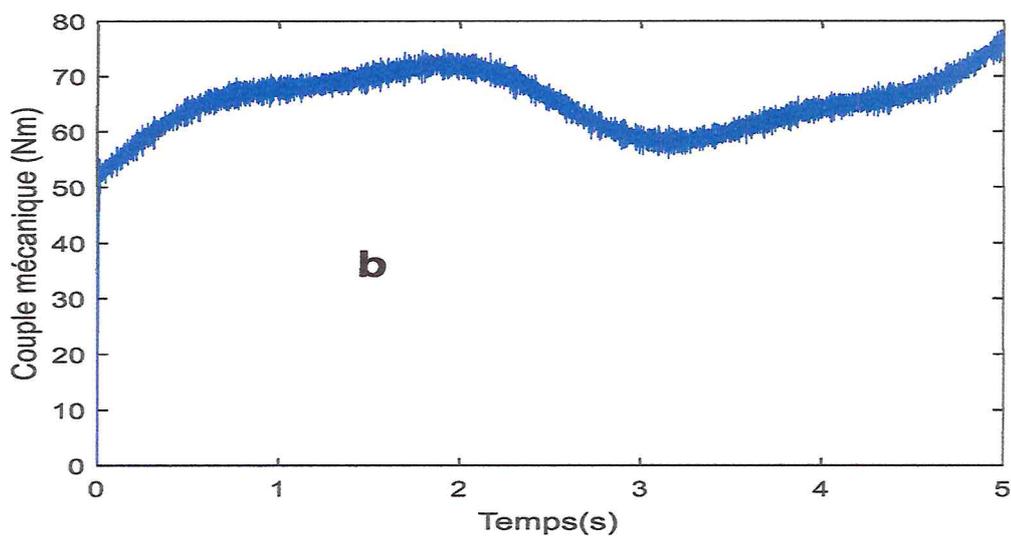
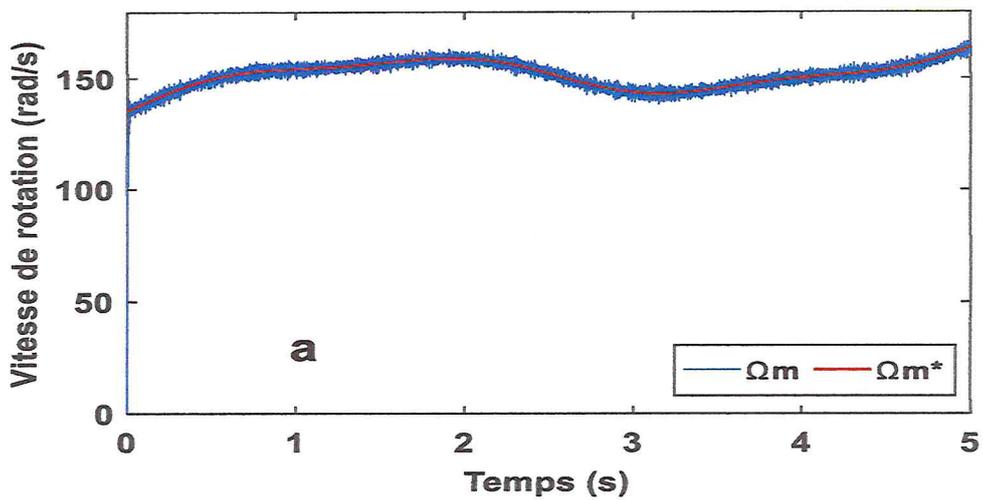


Figure III.21 vitesse de vent en fonction du temps



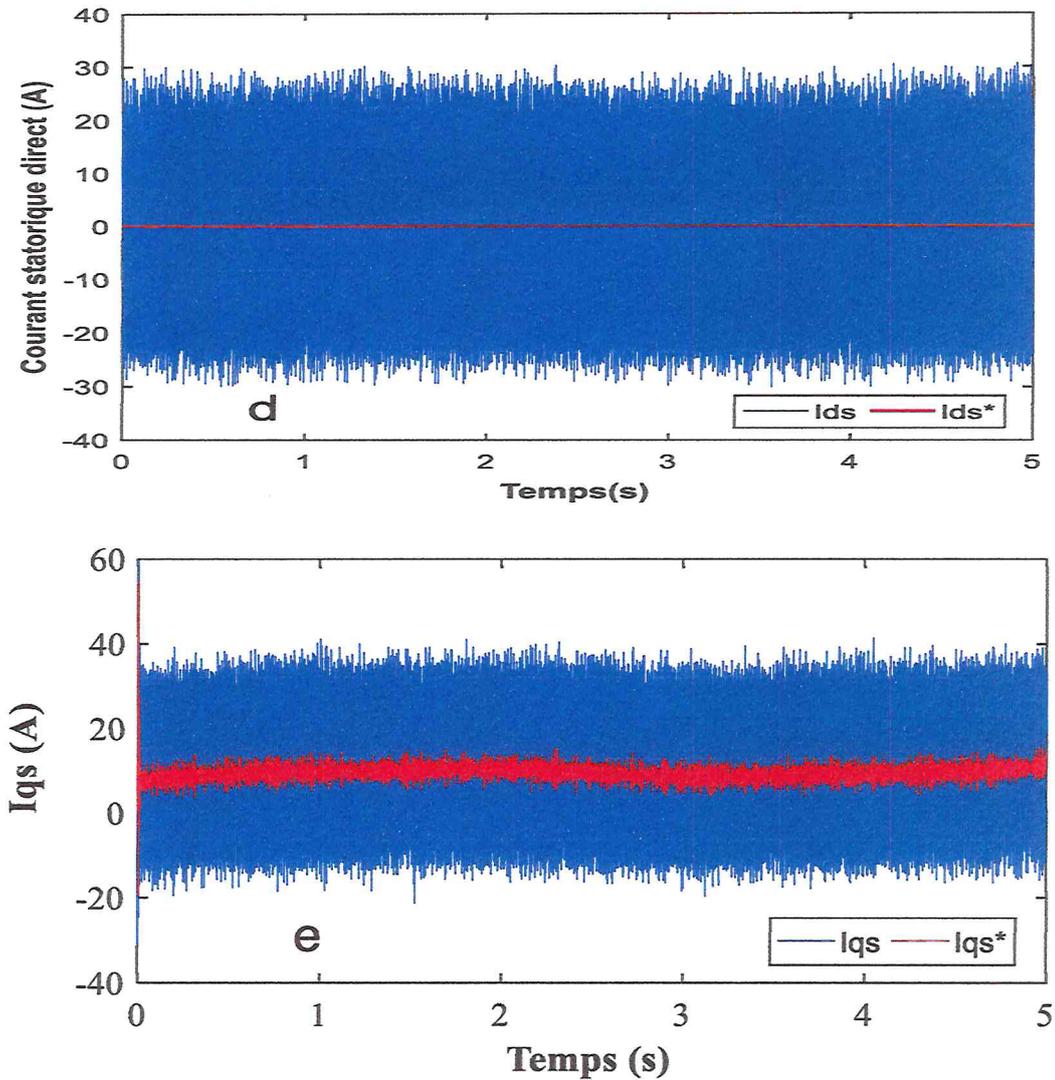


Figure III.22 Performances du système sous une vitesse de vent aléatoire à l'aide d'un contrôleur RST. (a) vitesse de rotation (rad / s), (b) couple mécanique (Nm), (c) couple électromagnétique (N. m), (d) courant statorique continu (A) et (e) courant statorique quadratique (A).

III.10 Maximisation de la puissance par un régulateur RST adaptative basée sur la logique floue

Pour la commande de telles classes de systèmes, les méthodes conventionnelles de l'automatique ont montré leurs limites en termes de stabilisation et performances. Suite aux développements des calculateurs numériques, les automaticiens commencent à s'intéresser aux nouvelles approches de commande telles que la commande adaptative, la commande prédictive, la commande robuste, ainsi que des techniques basées sur l'intelligence artificielle.

Parmi ces dernières techniques, la commande par logique floue est à l'heure actuelle une des préoccupations des chercheurs dans le monde. Les systèmes d'inférence flous possèdent deux points

forts : le premier est qu'ils sont généralement construits à partir de la connaissance humaine et le deuxième réside dans leur capacité descriptive due à l'utilisation des variables linguistiques.

Les contrôleurs RST sont simples mais ne peuvent pas toujours contrôler efficacement les systèmes avec des paramètres changeants ou de fortes non-linéarités.

La supervision floue des paramètres du régulateur RST est une solution adéquate qui se justifie par les arguments suivants :

- La logique floue est la technique de commande la plus simple à implanter en pratique.
- Les critères de performance des deux régulateurs RST classique et à logique floue sont complémentaires.

Dans ce chapitre on va présenter un aperçu général sur la théorie de la logique floue. Ensuite, on va montrer la description et l'application de la commande par logique floue avec ses différentes étapes de fuzzification, inférence et défuzzification. Une méthodologie de contrôleurs combinant l'approche RST et l'approche floue sera présentée aussi, cette approche associant le régulateur RST et le superviseur composé de règles floues. Enfin et dans le but de montrer le degré d'amélioration du comportement dynamique du système éolienne choisi, nous terminons cette étude par des tests de simulation.

L'objectif est de montrer que la technique proposée peut améliorer les performances des GSAP en termes de suivi de référence, de sensibilité aux perturbations et de robustesse contre variations des paramètres de la machine.

III.10.1 Commande par logique floue

Dans le système présenté dans cette étude, quatre régulateurs à base de la logique floue sont utilisés : deux pour produire les tensions de référence souhaitées à la commande des courants statoriques (i_{ds} et i_{qs}) et les autres à la commande des courants transitant le filtre (i_{td} et i_{tq}).

Comme il est représenté sur la figure III.23, dans le régulateur floue (RF), la valeur de référence $R(t)$ est comparée à la valeur réelle (mesurée) $Y(t)$ pour obtenir l'erreur $e(t)$.

De plus, cette erreur est dérivée pour obtenir la variation de l'erreur $ce(t)$.

Les deux entrées du régulateur flou sont l'erreur de la vitesse et sa variation. La sortie du régulateur correspond à la commande. Ces trois grandeurs sont normalisées comme suit :

$$\begin{cases} E = e \times GE \\ CE = ce \times GC \\ DU = du \times GU \end{cases} \quad 3.61$$

Où, GE, GC, GU sont des facteurs d'échelle ou des gains de normalisation associés à E, CE, DU respectivement. Ils permettent de changer la sensibilité du régulateur flou sans en changer la structure. Les grandeurs (e, ce, du) indicées sont donc les grandeurs normalisées à l'entrée et à la sortie du RF.

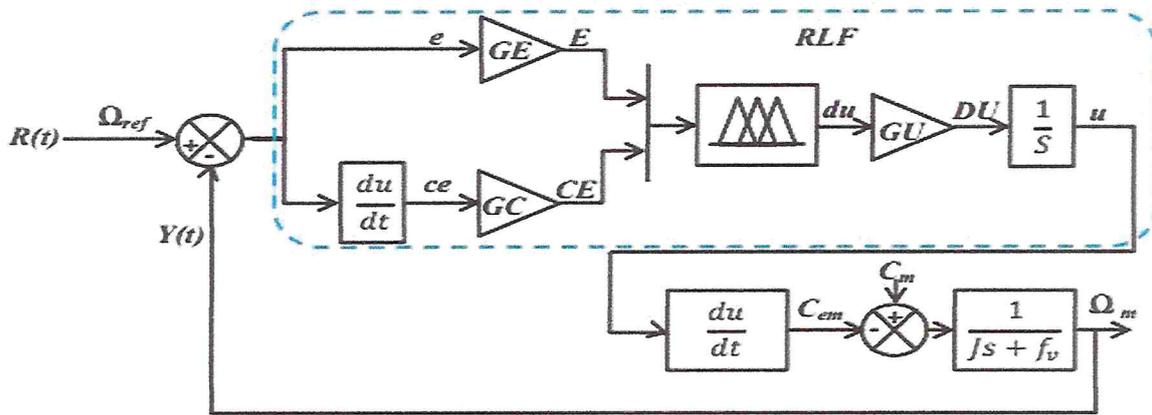


Figure III.23 Schéma synoptique d'un régulateur flou de la vitesse

D'après [102], la normalisation des grandeurs d'entrées et de sortie est une étape clé du bon fonctionnement. Les gains d'entrées permettent de doser l'action des entrées sur le RF, tandis que le gain de sortie influence la commande qui est directement envoyée au procédé. Il existe un fort lien entre les gains d'entrées et le gain de sortie puisque le réglage des gains d'entrées influe sur la sortie du RF. À la limite, un mauvais choix de réglage aurait pour conséquence de biaiser les résultats.

L'erreur et sa variation est donnée par l'expression suivante :

$$\begin{cases} E = GE[R(t) - Y(t)] \\ CE = GC[e(t) - e(t-1)] \end{cases} \quad 3.62$$

III.10.1.1 Ensembles flous (fonction d'appartenance)

Pour les fonctions d'appartenance, on a choisi pour chaque variable la forme triangulaire comme le montre la figure III.24.

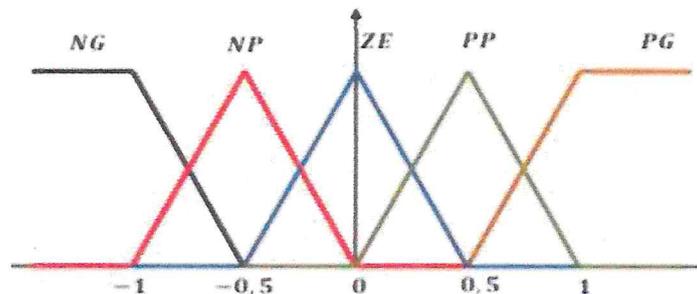


Figure III.24 Fonctions d'appartenance pour l'erreur, la variation d'erreur et la commande.

Chacune des deux entrées linguistique et la sortie du RF possède cinq ensembles flous qui sont définis sur l'intervalle $[-1, 1]$. Il est généralement plus facile de commencer avec un nombre restreint de valeurs linguistiques possibles, pour simplifier le design initial. Si la précision demandée est plus grande, on peut ajouter des valeurs linguistiques. Puisque un trop grand nombre d'ensembles dévoreurs d'espace mémoire et nécessite un temps de calcul plus long lorsque le contrôleur est en fonction. Il est noté aussi qu'il existe plusieurs façons de définir les valeurs numériques de chaque fonction d'appartenance ; elles peuvent être symétriques et distribuées de manière non équidistante.

Les variables linguistiques sont notées comme suit : **NG** pour négatif grand, **NP** pour négatif petit, **EZ** pour environ zéro, **PP** pour positif petit et **PG** pour positif grand.

III.10.1.2 Inférence floue

Les règles floues permettent de déterminer le signal de sortie du régulateur en fonction des signaux d'entrée. Elles relient le signal de sortie aux signaux d'entrées par des conditions linguistiques prenant en compte l'expérience ou le savoir-faire acquis par un opérateur humain. Ces relations fournissent ensuite la base des règles à partir de laquelle les décisions peuvent être prises.

Pour choisir les règles, il suffit d'observer la réponse d'un système en boucle fermée à la suite d'un changement de charge de consigne ou de trajectoire dans le plan de phase.

La figure III.25 illustre un plan de phase d'une réponse indicielle d'un système en boucle fermée. Notre objectif est la conception théorique du régulateur flou donc nous n'avons qu'un seul choix pour l'extraction des règles : c'est par raisonnement dans la réponse temporelle.

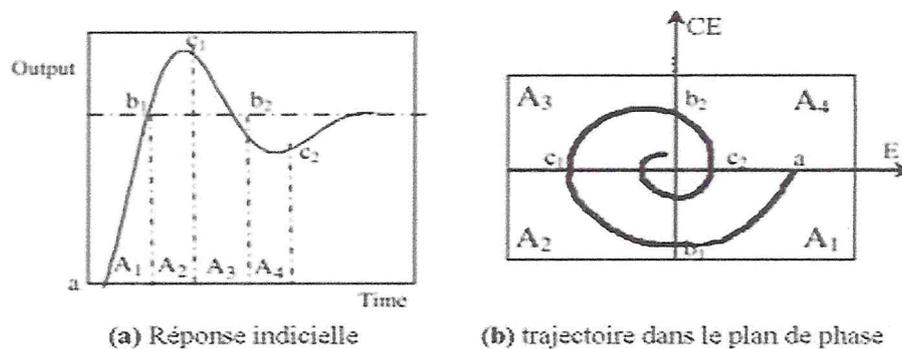


Figure III.25 Méthodes de définition des règles floues.

Les deux schémas (a et b) de la figure présentent la décomposition du plan de phase en quatre régions ou zones (A_1 à A_4) et en deux ensembles de points : deux à l'intersection (b_1, b_2) et deux au pic de dépassement (c_1, c_2). Les règles d'inférence sont définies suivant ces régions en assurant les critères suivants :

- Pour la région A1 (loin de la référence) : diminution du temps de montée.
- Pour la région A2 (autour de la référence, en phase de convergence) : minimisation du dépassement.
- Pour la région A3 (autour de la référence, en phase de divergence) : minimisation du dépassement.
- Pour la région A4 (stabilisation de la réponse) : minimisation de l'erreur statique en régime permanent et élimination de l'oscillation.

On sait que, par exemple, si l'erreur est grande, il faut demander une forte correction à la sortie, peu importe la variation de l'erreur (A1). Si l'erreur est négative et la variation de l'erreur est positive (A3), la commande floue consistera donc à imposer une correction faible puisque la mesure se rapproche de la consigne. De même, si l'erreur et sa variation sont nulles, la sortie doit être maintenue à sa valeur actuelle (A4).

Les règles d'inférences conduisent à adopter une table de décision anti-diagonale, résumant les règles choisies ; cette table qui figure dans le tableau 3.1. Ce tableau montre la matrice d'inférence de RF pour une partition de 5 sous-ensembles flous pour chaque variable d'entrée E et CE.

La méthode d'inférence choisie est celle de **Mamdani**, c'est la méthodologie la plus couramment utilisée [103]. Par conséquent, l'opérateur "ET" est réalisé par le calcul du *minimum*, tandis que l'opérateur "OU" est réalisé par le calcul du *maximum*. Dans cette méthode, l'opérateur "ET" est représenté par la fonction *Produit*, l'opérateur "OU" par la fonction *Somme* ou *Moyenne* et pour la conclusion, l'opérateur "ALORS" est représenté par la fonction *Produit* [104].

Alors la sortie floue résultante du régulateur est la contribution des 25 règles floues de la matrice d'inférence.

CE	E				
	NG	NP	ZE	PP	<u>PG</u>
NG	NG	NG	NP	NP	ZE
NP	NG	NP	NP	ZE	PP
ZE	NP	NP	ZE	PP	PP
PP	NP	ZE	PP	PP	PP
<u>PG</u>	<u>ZE</u>	PP	PP	PG	<u>PG</u>

Tableau III.1 Matrice d'inférence du régulateur flou.

III.10.1.3 Defuzzification

Lorsque les sorties floues sont calculées, il faut les convertir en une valeur déterministe à partir de la surface totale de toutes les fonctions d'appartenance. Cette dernière étape pour ce mode de contrôle (*defuzzification*) se fait à l'aide de la méthode de calcul du centre de gravité. Le calcul de la solution précise dc_n , d'une solution floue à l'aide de la méthode du centre de gravité est défini par [105]. Cette méthode est caractérisée par sa simplicité de calcul et sa sortie est unique.

$$dc_n = x_{Gr} \frac{\sum_{i=1}^{25} \mu_{ci} x_{Gi} S_i}{\sum_{i=1}^{25} \mu_{ci} S_i} \quad 3.63$$

Où :

- S_i est la surface de l'ensemble flou de l'incrément de la commande dc_n correspondant à la $i^{\text{ème}}$ règle.
- x_{Gr} est l'abscisse de son centre de gravité.

III.10.1.4 Commande adaptative par logique floue

Jusqu'à maintenant les régulateurs conventionnels sont les plus utilisés dans les applications industrielles. Environ 90% des contrôleurs industriels sont des contrôleurs PID [106]. Le reste est constitué de systèmes de contrôle, dédiés, basés sur différentes techniques de contrôle moderne.

Bien que relativement facile à régler, le PID ne permet pas toujours d'obtenir les performances requises, en particulier sur les systèmes : (i) à retard pur/temps mort important, (ii) d'ordre supérieur à 2 (donc possédant plus d'un mode vibratoire)...etc. Le correcteur numérique RST est bien adapté à ces types de systèmes. La structure du régulateur RST qui agit différemment sur la consigne et sur la sortie est la principale raison de ce succès qu'il peut remplacer le régulateur PID dans l'industrie. Cependant, il possède un certain inconvénient qui ils sont mentionnées auparavant.

Il est connu que le régulateur flou apporte des solutions étonnantes aux problèmes de régulation dans le régime transitoire face aux variations des paramètres du système et dans le cas de présence d'une dynamique non linéaire dans le système. Mais il subsiste le risque d'avoir des oscillations à faible amplitude en régime permanent ce qui n'est pas le cas pour le régulateur RST.

Pour remédier aux inconvénients des correcteurs RST et RLF, nous les combinons ensemble.

III.10.1.4.1 Description du mécanisme d'adaptation d'un régulateur RST par la logique floue

Les régulateurs hybrides RST-flous peuvent être considérés comme des RST non-linéaires et leurs paramètres changent au cours de fonctionnement. Dans notre cas, on se base sur l'erreur et sa dérivée pour ajuster ces paramètres (gains). Cette approche associant le régulateur RST et le superviseur composé

de règles floues, offre la possibilité d'utiliser la précision mathématique de l'algorithme du RST avec l'adaptabilité, la souplesse et la simplicité du formalisme linguistique flou.

Ce type de commande, dite adaptative, permet donc d'exploiter les avantages présentés par des contrôleurs RST est ceux de la logique floue. L'objectif de la loi d'adaptation est d'améliorer les performances de la commande des systèmes complexes et non linéaires.

On propose un superviseur dont les entrées sont (l'erreur et sa variation), les sorties sont trois matrices floues qui permettent de générer les signaux qui seront appliquer à chaque gain du RST (S_1, R_1, T_0). La figure III.26 montre le diagramme de cette configuration [97], [99] .

