

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES

Faculté de Génie Electrique

Département d'Electrotechnique

Thèse présentée par :

BOUZID Mohamed Amine

Pour l'obtention du diplôme de :

Doctorat 3^{ème} Cycle : Électrotechnique

Option : Commande des Actionneurs Électriques

Intitulé de la thèse :

Commande Prédictive d'un Site Isolé Eolien Photovoltaïque

Présentée devant le jury composé de :

Mr. MEROUFEL Abdelkader	Professeur (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)	Président
Mr. MASSOUM Ahmed	Professeur (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)	Rapporteur
Mr. BENTAALAH Abderrahim	MCA (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)	Examineur
Mr. ALLAOUI Tayeb	Professeur (U.I.K. TIARET)	Examineur
Mr. ABID Mohamed	Professeur (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)	Examineur

Soutenue le : / / 2018

REMERCIEMENT

Je remercie tout d'abord **Allah**, le tout puissant, de m'avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail de recherche.

Je remercie particulièrement Monsieur **MASSOUM Ahmed**, Professeur à l'*Université de Sidi Bel Abbes* d'avoir dirigé mes travaux de recherches, pour ses conseils précieux, ses encouragements prodigués et la confiance qu'il m'a accordée. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je remercie tous les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail :

Monsieur MEROUFEL Abdelkader ,	Professeur à l' <i>Université de Sidi Bel Abbes</i> ;
Monsieur BENTAALAH Abderrahim ,	Docteur à l' <i>Université de Sidi Bel Abbes</i> ;
Monsieur ALLAOUI Tayeb ,	Professeur à l' <i>Université de Tiaret</i> ;
Monsieur ABID Mohamed ,	Professeur à l' <i>Université de Sidi Bel Abbes</i> .

Mes remerciements vont aussi aux membres des laboratoires **ICEPS**, **L2GEGI** et **LGEP**.

Je me permets d'adresser mes remerciements à ma très chère famille à qui je dédie ce travail. **Merci** à mes parents qui m'ont toujours soutenu et m'ont accompagné, tout au long de ce chemin, Je tiens également à remercier tous mes amis pour leurs encouragements.

Finalement, je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

Table des Matières

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENT.....	2
TABLE DES MATIERES.....	4
LISTE DES FIGURES.....	9
ABREVIATIONS ET SYMBOLES.....	13

Chapitre 01: Etat de l'art

1. INTRODUCTION.....	21
2. SOURCES D'ENERGIE RENOUVELABLE.....	22
2.1 SOURCE HYDRAULIQUE.....	22
2.2 SOURCE PHOTOVOLTAÏQUE.....	23
2.3 SOURCE MARINE.....	23
2.4 SOURCE EOLIENNE.....	24
2.5 GEOTHERMIE.....	24
3. UTILISATION DES ENERGIES RENOUVELABLES.....	25
3.1 SYSTEME RACCORDEES AU RESEAU.....	25
3.2 SYSTEME AUTONOMES.....	26
4. GÉNÉRALITÉS SUR LES SYSTÈMES DE CONVERSION D'ÉNERGIE SOLAIRE.....	26
4.1 ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE.....	27
4.2 BREF HISTORIQUE.....	27
4.3 ELECTRICITE SOLAIRE PAR EFFET PHOTOVOLTAÏQUE.....	27
4.4 CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES.....	29
4.5 TYPES DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES.....	30
4.6 MODULE PHOTOVOLTAÏQUE.....	31
4.7 GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE.....	32
4.8 CONVERSION DE L'ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE.....	34
4.9 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA TECHNOLOGIE PHOTOVOLTAÏQUE.....	34
5. GÉNÉRALITÉS SUR LES SYSTÈMES DE CONVERSION D'ÉNERGIE ÉOLIENNE.....	35
5.1 PRINCIPE DE CONVERSION.....	35
5.2 TYPES D'EOLIENNES.....	36
5.3 LES DIFFERENTES CHAINES DE CONVERSION EOLIENNE.....	37
5.4 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE EOLIENNE.....	39
6. GENERALITES SUR LES SYSTEMES DE STOCKAGE.....	40
6.1 DIFFERENTS SYSTEMES DE STOCKAGE D'ENERGIE.....	40
6.2 LES TYPES DES BATTERIES.....	44
6.3 CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES DES BATTERIES.....	45
7. CONCLUSION.....	46

Chapitre 02: Modélisation et commande de la chaîne de conversion

1. INTRODUCTION.....	48
2. PRESENTATION DE LA CHAINE DE CONVERSION.....	48
3. MODELISATION DE LA CHAINE DE CONVERSION	49
3.1 MODELISATION DE LA TURBINE EOLIENNE	49
3.1.1 Hypothèses simplificatrices [51], [71].....	49
3.1.2 Modélisation de la turbine [51], [71].....	50
3.1.3 Conversion aérodynamique.....	51
3.1.4 Théorie de BETZ.....	51
3.1.5 Limite de BETZ	52
3.1.6 Modèle du multiplicateur	53
3.1.7 Equation dynamique de l'arbre	53
3.2 MODELISATION DE LA MSAP.....	54
3.3 MODELISATION DU PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE.....	55
3.3.1 Tension à circuit ouvert	57
3.3.2 Courant de court-circuit	57
3.3.3 Le point de puissance maximale.....	58
3.3.4 Effet de l'éclairement et de la température	59
3.4 MODELISATION DU DISPOSITIF DE STOCKAGE	59
4. COMMANDE DE LA CHAINE DE CONVERSION.....	61
4.1 EXTRACTION DU MAXIMUM DE LA PUISSANCE EOLIENNE	61
4.2 COMMANDE VECTORIELLE DE LA MSAP	63
4.3 EXTRACTION DU MAXIMUM DE LA PUISSANCE PHOTOVOLTAÏQUE	64
4.4 REGLAGE DE LA TENSION CONTINUE	67
4.5 COMMANDE COTE CHARGE.....	68
4.6 SUPERVISION ET GESTION D'ENERGIE.....	70
5. RESULTATS DE SIMULATION.....	72
5.1 LA TURBINE.....	72
5.2 LA GSAP.....	74
5.3 SUPERVISION ET GESTION D'ENERGIE.....	78
6. CONCLUSION	81

Chapitre 03: Réseaux de neurones, logique floue et commande prédictive

1. INTRODUCTION.....	84
2. LA LOGIQUE FLOUE.....	84
2.1 HISTORIQUE.....	84
2.2 DOMAINES D'APPLICATION	85
2.3 LA THEORIE DES ENSEMBLES FLOUS	85
2.3.1 Système flou	85