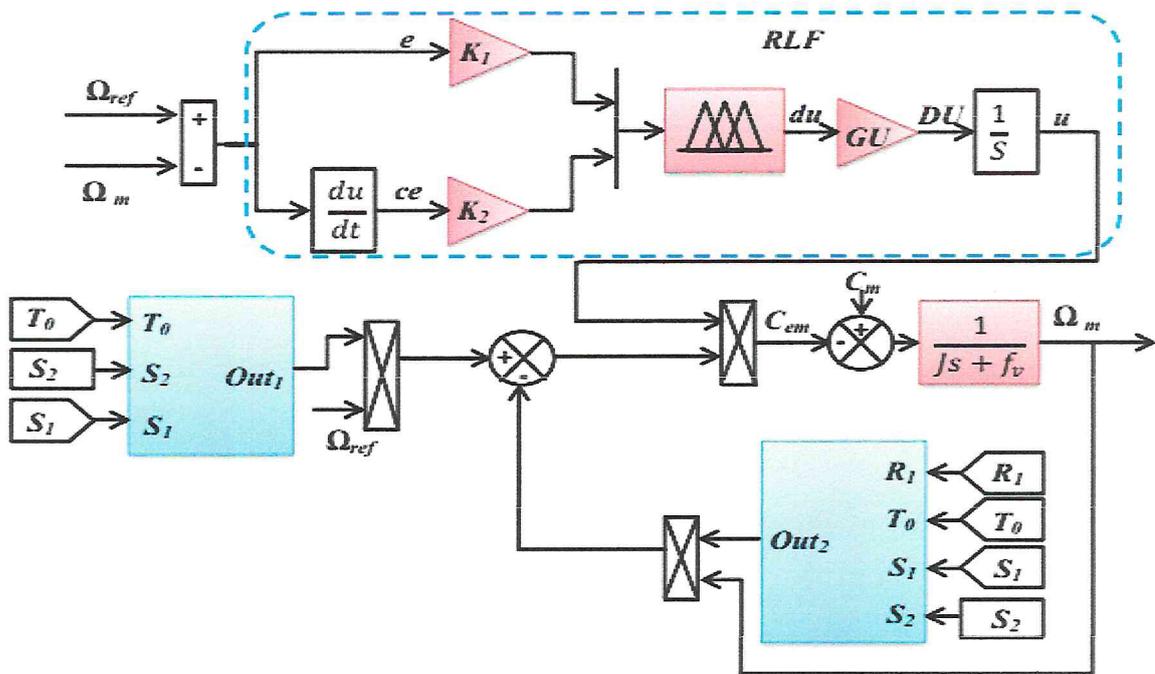
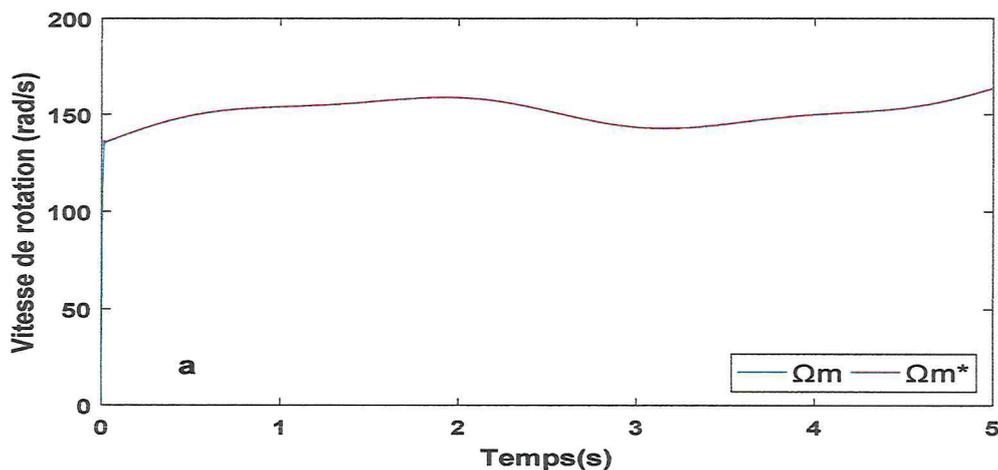
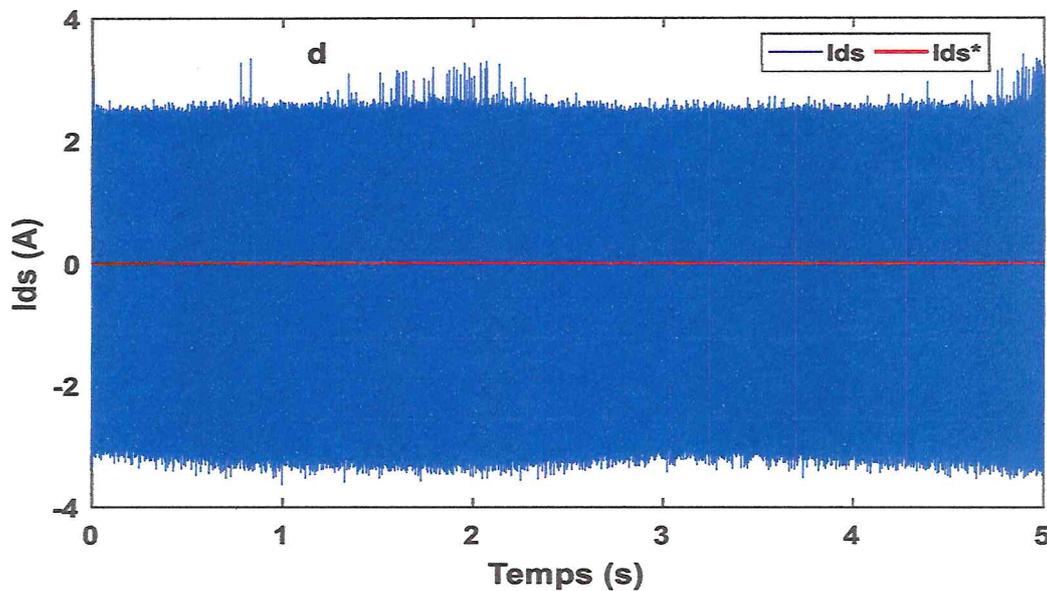
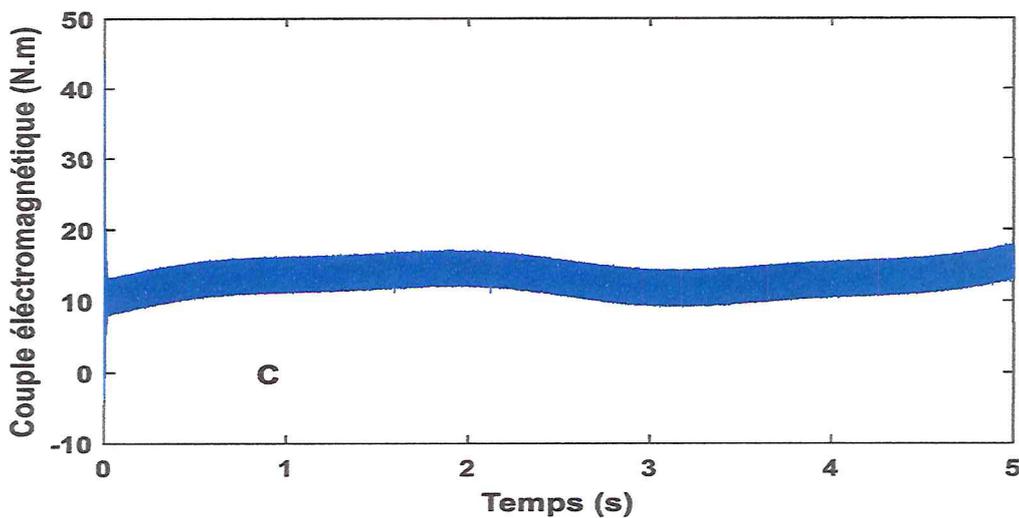
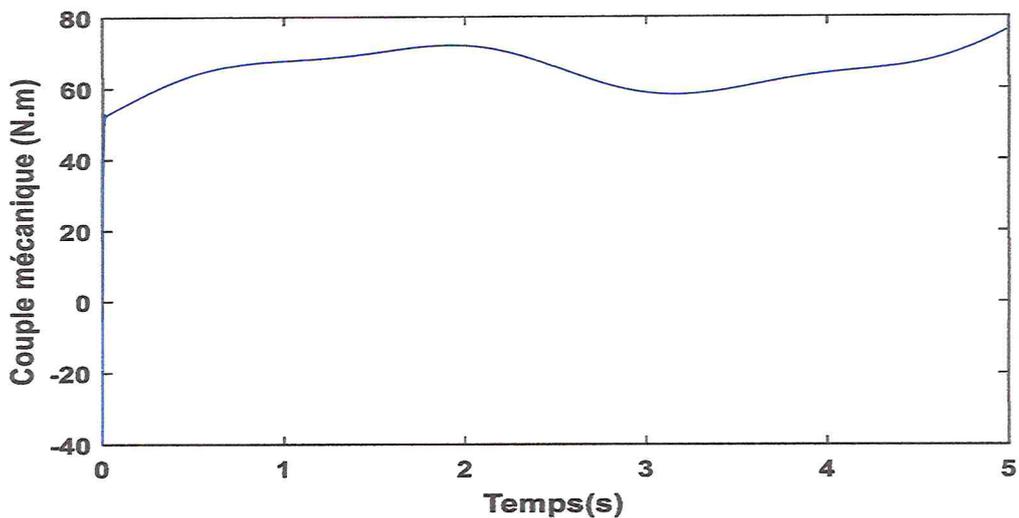


Figure III.26 Principe d'adaptation du RST par la logique floue

III.10.1.4.2 Résultats de simulation





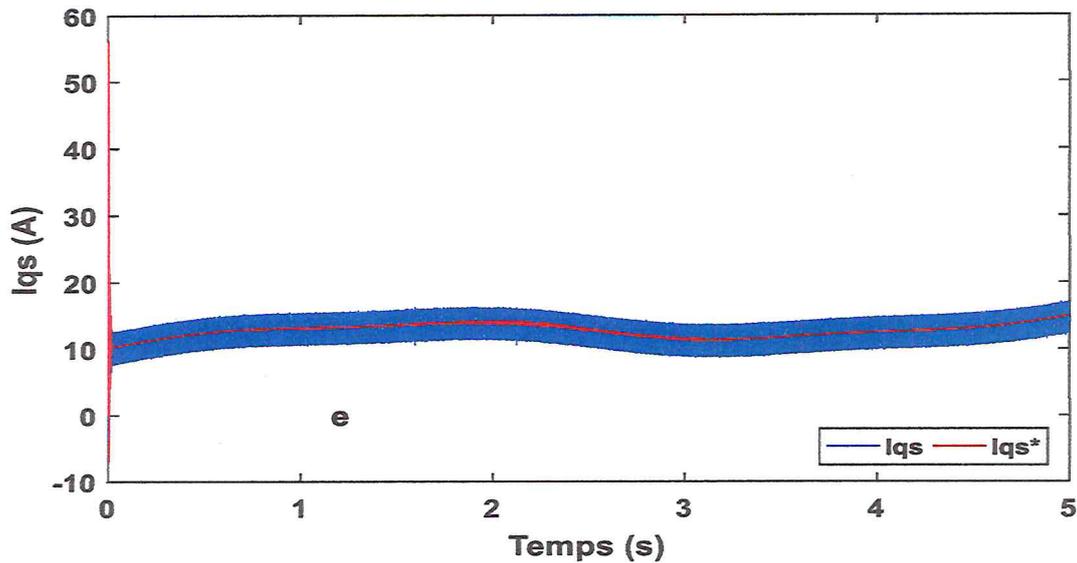


Figure III.27 Performances du système sous une vitesse de vent aléatoire à l'aide d'un contrôleur RST-flou adaptative. (a) vitesse de rotation (rad / s), (b) couple mécanique (Nm), (c) couple électromagnétique (N. m), (d) courant statorique continu (A), et (e) courant statorique quadratique (A).

III.11 Maximisation de la puissance par un régulateur RST optimisé par algorithmes génétiques

Plusieurs algorithmes d'optimisation de la fonction objective existent et dont l'objectif est la détermination d'un extremum global (minimum ou maximum). Toutefois, certains algorithmes convergent vers un extremum local qui risquerait de donner des valeurs erronées pour le système. Nous proposons donc les algorithmes génétiques qui contournent cette difficulté.

Cette section propose une nouvelle approche pour le réglage des paramètres du régulateur RST basés sur l'algorithme génétiques AG. Le problème de conception de commande RST est formulé comme un problème d'optimisation sous contrainte, qui est efficacement résolu basé sur un algorithme génétique

III.11.1 Optimisation des paramètres du régulateur RST par l'algorithme génétique

Afin de concevoir le contrôleur RST optimal, l'algorithme génétique est appliqué pour trouver les paramètres optimaux de celui-ci. La structure du correcteur RST avec AG est représentée sur la figure III.28 [107]

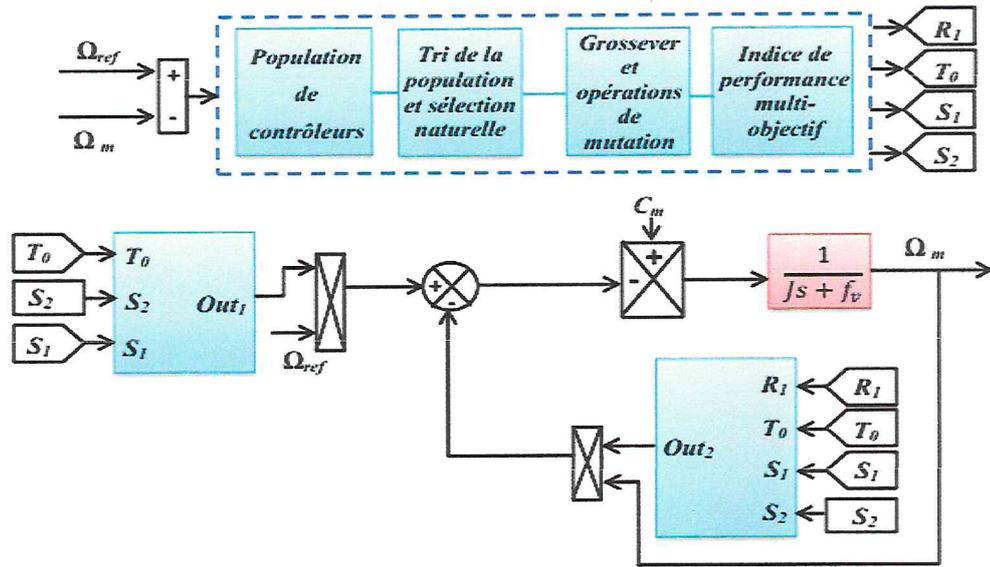


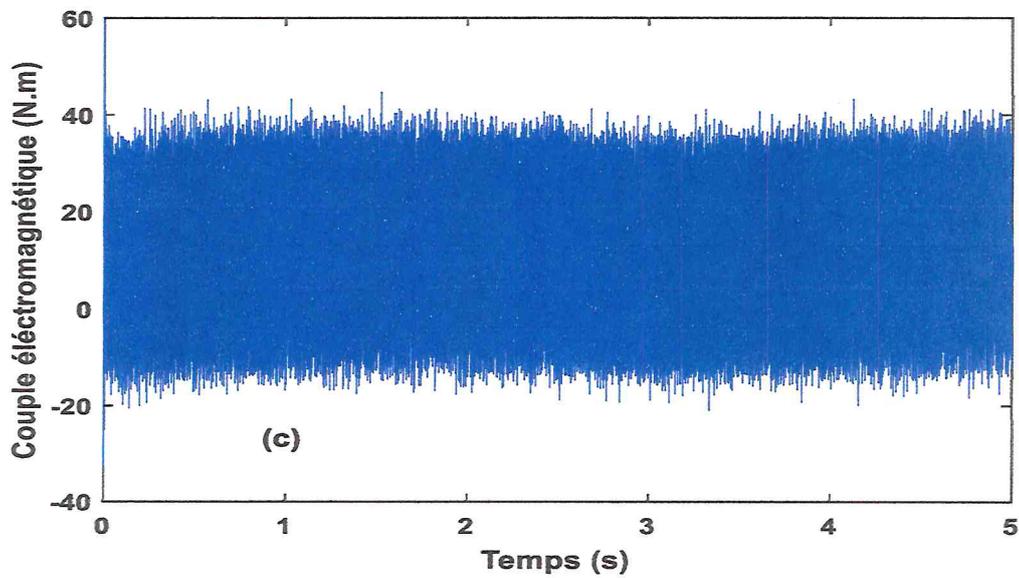
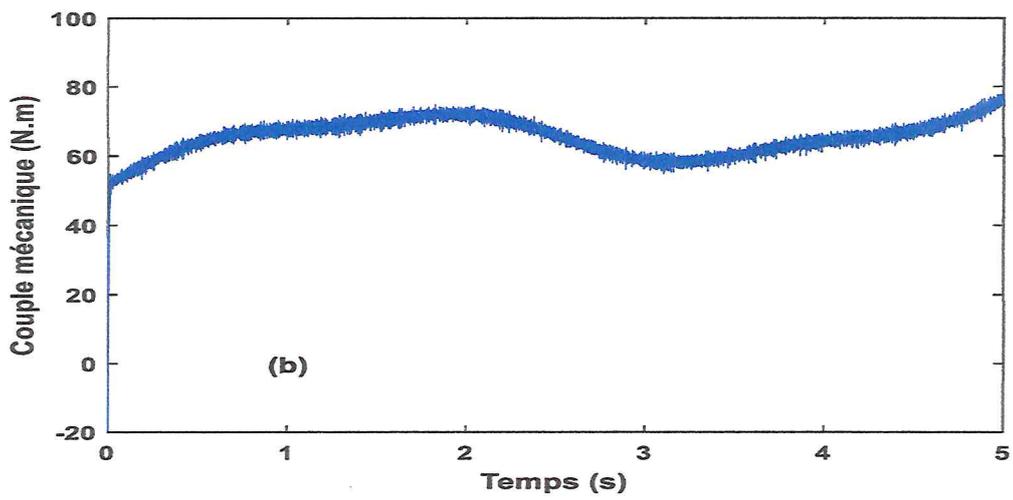
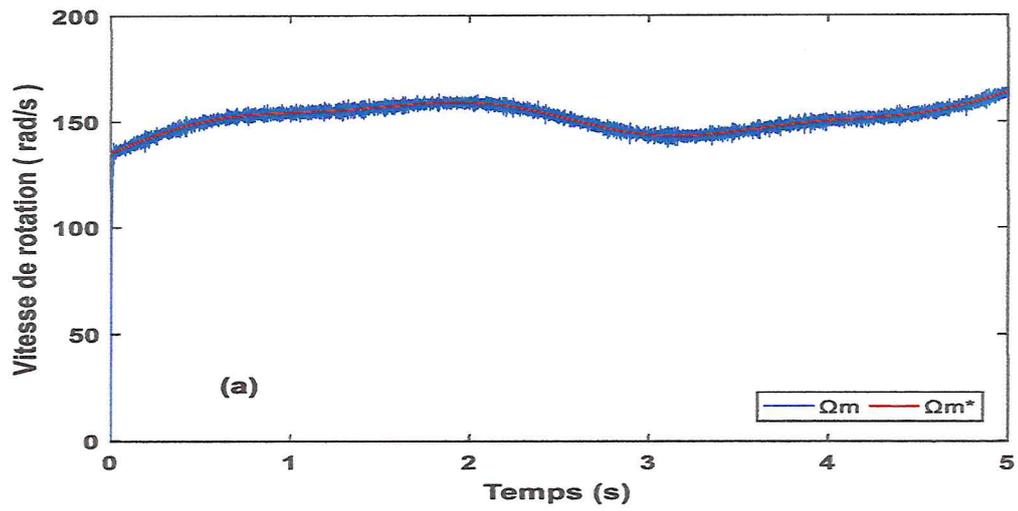
Figure III.28 Schéma de principe du contrôleur RST proposé avec l'algorithme génétique.

Les paramètres de contrôle adoptés dans la mise en œuvre de l'algorithme proposé sont répertoriés dans le tableau III.2.

Taille de la population	80
Bornes variables	[0 100;0 100]
N° max de génération	100
Tolérance	1e-6
Indice de performance / fonction fitness	Erreur quadratique moyenne
Sélection de probabilité	0.095
Méthode de croisement	Croisement arithmétique
Opérateur de mutation	Multi Non uniformément distribué
Probabilité de mutation	0.18%