2.3.2	<i>Ensemble flous</i>	86
2.3.3	<i>Variables linguistiques</i>	86
2.4	OPERATION SUR LES ENSEMBLES FLOUS	88
2.5	PROPRIETES DES ENSEMBLES FLOUS.....	88
2.6	STRUCTURE D'UNE COMMANDE PAR LOGIQUE FLOUE.....	89
2.7	CONTROLEUR FLOU	89
2.7.1	<i>Interface de fuzzification</i>	89
2.7.2	<i>Base de règle</i>	90
2.7.3	<i>Mécanisme d'inférence</i>	90
2.7.4	<i>Interface de défuzzification</i>	90
2.8	LE CONTROLE ADAPTATIF.....	91
3.	RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS	92
3.1	HISTORIQUE.....	92
3.2	LE NEURONE BIOLOGIQUE.....	92
3.3	LE NEURONE FORMEL	93
3.4	DOMAINES D'APPLICATION	94
3.5	ARCHITECTURE DES RESEAUX DE NEURONES	94
3.5.1	<i>Les réseaux non bouclés</i>	94
3.5.2	<i>Les réseaux bouclés</i>	95
3.6	PROCESSUS D'APPRENTISSAGE	95
3.7	TYPES D'APPRENTISSAGE	95
3.7.1	<i>Apprentissage supervisé</i>	96
3.7.2	<i>Apprentissage non supervisé</i>	96
3.7.3	<i>Apprentissage auto-supervisé</i>	96
3.8	AVANTAGES ET INCONVENIENTS	96
4.	LA COMMANDE PREDICTIVE.....	97
4.1	DEFINITION.....	97
4.2	PRINCIPE DE LA COMMANDE PREDICTIVE.....	97
4.3	HISTORIQUE DES METHODES MPC.....	98
4.3.1	<i>MAC (Model Algorithmic Control)</i>	98
4.3.2	<i>DMC (Dynamic Matrix Control)</i>	99
4.3.3	<i>EHAC (Extended Horizon Adaptive Control)</i>	100
4.3.4	<i>EPSAC (Extended Prediction Self-Adapted Control)</i>	100
4.3.5	<i>GPC (Generalized Predictive Control)</i>	101
4.3.6	<i>PFC (Predictive Functional Control)</i>	101
4.3.7	<i>CRHPC (Constrained Receding Horizon Predictive Control)</i>	102
4.3.8	<i>MPC (Model Predictive Control)</i>	102
4.4	APPLICATIONS INDUSTRIELLES DE LA COMMANDE PREDICTIVE.....	102
4.5	COMMANDE PREDICTIVE GENERALISEE	102
4.5.1	<i>Présentation de la loi de commande : Modèle employé</i>	103

4.5.2 Philosophie de la loi de commande :	104
4.5.3 Récursion de l'équation de diophantine (résolution itérative) :	105
4.5.4 CALCUL DE LA COMMANDE :	106
4.6 CHOIX DES PARAMETRES DE SYNTHÈSE	107
4.6.1 Horizons de prédiction	107
4.6.2 Horizon de commande	107
4.6.3 La pondération	107
4.6.4 FORMULATION DE LA LOI DE COMMANDE GPC SOUS LA FORME CANONIQUE RST	108
5. CONCLUSION	109

Chapitre 04: optimisation de la production de l'énergie électrique

1. INTRODUCTION	112
2. OPTIMISATION DE LA PRODUCTION DE L'ENERGIE PHOTOVOLTAIQUE	112
2.1 PRINCIPE DU SUIVI DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE	113
2.2 TECHNIQUES DE SUIVI DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE	114
2.3 UTILISATION DU CONTROLEUR FLOU	117
2.4 RESULTATS DE SIMULATION	120
3. OPTIMISATION DE LA PRODUCTION DE L'ENERGIE EOLIENNE	123
3.1 DESCRIPTION DU CONTROLEUR FLOU ADAPTATIF	123
3.2 COMMANDE PAR RESEAUX DE NEURONES	126
3.3 COMMANDE PREDICTIVE GENERALISEE	129
4. ETUDE COMPARATIVE	132
5. CONCLUSION	134
CONCLUSION GENERALE	137
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	140
ANNEXE A : Paramètres de la turbine, la génératrice et la batterie	149
ANNEXE B : Paramètres du panneau solaire	150
ANNEXE C : synthèse des régulateurs	151
ANNEXE D : Présentation du Systèmes Neuro-floue de type ANFIS et de la boîte à outils floue	153
ملخص	155
Abstract	155
Résumé	155

Liste de Figures

LISTE DES FIGURES

Chapitre 01

Figure 1 : Production d'électricité d'origine éolienne	21
Figure 2 : Production d'électricité d'origine solaire	22
Figure 3 : Centrale hydraulique.....	23
Figure 4 : Source photovoltaïque	23
Figure 5 : Energie de la mer	24
Figure 6 : Parc éolien.....	24
Figure 7 : Centrale géothermique	25
Figure 8 : Effet photovoltaïque	28
Figure 9 : Diagrammes de bandes d'énergie au voisinage de la jonction	28
Figure 10 : Coupe transversale d'une cellule PV typique	29
Figure 11 : Cellule photovoltaïque (monocristalline)	30
Figure 12 : Cellule PV polycristalline	31
Figure 13 : Cellules, module et panneau photovoltaïque	31
Figure 14 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de ns cellules en série	33
Figure 15 : Caractéristiques résultant d'un groupement de np cellules en parallèle.....	33
Figure 16 : Conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique	36
Figure 17 : Exemples des éoliennes à axe verticale (a, b et c) et à axe horizontale (d)	37
Figure 18 : Système de conversion éolien utilisant la machine asynchrone	37
Figure 19 : Système avec MADA pour l'opération à vitesse variable.....	38
Figure 20 : Système avec générateur synchrone pour un fonctionnement à vitesse variable.....	39
Figure 21 : Principaux éléments d'un accumulateur à volant d'inertie	41

Chapitre 02

Figure 1 : Système de conversion étudié.....	48
Figure 2 : Système mécanique de l'éolienne	49
Figure 3 : Modèle mécanique de la turbine	50
Figure 4 : Schéma de la turbine éolienne.....	50
Figure 5 : Théorie de Betz - schéma de principe	51
Figure 6 : Coefficient aérodynamique (C_p) en fonction du ratio de vitesse de la turbine (λ).....	52
Figure 7 : Schéma bloc de la turbine	54
Figure 8 : Circuit équivalent de la cellule photovoltaïque.....	56
Figure 9 : Caractéristique de la cellule photovoltaïque	56
Figure 10 : Point de fonctionnement de la cellule photovoltaïque	57
Figure 11 : Tension à circuit ouvert.....	57
Figure 12 : Tension de court-circuit.....	58