Tableau III.2 : Les paramètres du contrôleur RST-AG

III.11.2 Résultats de simulation et discussion



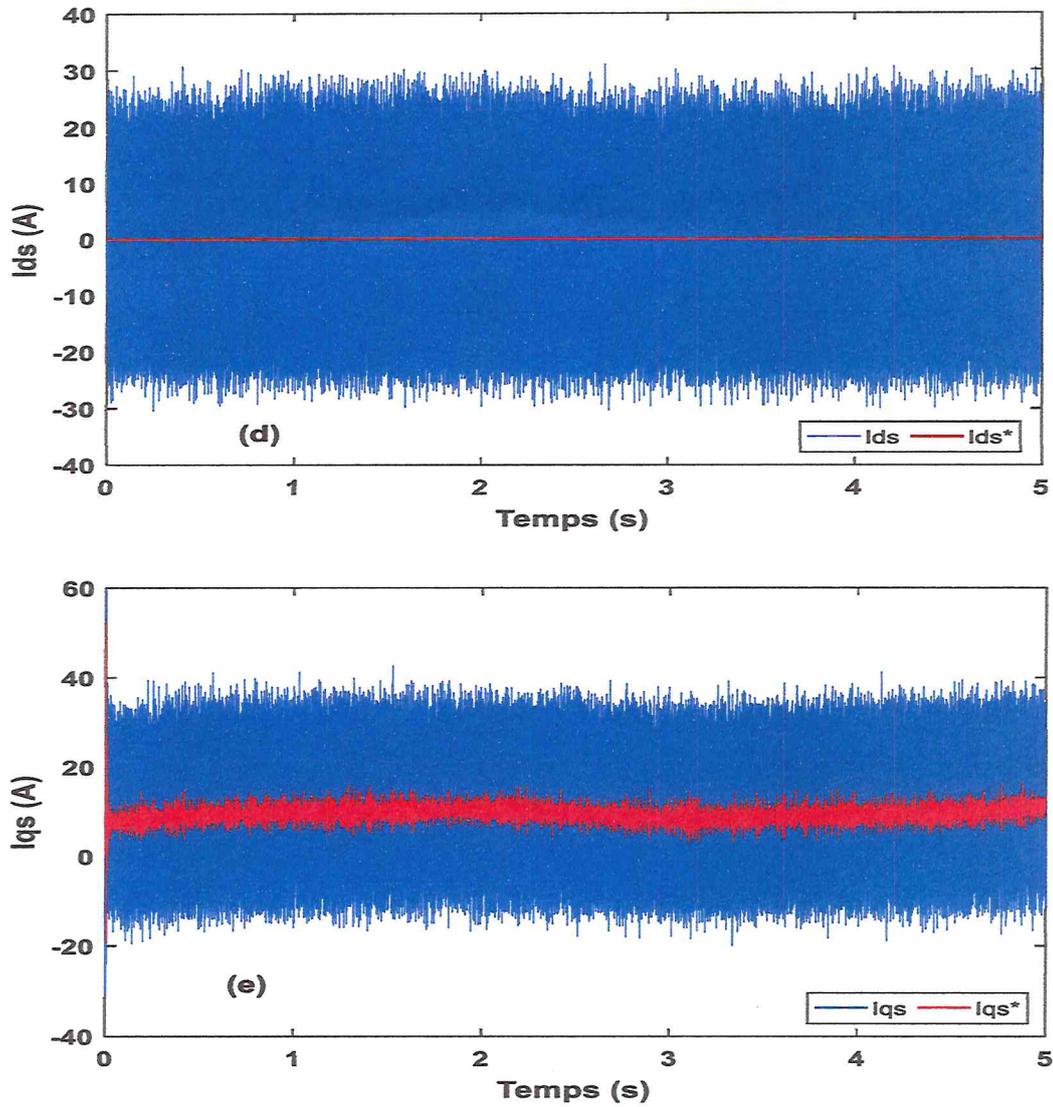
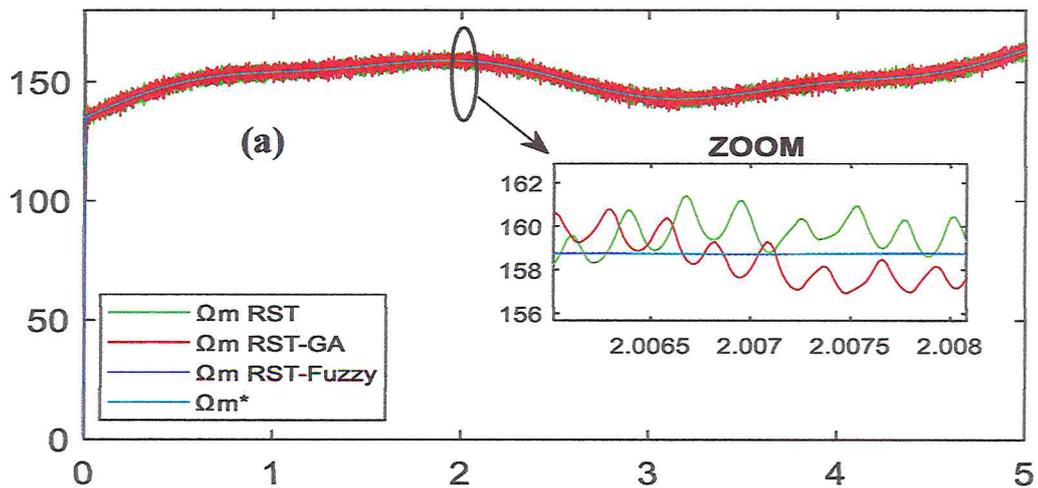
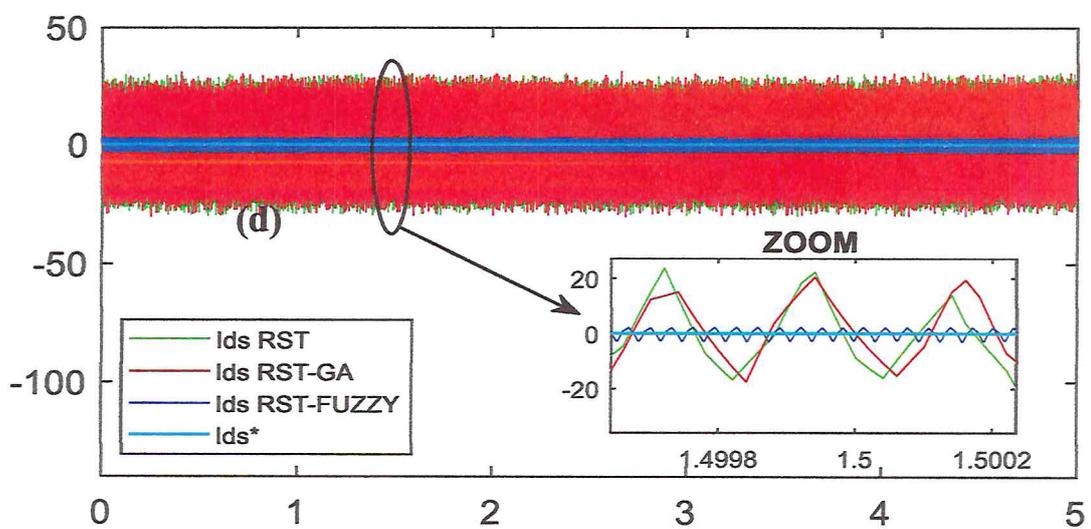
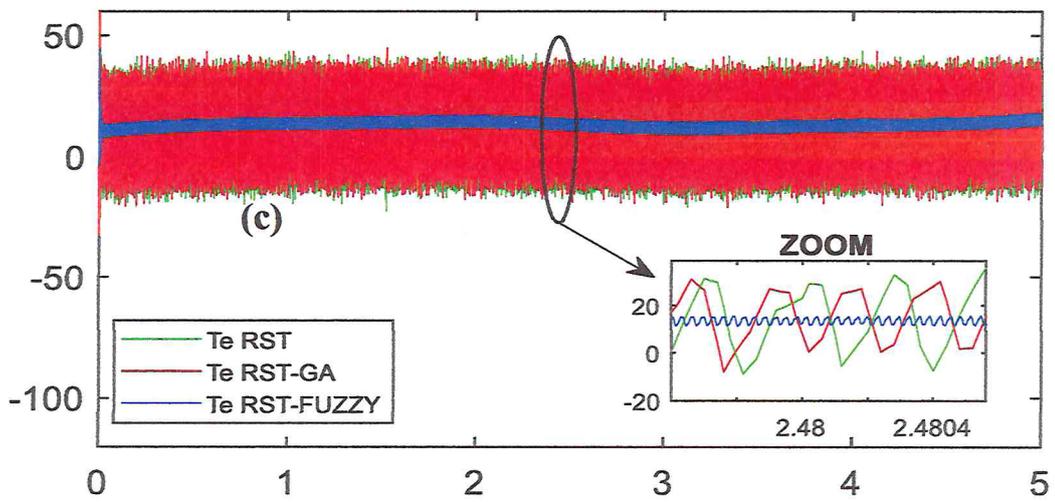
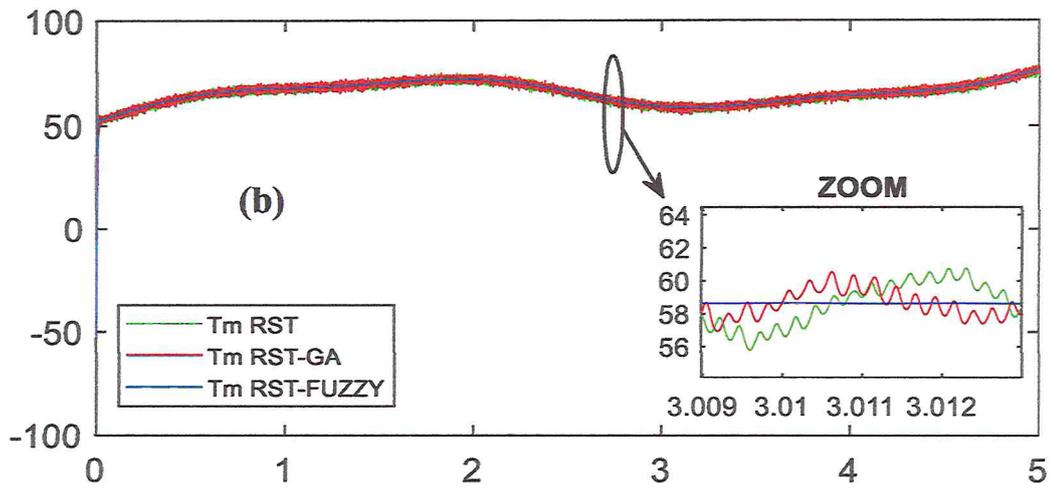


Figure III.29 Performances du système sous une vitesse de vent aléatoire à l'aide d'un contrôleur RST-génétique. (a) vitesse de rotation (rad / s), (b) couple mécanique (Nm), (c) couple électromagnétique (N. m), (d) courant statorique continu (A) et (e) courant statorique quadratique (A).





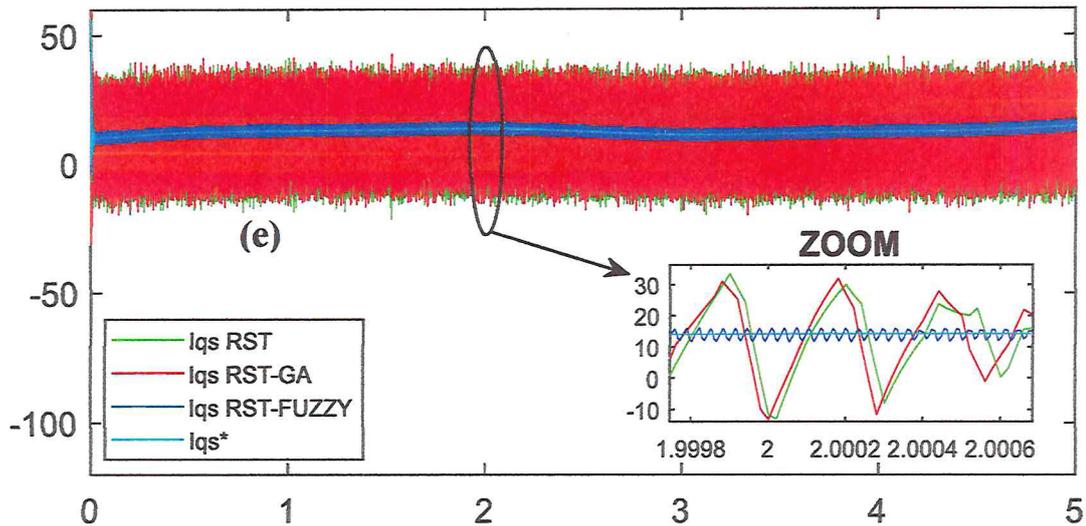


Figure III.30. Performances du système sous une vitesse de vent aléatoire à l'aide d'un contrôleur RST, RST-Génétique et RST-Fuzzy (a) vitesse de rotation (rad / s), (b) couple mécanique (Nm), (c) couple électromagnétique (N.m), (d) courant statorique direct (A) et (e) courant statorique quadratique (A).

Les figures (III.30.a), (III.30.b), (III.30.c), (III.30.d) et (III.30.e) montrent respectivement la vitesse de rotation, le couple mécanique, le couple électromagnétique et les courants statorique direct et quadratique du GSAP pour les trois algorithmes MPPT (RST, RST-AG, RST-floue adaptatif).

On constate que la vitesse de rotation est totalement confondue avec la vitesse de référence optimale après un temps très court pour l'algorithme à trois MPPT, les variations de la vitesse du générateur sont adaptées à la variation de la vitesse du vent, grâce au absence de bobinage (l'inductance augmente le temps de réponse) au niveau du rotor, ce qui le rend plus performant par rapport à plusieurs types de générateurs.

Les figures (III.30.d) et (III.30.e) montrent que le couple est l'image courante I_q , tendant à ce que le courant I_d porte la valeur presque nulle, ainsi le découplage est assuré et donc un bon fonctionnement de la commande vectorielle.

On peut également voir sur ces figures que les courbes des différentes grandeurs présentent des oscillations pour les algorithmes RST et RST-AG. Par contre l'algorithme RST avec la logique floue présente de bons résultats et sans oscillations.

III.12 Conclusion

Nous avons décrit de façon explicite les différents éléments constituant d'une éolienne et les deux grands types d'éoliennes (à axe horizontal, vertical) où on se limitera dans la suite de cette étude uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal car c'est la technologie largement dominante aujourd'hui et la plus répandue et son rendement est supérieur.

En outre, le Principe de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, dans ce titre quelques notions principales ont été décrites comme l'expression de la puissance extraite, l'évolution de la puissance en fonction de la vitesse du vent, la mise en évidence de la limite de Betz

Ainsi, nous avons présenté la modélisation de la chaîne de production éolienne dont l'aérodynamique de la turbine et aussi les systèmes électriques (générateur, convertisseur de puissance). Cette modélisation nous a permis de définir ensuite le principe de la poursuite du point de puissance maximale pour le but d'optimiser le processus de production d'électricité. Nous avons également montré comment nous pourrions optimiser la puissance fournie par une turbine éolienne à vitesse variable couplée à un GSAP.

Une étude bibliographique des méthodes de poursuite du point de puissance maximale existantes a été présentée. Cette étude a permis de montrer les besoins d'un régulateur en termes de performances, de robustesse et de flexibilité. Ce régulateur devrait assurer un bon fonctionnement aux caractéristiques maximales quelques soient les comportements aléatoires de la source et de la charge avec un haut rendement. Parmi ces régulateurs on a le régulateur polynomial RST, RST optimisé avec l'algorithme génétique et le dernier par un régulateur RST-flou adaptatif.

En effet la différence entre les trois régulateurs est peu significative en ce qui concerne le suivi de consigne, mais en termes de rapidité et robustesse on a vu la supériorité du régulateur RST-flou adaptatif.

Chapitre IV

Application du système hybride (Photovoltaïque-Eolienne) au Pompage

IV Introduction

Aujourd'hui, les systèmes énergétiques hybrides (tels l'éolien-photovoltaïque) ont connu une croissance très importante vu leurs multiples atouts ; ce qui a permis de réduire les coûts et d'améliorer les rendements de ces systèmes.

Dans un grand nombre d'applications, l'énergie hybride est tout simplement la solution la plus rentable. Parmi les applications qui nécessitent l'utilisation de l'énergie hybride (éolienne-photovoltaïque), on peut citer les systèmes isolés alimentant des résidences éloignées et les systèmes de pompage d'eau.

Le pompage d'eau hybride qui permet d'obtenir des débits nettement plus importants, apparaît comme une solution raisonnable du point de vue technique et économique [108-109].

Le schéma général du couplage direct d'un système de pompage éolien-photovoltaïque peut être représenté par la figure IV.1.

Il est constitué principalement de :

- un générateur hybride (éolienne-photovoltaïque) qui alimente le moteur.
- une motopompe qui comprend deux parties :
- un moteur électrique à courant alternatif.
- une pompe centrifuge.

IV.1 Système de conversion d'énergie hybride

Une fois tous les modèles élémentaires validés, nous avons effectué le couplage des deux chaînes, comme présenté sur la figure IV.1.

Ce système est caractérisé par deux sources énergétiques (éolienne et photovoltaïque); la turbine éolienne (WT) entraîne un générateur synchrone à aimants permanents (GSAP) qui lui-même est connecté à la charge par un redresseur commandé. Les cellules photovoltaïques (GPV) sont connectées à la charge par un convertisseur DC/DC commandé en MPPT (Maximal Power Point Tracking). Le couplage des deux systèmes est fait par l'intermédiaire d'un bus continu, comme indiqué la figure IV.1.

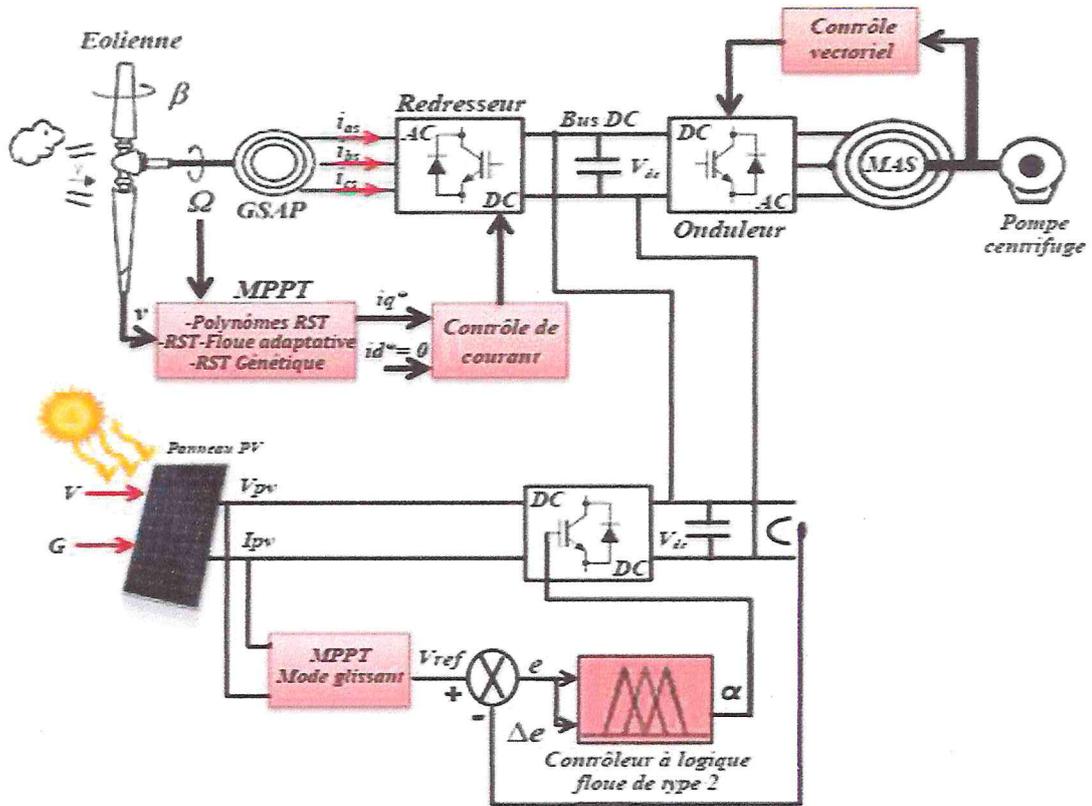


Figure IV.1 Schéma de principe du système hybride

Dans la figure IV.2 le bus à courant continu est présenté en détail et on peut voir qu'il est représenté par le condensateur C connecté aux deux systèmes.

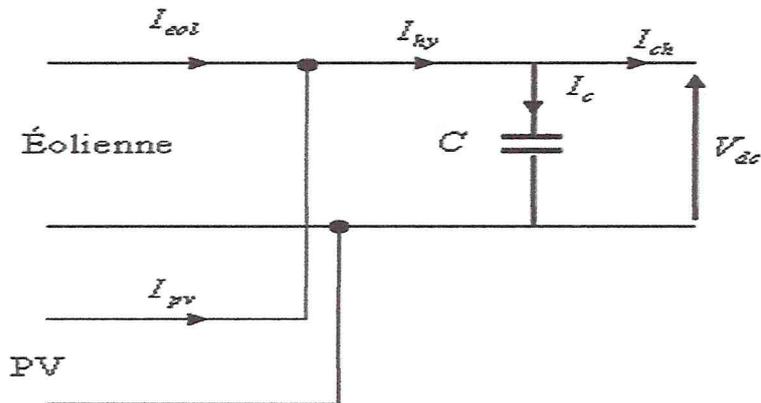


Figure IV.2 Modèle du bus à courant continu

A partir de la figure IV.2, on peut écrire l'équation suivante:

$$I_{hy} = I_{eol} + I_{PV} = I_c + I_{ch}$$

4.1

$$\text{Avec } \begin{cases} I_c = C \frac{dV_{dc}}{dt} \\ I_{ch} = \frac{V_{dc}}{R_{ch}} \end{cases} \quad 4.2$$

Il convient de mentionner que, dans cette structure, le système de conversion du vent est contrôlé par le MPPT basé sur les contrôleurs RST-Fuzzy adaptative et le système de conversion photovoltaïque est contrôlé par le MPPT basé sur le mode glissant et la tension du bus CC est régulée avec le contrôleur AFLCT2-PI.

IV.2 Un contrôleur AFLCType2-PI de tension de liaison CC

Le schéma de contrôle proposé pour la tension de liaison CC est basé sur un contrôleur de logique floue adaptative PI de type 2 et est appliqué à cette régulation pour compenser les déséquilibres de puissance réels dans des conditions de charge variables. L'idée du contrôle adaptatif PI de logique floue de type 2 est de combiner un contrôleur PI conventionnel avec FLC type 2. D'une part, il a une capacité adaptative, ce qui lui permet d'identifier automatiquement les paramètres de processus contrôlés, de définir les paramètres de contrôle et de s'adapter aux modifications des paramètres du processus. D'autre part, il présente également les avantages du contrôleur PI, tels qu'une structure simple, une grande fiabilité et une familiarité avec le personnel de conception technique.

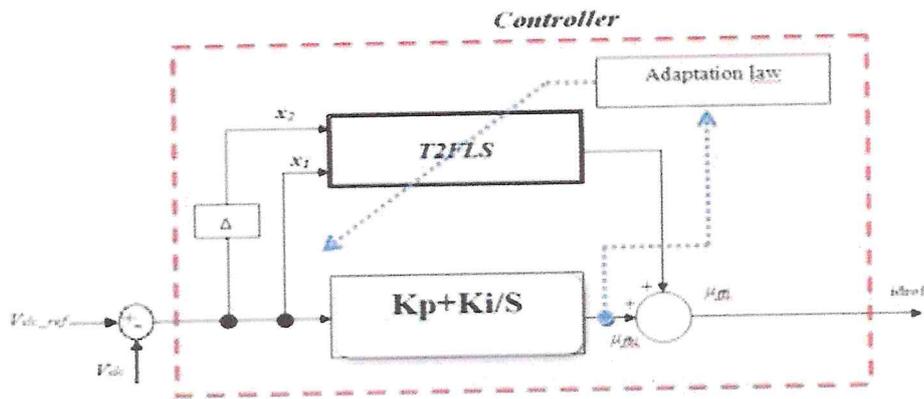


Figure IV.3 Un contrôleur PI à logique floue adaptative

Les fonctions d'appartenances pour les variables d'entrée et de sortie sont de forme triangulaire et sont représentées sur la figure IV.4.

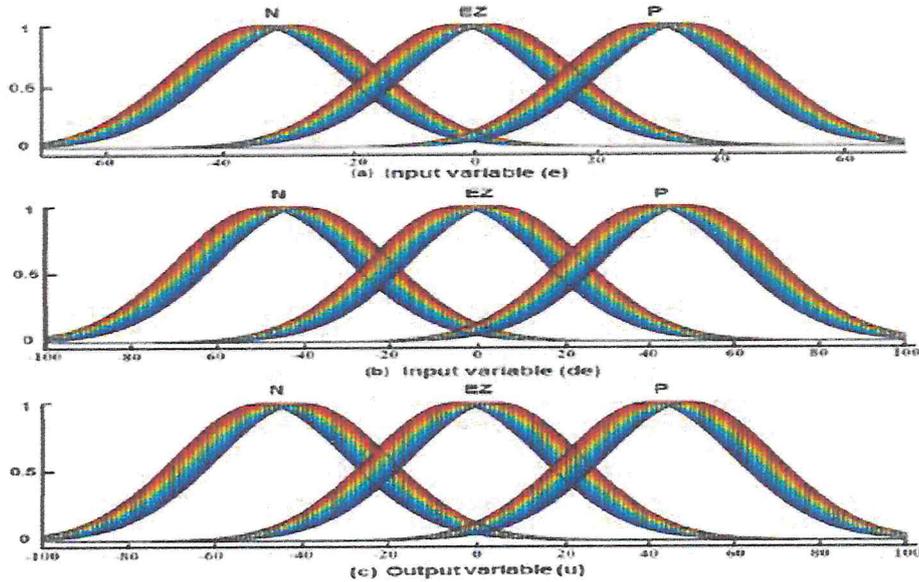


Figure IV.4 (a) Les fonctions d'appartenance pour l'erreur,(b) changement d'erreur et (c) kp et ki.

La matrice de base de règles du contrôleur AFLC Type2-PI est donnée par le tableau IV.1.

E	Δe	K_p	K_i
N	N	N	N
N	EZ	N	N
N	P	EZ	EZ
EZ	N	N	N
EZ	EZ	EZ	EZ
EZ	P	P	P
P	N	EZ	EZ
P	EZ	P	P
P	P	P	P

Tableau IV.1 Représentation des règles d'inférence.

IV.3 Modélisation de l'onduleur triphasé

Un onduleur autonome (à commande adjacente ou à M.L.I) est un convertisseur statique qui assure la transformation de l'énergie d'une source continue en une énergie alternative, qui peut-être à fréquence fixe ou variable [110]. Il constitué de cellules de commutation généralement à transistors ou à thyristor GTO pour les grandes puissances. 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 filtrée est appliquée à l'onduleur.

Le schéma structurel d'un tel onduleur triphasé à deux niveaux et de sa charge est illustré par la figure IV.5. Chaque groupe transistor - diode assemblé en parallèles forme un interrupteur double commandé (à l'ouverture et à la fermeture) dont l'état apparaît complémentaire à celui qui lui est associé pour former ainsi un bras de commutation [111].

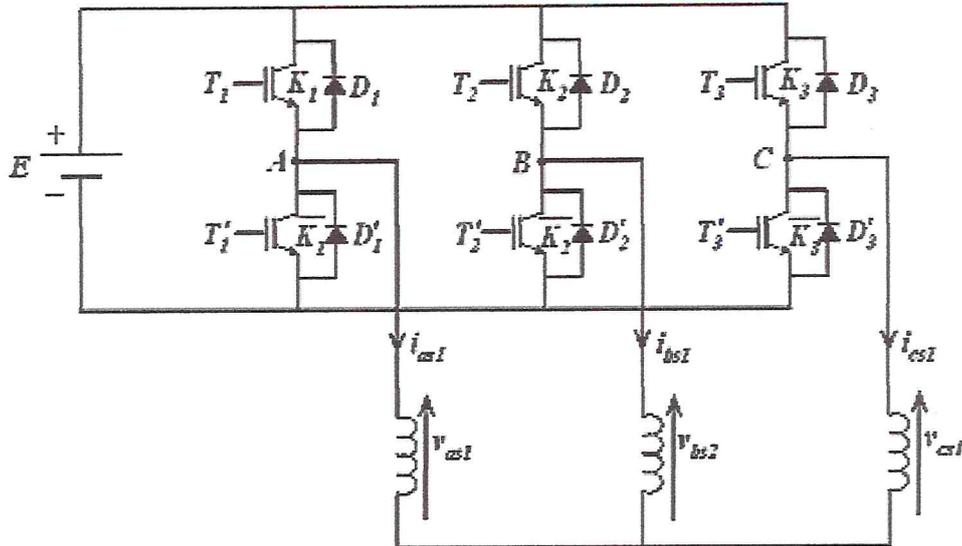


Figure IV.5 onduleur triphasé

Les couples d'interrupteurs doivent être commandés de manière complémentaire pour assurer la continuité des courants alternatifs dans la charge d'une part et d'éviter le court-circuit de la source d'autre part. Les diodes sont des diodes à roue libre assurant la protection des transistors. Avant de poser le modèle de l'onduleur triphasé, nous rappelons brièvement le contexte habituel d'hypothèses simplificatrices, désormais classiques, qui sont :

Les hypothèses simplificatrices :

- La commutation des interrupteurs est instantanée.
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable, supposés idéalisés,
- La charge est équilibrée, couplée en étoile, avec neutre isolé.

On a, donc:

Les tensions composées V_{ab} , V_{bc} et V_{ca} sont obtenues à partir de ces relations ci-dessous :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad 4.3$$

V_{ao} , V_{bo} et V_{co} sont les tensions d'entrée de l'onduleur ou tensions continues. Elles sont référencées par rapport à un point milieu « o » d'un diviseur fictif d'entrée. On peut écrire :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad 4.4$$

V_{an} , V_{bn} et V_{cn} : sont les tensions des phases de la charge (valeur alternative).

V_{no} : Tension de neutre de la charge par rapport au point fictif « o ».

Le système V_{an} , V_{bn} et V_{cn} étant équilibré, il en découle :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad 4.5$$

La substitution de 4.5 dans 4.4 aboutit à :

$$V_{no} = \frac{1}{3} \cdot (V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad 4.6$$

En remplaçant 4.6 dans 4.4, on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = +\frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co} \end{cases} \quad 4.7$$

Donc, l'onduleur de tension peut être modélisé par une matrice [T] assurant le passage continu-alternatif.

$$[V_{AC}] = [T] \cdot [V_{dc}] \quad 4.8$$

Telle que :

$$\begin{aligned} [V_{AC}] &= [V_{an} \quad V_{bn} \quad V_{cn}]^T \\ [V_{dc}] &= [V_{ao} \quad V_{bo} \quad V_{co}]^T \end{aligned} \quad 4.9$$

Donc, pour chaque bras il y a deux états indépendants. Ces deux états peuvent être considérés comme des grandeurs booléennes.

Commutation supposée idéale : $S_i = (1 \text{ ou } 0) \{i=1, 2, 3\}$.

La matrice de transfert est :

$$[T] = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \quad 4.10$$

IV.4 Application du système hybride au pompage d'eau

IV.4.1 Types de moteurs utilisés

Le moteur électrique est le deuxième élément dans le système de pompage hybride d'eau ; c'est la machine qui transforme l'énergie électrique en énergie mécanique. Il peut être à courant continu ou à courant alternatif [112]. Dans ce dernier cas, un convertisseur électronique ou un onduleur est nécessaire pour convertir le courant continu provenant d'un générateur hybride en courant alternatif. Pour cette raison, le choix d'un moteur asynchrone peut sembler, de prime abord, plus intéressant.

IV.4.2 Les pompes

On appelle pompes les machines qui réalisent l'écoulement d'un liquide en utilisant une quantité d'énergie mécanique fournie par un moteur. Cette dépense d'énergie est nécessaire parce que l'écoulement à lieu dans le sens des pressions croissantes, la pompe doit par conséquent vaincre une certaine résistance dont la nature varie suivant l'utilisation de l'appareil. Les critères qui guident le choix d'une pompe sont les suivants [113] :

- La nature du liquide pompé, viscosité, température, présence de corps solides.
- Le débit et la pression souhaités.
- L'énergie consommée.

IV.4.2.1 Type de pompe utilisée

Les configurations des systèmes de pompage se basent sur le choix de pompe utilisée, cette dernière peut être:

1. Centrifuge ou volumétrique.
2. Immergée ou en surface.

IV.4.2.1.1 Les pompes centrifuges

Les pompes centrifuges utilisent les variations de vitesse du fluide pompé pour obtenir un accroissement de pression. L'énergie mécanique d'un moteur est transmise au fluide. La vitesse donnée au fluide va donner de l'énergie cinétique à celui-ci. L'énergie cinétique est ensuite transformée en énergie de pression.

Ces pompes contiennent généralement plusieurs étages (roues à ailettes), superposées pour obtenir de grandes pressions, et peuvent fonctionner en surface et immergés.

IV.4.2.1.2 Les pompes volumétriques

Les pompes volumétriques utilisent les variations de volume du fluide pompé pour obtenir un accroissement de pression. Le fluide est d'abord aspiré par l'accroissement d'un volume puis refoulé par diminution de ce même volume. Les pompes volumétriques utilisées le plus couramment sont les pompes à pistons, à palette et à engrenage. Leurs principaux atouts sont les suivants :

- Elles sont destinées aux faibles débits (inférieur à 5 m³/h) et aux grandes hauteurs.
- Elles ont de bons rendements, et les pompes de surface sont auto-amorçantes.

IV.4.3 Constitution d'une pompe centrifuge

Une pompe centrifuge est construite pour répondre à des conditions précises de fonctionnement (débit Q à élever à une hauteur H_m). D'une façon générale, une pompe comporte, figure IV.6:

- 1- un distributeur, sorte de tubulure profilée, qui sert à conduire l'eau avec une vitesse et une direction convenable dans l'axe de la pompe.
- 2- une roue constituée par un moyeu, et portée par un arbre muni d'aubes tournant à de deux coquilles formant le corps de la pompe.
- 3- Un diffuseur fixe qui transforme l'énergie cinétique du fluide à la sortie de la roue en énergie de pression (énergie potentielle) [114].

IV.4.3.1 Le fonctionnement d'une pompe centrifuge est basé sur le principe suivant :

Lorsque la pompe est pleine d'eau, sous l'effet de la rotation de la turbine entraînée par le moteur, l'eau qui arrive dans la région axiale est projetée à la périphérie et de ce fait, engendre une dépression. Cela provoque un appel des tranches suivantes et par suite, un écoulement continu de la veine liquide. Cette dernière est recueillie par la volute ou par le diffuseur et dirigée dans la conduite de refoulement. [115]

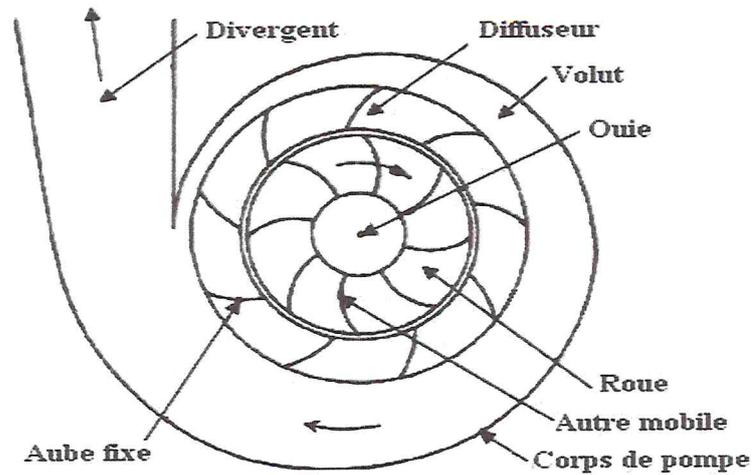


Figure IV.6 Schéma de principe d'une pompe centrifuge

IV.4.4 Présentation du modèle mathématique de la motopompe

IV.4.4.1 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone

La MAS est une machine à courant alternatif appelée aussi machine à induction caractérisée par le fait que son rotor ne tourne pas à la même vitesse que le champ tournant à l'entrefer.

L'application adéquate d'une tension de pulsation w_s aux enroulements statoriques d'une machine asynchrone, crée un champ magnétique tournant. Ce champ tourne mécaniquement à la vitesse de synchronisme $\Omega_s = w_s / p$. Le rotor de la machine tourne à une vitesse mécanique Ω inférieure à la vitesse de synchronisme ($\Omega < \Omega_s$). Le rotor perçoit donc un champ glissant à la vitesse relative $\Omega_{gl} = \Omega_s - \Omega$.

Puisque :

$$\Omega_{gl} = \Omega_s - \Omega \Rightarrow w_{gl} = w_s - w \quad 4.11$$

Alors, $w + w_{gl} = w_s$, et donc :

$$w_{gl} = gw_s \quad 4.12$$

Avec

$$\Omega_s = w_s / p, w_{gl} = p \Omega_{gl} \text{ et } w = p \Omega \quad 4.13$$

Dans le moteur asynchrone, le courant statorique sert à la fois à générer le flux et le couple. Le découplage naturel de la machine à courant continu n'existe plus. D'autre part, les variables internes du rotor à cage tel que le courant rotorique ne sont connues qu'à travers le stator, ce qui montre que sa simplicité structurelle cache une grande complexité fonctionnelle. Ceci se traduit par de fortes contraintes sur le contrôle du système donc une complexité importante de la commande [116-117].

IV.4.4.2 Hypothèses simplificatrices

La machine asynchrone étant un système dynamique non linéaire, il est nécessaire de disposer d'un modèle représentant fidèlement son comportement au niveau de ses modes électrique, électromécanique et mécanique. Dans la littérature de la commande, le modèle de PARK est généralement choisi. En effet, c'est une solution qui tient compte des hypothèses simplificatrices intrinsèques au système [118-119]:

- Le circuit magnétique est non saturé, parfaitement feuilleté au stator et au rotor, et la densité de courant peut être considérée comme uniforme dans la section des conducteurs pour négliger le phénomène d'hystérésis et les pertes dues aux courants de Foucault.
- On ne considère que la première harmonique d'espace de la distribution de force magnétomotrice créée par chaque phase du stator et du rotor.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température.
- L'entrefer est d'épaisseur uniforme.
- La constance des inductances propres.
- Le système d'alimentation est parfaitement équilibré et sinusoïdal.
- Linéarité des flux et f.m.m permet la superposition.

IV.4.4.3 Modèle du moteur

Modéliser consiste à mettre en équations les différents paramètres d'un système. A l'issue de cette opération on se trouve au problème suivant : plus le modèle se rapproche de la réalité, plus il devient complexe et demande des moyens de calcul très importants, par contre si le système est simplifié, les calculs deviennent faciles mais on s'éloigne de la réalité. Un choix judicieux consiste à idéaliser la machine et par conséquent garder les phénomènes les plus importants et négliger les phénomènes secondaires. Il est donc important que le modèle soit utilisable aussi bien en régime statique qu'en régime dynamique. Pour ce faire nous devons avoir recours à des hypothèses simplificatrices sur lesquelles se basera notre étude [116].

La machine utilisée est supposée à distribution sinusoïdale, symétrique et non saturée. Elle est alimentée en tension à travers un onduleur MLI est commandé en courant. Dans un repère lié au champ tournant, on peut écrire le modèle de la machine asynchrone sous la forme [118-119]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{ds}}{dt} = -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r}\right) i_{ds} + \omega_s i_{qs} + \frac{1-\sigma}{\sigma M T_r} \Phi_{dr} + \frac{1-\sigma}{\sigma M} p\Omega \Phi_{qr} + \frac{1}{\sigma L_s} V_{ds} \\ \frac{di_{qs}}{dt} = -\omega_s i_{ds} - \left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r}\right) i_{qs} + \frac{1-\sigma}{\sigma M T_r} \Phi_{qr} - \frac{1-\sigma}{\sigma M} p\Omega \Phi_{dr} + \frac{1}{\sigma L_s} V_{qs} \\ \frac{d\Phi_{dr}}{dt} = \frac{M}{T_r} i_{ds} - \frac{1}{T} \Phi_{dr} + (\omega_s - p\Omega) \Phi_{qr} \\ \frac{d\Phi_{qr}}{dt} = \frac{M}{T_r} i_{qs} - (\omega_s - p\Omega) \Phi_{dr} - \frac{1}{T} \Phi_{qr} \end{array} \right. \quad 4.14$$

Avec :

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s T_r} \quad ; \quad T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad ; \quad T_s = \frac{L_s}{R_s} \quad 4.15$$

Avec l'équation mécanique :

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} (C_{em} - f_v \Omega - C_r) \quad 4.16$$

IV.4.4.3.1 Principe du contrôle vectoriel de la MAS

La commande par flux orienté ou commande vectorielle introduite dès 1971 par *Blaschke* est basée sur l'électromagnétisme: «la force exercée sur un conducteur parcouru par un courant placé dans un champ magnétique est égale au produit vectoriel du vecteur courant par le vecteur champ» [120].

Il en résulte évidemment que l'amplitude de cette force sera maximale pour des intensités du courant et du champ donnés quand le vecteur courant sera en quadrature avec le vecteur champ. Si ce principe est applicable aux machines électriques à courant continu qui sont naturellement découplés, il n'en est pas de même pour la MAS où l'angle entre le champ tournant du stator et celui du rotor varie avec la charge. Ceci induit des interactions complexes et des réponses dynamiques oscillantes, comme l'indique la figure IV.7

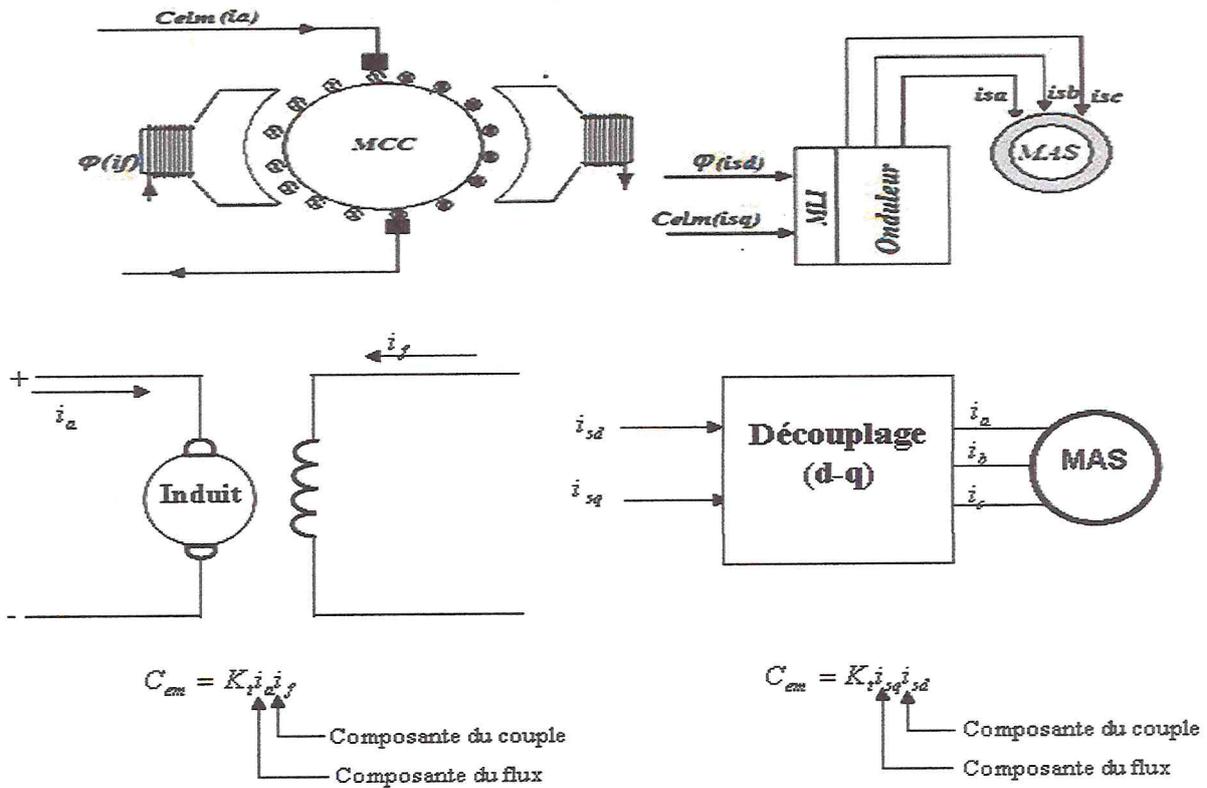


Figure IV.7 Analogie de la machine asynchrone avec la machine à courant continu dans le contrôle vectoriel.

Cette stratégie est basée sur un choix adéquat du repère de référence [121], lié au flux du rotor. La décomposition du courant statorique en i_{sd} suivant le flux du rotor et en i_{sq} en quadrature avec ce flux, permet de mettre en évidence une commande découplée où le fonctionnement est facilement comparable à celui du moteur à courant continu à excitation séparée, voir figure IV.8.

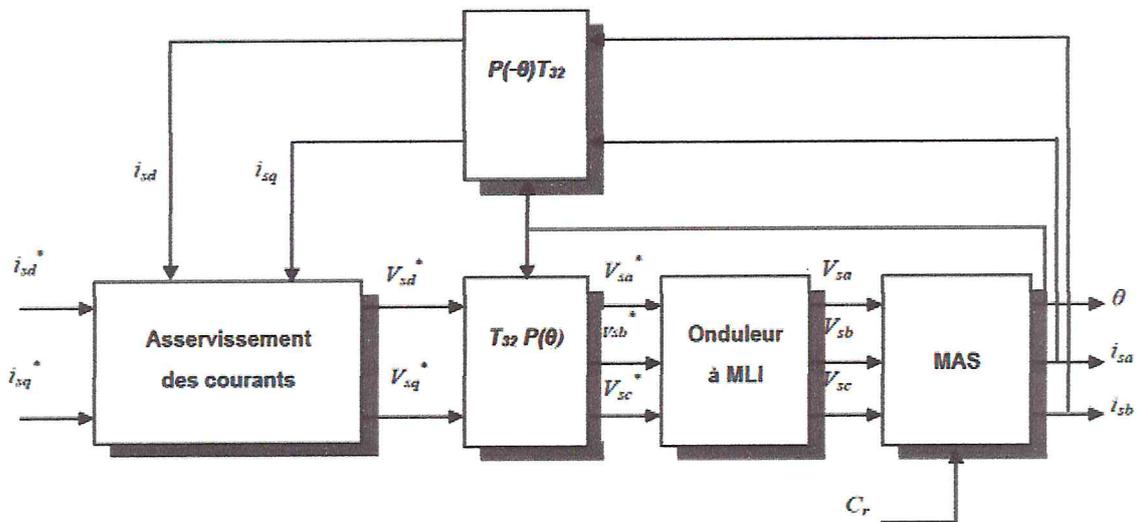


Figure IV.8 Structure générale de la commande vectorielle de la MAS.

IV.4.4.3.1.1 Commande vectorielle directe à flux rotorique orienté

Connue sous le nom de contrôle direct du flux (*DFOC*) Direct Field Oriented Control, cette méthode exige une bonne connaissance du module et de la phase du flux rotorique quel que soit le régime transitoire effectué.

Une première méthode consiste à mesurer directement le flux de la machine à l'aide de capteurs positionnés dans l'entrefer et d'en déduire l'amplitude et la phase. Le calcul du flux se base sur l'intégration des courants statoriques mesurés [122]. En outre, la connaissance de la position du flux dans les référentiels tournant (*dq*) est également nécessaire à l'élaboration des modèles du flux, du couple et des courants de référence du système de commande [123].

Les inconvénients de cette méthode sont dus au fait que les capteurs sont soumis à des conditions extrêmes (température, vibrations, etc.). De plus, la mesure est entachée de bruits dépendant de la vitesse causés par les encoches, ce qui nécessite du filtrage à fréquence variable.

Cette mesure permet de concevoir une commande vectorielle complètement découplée (flux et couple) par contre l'installation de capteurs de flux augmente le coût de fabrication. Pour cette raison, une deuxième méthode basée sur l'estimation (boucle ouverte) ou observation (boucle fermée) du flux à partir de mesures effectuées sur le montage (courants, tensions, vitesse) est généralement utilisée. La configuration générale est illustrée dans la figure IV.9.

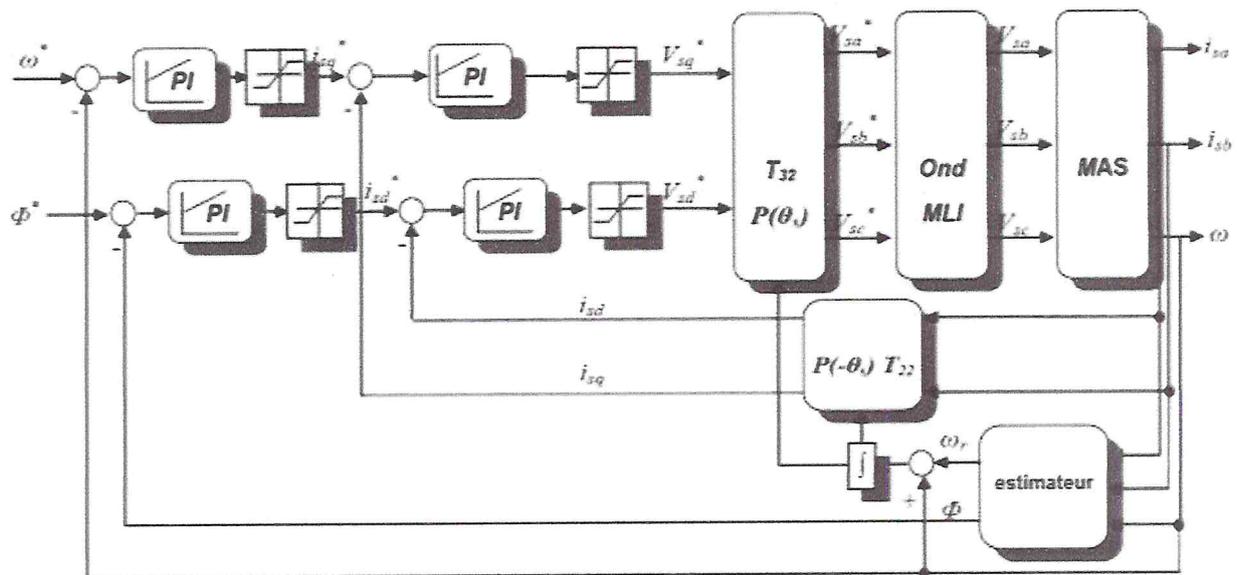


Figure IV.9 Contrôle vectoriel direct de la MAS.

IV.4.4.3.1.2 Commande vectorielle indirecte à flux rotorique orienté

Contrairement à la commande vectorielle directe, la méthode indirecte consiste à ne pas estimer l'amplitude du flux rotorique mais à utiliser directement l'amplitude de référence. L'intérêt de cette

méthode est d'utiliser uniquement des grandeurs de référence qui par définition ne sont pas bruitées. En effet, à partir d'un couple électromagnétique de référence $C_{em_{réf}}$ et du flux rotorique de référence, la méthode de commande indirecte se caractérise donc par le fait qu'aucune estimation du flux n'est nécessaire [122].

Le contrôle vectoriel de la MAS est donc un type de commande permettant de découpler le couple et le flux et inversement. Ceci consiste alors à choisir un système d'axes approprié. Ainsi, le repère de référence (dq) est lié au flux rotorique de sorte que le vecteur flux rotorique soit selon l'axe d . Les deux composantes du courant statorique i_{sd} et i_{sq} représentent les variables d'entrée d'une commande découplée du flux et du couple. Il est à noter, par ailleurs, que la commande vectorielle basée sur l'orientation du flux rotorique est la plus utilisée du fait qu'elle permet l'élimination de l'influence des réactances de fuite rotorique et statorique [124-125].