Figure 13 : Intersection de la courbe caractéristique (I_{pv} - V_{pv}) et la caractéristique de charge	58
Figure 14 : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $P(V)$ et $P(V)$ d'une cellule PV	59
Figure 15 : Influence de la température sur la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule PV	59
Figure 16 : Modèle R-C de la batterie	60
Figure 17 : Schéma bloc de la MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique	62
Figure 18 : Point de fonctionnement optimal	63
Figure 19 : Schéma fonctionnel de régulation de vitesse.....	63
Figure 20 : Schéma bloc de la commande du redresseur côté MSAP	64
Figure 21 : Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation (P&O).....	66
Figure 22 : Hacheur réversible	67
Figure 23 : Schéma de commande coté charge	68
Figure 24 : Projection des différentes composantes des vecteurs courant et tension dans un référentiel tournant	69
Figure 25 : Organigramme du contrôleur de charge et de gestion de l'énergie.....	71
Figure 26 : Profil du vent.....	72
Figure 27 : [a]- Coefficient aérodynamique C_p , [b]- Vitesse spécifique, [c]- Vitesse mécanique de la turbine	73
Figure 28 : [a]-Couple électromagnétique C_{em} , [b]- Flux quadratique q et directe d , [c]- Courant i_q et i_d ..	74
Figure 29 : [a]- Régulation de la tension du bus continu V_{dc} , [b]- Zoom de V_{dc}	75
Figure 30 : [a]- Tension V_d, q , [b]- Zoom de V_d, q	76
Figure 31 : [a]-Tension aux bornes de la charge, [b]-Zoom V_{abc} , [c]- Courant de charge, [d]- Zoom i_{abc}	78
Figure 32 : Puissance (Test 01).....	78
Figure 33 : Etat des sources (Test 01)	79
Figure 34: Puissance (Test 02)	79
Figure 35 : Etat des sources (Test 02)	79
Figure 36 : Puissance (Test 03).....	80
Figure 37 : Etat des sources (Test 03)	80
Figure 38 : Puissance (Test 04).....	81
Figure 39 : Etat des sources (Test 04)	81

Chapitre 03

Figure 1 : Schéma bloc représentant un système flou.	86
Figure 2 : Elément de la logique floue.....	87
Figure 3 : Exemple d'ensemble en logique booléenne et en logique floue.	88
Figure 4 : Structure d'un système de contrôle flou.	89
Figure 5 : Structure de base de la commande adaptative utilisée.....	91
Figure 6 : Structure du contrôleur flou adaptatif utilisé pour la commande de vitesse de la turbine.	91
Figure 7 : Neurone biologique et ses principaux composants.	93

Figure 8 : Neurone formel.....	93
Figure 9 : Quelques fonctions d'activation.....	94
Figure 10 : Réseau non bouclé.....	95
Figure 11 : Réseau bouclé.....	95
Figure 12 : Principe de base de la commande prédictive.....	98
Figure 13 : Structure du prédicteur optimal.....	105
Figure 14 : Structure de réglage (R-S-T).....	108

Chapitre 04

Figure 1 : Structure d'un système de production d'énergie photovoltaïque	113
Figure 2: Fonctionnement d'un panneau photovoltaïque	113
Figure 3: Principe de MPPT d'un panneau photovoltaïque.....	114
Figure 4: Principe de la méthode P&O.....	116
Figure 5: Fonctionnement de la méthode P&O sous l'évolution rapide de l'ensoleillement.....	116
Figure 6: Structure du contrôleur MPPT flou.....	118
Figure 7: Fonctions d'appartenance des entrées et de sortie	119
Figure 8 : Test 1 : [a] Puissance [b] Courant [c] Tension	121
Figure 9 : Test 2 : [a] L'ensoleillement [b] Puissance [c] Courant [d] Tension.....	122
Figure 10 : Test 3 : [a] Température [b] Puissance [c] Courant [d] Tension.....	123
Figure 11 : Formes des fonctions d'appartenances des entrées du régulateur flou adaptatif.....	124
Figure 12 : Formes des fonctions d'appartenances de la sortie du régulateur flou adaptatif.....	124
Figure 13 : Application du contrôleur flou	126
Figure 14 : Schémas bloc Simulink du régulateur neuro-flou utilisé.....	126
Figure 15 : Fonctions d'appartenance d'entrées	127
Figure 16 : Fonctions d'appartenance de sorties.....	127
Figure 17 : Application du contrôleur ANFIS.....	129
Figure 18 : Application du contrôleur prédictif.....	131
Figure 19 : Coefficient de puissance.....	132
Figure 20 : (a) : vitesse spécifique, (b) : zoom	133
Figure 21 : (a) : vitesse de la turbine, (b) : zoom.....	134

Abréviations & Symboles

ABREVIATIONS ET SYMBOLES

Abréviation	Désignation
SEH	Systèmes d'Énergie Hybrides
CC	Courant Continu
CA	Courant Alternatif
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PI	Proportionnel intégrale
IG	Générateur Asynchrone
SCIG	Générateur Asynchrone à cage d'écureuil
DFIG	Générateur Asynchrone doublement alimenté
SG	Générateur Synchrone
GSAP	Générateur synchrone à aimants permanents
WRSG	Générateur Synchrone à Rotor Bobiné
SMES	Stockage de l'énergie dans les inductances supraconductrices
FMM	Force magnétomotrice
FLC	Fuzzy Logic Control
IMC	Internal Model Controller
MPC	Model Predictive Control
MBPC	Model Based Predictive Control
MAC	Model Algorithmic Control
DMC	Dynamic Matrix Control
EHAC	Extended Horizon Adaptive Control
EPSAC	Extended Prediction Self-Adapted Control
GPC	Generalized Predictive Control
PFC	Predictive Functional Control
CRHPC	Constrained Receding Horizon Predictive Control

Symboles

H_2	Hydrogène
O_2	Oxygène
C_g	Couple transmis par la génératrice [Nm]
C_{aer}	Couple aérodynamique [Nm]
C_p	Rendement aérodynamique de la turbine éolienne
C_{vis}	Couple résistant dû au frottement
I_s	Courant statoriques [A]
Ω_{tur}	La vitesse de la turbine (tr/mn)
Ω_{mec}	La vitesse mécanique (tr/mn)
J_G	Moment d'inertie du rotor de la génératrice [$kg.m^2$]
J_h	Moment d'inertie de l'arbre d'entraînement [$Kg.m^2$]
$J_{turbine}$	Moment d'inertie de la turbine [$Kg.m^2$]
J_{pale}	Moment d'inertie des pales
J	Moment d'inertie total [$Kg.m^2$]
K_b	Elasticité des pales
λ	Longueur d'onde [μm]
K_h	Elasticité de l'arbre d'entraînement
K_p	Gain de l'action proportionnelle
K_i	Gain de l'action intégrale
G	gain du multiplicateur
β	Angle de calage [Degré]
L_d	Inductance cyclique directe [H]
L_q	Inductance cyclique quadratique [H]
$C_{p,max}$	Coefficient de puissance maximale de la turbine éolienne
ρ	Masse volumique de l'air [$g.m^3$]
I_{abc}	Courants statoriques [A]
I_{dq}	Courants du repère de Park [A]
v_{dq}	Tensions du repère de Park [V]
I_{bat}	Courant de la batterie [A]
C_{em}	Couple électromagnétique [Nm]
C_m	Couple mécanique [Nm]
P_{aer}	Puissance aérodynamique
R_p	Longueur de la pale [m]
R_s	Résistance des enroulements statoriques [ohm]
Φ_{abc}	Flux statoriques [Wb]
Φ_{dq}	Flux d'axes direct (d) et en quadratique (q) [Wb]
P	Le nombre de paires de pôles
T_e	Constante de temps électrique [s]

G_0	Le gain statique
C	Capacité de stockage [Ah]
R	Résistance interne de la batterie [Ω]
V_{dc}	Tension du bus continu [V]
V_{bat}	Tension de la batterie [V]
Q_b	Quantité de charge manquante
C_b	Capacité nominale de la batterie [Ah]
C_1	la valeur de la capacité [F]
d_b	Rapport cyclique
K_t	Le coefficient de couple
φ_f	Le flux inducteur

Introduction Générale

Introduction Générale

L'épuisement rapide des ressources en combustible fossiles à l'échelle mondiale a nécessité une recherche urgente pour les sources d'énergies alternatives pour répondre à la demande de nos jours [1]. Une autre raison clé pour réduire notre dépendance aux combustibles fossiles est la croissance des phénomènes de réchauffement planétaire.

Le réchauffement climatique est considéré comme l'un des problèmes environnementaux les plus critiques que les gens vont faire face dans les prochaines années. Par conséquent, il est impératif de trouver des sources alternatives pour couvrir la demande croissance d'énergie tout en minimisant les impacts négatifs sur l'environnement [2].

La production de l'énergie électrique à partir des sources renouvelables peut contribuer d'une manière significative à la réduction des émissions à effet de serre tels que le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote et de protéger l'environnement contre une dégradation supplémentaire [3].

La production d'électricité à partir des sources d'énergie renouvelables devient de plus en plus utilisable et économique que les systèmes traditionnels de production pour fournir une énergie fiable dans les zones non desservies par les réseaux électriques classiques [4]. Elle permet l'alimentation en énergie dans les secteurs suivants : l'électrification rurale, l'agriculture, l'électrification insulaire, le tourisme, l'industrie et les télécommunications [5], [6].

La fiabilité croissante des systèmes basés sur les énergies renouvelables ont mené à une grande utilisation pour la génération d'énergie électrique dans les régions éloignées.

L'énergie éolienne et l'énergie solaire sont deux énergies renouvelables utilisant les ressources naturelles (vent et soleil). Elles sont abondantes, propres et inépuisables [7].

Les ressources énergétiques solaires et éoliennes varient considérablement au fil du temps et ne correspondent généralement pas avec les fluctuations de la charge selon les périodes annuelles ou journalières. Pour les régions isolées, la solution à retenir est l'intégration de l'énergie solaire et éolienne dans le même système [8]. Dans la mesure où la consommation et la production sont fortement découplées, l'intégration du dispositif de stockage est nécessaire [9].

PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS

Le plus gros problème pour une utilisation séparée de l'énergie solaire et l'énergie éolienne est leur discontinuité. Un système d'énergie solaire par lui-même ne peut pas fournir une source continue d'énergie en raison de sa faible disponibilité au cours de chaque période sans soleil et pendant l'hiver, alors qu'un système d'énergie éolienne ne peut pas répondre à la demande constante de charge en raison des variations de la vitesse du vent d'une heure à l'autre.

En général, les variations de l'énergie solaire et les fluctuations de l'énergie éolienne ne correspondent pas à la répartition temporelle de la demande de charge.

La combinaison de l'énergie éolienne et solaire dans une centrale électrique hybride permet de lisser cette variation.

La décision d'utiliser ou non les deux ressources dépend aussi de la charge parce que l'objectif est de rendre la production égale à la consommation.

L'objectif de travail de la thèse est d'assurer la commande et l'optimisation des systèmes de production de l'énergie électrique à partir de sources renouvelables (éolienne, solaire) alimentant un site isolé.

ORGANISATION DE LA THESE

Les travaux présentés dans cette thèse concernent l'optimisation du transfert d'énergie entre les sources d'énergies renouvelables et le dispositif de stockage quelles que soient les conditions météorologiques.

Dans le premier chapitre, nous décrivons le contexte de la production de l'énergie électrique des sources renouvelables. Ensuite, nous focalisons notre attention sur les technologies de la production d'électricité à partir de l'énergie éolienne et le photovoltaïque. Les différentes solutions technologiques permettant de stocker l'énergie sont aussi présentées.

La modélisation du système de conversion est établie dans le chapitre 2. La modélisation des éléments constituant de la chaîne de conversion éolienne est présentée. Cette chaîne est constituée d'une turbine éolienne, d'une génératrice synchrone à aimants permanents et du bus DC. Cette modélisation, qui permet de faire une analyse du comportement dynamique du couplage entre le générateur synchrone et le bus DC.

Ensuite, Le modèle de la chaîne de production photovoltaïque est mis au point afin de déterminer la puissance que peut fournir les modules PV aux dispositifs de stockage et à la charge électrique. Le modèle du générateur PV, l'influence des paramètres météorologiques, ainsi que l'influence des paramètres externes, seront présentés.

La commande vectorielle classique reposant sur une régulation cascade des courants statoriques et vitesse rotorique est traitée dans le présent chapitre. La boucle interne du courant statorique et la boucle externe de la vitesse sont réalisées à l'aide de correcteurs de type Proportionnel Intégral. Les résultats obtenus servent de références pour évaluer les performances des autres stratégies de commande développées par la suite.

Le chapitre 2 présente aussi la modélisation et le contrôle du système de stockage d'énergie. Ce chapitre montre le contrôle de la tension de sortie et de la fréquence du côté de la charge. Pour contrôler la gestion du flux de puissance, nous avons développé un superviseur. Ce dernier permet une gestion efficace de l'énergie.

Dans le chapitre 3, nous présentons dans la première partie, une étude sur les réseaux de neurones, les différents modèles, leurs apprentissages et les différentes structures de commande connus dans la littérature des réseaux de neurones. Dans la deuxième partie nous présentons une

étude sur la logique floue. L'état de l'art de la commande prédictive fait l'objective de la troisième partie.

Ces techniques seront appliquées pour l'optimisation de la production de l'énergie électrique à partir des énergies renouvelables.