Dans un référentiel lié au champ tournant, les équations de la machine s'écrivent comme suit:

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \Phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} - \omega_s \Phi_{sd} \\ 0 = R_r i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - \omega_r \Phi_{rq} \\ 0 = R_r i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} - \omega_r \Phi_{rd} \end{cases} \quad 4.17$$

En imposant, $\Phi_{rq} = 0$, les équations de Park données en 4.17 débouchent sur les propriétés suivantes:

- L'axe d est aligné systématiquement sur le vecteur flux rotorique tel que $\Phi_{rd} = \Phi_r$;
- Si le moteur fonctionne à flux rotorique constant, la composante i_{rd} du courant rotorique est toujours nulle. Cette caractéristique est vraie car nous avons pour $\Phi_{rq} = 0$:

$$\begin{cases} \Phi_{rd} = \Phi_r \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - \omega_r \Phi_{rq} = 0 \end{cases} \quad 4.18$$

- L'évolution du couple dans le moteur est guidée par la composante i_{rq} et qui peut, à son tour, être contrôlé par i_{sq} car:

$$\Phi_{rq} = M_{sr} i_{sq} + L_r i_{rq} = 0 \quad 4.19$$

Ceci conduit à écrire:

$$i_{rq} = -\frac{M_{sr}}{L_r} i_{sq} \tag{4.20}$$

- Dans ces conditions, l'expression du couple développé par le moteur devient:

$$C_{em} = p \cdot \frac{M_{sr}}{L_r} \Phi_r \cdot i_{sq} \tag{4.21}$$

Ce type de commande conduit à établir un modèle mathématique du moteur qui prend la forme donnée en 4.22. Ainsi, les expressions 4.22 ont servi pour développer le schéma général de contrôle vectoriel indirect à flux rotorique orienté.

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = R_s i_{sd} + \sigma L_{sc} \frac{di_{sd}}{dt} + \frac{M_{sr}}{L_r} \frac{d\Phi_r}{dt} - \sigma \omega_s L_{sc} i_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \sigma L_{sc} \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_s \frac{M_{sr}}{L_r} \Phi_r + \sigma \omega_s L_{sc} i_{sd} \\ T_r \frac{d\Phi_r}{dt} + \Phi_r = M_{sr} i_{sd} \\ \omega_r = \frac{M_{sr}}{T_r \Phi_r} i_{sq} \end{array} \right. \tag{4.22}$$

Le schéma bloc de la commande vectorielle indirecte appliquée à la machine asynchrone est présenté dans la figure IV.10.

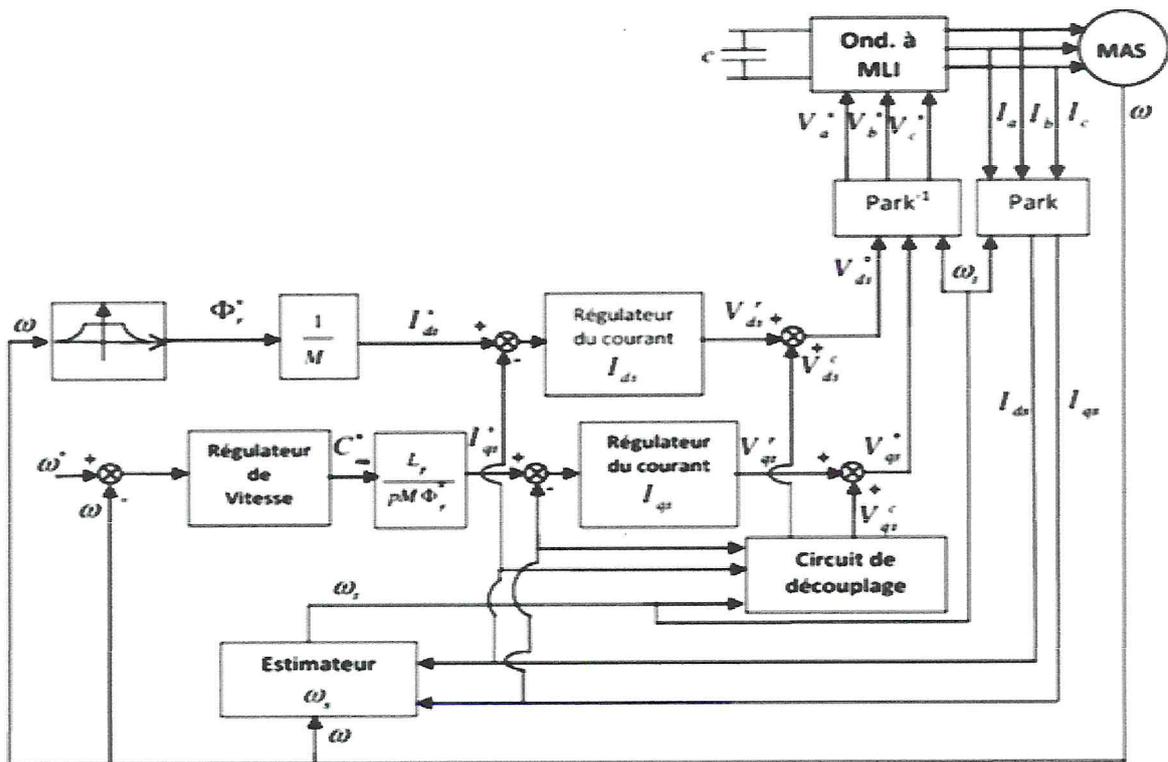


Figure IV.10 Schéma bloc de la commande vectorielle indirecte de la MAS [125]

IV.4.4.4 Modèle de la pompe centrifuge

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge est caractérisé par une surface ayant pour équation :

$$F(H, Q, \omega) = 0 \quad 4.23$$

Où considérait généralement, une variation de la hauteur comme fonction du débit, et où la vitesse ω est considérée comme un paramètre [126].

IV.4.4.4.1 Caractéristique hauteur – débit

La hauteur H créée par la pompe en fonction du débit Q est donnée par:

$$H = H - \Delta H \quad 4.24$$

Où ΔH sont les pertes par frottement ; ces pertes sont exprimées par :

$$\Delta H = K_{fr} Q^2 \quad 4.25$$

K_{fr} : Coefficient de perte de charge relatif à la pompe.

La modification de la caractéristique $H(Q)$ pour d'autres vitesses d'entraînement s'effectue par l'utilisation des lois de similitude ci-après [127]:

$$\frac{Q}{Q_n} = \frac{\omega}{\omega_n} \quad 4.26$$

$$\frac{H}{H_n} = \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2$$

La relation liant la hauteur d'eau au débit de la pompe est donnée par :

$$H_m = C_1 \omega^2 - C_2 Q \omega - C_3 Q^2 \quad 4.27$$

Où : C_1 , C_2 et C_3 sont des constantes liées à la géométrie de la pompe.

IV.4.4.4.2 Caractéristique couple vitesse

La pompe centrifuge est caractérisée principalement par un couple nécessaire (utile) pour l'entraînement de la pompe proportionnel au carré de sa vitesse.

$$C_p = K_p \omega_m^2 \quad 4.28$$

Où :

C_p : Le couple utile pour l'entraînement de la pompe.

K_p : Constante qui dépend de la pompe.

IV.4.4.4.3 Les avantages et les inconvénients des pompes centrifuges

IV.4.4.4.3.1 Les avantages

- Construction simple en générale, une seule pièce en mouvement: le rotor [128]
- Prix peu élevé.
- Encombrement réduit.
- Jeu assez large, donc facilité de manipuler les liquides contenant des solides en suspension.
- Entretien en générale peu couteux.
- Peu d'influence de l'usure ou la corrosion sur les caractéristiques.
- Grand flexibilité d'utilisation.
- Ajustement automatique du débit à la pression.
- Puissance absorbée limite donc sans danger.

IV.4.4.4.3.2 Les inconvénients

- Limitation de la viscosité.
- En effet la pompe centrifuge est limitée pratiquement à des viscosités de l'ordre de (100cst: centistokes) et son rendement chute rapidement au-delà de cette valeur.
- Débit légèrement instable, dans les basses valeurs: difficulté de contrôle le débit.

IV.5 Résultats de simulation et discussion

Pour voir le comportement dynamique du système hybride global appliqué au pompage d'eau, on va baser sur le système présenté par la structure de la figure IV.1.

Il convient de mentionner que le système de conversion du vent dans cette structure est contrôlé par RST-Floue adaptative contrôleur MPPT, et le système de conversion photovoltaïque est optimisé par SMC MPPT et la régulation de la tension du bus CC basée sur un contrôleur AFLC Type2-PI.

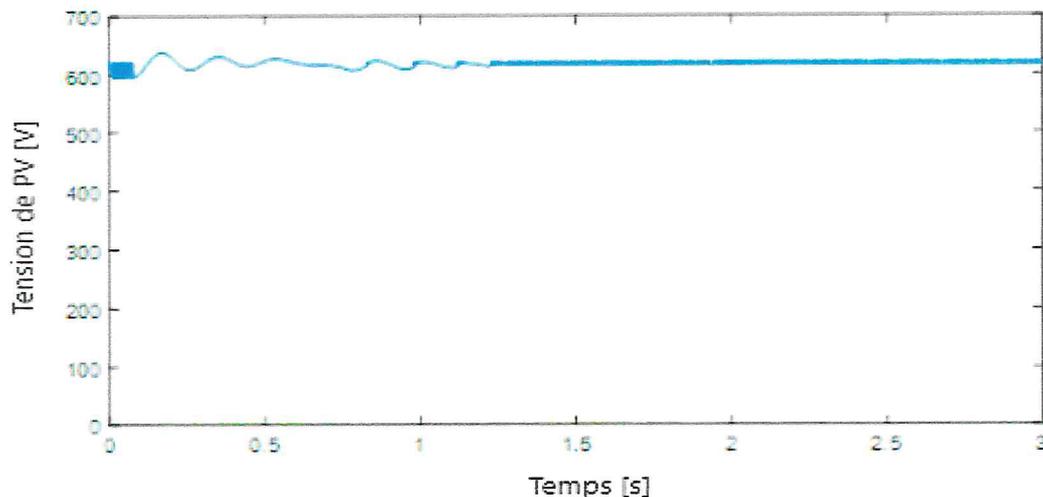


Figure IV.11 Tension de bus CC à base de MG.

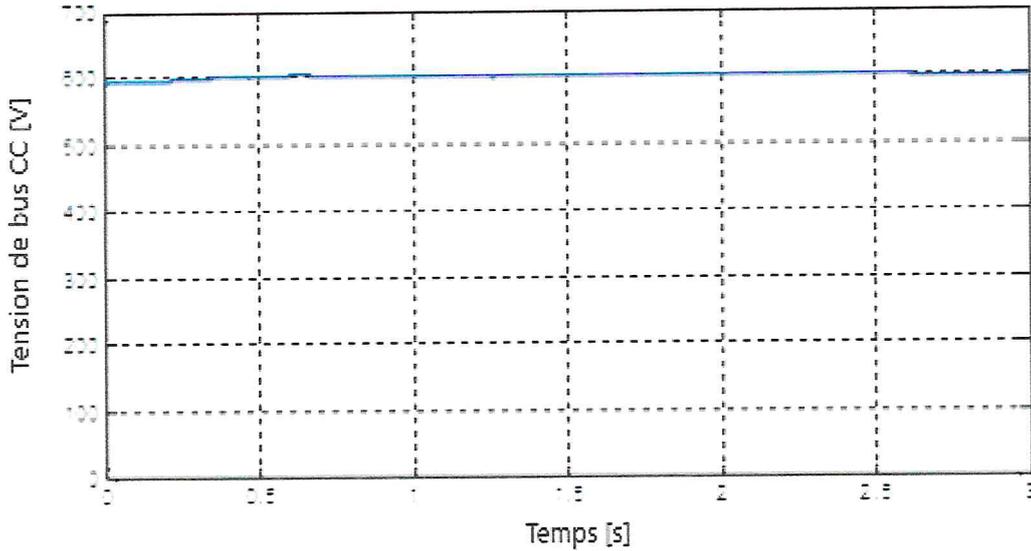
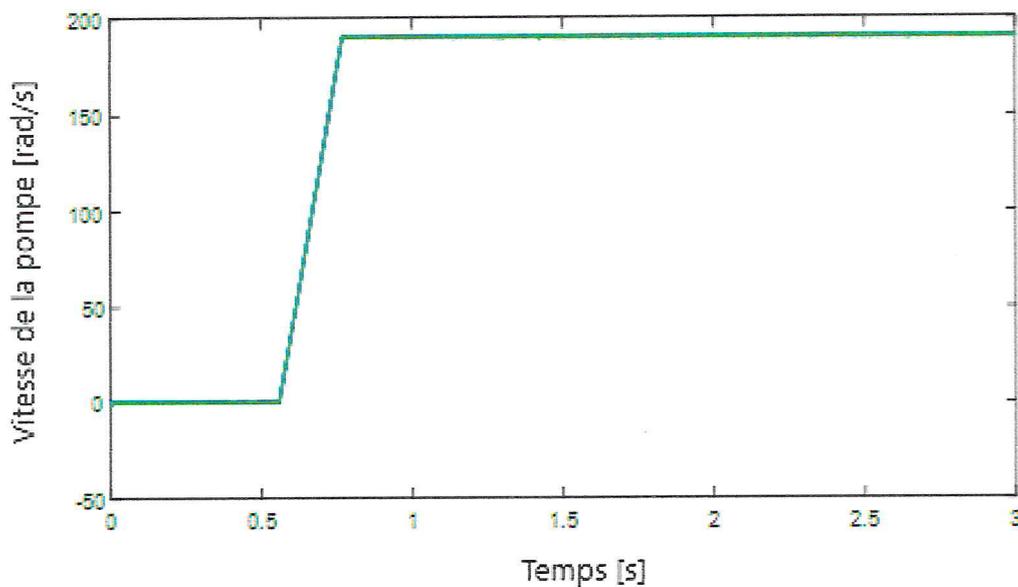


Figure IV.12 Tension de bus CC à base de AFLC Type2-PI.

Les deux figures IV.11 et IV.12 présentent l'allure de la tension de bus continu, contrôlée par deux algorithmes de commande, mode glissant et AFLC Type2-PI. On peut bien constater que le régulateur AFLC Type2-PI donne de bonnes performances en termes de rapidité, stabilité et précision. On remarque aussi que l'allure de la tension continue par cette commande est sans oscillations comparativement à celle obtenue avec le régulateur MG. Ce qui montre l'efficacité du régulateur AFLC Type2-PI.



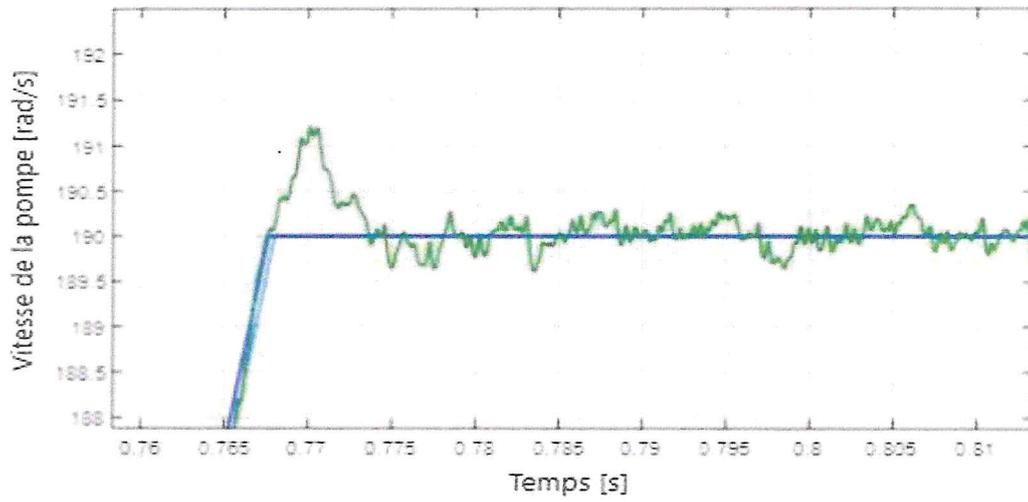


Figure IV.13 Vitesse de la pompe et son zoom.

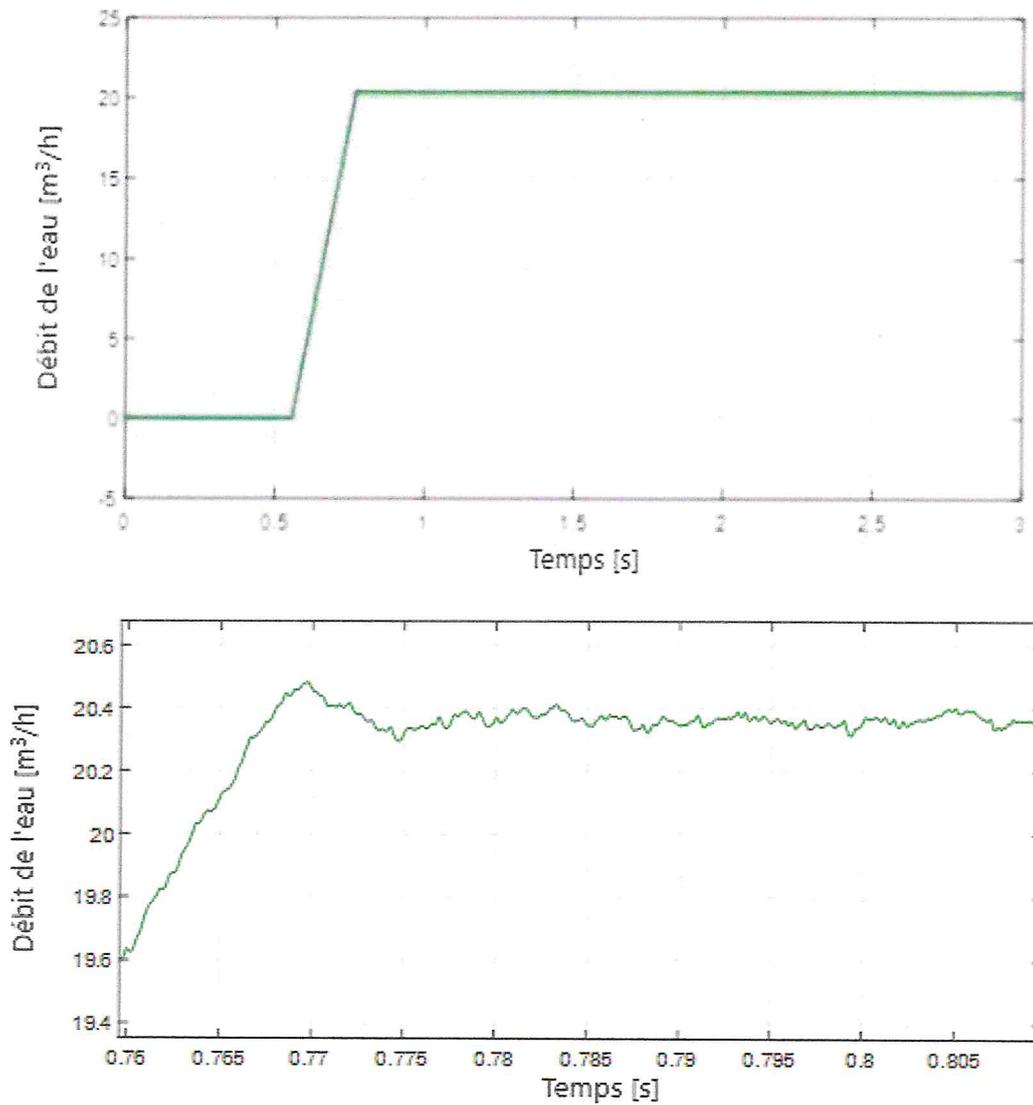


Figure IV.14 débit de l'eau et son zoom.

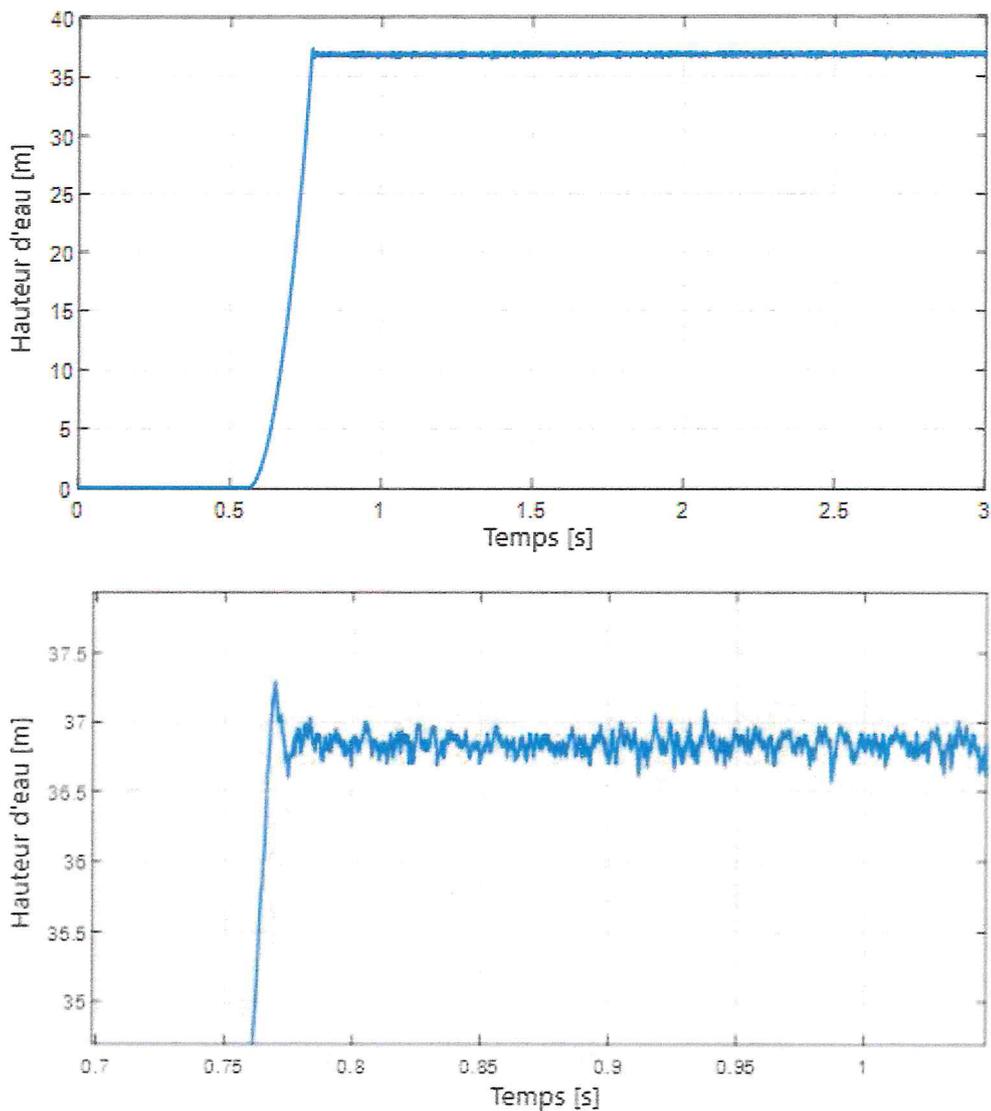
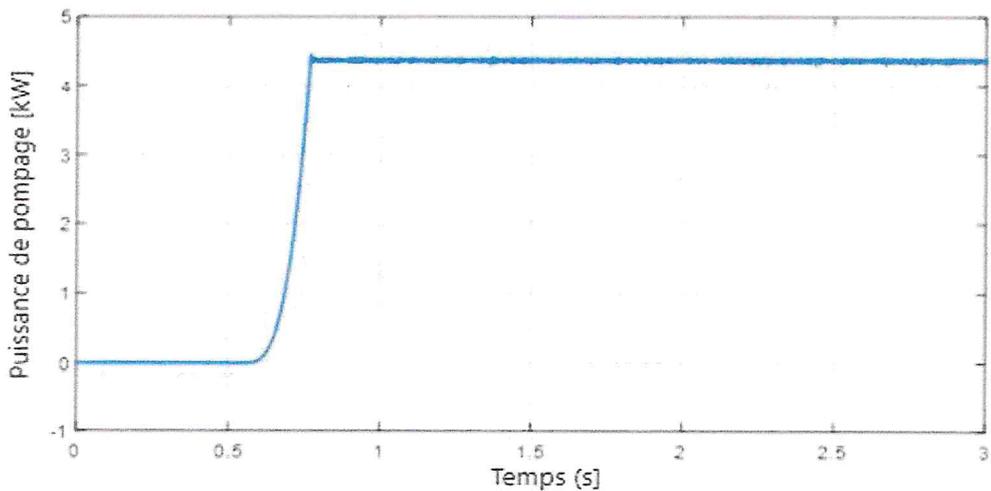


Figure IV.15 Hauteur de l'eau et son zoom.