Le quatrième chapitre s'intéresse à l'optimisation de la conversion éolienne par les différentes techniques citées en chapitre 03. (Commande par la logique floue, les réseaux de neurones et la commande prédictive). Ces commandes sont testées sous SIMULINK-MATLAB pour la maximisation de puissance du système éolien. Les résultats obtenus par simulation seront alors présentés et analysés.

Dans le quatrième chapitre, nous allons étudier l'optimisation de la production d'électricité à partir de l'énergie solaire. Tout d'abord, nous parlons des techniques de maximisation de puissance des panneaux photovoltaïques qui existent dans la littérature. Ensuite, la stratégie de commande par la logique floue sera proposée dont l'objectif est d'améliorer le rendement quelques soient les conditions climatiques et leurs variations.

Enfin, dans la conclusion générale, nous présentons une synthèse des travaux effectués ainsi que les principaux résultats obtenus, puis les perspectives et notamment les suggestions de travaux futurs.

ETAT DE L'ART

Chapitre 1

ETAT DE L'ART

1. INTRODUCTION

La production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. L'exploitation des énergies renouvelables est une solution indispensable.

La production d'électricité mondiale provenant des sources d'énergies renouvelables a atteint 1 849 gigawatts (GW), en hausse de 8,7 % sur un an. Cet essor a été principalement porté par l'éolien (433 GW, + 17 %) (Fig.1) et le solaire photovoltaïque (227 GW, + 28 %) (Fig.2), ces deux filières assurant à elles seules les trois quarts de la croissance globale. [10]

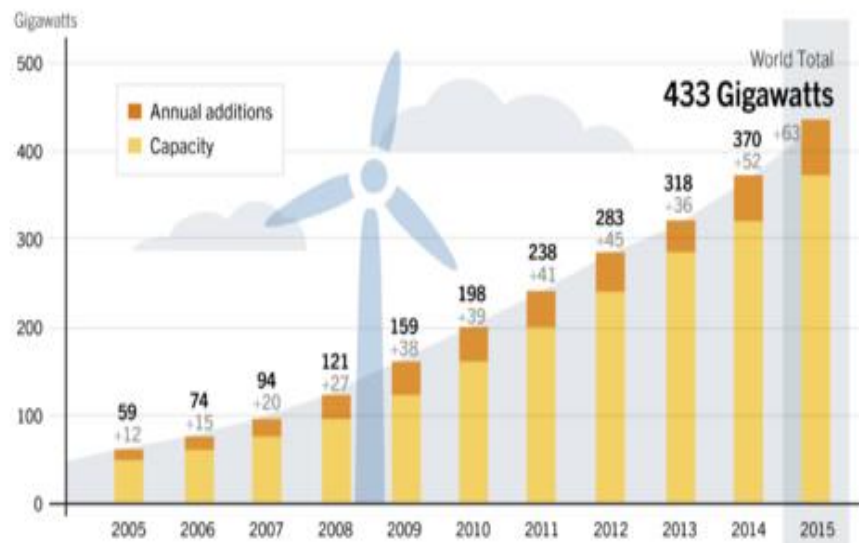


Figure 1 : Production d'électricité d'origine éolienne

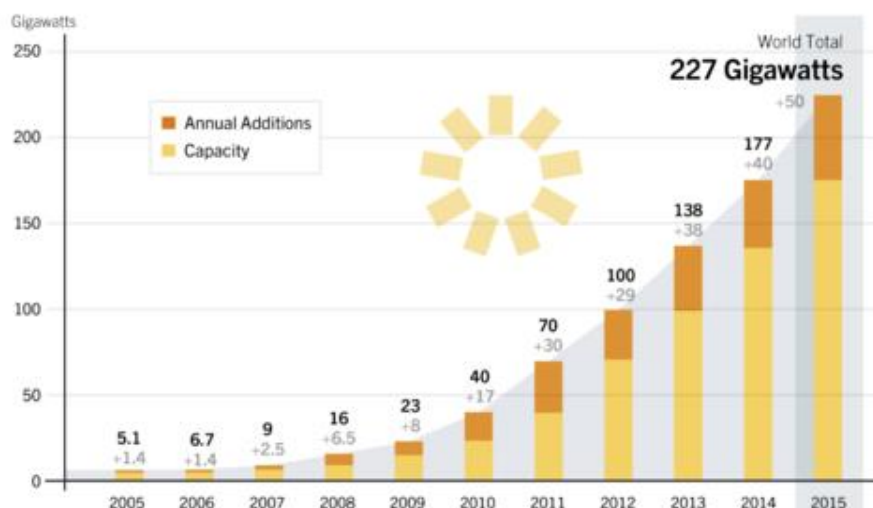


Figure 2 : Production d'électricité d'origine solaire

L'apport des nouveaux systèmes de production d'énergies renouvelables a été décisif pour freiner l'augmentation de la part des sources conventionnelles dans le total mondial, et ainsi réduire la production des gaz à effet de serre.

Compte tenu de la dynamique actuelle des filières éolienne, solaire et biomasse, la croissance de la production d'électricité renouvelable devrait rester soutenue dans les prochaines années et sa part dans la production mondiale devrait continuer à augmenter.

2. SOURCES D'ÉNERGIE RENOUVELABLE

Les **énergies renouvelables** sont des sources d'énergies dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain. L'expression *énergie renouvelable* est la forme courte et usuelle des expressions « sources d'énergie renouvelables » ou « énergies d'origine renouvelable » qui sont plus correctes d'un point de vue physique. Les énergies renouvelables n'engendrent pas ou peu de déchets ou d'émissions polluantes. Elles participent à la lutte contre l'effet de serre et les rejets de CO₂ dans l'atmosphère, facilitent la gestion raisonnée des ressources locales, génèrent des emplois.

L'énergie renouvelable provient de plusieurs sources distinctes.

2.1 SOURCE HYDRAULIQUE

L'hydroélectricité utilise le mouvement de l'eau pour faire tourner une turbine et produire de l'électricité.

L'eau peut être dans une rivière en mouvement, se déplaçant de plus hautes à des élévations inférieures à travers un barrage spécialement construit, ou dans le mouvement des marées ou des vagues d'océan.

L'hydroélectricité est la source d'énergie renouvelable la plus utilisée pour produire de l'électricité.

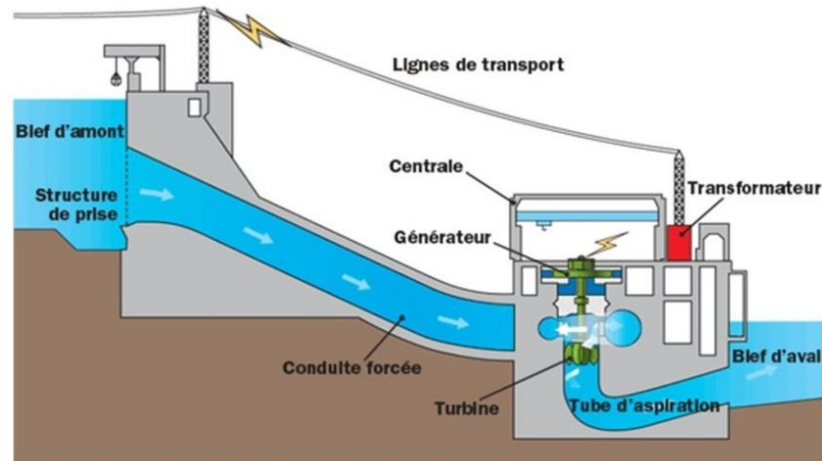


Figure 3 : Centrale hydraulique

2.2 SOURCE PHOTOVOLTAÏQUE

Le soleil constitue une réserve d'énergie renouvelable inépuisable et gratuite. L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Les panneaux photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques ont la capacité de transformer directement la lumière solaire en énergie électrique qui peut être exploitée directement après un étage d'adaptation. L'énergie solaire photovoltaïque offre une réponse durable aux enjeux énergétiques actuels. Elle contribue à limiter les émissions de CO₂ dans l'atmosphère et constitue une alternative aux énergies fossiles.



Figure 4 : Source photovoltaïque

2.3 SOURCE MARINE

La filière des énergies marines appelées aussi énergie des océans ou thalasso-énergies, comprend le développement des technologies et la maîtrise et l'exploitation des flux d'énergies naturelles fournies par les mers et les océans. On recense : la houle, l'énergie des vagues, l'énergie des courants, l'énergie des marées et l'énergie thermique des mers (ETM) qui travaille sur le gradient thermique entre les couches d'eau de surface et celle des profondeurs.

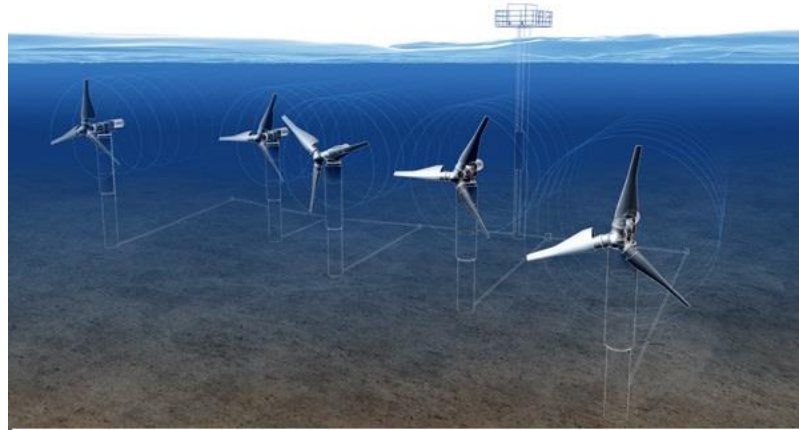


Figure 5 : Energie de la mer

2.4 SOURCE EOLIENNE

Développée sur le même principe que celui des anciens moulins, l'énergie éolienne convertit l'énergie du vent en énergie mécanique. La ressource éolienne vient du déplacement des masses d'air. Le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres créent une différence de pression et ainsi le déplacement des masses d'air. Le vent ainsi créé permet de faire tourner des pales d'une éolienne qui entraînent une génératrice comme énergie primaire. Les parcs éoliens continuent de se développer pour produire de l'électricité aussi bien au niveau local qu'à un niveau plus large (par injection sur le réseau d'électricité).



Figure 6 : Parc éolien

2.5 GEOTHERMIE

La géothermie, ou "chaleur de la terre", couvre l'ensemble des applications permettant d'exploiter la chaleur contenue dans le sous-sol ou dans les nappes d'eau souterraines. Il existe différents types de géothermie, répartis en deux grands domaines : la production d'électricité et la production de chaleur/froid. En fonction de la ressource, des besoins et de la technique utilisée, les applications sont multiples.

On distingue 3 types de géothermie : la géothermie profonde à haute énergie (150 - 250°C) pour la production d'électricité, la géothermie moyenne à basse énergie (30 - 150°C) pour le chauffage urbain collectif par réseau de chaleur, et la géothermie à très basse énergie (< 30°C) par pompe à chaleur.

La production d'électricité d'origine géothermique dans le monde s'élève à 151 TWh. À la fin de 2015, les pays ayant la plus grande capacité de production d'énergie géothermique sont les États-Unis (3,6 GW), les Philippines (1,9 GW), l'Indonésie (1,4 GW), le Mexique (1,1 GW), la Nouvelle-Zélande (1,0 GW), l'Italie (0,9 GW), l'Islande (0,7 GW), Au Kenya (0,6 GW) et au Japon (0,5 GW).

L'électricité d'origine géothermique représente 0.4% de la production d'électricité mondiale.

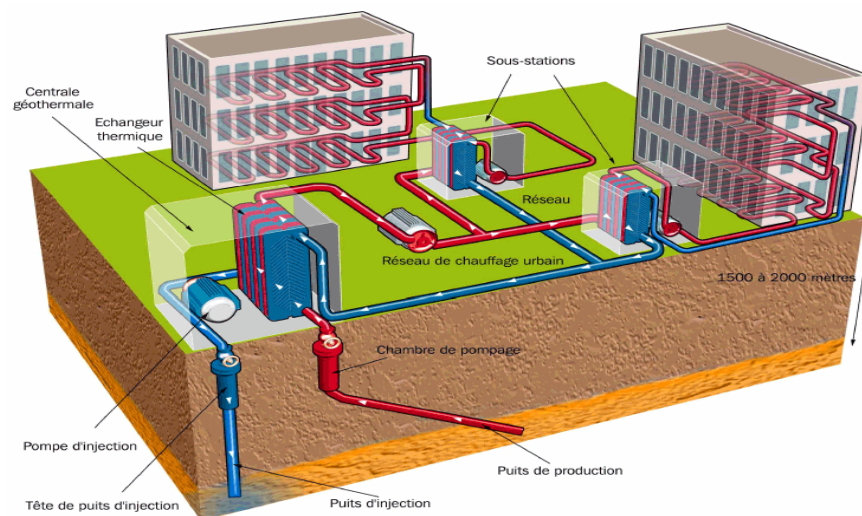


Figure 7 : Centrale géothermique

3. UTILISATION DES ENERGIES RENOUVELABLES

L'énergie électrique produite par des sources renouvelables peut être utilisée en deux modes :

- ❖ Mode Autonome,
- ❖ Connectée au réseau.

Les systèmes d'énergie renouvelable individuels qui fournissent de l'électricité à de petites communautés sont assez répandus. Ils sont adaptés aux endroits dont la connexion au réseau n'est pas rentable ou même impossible.