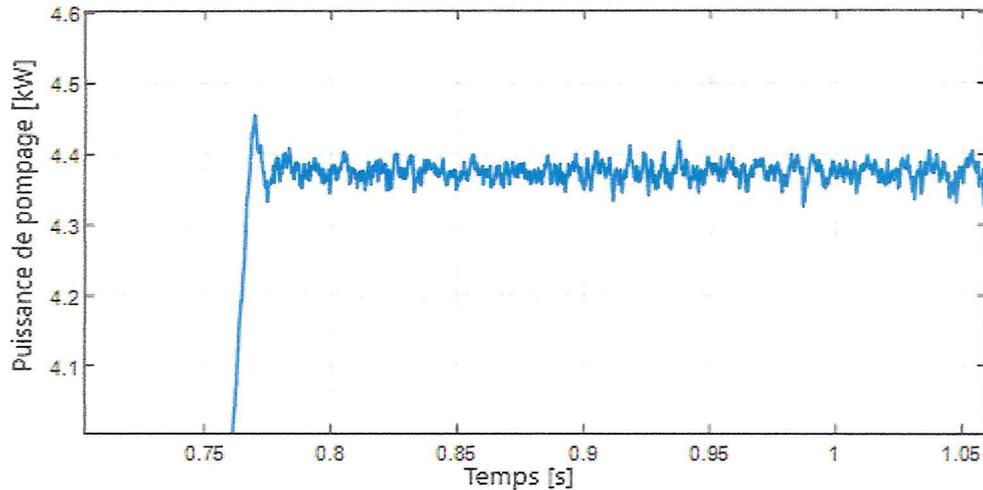


Figure IV.16 Puissance de pompage et son zoom.

Les figures IV.13, IV.14, IV.15 et IV.16 montrent respectivement la vitesse de la pompe, le débit d'eau, la hauteur de l'eau pompée et la puissance de pompage. D'après ces résultats, on peut observer que la vitesse de la pompe se stabilise après un court transitoire qui est dû aux constantes de temps de la machine ainsi qu'aux temps de réponse du MPPT.

Il en est de même pour les autres grandeurs (débit d'eau, hauteur d'eau et puissance de pompage) car toutes ces quantités sont liées à la vitesse et donc toute variation de la vitesse entraînera une variation de ces quantités.

Ces résultats montrent que l'amorçage de la pompe et le démarrage du pompage nécessitent une vitesse spécifique qui dans notre cas est d'environ 190 tr / min.

IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre on a étudié un système hybride appliqué au pompage d'eau. La pompe est entraînée par un moteur asynchrone contrôlé par la commande vectorielle.

La tension de bus continu a été régulée par deux commandes, mode glissant et AFLC Type2-PI, ce qui nous permet de conclure que la deuxième commande est plus performante que celle de mode glissant.

On peut conclure que toutes les grandeurs du système hybride et de la pompe se stabilisent dans leurs régimes permanent après un court transitoire qui est dû aux constantes de temps de la machine ainsi qu'aux temps de réponse des différents algorithmes d'optimisation et de commande utilisés.

L'utilisation de ce genre de système hybride renouvelables dans le pompage est très avantageux en termes de la réduction des émissions de gaz à effet de serre (CO_2) ou toxiques, l'amélioration de l'autonomie, la réduction des coûts, la prolongation de la durée de vie des systèmes de pompage et la sûreté de fonctionnement.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans le contexte mondial pour réduire l'émission de gaz à effet de serre et l'échauffement de la planète, le besoin de l'énergie renouvelable est indispensable. La production de l'énergie renouvelable, surtout éolienne et photovoltaïque, est de plus en plus importante et alors de nouvelles constructions apparaissent.

Nous nous sommes intéressés dans cette thèse à l'application des techniques de commande et d'optimisation avancées et intelligentes d'un système hybride de conversion d'énergie électrique composé des ressources renouvelables (éolienne et photovoltaïque), pour des applications au pompage d'eau.

Il a pour objectif d'une part de développer de nouvelles techniques et approches de commande permettant d'augmenter davantage les performances de ce système, en terme de suivi de consignes et de rejet de perturbations, et robustes vis-à-vis des incertitudes paramétriques. En outre, il a les objectifs généraux concernant les énergies renouvelables à savoir : la réduction des émissions de gaz à effet de serre (CO₂) ou toxiques, l'amélioration de l'autonomie, la réduction des coûts, la prolongation de la durée de vie et la sûreté de fonctionnement.

Tout d'abord on a dressé un rappel sur les différents types des énergies renouvelables suivi par un état de l'art sur les systèmes hybrides de génération d'énergie électrique ainsi que les différents éléments qui les construisent.

Dans ce contexte, nous avons modélisé chaque bloc de la chaîne de conversion d'énergie du système ainsi que la commande de chaque convertisseur. Le problème qui se pose est généralement une exploitation non optimale du système. Alors une adaptation est nécessaire pour maximiser le rendement du système d'une part et pour réduire le coût du système d'autre part. Pour parvenir à cet objectif, nous avons opté pour différentes techniques d'optimisation, les modèles de simulation pour ce système hybride ainsi que pour les éléments d'interconnexion ont été développés sous environnement MATLAB/Simulink.

Concernant le générateur photovoltaïque, on a commencé par la modélisation du comportement d'un panneau photovoltaïque sous l'environnement Matlab-Simulink. Ensuite, nous avons entamé la description de l'étage d'adaptation du convertisseur DC-DC le plus utilisée (boost ou hacheur survolteur). Concernant l'optimisation de notre système photovoltaïque, nous avons proposé un contrôleur de poursuite du point de puissance maximale en combinant la simplicité et la flexibilité de la recherche extrême d'une technique intelligente hybride basée sur le mode glissant et la logique floue type 2 (mode glissant-floue type 2), le grand avantage de cette combinaison est que notre contrôleur atteint rapidement

Conclusion générale

le point de fonctionnement optimal . Il s'adapte à toutes conditions de fonctionnement presque instantanément en prenant en compte les incertitudes du système. En conséquence, le panneau extrait toujours la puissance maximale quelques soient les variations de condition climatique et/ou d'exploitation.

Pour la chaîne éolienne, on a représenté le modèle avec tous ses éléments : rotor éolien, générateur à aimants permanents et le redresseur commandé.

Pour la maximisation de l'énergie contenue dans le vent, une recherche opérationnelle du point de puissance maximum (MPPT) a été présentée en utilisant trois types de régulateurs intelligents basés sur (RST classique, RST-floue adaptative, RST optimisé par les algorithmes génétiques).

On a ensuite procédé à une analyse en simulation des performances dynamiques et de la robustesse des régulateurs proposés. Les résultats de cette analyse se résument aux points suivants :

- Toutes les stratégies de commandes utilisées indiquent que les régulateurs proposés ont de meilleures performances dynamiques et sont beaucoup plus robustes.
- En d'autres termes, les résultats de simulation ont montré : un comportement remarquable du contrôleur RST-floue adaptatif en régulation et en poursuite, un rejet de perturbation nettement mieux que pour les autres régulateurs.

Cependant, il n'est pas question d'obtenir, à l'aide de ces régulateurs, des performances très supérieures à celles des contrôleurs classiques convenablement choisis et optimisés. Ce qui est intéressant, c'est la manière dont s'opèrent la conception, la mise au point et le réglage de ces nouveaux régulateurs. Ces techniques conviennent alors particulièrement aux cas des systèmes complexes à modéliser.

Enfin, nous avons pu injecter la puissance électrique, extraite à la pompe centrifuge via un onduleur de tension triphasé, en régulant la tension du bus continu.

Le pompage d'eau est une des applications envisagée et étudiée ici avec une charge passive. Les résultats de simulation obtenus ont permis de montrer un bon comportement énergétique du système complet.

Enfin, des perspectives de ce travail qui peuvent être distinguées dans le but d'améliorer ce genre de systèmes sont citées ci-dessous:

Conclusion générale

- Améliorer la méthodologie du dimensionnement optimal en ajoutant la pile à combustible, consommation d'hydrogène et les super-condensateurs à l'algorithme d'optimisation.
- Proposer et comparer une autre commande pour la gestion d'énergie pour ce type du système.
- Application d'autres structures des convertisseurs statiques tels que les convertisseurs multicellulaires.
- Envisager une réalisation pratique puis une implantation en site isolé du système hybride proposé.

Annexes

Annexe A

Logique floue

A.1 La logique floue

La logique floue est une technique utilisée en intelligence artificielle. Son domaine d'application est aussi varié que la robotique, la gestion de la circulation routière, le contrôle aérien, l'environnement (météorologie, climatologie, sismologie, analyse du cycle de vie), la médecine (aide au diagnostic) etc. . . Ces bases théoriques ont été formulées en 1965 par le professeur Lotfi A. Zadeh.

La logique floue associe à un concept imprécis, une fonction d'appartenance à un ensemble. Généralement, c'est une fonction numérique continue qui exprime un point de vue subjectif d'une personne sur la variabilité du concept.

Il a été montré qu'une telle fonction est utile pour représenter l'influence des modificateurs linguistiques, comme "très, plus ou moins", "peu" sur la signification des concepts [129].

A.1.1 Variables linguistiques et les ensembles flous

La description imprécise d'une certaine situation, d'un phénomène ou d'une grandeur physique ne peut se faire que par des expressions relatives ou floues à savoir: grand, petit, positif, négatif, nul, chaud, froid, etc. Ces différentes classes d'expressions floues dénommées ensembles flous constituent ce que on appelle les variables linguistiques.

Afin de pouvoir traiter numériquement ces variables linguistiques (normalisées généralement sur un intervalle bien déterminé appelé univers de discours), il faut les soumettre à une définition mathématique à base de fonctions d'appartenance qui montrent le degré de vérification de ces variables linguistiques relativement aux différents sous-ensembles flous de la même classe.

Un sous-ensemble flou A de X (communément appelé univers de discours) est défini par une fonction d'appartenance $\mu_A(x)$ qui associe à l'élément x , son degré d'appartenance au sous-ensemble A , compris entre 0 et 1. On note alors :

$$\mu : \begin{cases} X \rightarrow [0,1] \\ x \rightarrow \mu_A(x) \end{cases}$$

Si on adopte la notation suivante, pour représenter un sous-ensemble flou A , qui indiquera pour tout élément x de X son degré d'appartenance $\mu_A(x)$ au sous-ensemble A :

Annexes

$$\text{Si } X \text{ est fini } \left\{ A = \sum_{x \in X} \mu_A(x) / x = \mu_A(x_1) / x_1 + \mu_A(x_2) / x_2 + \dots \right.$$

$$\text{Si } X \text{ est fini } \left\{ A = \int_X \mu_A(x) / x \right.$$

Dans les deux expressions précédentes, le signe intégral et sommation ne désignent pas une intégration ou une addition arithmétique, respectivement, mais une collection de tous les points x appartenant à X avec leur fonction d'appartenance $\mu_A(x)$.

Nous rappelons dans cette partie quelques propriétés essentielles qui sont associées aux sous-ensembles flous.

• **Hauteur, $\text{hgt}(A)$:** On définit la hauteur d'un sous-ensemble A de X , par le plus fort degré d'appartenance d'un élément x à A :

$$\text{hgt}(A) = \sup_{x \in X} (\mu_A(x))$$

Afin de normaliser un sous-ensemble flou, on posera généralement $\text{hgt}(A)=1$.

• **Support, $\text{supp}(A)$:** Le support est défini comme l'ensemble des éléments de X appartenant au sous-ensemble A :

$$\text{supp}(A) = \{x \in X / \mu_A(x) \neq 0\}$$

L'ensemble flou dont le support est *Singleton*, est représenté par une fonction d'appartenance de forme particulière appelé le singleton. Elle est définie par $\mu_A(x)=1$ si $x = x_0$ et 0 sinon.

• **Noyau, $\text{noy}(A)$:** Le noyau d'un sous-ensemble flou A de X est défini comme l'ensemble des éléments x de X appartenant à A avec un degré d'appartenance égal à 1:

$$\text{noy}(A) = \{x \in X / \mu_A(x) = 1\}$$

La figure 1.16 illustre ces trois propriétés.

• **Coupe de niveau, α -cut (A) :** pour toute valeur α de $[0, 1]$, la coupe de niveau α d'un sous ensemble flou A de X est définie par le sous-ensemble:

$$\alpha\text{-cut}(A) = \{x \in X / \mu_A(x) \geq \alpha\}$$

• **Sous-ensemble flou convexe:** un sous-ensemble flou sera convexe s'il vérifie:

$$\forall x_1, x_2, x_3 \in X \text{ si } x_1 \leq x_2 \leq x_3 \text{ alors } \mu_A(x_2) \geq \min(\mu_A(x_1), \mu_A(x_3))$$

Annexes

Pour l'application de la commande floue, on utilisera surtout des sous-ensembles flous convexes.

• **Partition floue**: on définit n_A sous-ensembles flous (A_i) de X . $(A_1, A_2, \dots, A_{n_A})$ est appelée une partition floue de X :

$$\forall x \in X, \sum_{i=1}^{n_A} \mu_{A_i}(x) = 1$$

Un exemple est donné dans la figure A.1

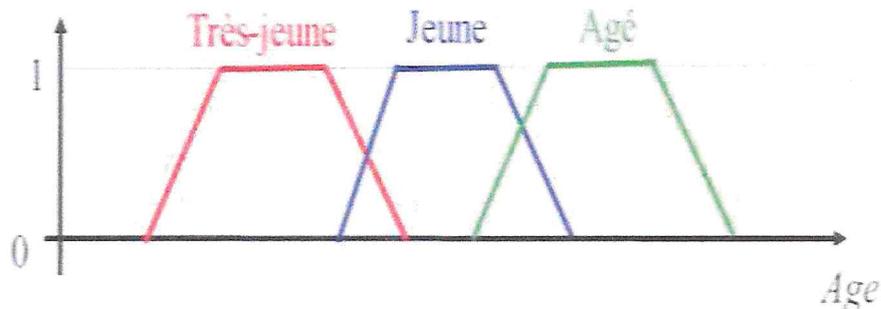


Figure A.1 Partition floue de la variable linguistique "Age"

A.1.2 Sous-ensembles flous

Les sous-ensembles flous sont une classe d'objet où la transition entre l'appartenance et le non appartenance à l'ensemble n'est pas abrupte mais graduelle. Un sous-ensemble floue A , est défini par :

- Un intervalle convexe A de, auquel est associé un label linguistique (e.g. "Très-jeune", "Jeune", "Agé").
- Une fonction réelle $\mu_A(x)$ à valeurs dans $[0, 1]$, qui donne le degré d'appartenance d'une variable x au sous-ensemble floue $\mu_A(x)$. Cette fonction modélise les situations où un même élément peut être classé dans plusieurs catégories avec des degrés divers [131].

A.1.3 Fonction d'appartenance

Afin de permettre un traitement numérique des variables linguistiques dans la prise de décisions floues sur calculateur, une définition des variables linguistiques à l'aide de fonctions d'appartenance s'impose. Dans ce contexte, nous associons à chaque valeur de la variable linguistique une fonction d'appartenance désignée par $\mu_A(x)$, qui sera désignée par le degré ou le facteur d'appartenance. Il est à noter que l'ensemble des éléments de x pour lesquels $\mu_A(x) > 0$, est appelé "support de A ". Le plus souvent, nous utilisons pour les fonctions d'appartenance les fonctions suivantes (figure A.2) [132] :

- **Fonction triangulaire** : Elle est définie par trois paramètres a, b, c qui déterminent les coordonnées des trois sommets.

Annexes

$$\mu(x) = \text{Max} \left(\text{Min} \left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b} \right), 0 \right)$$

• Fonction trapézoïdale : Elle est définie par quatre paramètres a, b, c, d :

$$\mu(x) = \text{Max} \left(\text{Min} \left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{c-x}{d-x} \right), 0 \right)$$

• Fonction gaussienne : Elle est définie par deux paramètres (σ , μ) :

$$\mu(x) = \exp \left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \right)$$

• Fonction sigmoïdale : Elle est définie par deux paramètres a, c :

$$\mu(x) = \left(\frac{1}{1 + \exp(a(x-c))} \right)$$

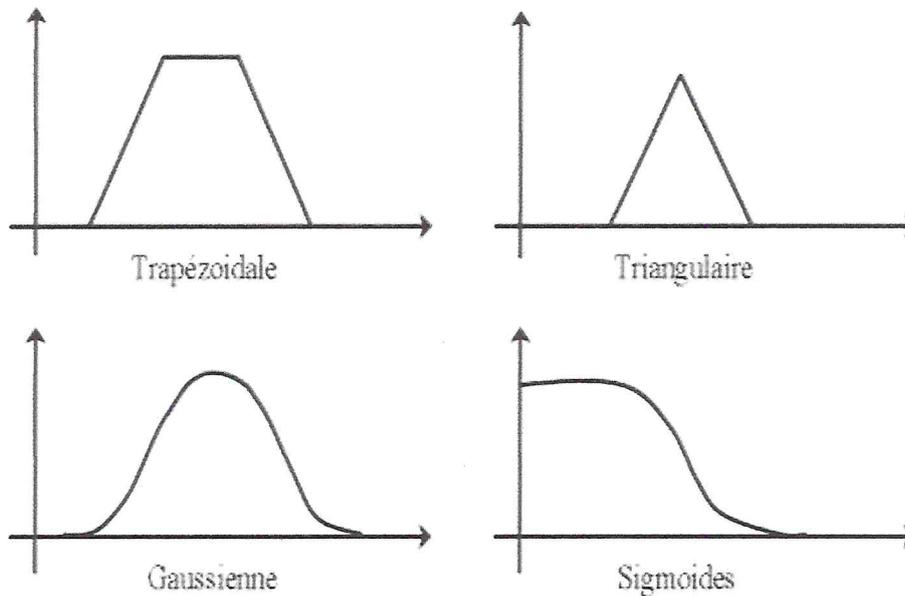


Figure A.2 Partition floue de la variable linguistique "Age"

A.1.4 Base de règles floues

Nous définissons une règle floue comme une proposition floue correspondant à la mise en relation de deux propositions floues par une implication. Une proposition floue est dite élémentaire, si elle n'est constituée que d'un prédicat de la forme "x est A". La composition de deux ou plusieurs variables linguistiques constitue une proposition floue. L'expression linguistique générale d'une règle peut être formalisée de la manière suivante :

Annexes

Si x est A alors y est B.

Où A et B sont des sous-ensembles flous, x et y sont des variables linguistiques.

Nous appelons prémisse, la partie condition de la règle (x est A) et conclusion, la seconde partie (y est B).

D'une manière générale, nous pouvons combiner des propositions floues de type "x est A" par des opérateurs logiques de conjonction et de disjonction. Nous pouvons alors construire des règles floues plus complexes, dont la partie prémisse et la partie conclusion correspondent à une combinaison de propositions, par exemple [133] :

Si x_1 est A1 et x_2 est A2 alors y est B.

A.2 Système d'inférence floue

La figure A.3 illustre la structure générale du cœur d'un système d'inférence floue à deux entrées et une sortie.

Nous pouvons noter que le calcul de la sortie y s'effectue à partir de trois étapes fondamentales [130] :

- Une interface de Fuzzification ;
- Un mécanisme d'inférence (règles) ;
- Une interface de Défuzzification.

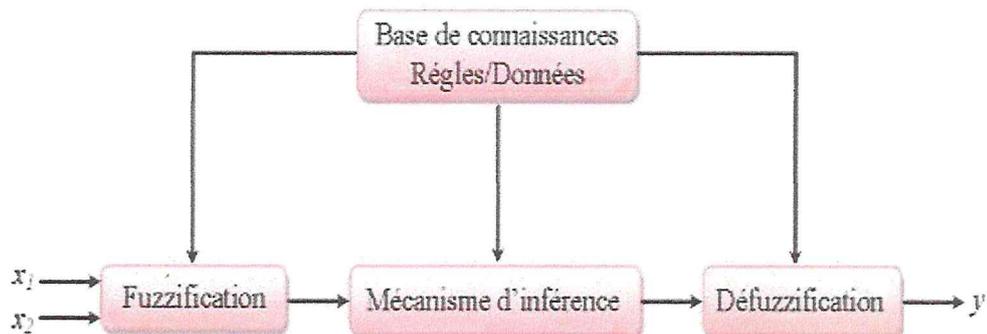


Figure A.3 Structure interne d'un système d'inférence floue.

A.2.1 Fuzzification

La fuzzification est la traduction des valeurs numériques relatives aux entrées du système en termes d'appartenances à des sous-ensembles flous pour pouvoir appliquer les règles. A une variable, nous associons les degrés d'appartenances correspondant à chaque sous ensemble ou (ce qui dépend bien sûr de la description floue adoptée) [131].

A.2.2 Inférence floue

L'inférence floue est l'application de la caractérisation symbolique du système aux règles floues et la déduction d'un certain nombre de résultats locaux ; également exprimés sous forme symbolique concernant les variables de sortie du système. Le but de cette étape est d'arriver à déterminer des sorties floues ; en partant d'entrées floues et en utilisant une base de règles [149]. Pour pouvoir utiliser cette base de règles, nous avons besoin de trois opérateurs, mathématiques, pour réaliser la conjonction (ET), l'implication (Si.....Alors) et l'agrégation (Sinon).

A.2.3 Défuzzification

Elle a pour but l'obtention d'une valeur numérique pour chaque variable de sortie à partir des valeurs de sortie des différentes règles. Parmi les nombreuses possibilités pour réaliser cette étape, nous pouvons citer [133] :

- **La méthode du centre de gravité :**

C'est la méthode de défuzzification la plus courante. L'abscisse du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultant de l'inférence correspond à la valeur de sortie du régulateur.

$$y_0 = \frac{\sum_{i=0}^n U_i(y_i) y_i(i)}{\sum_{i=0}^n U_i(y_i)}$$

Il apparaît que plus la fonction d'appartenance résultante est compliquée, plus le processus de défuzzification devient long et coûteux en temps de calcul [134].

- **La méthode de la moyenne des maxima :**

Les points où la fonction d'appartenance résultante atteint son maximum sont concernés.

$$y_0 = \sum_{i=1}^l \frac{y_i}{l}$$

A.3 Contrôleurs flous

La commande floue est une application de la logique floue au contrôle des systèmes dynamiques pour lesquels nous ne possédons pas de modèle satisfaisant. Son principe est simple, il s'agit dans la plupart des cas d'imiter le comportement d'un opérateur humain dans la régulation d'un processus complexe à l'aide de règles floues. Cette méthode de conduite de processus est mise en œuvre grâce à un dispositif appelé usuellement "contrôleur flou".

Annexes

Un contrôleur flou est un système d'inférence flou employé dans la technique d'automatisation. Son but est de trouver une valeur numérique à appliquer au système à partir d'un jeu de variables physiques. Les principaux types de contrôleurs qui ont été développés portent le nom des chercheurs qui les ont proposés, il s'agit du contrôleur de **Mamdani** et du contrôleur de **Sugeno**. Pour exposer le principe de fonctionnement de chacun d'eux, nous considérons l'exemple d'une base de règles de la forme [134]

A.3.1 Méthode de Mamdani

La méthode de Mamdani est historiquement la première à avoir été proposée, elle repose sur le raisonnement suivant [135] :

- Calcul de la valeur de vérité de chaque règle :

$$\alpha_i(x) = \text{Min}(U_{A_i}(x_1), U_{B_i}(x_2))$$

- Calcul de la contribution de chaque règle :

$$\alpha_i(x) = \text{Min}(\alpha_i(x), U_{C_i}(y))$$

- L'agrégation des règles :

$$\alpha(y) = \text{Max}(\alpha_i(y))$$

- La défuzzification pour obtenir une conclusion "nette".

A.3.2 Méthode de Takagi-Sugeno

Cette méthode a été proposée par Takagi-Sugeno [136], elle se caractérise par une sortie non floue des règles. A chaque règle, nous associons une sortie définie sous forme numérique comme étant une combinaison linéaire des entrées. Les règles utilisées d'ordre zéro sont du type Règle i : si x_1 est A_1 et x_2 est A_2 et... x_n est A_n et Alors $y_i = C_1x_1 + C_2x_2 + \dots + C_nx_n$. Où les valeurs C_j sont des valeurs réelles (non floues). Cette méthode se base sur le raisonnement suivant :

- Calcul de la valeur de vérité de chaque règle :

$$\alpha_i = \prod_{j=1}^n A_j$$

- Calcul de la sortie du système d'inférence flou :

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i y_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i}$$

Annexes

α_i représente ici le degré de vérité de chaque règle. Les systèmes d'inférence flou de type **Sugeno** permettent une meilleure représentation des fonctions numériques et des mécanismes d'inférence plus rapides [136].

Il a été montré expérimentalement que, pour un objectif de commande de processus, la méthode de **Sugeno** donnait des résultats très voisins de celle de **Mamdani** tout en permettant une réduction sensible du temps de calcul [131].

Annexe B

Algorithme génétique

B.1 Présentation des algorithmes génétiques.

Les algorithmes génétiques (AG) sont des techniques de recherche et d'optimisation stochastique dérivées de la génétique et des mécanismes de la sélection naturelle et de l'évolution. Leurs champs d'application sont très vastes : économie, finance, optimisation de fonctions, planification et bien d'autres domaines. La raison de ce grand nombre d'application est claire, la simplicité et l'efficacité.

Les premiers travaux sur les algorithmes génétiques ont été initialement développés par John Holland en 1975 [137]. Il a développé les principes fondamentaux des algorithmes génétiques dans le cadre de l'optimisation mathématique. D'une manière globale, un algorithme génétique manipule les solutions potentielles d'un problème donné afin d'atteindre la solution optimale ou une solution jugée satisfaisante.

L'algorithme génétique est organisé en plusieurs étapes et fonctionne de manière itérative.

La figure B.1 représente l'algorithme génétique le plus simple [138]. Celui-ci met en œuvre différents opérateurs qui seront décrits ultérieurement. Mais avant, il est nécessaire de définir quelques termes de base rencontrés dans la littérature :

- **Individu:** solution potentielle du problème.
- **Chromosome:** solution potentielle du problème sous une forme codée, c.-à-d. une forme chaîne de caractères (figure B.1).
- **Population:** ensemble fini d'individus (de solution).
- **Gène:** partie élémentaire (caractère) non divisible d'un chromosome.
- **Fitness:** terme anglo-saxon qui désigne la fonction d'évaluation d'un individu. Cette fonction est liée à la fonction à optimiser et permet de définir le degré de performance d'un individu (donc d'une solution) vis-à-vis du problème.

L'algorithme génétique part d'un ensemble de solutions possibles initialisé aléatoirement dans l'espace de recherche. Les individus sont représentés par leurs variables de conception ou par un codage de celles-ci (chromosome). Certaines solutions de la première population sont utilisées pour former, à partir d'opérateurs génétiques (croisement, mutation, etc.), une nouvelle population. Ceci est motivé par l'espoir que la nouvelle population soit meilleure que la précédente.

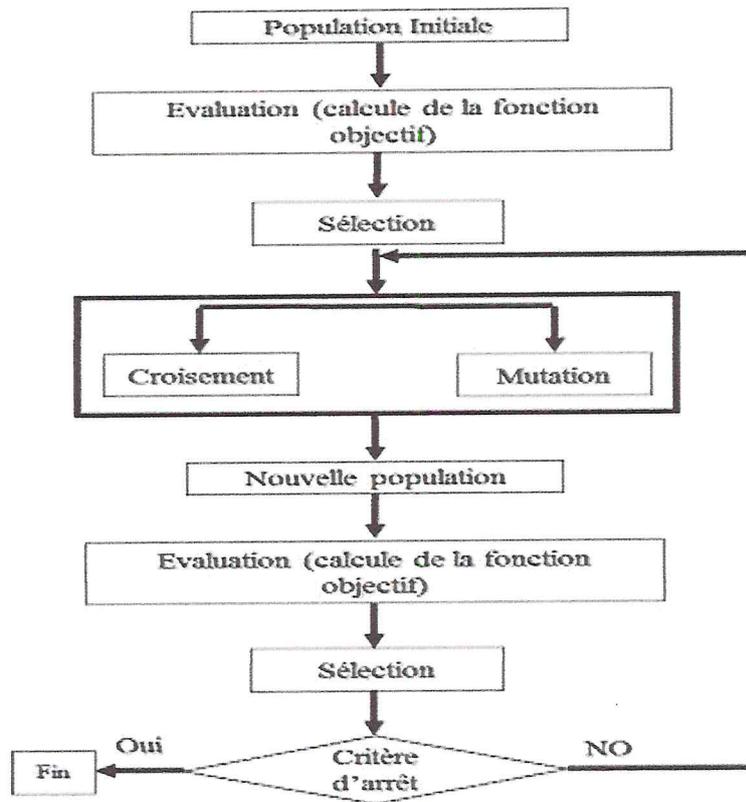


Figure B.1 Algorithme génétique

Parmi les avantages des algorithmes génétiques, nous pouvons mentionner :

- La généricité de la méthode applicable aussi bien aux problèmes continus qu’aux problèmes discrets ou mixtes.
- Ils n’utilisent que la valeur de la fonction objectif (et non pas sa dérivée ou un calcul intermédiaire).
- Les éventuelles discontinuités de la fonction objective ont peu d’effet sur la convergence de ces algorithmes.
- Ils se laissent difficilement piéger par des optima locaux.
- Ils peuvent traiter un grand nombre de paramètres, et sont très bien adaptés au calcul parallèle.

Toutes ces caractéristiques contribuent à ce que les algorithmes génétiques soient efficaces pour une grande variété de problèmes d’optimisation.

Les AG utilisent principalement trois types d’opérateurs génétiques qui sont le ”croisement”, la ”mutation” et la ”sélection”. Ces opérateurs sont appliqués aux individus de la population avec l’espoir d’améliorer leurs caractéristiques génétiques et de les amener à s’adapter à leur environnement.

Annexes

B.1.1 Le croisement

De façon classique, le croisement s'opère à partir de deux parents pour générer deux enfants, en espérant que les enfants seront meilleurs que les parents si les bons caractères génétiques de ces derniers sont combinés. Il permet en fait d'exploiter les solutions courantes lors de la recherche. Il existe différentes techniques de croisement. Chacune des techniques s'applique sur des chromosomes dont la représentation est soit binaire ou réelle. Nous citerons quelques techniques. La figure B.2 montre un exemple de croisement de deux parents codés en binaire. Un site de croisement est déterminé aléatoirement dans le chromosome des deux parents et deux nouveaux chromosomes enfants sont alors créés en échangeant tous les bits compris dans les portions avant le site de croisement.

L'application du croisement s'effectue suivant la probabilité pc définie par l'utilisateur, et qui indique si deux parents sélectionnés aléatoirement subiront le croisement.

➤ **Le croisement multipoints**

Plusieurs auteurs se sont penchés sur l'utilisation de plusieurs points de coupure concernant l'opérateur de croisement. Le nombre de points de coupure généré est en moyenne $L/2$ où L est la taille du chromosome figure B.2. Cette technique s'applique autant pour une codification binaire que réelle des chromosomes. C'est une technique très utilisée dans différentes applications du fait que les résultats obtenus sont satisfaisants [139].

➤ **Le croisement uniforme**

Est une généralisation du croisement multipoints. Ici, chaque gène du chromosome peut constituer un point de croisement. Un chromosome nommé masque, de taille identique à celle des parents, est créé aléatoirement et la valeur des gènes du masque détermine de quel parent l'enfant recevra-t-il son gène selon le fonctionnement suivant : si la valeur du bit du masque est égale à 1 alors la valeur du gène du parent 1 est copiée chez l'enfant1 et si la valeur du bit du masque est égale à 0 alors la valeur du gène du parent 2 est transmise à l'enfant1. Les valeurs des gènes de l'enfant 2 sont les suivantes : les valeurs des gènes du parents1 lorsque la valeur du bit du masque est égale à 0 et les valeurs des gènes du parent 2 lorsque la valeur du bit du masque est égale à 1 figure B.2.

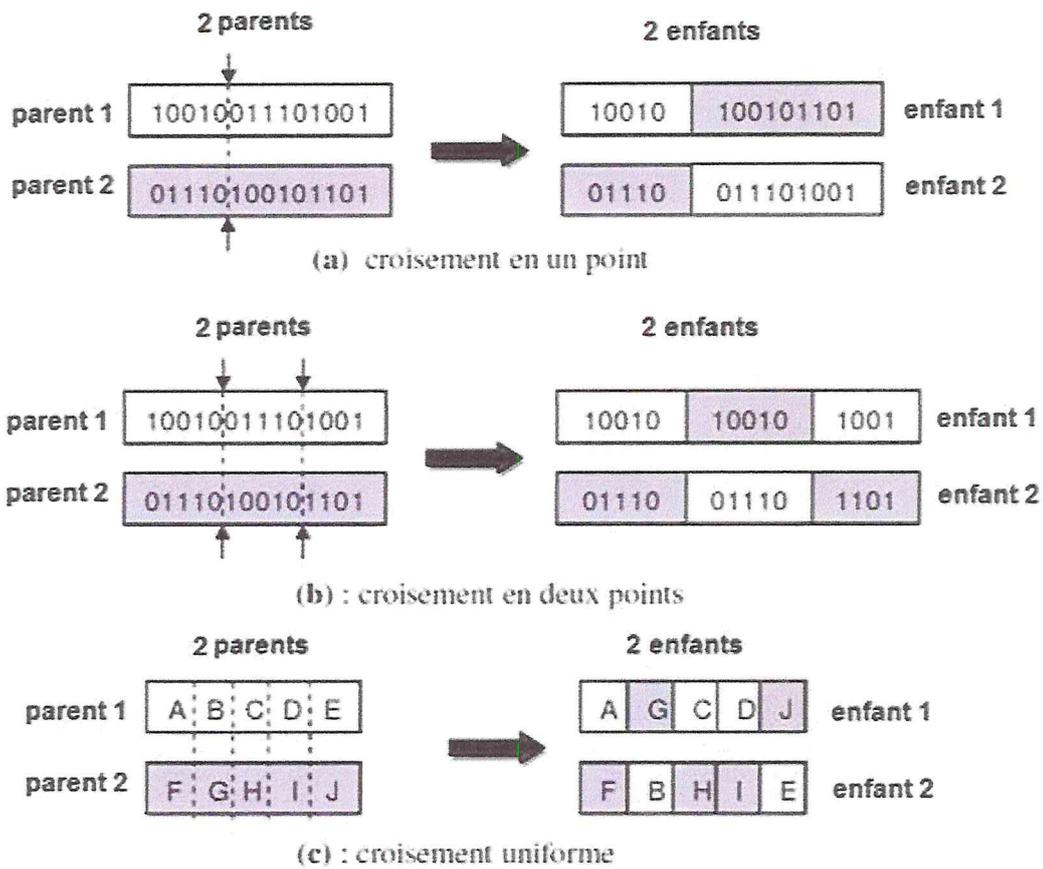


Figure B.2 Exemples d'opération de croisement

B.1.2 La mutation

Elle est généralement appliquée après le croisement des parents et aide à fournir de nouvelles caractéristiques génétiques, difficiles à obtenir par le seul opérateur de croisement. La mutation est définie comme étant la modification aléatoire d'un gène dans un chromosome. La figure B.3 illustre la mutation appliquée à un chromosome binaire. Cet opérateur évite la convergence prématurée vers les extrémums locaux [140]. Il est appliqué avec une probabilité fixée pm . Le taux de mutation rend la recherche très aléatoire s'il est trop élevé et risque de stagner s'il est trop faible.

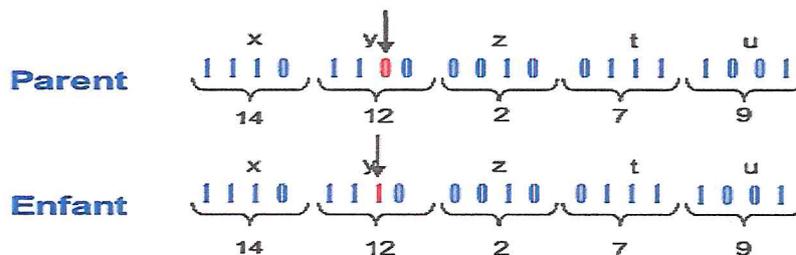


Figure B.3 Mutation d'un gène.

Contrairement à l'opérateur de croisement, la mutation est souvent considérée comme secondaire ayant pour rôle de restaurer des informations génétique perdues. Par exemple, si tous les chromosomes

Annexes

d'une population convergente vers un 0 à un emplacement donné, l'opérateur de croisement ne pourra pas faire apparaître le 1, par contre il est possible que l'opérateur de mutation le fasse.

B.1.3 La sélection

La sélection des meilleurs individus pour former la nouvelle population est cruciale, car il requiert de définir la notion de "meilleur" pour chaque problème donné. Pour les AG classiques, cette notion est généralement liée la valeur de la fonction d'adaptation. Les individus qui sont sélectionnés pour former la nouvelle génération le sont donc en fonction de leur adaptation (ou fitness). Ainsi, un individu a d'autant plus de chance d'être sélectionné qu'il présente une performance élevée. Deux éléments guident le processus d'évolution de la population dans les AG. Il s'agit de la pression de sélection et de la diversité de la population. La pression de sélection définit en quelque sorte le degré d'adaptation que doit avoir un chromosome pour être sélectionné comme une solution prometteuse. La diversité de la population se mesure par la similitude des gènes des chromosomes. Plus la population comporte des chromosomes qui se ressemblent, moins on explore l'espace des solutions. Ces deux facteurs sont intimement liés car l'augmentation de la pression de sélection entraîne la diminution de la diversité génétique de la population et vice versa. En d'autres termes, une forte pression de sélection peut entraîner une convergence prématurée vers une solution non optimale tandis qu'une pression de sélection faible rendra la recherche de la solution aléatoire et inefficace.

B.2 Critère d'arrêt

Comme dans tout algorithme itératif, il faut définir un critère d'arrêt. Celui-ci peut être formulé de différentes façons parmi lesquelles nous pouvons citer :

- Arrêt de l'algorithme lorsque le résultat atteint une solution satisfaisante.
- Arrêt s'il n'y a pas d'amélioration pendant un certain nombre de générations.
- Arrêt si un certain nombre de générations est dépassé.

Annexe C

Création du modèle de la cellule sous Matlab/Simulink

Pour simuler le fonctionnement, nous avons utilisé l'environnement Matlab/Simpower système. Le module photovoltaïque choisi est « KC200GT » [141]. Ce dernier est composé de 54 cellules solaires poly cristallines pour produire une puissance maximale de 200,143 W. Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque sont résumées dans le tableau ci-après :

I_{mp}	7,61 A
V_{mp}	26,3
P_{max}	200,143 W
I_{sc}	8,21 A
V_{oc}	32,9 V
K_v	-0,1230 V/K
K_i	0,0032 A/K
N_s	54

Tableau C.1. Caractéristiques électriques du module photovoltaïque « KC200GT »

Le tableau suivant C.2 donne les différents paramètres utilisés dans la simulation de la chaîne éolienne.

Élément de la chaîne	Paramètres	Valeurs numériques
Turbine éolienne	Masse volumique de l'air (kg/m^3)	$\rho = 1.225$
	Rayon de l'éolienne (m)	$R_r = 3$
	Gain du multiplicateur	$G = 5.4$
	Nombre des pales	$P = 3$
	Coefficient de frottement ($kg.m^2.s^{-1}$)	$f_t = 0.017$
	Moment d'inertie ($kg.m^2$)	$J_t = 0.042$

Annexes

	Vitesse spécifique optimale	$\lambda_{opt} = 8.1$
GSAP	Puissance nominale (kW)	$P_n = 9.2$
	Inductance statorique selon l'axe d (mH)	$L_d = 7.9$
	Inductance statorique selon l'axe q (mH)	$L_q = 7.9$
	Inertie du générateur ($kg.m^2$)	$J_g = 0.0064$
	Flux des aimants (Wb)	$\Psi_f = 0.1983$
	Nombre de paires de pôles	$P = 4$
	Résistance statorique (Ω)	$R_s = 0.475$
	Coefficient de frottement	$f_g = 0.0000064$

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1]. Borni, A., Bouarroudj, N., Bouchakour, A., Zaghba, L. « P&O-PI and fuzzy-PI MPPT Controllers and their time domain optimization using PSO and GA for grid-connected photovoltaic system: a comparative study », *Int. J. Power Electronics*, Vol. 8, No. 4, pp.300– 322, 2017.
- [2]. Makhloufi Salim, « Contribution à l'optimisation des installations photovoltaïques par des commandes intelligentes », thèse de doctorat en sciences, université de Batna, 2013.
- [3]. D. Saïd, Contribution à la Modélisation et à la Commande Robuste d'une Machine à Induction Double Alimentée à Flux Orienté avec Optimisation de la Structure d'Alimentation. PhD thesis, Université de Batna, 2005.
- [4]. F. Deroncourt and E. Sander, "La logique floue : entre raisonnement humain et intelligence artificielle,
- [5]. G. Bartolini, A. Ferrara, and A. A. Stotsky, "Robustness and performance of an indirect adaptive control scheme in presence of bounded disturbances," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 44, no. 4, pp. 789–793, 1999.
- [6]. MULTON (B.). « Ressources énergétiques et consommation humaine d'énergie. » Techniques de l'Ingénieur Traité
- [7] B.L. Braga, J.L. Silveira, M.E. Da Silva, E.B. Machin, D.T. Pedroso, C.E. Tuna, « Comparative analysis between a PEM fuel cell and an internal combustion engine driving an electricity generator: technical, economical and ecological aspects, » *Appl. Therm. Eng.* 63 (2014) 354–361.
- [8] R. Chedid and S. Rahman, « Unit Sizing and Control of Hybrid Wind-Solar Power Systems », *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 12, No. 1, March 1997.
- [9] D. REKIOUA, Z. ROUMILA et T. REKIOUA, « Etude d'une centrale hybride photovoltaïque - éolien – diesel, » *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 11. N°4. 623 – 633, 2008.
- [10] O. Gergaud, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau, » Thèse de Doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, France, Décembre 2002.
- [11] A. Mirecki, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance, » Thèse de doctorat, de l'institut national polytechnique de Toulouse, 5 avril 2005.
- [12] B. Multon, G. Robin, M. Ruellan, H. B. Ahmed, « 3ème situation énergétique mondiale à l'aube du millénaire. Perspectives offertes par les ressources renouvelables, » *Revue 3Ei*. No.36. mars 2004. pp. 1-14.
- [13] C. Darras, « Modélisation de systèmes hybrides Photovoltaïque / Hydrogène: Applications site isolé, micro-réseau, et connexion au réseau électrique dans le cadre du projet PEPITE (ANR PAN-H), » Thèse de Doctorat de L'université De Corse-Pascal Paoli, 6 May 2011.
- [14] O. Carlson, A. Grauers, J. Svensson, A. Larsson, « A comparison of electrical systems for variable speed operation of wind turbines, » *European wind energy conf.* 1994, p. 500- 505.
- [15] A. CLEMENT et al, « Wave energy in Europe: current status and perspectives, » *Renewable and sustainable energy reviews.* 6 (2002). pp 405-431.
- [16] B. Robyns, P. Bastard, « Production décentralisée d'électricité : contexte et enjeux techniques, » *Revue 3Ei* n°39, Décembre 2004.

Références bibliographiques

- [17] A. Lilia « Contribution à l'Amélioration des Performances des Générateurs Eoliens - Evaluation de l'Impact des Energies Renouvelables sur l'Environnement, » Thèse de doctorat, université de Hadj Lakhdar, Batna, 26 avril 2012.
- [18] M. Elhassan, M. Fauzi, K. Sopian and A. A. Abass, « Design and Performance of Photovoltaic power System as a Renewable Energy Source for Residential in Khartoum, » International Journal of the Physical Sciences Vol. 7(25), pp. 4036-4042, June 2012.
- [19] Le Gallou F., B. Bouchon-Meunier (Coordonnateurs), « Systémique - Théorie et Applications, » Éditions Tec & Doc, Paris, 1994, 341pages.
- [20] D. Saheb-Koussa, M. Belhamel, « Production d'électricité sans interruption moyennant un système hybride (éolien – photovoltaïque – diesel), » Revue des Energies Renouvelables, ICRES-07 Tlemcen 121 – 128, 2007.
- [21] Musseli, M., Notton, G. & Louche, A., « Design of Hybrid-Photovoltaic power generator, with optimization of energy management, » Solar Energy, Vol.65, No.3, 1999, pp. 143-157.
- [22] H. Ibrahim A. Ilinca J. Perron, « Investigations des différentes alternatives renouvelables et hybrides pour l'électrification des sites isolés, » Rapport interne, Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE), Université du Québec, Septembre 2008.
- [23] L. Stoyanov, « Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables, » Thèse de doctorat de l'université Technique De Sofia, 28 octobre 2011
- [24] J. G. McGowan, J.F. Manwell, « Hybrid/PV/Diesel system experiences, »Renewable Energy, Vol. 16, pp. 928-933, 1999.
- [25] I. Vechi, « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome, » Thèse de doctorat, Université du Havre, France, Décembre 2005.
- [26] E. Ian Baring-Gould, L. Flowers, P. Lundsager, « Worldwide status of wind-diesel applications, » Pre-Workshop Wind-Diesel 101, Anchorage, Alaska, 2004.
- [27] P. Lundsager, H. Bindner, N. Clausen, S. Frandsen, L. H. Hansen, J. C. Hansen, « Isolated systems with wind power, » Risø-R-1256 (EN), 2001.
- [28] T. L. Jensen, « Renewable Energy on Small Islands, » Forum for Energy and Development (FED), Second Edition, Denmark, August 2000.
- [29] A. K. Ould Mahmoud, « Caractérisation, modélisation, fonctionnement et impact d'un système hybride pour l'alimentation de charge mixte, » Thèse doctorat, université de Cheikh Anta Diop, Dakar, 2008.
- [30] B. Wichert, « PV-diesel hybrid energy systems for remote area power generation – A review of current practice and future developments, » Renewable and Sustainable Energy Reviews, 1997, vol. 1, No. 3, pp. 209–228, Elsevier Science 1997.
- [31] M. Ashari, C. V. Nayar, « An optimum dispatch strategy using set point for a photovoltaic (PV)-diesel-battery hybrid power system, » Renewable Energy, vol. 66, N°. 1, pp. 1-9, 1999.
- [32] S. Ruin, O. Carlson, « Wind-hybrid systems with variable speed and DC-link, » Wind Power for the 21 Century, Kassel, Germany, 25-27 September 2000.
- [33] P. Lundsager, H. Bindner, N. Clausen, S. Frandsen, L. H. Hansen, J. C. Hansen, « Isolated systems with wind power, » Risø-R-1256(EN), 2001.