Depuis quelques années, il n'est plus nécessaire d'installer les systèmes de production d'énergie renouvelable précisément sur le lieu d'utilisation de l'énergie. L'énergie électrique générée est transférée par un réseau électrique sur une distance plus ou moins grande vers les utilisateurs.

3.1 SYSTEMES RACCORDEES AU RESEAU

Dans le domaine éolien, les turbines éoliennes installées (par des clients privés ou industriels) sont généralement connectées sur le réseau global.

La consommation du client est enregistrée par un compteur et la puissance produite par l'éolienne est injectée au réseau public et comptabilisée à travers un autre compteur. La facturation est faite séparément, selon la consommation et la production d'énergie [11].

Dans les dernières années, même avec l'installation des grandes turbines éoliennes de puissance nominale de l'ordre du mégawatt, la puissance délivrée par une seule turbine reste une quantité petite par rapport à celle d'une centrale conventionnelle. Par ailleurs, dans la majorité des pays, les zones proposant des vitesses de vent techniquement utilisables sont restreintes à quelques régions seulement. Ceci nécessite l'assemblage dans ces lieux d'autant d'éoliennes que possible, indépendamment de la demande énergétique locale. De cette façon, apparaissent les parcs ou fermes éoliennes, qui consistent en une concentration de nombreuses éoliennes en groupes organisées dans l'espace considéré et interconnectées. Ce groupement offre de nombreux avantages techniques. De plus, d'un point de vue économique, il est plus intéressant en termes de coût d'installation et de raccordement au réseau [12].

L'utilisation de l'énergie photovoltaïque est très répandue dans les bâtiments. La plupart des bâtiments sont raccordés au réseau électrique, l'électricité est disponible en permanence à un niveau de puissance choisi par le consommateur. L'installation d'un système d'énergie renouvelable peut améliorer le bilan énergétique du propriétaire [13].

3.2 SYSTEMES AUTONOMES

De plus en plus d'applications ne peuvent pas être reliées au réseau à cause de la complexité de la connexion à celui-ci ou du coût d'installation. Pour autant, il est souvent indispensable d'avoir accès à l'électricité afin d'assurer quelques services de base comme l'éclairage ou l'alimentation d'un dispositif électrique. Ces sites peuvent alors être alimentés en électricité par l'énergie renouvelable [13].

Durant les dernières années, d'importants efforts ont été effectués pour l'utilisation de l'énergie renouvelable dans des systèmes de puissance locaux et régionaux à travers l'intégration de systèmes de distribution de petites et moyennes tailles. De nombreux travaux sur le développement des systèmes éoliens autant que photovoltaïques pour les sites isolés ont été réalisés [14]–[17].

4. GÉNÉRALITÉS SUR LES SYSTÈMES DE CONVERSION D'ÉNERGIE SOLAIRE

Une technologie pour produire de l'électricité d'une manière renouvelable est d'utiliser des cellules solaires pour convertir l'énergie fournie par le rayonnement solaire en électricité [18]. La production d'énergie photovoltaïque est actuellement l'objet de beaucoup d'intérêt commercial et académique [19].

Des travaux récents indiquent que, dans le moyen et long terme, la production photovoltaïque peut devenir commercialement si attrayant qu'il y aura mise en œuvre à grande échelle dans de nombreuses régions du monde développé [20]–[22].

4.1 ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant de photons, compris dans le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en énergie électrique. Elle utilise pour ce faire des modules photovoltaïques composés de cellules ou de photopiles fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible qui réalisent cette transformation d'énergie [23].

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique statique courant-tension $I(V)$ non linéaire et présentant un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble [23].

4.2 BREF HISTORIQUE

L'hélioélectricité, qui traite de la transformation directe de l'énergie solaire en énergie électrique, est apparue en 1930 avec les cellules à oxydes cuivreux puis au sélénium, mais ce n'est qu'en 1954 [24], avec la réalisation de premières cellules photovoltaïques au sélénium dans les laboratoires de la compagnie Bell telephone, que l'on entrevoit la possibilité de fournir de l'énergie. Les cellules photovoltaïques ont été rapidement utilisées pour l'alimentation des véhicules spatiaux. Leur développement a été motivé par la conquête de l'espace [25].

Au cours des années 80, la technologie photovoltaïque terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelque mégawatt et même devenue familière des consommateurs à travers de nombreux produits de faibles puissances y faisant appel : montres, calculatrices, balises radio et météorologique, pompes et réfrigérateurs solaires [25]. Des événements tels que les courses de véhicules solaires offrant une image de haute technologie futuristes et écologique y ont également contribué [26], [27].

4.3 ELECTRICITE SOLAIRE PAR EFFET PHOTOVOLTAÏQUE

Découvert par le physicien français A. BECQUEREL dès 1839, l'effet photovoltaïque permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires (photon) en électricité (Volt) par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière (Fig.8) [28], [29].

Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type '**N**' et dopée de type '**P**'. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau dopé **N** diffusent dans le matériau dopé '**P**'. La zone initialement dopée '**N**' devient chargée positivement et la zone initialement dopée '**P**' va avoir une charge négative. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone '**N**' et les trous vers la zone '**P**' [30].

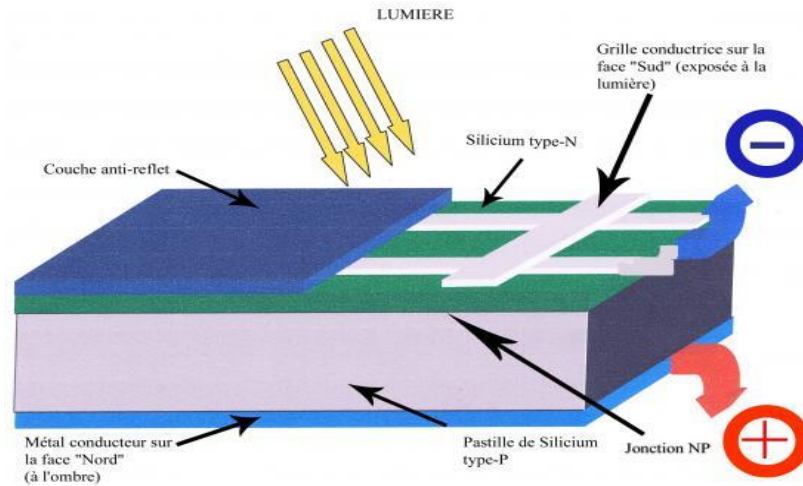


Figure 8 : Effet photovoltaïque

Donc ce principe réside en une collision des photons incidents (flux lumineux) avec les électrons libres et les électrons de valence en leur communiquant une énergie (E_v) [23].