Références bibliographiques

- [34] A.Engler et al, « Control of Parallel Operating Battery Inverters, » PV Hybrid Power Systems 2000 Conference, Aix-en-Provence, France, septembre 2000.
- [35] S. Roussin, « Le journal semestriel des systèmes photovoltaïques hybrides au Canada, » Centre De La Technologie De L'énergie De Canmet—Varenes Programme Photovoltaïque Et Systèmes Hybrides, P 4, Numéro 7, Été 2004
- [36] D.Turcotte, M.Ross and F.Sheriff, « Photovoltaic hybrid System Sizing and Simulation Tools, » PV Horizon, Canada, 2001.
- [37] A. G. Moacyr, P. Leonardo, G. Luigi and A. Carlos, “ Research on Photovoltaics: Review, Trends and Perspectives ”, Power Electronics Conference (COBEP), Brazil 2011.
- [38] F. M. González-Longatt, “ Model of Photovoltaic Module in Matlab ”, 2nd Congreso Iberoamericano de Estudiantes de Ingeniería Eléctrica, 2005.
- [39] G. Grandi and G. Sancineto, “ Hardware Modeling of Photovoltaic Panels ”, Department of Electrical Engineering, University of Bologna, 2003.
- [40] S. Petibon, “ Nouvelles Architectures Distribuées de Gestion et de Conversion de l'Energie pour les Applications Photovoltaïques ”, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Janvier 2009.
- [41] A. T. Singo, «Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome,», Thèse de Doctorat, Groupe de Recherche en Electrotechnique et Electronique de Nancy, Faculté des Science et Technique, 54500 Vandœuvre-lès-Nancy, 2010.
- [42] M. Angel, “ Conception et Réalisation de Modules Photovoltaïques Electroniques ”, Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Septembre 2006.
- [43] B. Brousse, “ Réalisation et Caractérisation de Cellules Photovoltaïques Organiques Obtenues par Dépôt Physique ”, Thèse de Doctorat, Université de Limoges, Décembre 2004.
- [44] B. Bryant et M. K. Kazimierczuk, «Open-loop power-stage transfer functions relevant to current-mode control of boost PWM converter operating in CCM,» *IEEE Transactions on Circuits and Systems I*, vol. 52, n° 10, pp. 2158-2164, 2005.
- [45] D. Petreus and C. Farcas, “Modelling and Simulation of Photovoltaic Cells ”, Acta Technica Napocensis Electronics and Telecommunications, Vol. 49, N. 1, 2008.
- [46] A. Ould Mohamed Yahya, A. Ould Mahmoud and I. Youm, “Etude et Modélisation d'un Générateur Photovoltaïque ”, Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11, N°3 pp. 473-483, Année 2008.
- [47] Y. Pankow, " Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. Application au générateur photovoltaïque", Thèse de Doctorat de L'Ecole Doctorale de L'ENSAM ED432, 2004. BEL5688
- [48] K. Kassmil, M. Hamdaoui et F. Olivié, "Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique" Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°4 (2007) 451 – 462.
- [49] Salas, V., Olias, E., Barrado, A., and Lazaro, A. (2006). Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90(11) :1555-1578.
- [50]. D. Picault, B. Raison, S. Bacha, Casa J. de la et J. Aguilera. “Forecasting photovoltaic array power production subject to mismatch losses”, *Solar Energy*, Vol. 84, pp. 1301-1309. 2010.

Références bibliographiques

- [51]. C. S. Chin, P. Neelakantan, H. P. Yoong, K. T. K. Teo, «Optimization of fuzzy based maximum power point tracking in pv system for rapidly changing solar irradiance», University Malaysia Sabah, Kota Kinabalu, Malaysia, global journal of technology and optimization, Volume 2, 2011.
- [52]. J. M. Yang, I. H. Choi, J. H. Kim, « Sliding mode motion control of non holonomic mobile robots », IEEE control system, Vol. 19, N° 19, pp. 15-23, 1999.
- [53] A. Ishigame, T. Furukawa, «Sliding mode controller design based on fuzzy inference for nonlinear systems», IEEE transactions on industrial Electronics, Vol. 40, N° 1, February 1993.
- [54]. J. E. SLOTTINE, «Sliding Controller Design for Nonlinear Systems», International Journal of Control, Vol. 40, No.2, 1984, pp. 421_434.
- [55]. A Hamzaoui, N Essounbouli and J Zaytoon, «Fuzzy Sliding Mode Control for Uncertain SISO Systems», Processing of IFAC Conf. on Intelligent Control Systems and Signal ICONS'03, pages 233–238, 2003.
- [56] H. Bühler, « Réglage par Mode de Glissement », Presses Polytechniques Romandes, 1994.
- [57]U. BENZ « Réglage par Mode de Glissement Hybride, Applique au Réglage de Position de Systèmes Electromécaniques», Thèse de doctorat Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne 1992.
- [58] 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 Université de Bretagne Occidentale, 2010.
- [59] M. C. S. Alaoui, «Commande et Observateur par Modes glissants d'un Système de Pompage et d'un Bras Manipulateur», Thèse de doctorat Université Sidi Mohammed Ben Abdellah 2009.
- [60] M.S. Merzouga, H. Benalla, L. Louze, «Sliding Mode Control (SMC) Of Permanent Magnet Synchronous Generators (PMSG) » Energy Procedia Vol.18, pp 43 – 52, 2012.
- [61] A. Merabet, R. Beguenane, J. S. Thongam, I.Husseini «Adaptive Sliding Mode Speed Control for Wind Turbine Systems», IEEE, pp2461-2466,2011.
- [62] L. Shang, J. Hu, «Sliding-Mode-Based Direct Power Control of Grid-Connected Wind-Turbine-Driven Doubly Fed Induction Generators Under Unbalanced Grid Voltage Conditions», IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 27, Issue. 2, June 2012.
- [63] I. Song Kim, «Robust Maximum Power Point Tracker Using Sliding Mode Controller for the Three-Phase Grid-Connected Photovoltaic System» Solar Energy, Vol.81, Issue 3, pp 405–414, March 2007.
- [64] I. Song Kim, «Sliding Mode Controller for The Single -Phase Grid-Connected Photovoltaic System», Applied Energy Vol83, Issue 10, pp1101–1115, 2006.
- [65]. Borni Abdelhalim, étude et optimisation d'un multi système hybride de conversion d'énergie électrique, thèse de doctorat, université Constantine 1, ,2015.
- [66] W. Perruquetti, J. P. Barbot, «Sliding Mode Control in Engineering», Edition Marcel Dekker, ISBN 0-8247-0671-4. 2002.
- [67]. J. Y. Hung, Weibing Gao, James C. Hung, “Variable Structure Control: A Survey”, IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 40, No. 1, Feb. 1993.

Références bibliographiques

- [68]. Bouzeria Hamza, «modélisation et commande d'une chaîne de Conversion photovoltaïque», these doctorat 3ème cycle LMD, 2016.
- [69]. A. Menadi, S. Abdeddaim, A. Ghamri, and A. Betka, «Implementation of fuzzy-sliding mode based control of a grid connected photovoltaic system», *ISA transactions*, vol. 58, pp. 586-594, 2015.
- [70]. Salem Mohammed, «Approches de l'intelligence artificielle pour la commande robuste des systèmes non linéaires», doctorat en sciences, 2014.
- [71] C. Canudas de Wit, "Commande des moteurs asynchrones 2 : Optimisation, discretisation et observateurs," Hermès Science Publication, France, 2000.
- [72] A. Menadi, S. Abdeddaim, A. Ghamri, A. Betka, Implementation of fuzzy-sliding mode based control of a grid connected photovoltaic system, *ISA Transactions*, Volume 58, September 2015, Pages 586-594.
- [73] F. Kendouli, K. Nabti, K. Abed and H. Benalla, " Modélisation, Simulation et Contrôle d'une Turbine Eolienne à Vitesse Variable basée sur la Génératrice Asynchrone à double alimentation ", *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 14 N°1, pp. 109-120, 2011.
- [74] A. Abdulrazek, " Design and Power Characterization of a Small Wind Turbine Model in Partial Load Region ", Master of Science in Engineering Renewable, University of Kassel and Cairo University, February 2012.
- [75] K. Idjdarene, " Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes ", Thèse de Doctorat, Université Abderrahmane Mira Béchaa, Mai 2010.
- [76] F. Poitiers, " Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'Utilisation de l'Energie Eolienne ", Thèse de Doctorat, Université de Nantes, Décembre 2003.
- [77] N. Khezami, " Commande Multi Modèle Optimale des Eoliennes : Application à la participation des Eoliennes au Réglage de la Fréquence ", Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lille, Octobre 2011.
- [78] S. Elaimani, "Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrales Dans un Réseau de Moyenne Tension ", Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lille, Décembre 2006.
- [79] Bernard MULTON, Olivier GERGAUD, Hamid BEN AHMED, Xavier ROBOAM, Stéphan ASTIER, Brayima DAKYO, Cristian NICHITA " État de l'art dans les aérogénérateurs électriques", Extrait du rapport de synthèse ECRIN, bd de Vaugirard 75015 Paris, paru mai en 2002
- [80] M. Lopez, " Contribution à l'Optimisation d'un Système de Conversion Eolien Pour une Unité de Production Isolée ", Thèse de Doctorat, Université de Paris-Sud, 2008.
- [81] S. Belakehal, A. Bentounsi, M. Merzoug and H. Benalla, " Modélisation et Commande d'une Génératrice Synchrone à Aimants Permanents dédiée à la conversion de l'Energie Eolienne ", *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 13 N°1, pp. 149-161, 2010.
- [82] O. Gergaud, B. Multonv and H. Benahmed, " Modélisation d'une Chaîne de Conversion Eolienne de Petite Puissance ", *Electrotechnique du Futur*, Nancy, France 2001.
- [83] K. Idjdarene, " Contrôle d'une Génératrice Asynchrone à Cage dédiée à la Conversion de l'Energie Eolienne ", JCGE'08 LYON, 16 et 17, Décembre 2008.

Références bibliographiques

- [84] Abdelhamid LILIA, “ Contribution à l'Amélioration des Performances des Générateurs Eoliens - Evaluation de l'Impact des Energies Renouvelables sur l'Environnement ”, Thèse de Doctorat, Université Hadj Lakhdar de Batna, Avril 2012.
- [85] S. Heier, "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems", Publications John Wiley & Sons, ISBN 0-471-97143-X, 1998
- [86] J. Usaola, P. Ledesma, J. M. Rodriguez, J. L. Fernandez, D. Beato, R. Iturbe, J. R. Wihelmi, "Transient stability studies in grids with great wind power penetration. Modelling issues and operation requirements", 2003 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, September 7-12, 2003, Dallas (USA)
- [87] I. Munteanu, A. I. Bratcu, N.-A. Cutululis, and E. Ceanga, Optimal control of wind energy systems : towards a global approach. Springer Science & Business Media, 2008.
- [88] C. Saget, "La variation électronique de vitesse au service de la production d'énergie électrique par éolienne ", REE, n°7, Juillet 1998, pp. 42-48.
- [89] E. S. Abdin, W. Xu, "Control design and Dynamic Performance Analysis of a Wind Turbine-Induction Generator Unit ", IEEE Trans. on Energy conversion, vol.15, No1, March 2000.
- [90] E. De Vries, "Wind turbines technology trends", Vol. 6, No. 4, James & James (Science Publishers), Renewable Energy World, July-August 2003.
- [91] F. Meibody-Tabar, "Machines synchrones à aimants permanents alimentées par onduleurs de tension ; modélisation, commande et segmentation de puissance," Habilitation à Diriger des Recherches, Nancy, janvier 2000.
- [92] G. Grellet, G. Clerc, « Actionneurs électriques », Editions Eyrolles, Paris, France, 1997.
- [93] A.S. Toledo, " Commande directe et observation des convertisseurs de puissance application à l'onduleur de tension triphasé" Thèse de Doctorat de L'Ecole Doctorale de L'INPG, 2000.
- [94] M. Sc. Mariusz Malinowski "Sensorless Control Strategies for Three-Phase PWM Rectifier" in Ph.D. Thesis, Faculty of Electrical Engineering *Institute of Control and Industrial Electronics*, Warsaw University of Technology, Warsa , Poland, 2001.
- [95] Z .Laid "Etude Technique d'un Système d'Energie Hybride Photovoltaïque-Eolien Hors Réseau" Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2010.
- [96] J . G . Slootweg, S. W. H. Haan, H. Polinder, and W. L. Kling « General Model for Representing Variable Speed Wind Turbines in Power System Dynamics Simulations» IEEE, Power Engineering, Vol. 18, Issue 1, pp 144-151, February 2003.
- [97] K. Tahir, C. Belfedal, T. Allaoui, and M. Doumi, "Proposal of a new hybrid control strategy for dynamic performance improvement of wound field synchronous generator-based wind turbines," Journal of Renewable and Sustainable Energy, vol. 7, no. 4, p. 043113, 2015.
- [98] S. A. E. Ardjoun, M. Abid, A. G. Aissaoui, A. Naceri, "A robust fuzzy sliding mode control applied to the double fed induction machine," International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing, vol. 5, no. 4, pp. 315- 321, 2011.
- [99] M. Doumi, A. G. Aissaoui, M. Abid, A. Tahour, K. Tahir, « Robust Fuzzy Gains Scheduling of RST Controller for a WECS Based on a Doubly-Fed Induction Generator ». AUTOMATIKA 57(2016) 3, 617–626

Références bibliographiques

- [100] S. Bouallège, J. Haggège, and M. Benrejeb, « A new method for tuning PID-type fuzzy controllers using particle swarm optimization ». INTECH Open Access Publisher, 2012.
- [101] B. Hamane, M. L. Doumbia, M. Bouhamida, A. Draou, H. Chaoui and M. Benghanem « Comparative Study of PI, RST, Sliding Mode and Fuzzy Supervisory Controllers for DFIG based Wind Energy Conversion System ». International Journal Of Renewable Energy Research, Bekhada Hamane et al., Vol.5, No.4, 2015
- [102] M. C. Dobritoiu, Stabilisateur de réseaux électriques à base de logique floue. 2004.
- [103] R. K. Gupta, B. Pant, P. Sinha, R. Mehta, and V. Agarwala, "Study on ductility of ti aluminides using mamdani fuzzy inference system," in Proceedings of the International Conference on Soft Computing for Problem Solving (SocProS 2011) December 20-22, 2011, pp. 11–22, Springer, 2012.
- [104] M. T. Cao, Commande numérique de machines asynchrones par logique floue. Université Laval, 1997.
- [105] L. Kouider, Développement d'un superviseur flou appliqué à la commande d'un actionnaire électrique. PhD thesis, Université M'hamed Bougara de Boumerdes, 2013.
- [106] Y. Li, K. H. Ang, and G. C. Chong, "Patents, software, and hardware for PID control : an overview and analysis of the current art," IEEE Control Systems, vol. 26, no. 1, pp. 42–54, 2006.
- [107] K. Tahir, C. Belfedal, T. Allaoui, and M. Doumi, "Optimal tuning of RST controller using PSO optimization for synchronous generator based wind turbine," Journal of electrical engineering, vol. 16, no. 43, pp. 1–13, 2016.
- [108] A. Ben Rhoumamm, J. Belhadjmm X. Roboam "Control and energy management of a pumping system fed by hybrid Photovoltaic-Wind sources with hydraulic storage", International conference on Electrical Engineering Design and Technologies ICEET, Hammamet, Tunisia Nov 2007.
- [109] M. Turki, J. Belhadj, X. Roboam, "Design and Energy management of a smallscale reverse osmosis desalination unit powered by PV-Wind hybrid system without battery storage", International conference on Electrical Engineering Design and Technologies (ICEEDT), Nov. 2007, Hammamet, Tunisia.
- [110] NEY. H, « Equipements de puissance », Editions Fernand Nathan, Paris, 1988.
- [111] LEONHARD. W, « *Control Electrical* », Springer Verlag Berlin Heidelberg 1985. Printed in Germany.
- [112] J. Royer, T. Djiako " Le pompage photovoltaïque", Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, Institut de l'Énergie des Pays ayant en commun l'usage du Français, Québec CANADA.
- [113] L. Zarour "Etude et simulation d'un système de pompage photovoltaïque, optimisation de la conversion d'énergie",Mimoire de magister en électrothecnique, université mentouri de constantine, 2005.
- [114] R. Maouedj" *application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de tlemcen et de bouzareah*", Mémoire de Magister, Université de Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen, 2005
- [115] R. Chenni" Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque dans un village solaire", Thèse de doctorat en en sciences en physique énergétique, université de Constantine, 2007.
- [116] J.P Caron, J.P Hautie,r « Modélisation de la machine asynchrone, Commande vectorielle », éditions techniques Paris 1995.

Références bibliographiques

- [117] Ch. El Moucary, Eduardo Mendes, and Adel Razek, "Decoupled Direct Control for PWM *Inverter-Fed Induction Motor Drives*", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, no. 5, September/October 2002.
- [118] M. Pinard, « Commande Électronique des moteurs électriques », éditions Dunos, Paris 2004.
- [119] J.P Lois, « Modélisation des machines électriques en vue de leur commande », Lavoisier, Paris 2004.
- [120] F. Blaschke, "The principle of field orientation as applied to the new transvector closed loop vector control system for rotating machines", *Siemens Rev.* pp. 2037-2042, December 1972.
- [121] W. Leonhard, "Control of Electrical Drives", Springer, 3rd edition, ISBN-13: 978- 3540418207 September 21, 2001.
- [122] A. Davide, "Identification des Paramètres du Moteur à Induction Triphasé en vue de sa Commande Vectorielle", Mémoire, Maître Es-Sciences, Université Laval Québec, Canada. Décembre 2004.
- [123] A. Faqir "Commande A Structure Variable D'un Entraînement A Machine Asynchrone Soumis A Un Environnement Mécanique Variable", Doctorat. Université de Picardie Jules Verne, France, décembre 2003.
- [124] B. K. Bose, "Power electronics and AC drives", Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1986.
- [125] L. Baghli, "Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisant de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques", Thèse de doctorat de l'université de Henri Pointcaré, Nancy-I, janvier 1999.
- [126] G. Abderrazak, « Optimisation floue- génétique d'un système de pompage éolien », thèse de doctorat de l'université Mohamed Khider – Biskra, Mars 2013.
- [127] C. P. fleiderer and H. Peterman "Stroemungsmoshlein Springer verlag" berlin, heidelberg, New York, 1972.
- [128] Techniques de l'ingénieur, « *Mécanique et chaleur, pompes, vide, air comprimé* », NB4, Paris, 1988.
- [129] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," *Information and control*, vol. 8, no. 3, pp. 338–353, 1965.
- [130] A. Abraham, "Neuro fuzzy systems : State-of-the-art modeling techniques," in *International Work- Conference on Artificial Neural Networks*, pp. 269–276, Springer, 2001.
- [131] G. Klir and B. Yuan, *Fuzzy sets and fuzzy logic*, vol. 4. Prentice hall New Jersey, 1995.
- [132] S. V. Kartalopoulos and S. V. Kartakapoulos, *Understanding neural networks and fuzzy logic : basic concepts and applications*. Wiley-IEEE Press, 1997.
- [133] S. Rajasekaran and G. V. Pai, *Neural networks, fuzzy logic and genetic algorithm : synthesis and applications (with cd)*. PHI Learning Pvt. Ltd., 2003.
- [134] L.-X. Wang, *Adaptive fuzzy systems and control : design and stability analysis*. Prentice-Hall, Inc., 1994.
- [135] E. H. Mamdani and S. Assilian, "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller," *International journal of man-machine studies*, vol. 7, no. 1, pp. 1–13, 1975.
- [136] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control," *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, no. 1, pp. 116–132, 1985.
- [137] J.H. Holland, "Adaptation in Natural and Artificial System", University of Michching press, 1975.
- [138] K. ZIDI, "Intéreactif d'aide au déplacement multimodal", Thèse de Doctorat de l'écolecentrale de Lille.2006

Références bibliographiques

- [139] Zafer Civelek, « Optimization of fuzzy logic (Takagi-Sugeno) blade pitch angle controller in wind turbines by genetic algorithm ». *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Volume 23, Issue 1, February 2020, Pages 1-9.
- [140] Z. Jinhua, Z. Jian, D. Haifeng, W. Sun'an, « Self-organizing genetic algorithm based tuning of PID controllers ». *Information Sciences* 179 (2009), pp ; 1007–1018.
- [141] E. Benkhelil, A. Gherbi, « Modélisation et simulation d'un générateur photovoltaïque avec un étage d'adaptation DC/DC ». *Revue des Energies Renouvelables ICESD'11 Adrar*, pp 159 – 170, 2011.

ملخص

يعد استخدام نظام هجين (الطاقة الهوائية-الطاقة الشمسية) لضخ المياه حلاً مستداماً وقابل للتطبيق اقتصادياً للمجتمعات الريفية دون الوصول إلى شبكة الكهرباء . الهدف من هذه المقالة هو تقديم نموذج مفصل لنظام الضخ الهجين ، لاقتراح ومقارنة مخططات التحكم لتحسين أداء النظام وتحسين جودة الطاقة المولدة. يتكون النظام الهجين المستخدم في هذه المقالة من توربين رياح ومولد متزامن مغناطيسي دائم (PMSG) ومولد ضوئي ومحولات (مقوم ، دفعة ، عاكس) مقترنة مباشرة بمحرك غير متزامن يدفع مضخة طرد مركزي. يتم تطبيق عنصر تحكم نموذجي على التكوين المقترح من أجل التحكم في النظام لاستخراج الطاقة الهجينة القصوى. بالإضافة إلى ذلك ، تم تصميم خمسة أنواع من وحدات التحكم (تقليدية نسبية متكاملة PI و RST ، تكيفات RST الغامضة ، الخوارزميات الجينية ووضع الانزلاق) للنظام الهجين واختبارها في ظروف التشغيل المختلفة. يعتمد التحكم في جهد ناقل DC على وحدة تحكم منطقية ضبابية من النوع 2 ويتم تطبيقه على التنظيم لتعويض اختلافات الطاقة الحقيقية في ظل ظروف الحمل المتفاوتة.

الكلمات الرئيسية: طاقة الرياح ، الطاقة الشمسية ، ضخ المياه ، PMSG ، التحكم في RST ، المنطق الضبابي ، المنطق الضبابي من النوع 2 ، الخوارزميات الجينية ، وضع الانزلاق.

Abstract

The use of a hybrid system (wind-solar) for pumping water is an economically viable and sustainable solution for rural communities without access to the electricity grid. The purpose of this article is to present a detailed modeling of the hybrid pumping system, to propose and compare control schemes to optimize system performance and improve the quality of the power generated. The hybrid system used in this article consists of a wind turbine, permanent magnet synchronous generator (PMSG), a photovoltaic generator and converters (Rectifier, Boost, Inverter) directly coupled to an asynchronous motor that drives a centrifugal pump. A typical control is applied to the proposed configuration in order to control the system to extract maximum hybrid power. In addition, five types of controllers (Proportional Integral PI and RST conventional polynomials, adaptive RST-fuzzy, genetic algorithms and sliding mode) are designed for the hybrid system and tested under various operating conditions. The control of the DC bus voltage is based fuzzy logic Type 2 controller and is applied to the regulation to compensate for real power unbalances during variable load conditions.

Keywords: Wwind energy, Solar energy, Water pumping, PMSG, RST control, Fuzzy logic, Fuzy logic type 2, Genetic algorithm, Sliding mode.

Résumé

L'utilisation d'un système hybride (éolien-solaire) pour le pompage de l'eau est une solution économiquement fiable et durable pour les communautés rurales sans accès au réseau électrique. Le but de cet article est de présenter une modélisation détaillée du système de pompage hybride, de proposer et de comparer des schémas de contrôle pour optimiser les performances du système et améliorer la qualité de la puissance générée. Le système hybride utilisé dans cet article se compose d'une éolienne, d'un générateur synchrone à aimant permanent (PMSG), d'un générateur photovoltaïque et de convertisseurs (redresseur, boost, onduleur) directement couplés à un moteur asynchrone qui entraîne une pompe centrifuge. Un contrôle typique est appliqué à la configuration proposée afin de contrôler le système pour extraire la puissance hybride maximale. De plus, cinq types de contrôleurs (polynômes conventionnels proportionnels intégraux PI et RST, adaptatifs RST flous, algorithmes génétiques et mode coulissant) sont conçus pour le système hybride et testés dans diverses conditions de fonctionnement. Le contrôle de la tension du bus CC est basé sur un contrôleur à logique floue de type 2 et est appliqué à la régulation pour compenser les déséquilibres de puissance réels dans des conditions de charge variables.

Mots clés : Energie éolienne, Energie solaire, Pompage d'eau, PMSG, Contrôle RST, Logique floue, Logique floue type 2, Algorithme Génétique, Mode Glissant