- ❖ Si cette énergie est supérieure ou égale à l'énergie de gap de ce semi-conducteur $E_g = E_c - E_v$, l'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction en laissant un trou derrière lui, d'où l'apparition des paires électron-trou dans différents points de la jonction. Donc toute particule minoritaire près de la jonction a une probabilité très forte pour la traverser et la jonction s'oppose uniquement le passage des porteurs majoritaires (Fig.9).

- ❖ Si les photons ont une énergie très supérieure à E_g , ils passent de la bande de valence à un niveau instable de la bande de conduction. L'excès d'énergie sera transmis sous forme de photons réseau cristallin puis perdue en chaleur et l'électron prendra un niveau stable dans la bande de conduction.

- ❖ Si les photons ont une énergie inférieure à E_g ils ne seront pas absorbés et leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque.

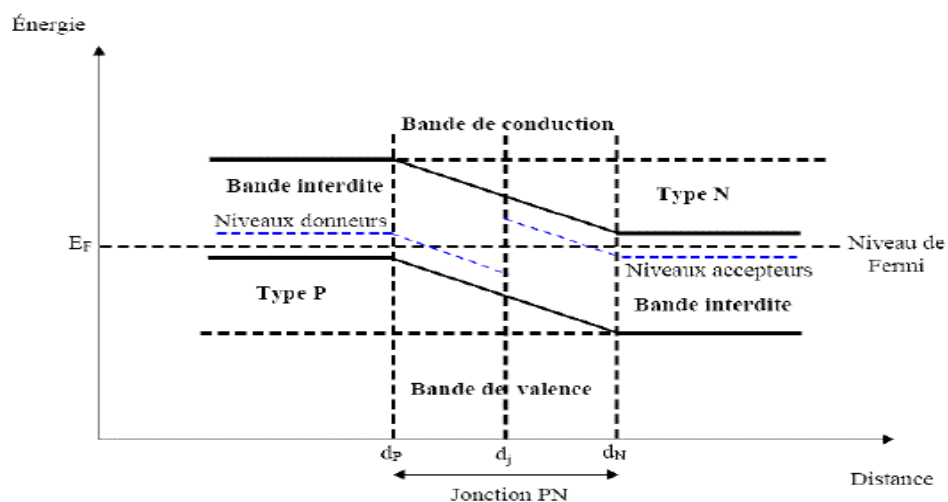


Figure 9 : Diagramme de bandes d'énergie au voisinage de la jonction

4.4 CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

La cellule photovoltaïque est un moyen de conversion de la lumière en énergie électrique par le processus « effet photovoltaïque ». Elle 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 P-N avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction P-N 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. A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs. La tension maximale de la cellule est d'environ 0,6 V pour un courant nul.

Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (V_{oc}) (Fig.10). 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 [31], [32].

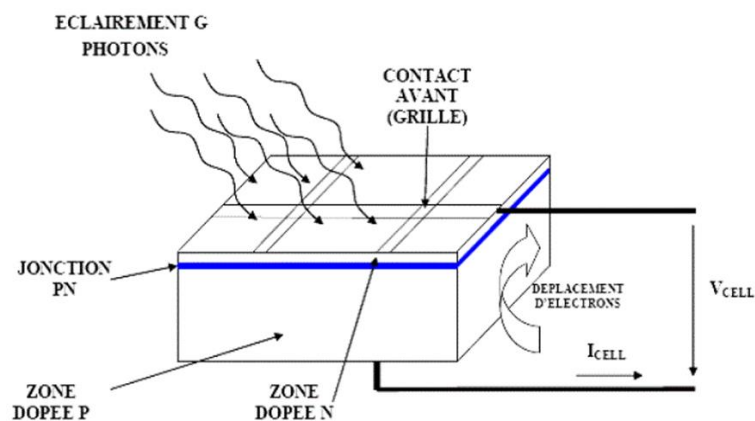


Figure 10 : Coupe transversale d'une cellule PV typique

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Le régime photovoltaïque est un régime où aucun potentiel n'est appliqué, mais où un courant circule à travers une charge.

Le système développe donc une puissance électrique. Le principe de fonctionnement de la cellule fait appel aux propriétés du rayonnement et celles des semi-conducteurs.

La conversion de photons en électrons dans un matériau pouvant produire un courant électrique nécessite [33], [34]:

- ❖ Absorption des photons par le matériau (absorption optique) et la génération des porteurs de charges.
- ❖ Collecte des porteurs excités avant qu'ils ne reprennent leur énergie initiale (relaxation).

Une cellule photovoltaïque produit une tension de 0,5V en circuit ouvert. L'intensité du courant fourni par cette cellule dépend des conditions environnantes et en fonction de la charge.

4.5 TYPES DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quel que soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent. Actuellement, il existe trois principaux types de cellules [35]:

➤ Cellules Monocristallines

Les cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal (Fig.11) [36].

Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie; plus onéreux, il est cependant plus efficace que le silicium polycristallin. Du silicium à l'état brut est fondu pour créer un barreau. Lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé on obtient un monocristal.

Un Wafer (tranche de silicium) est alors découpé dans le barreau de silicium. Après divers traitements (traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction P-N, dépôt de couche antireflet, pose des collecteurs), le Wafer devient cellule.

Les cellules sont rondes ou presque carrées et, vues de près, elles ont une couleur uniforme. Elles ont un rendement de 15 à 22 %, mais la méthode de production est laborieuse [37].



Figure 11 : Cellule photovoltaïque (monocristalline)

➤ Cellules Polycristallines

Les cellules polycristallines sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vu de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (Fig.12).

Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines [38].

Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication [39].

Le wafer est scié dans un barreau de silicium dont le refroidissement forcé a créé une structure polycristalline. (Durée de vie estimée : 30 ans)

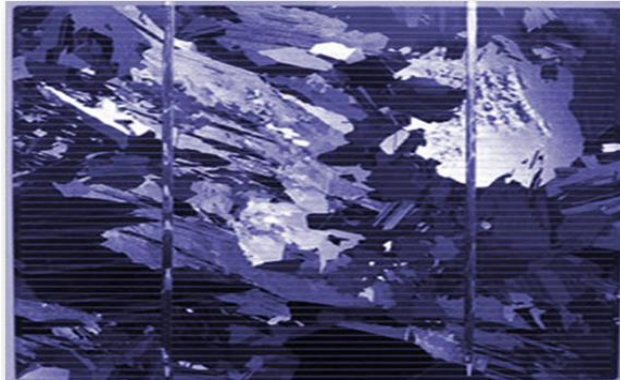


Figure 12 : Cellule PV polycristalline

➤ Cellules Amorphes

Les modules photovoltaïques amorphes ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 8% actuellement. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide [40].

Le rendement de ces panneaux est moins bon que celui des technologies polycristallines ou monocristallines. Cependant, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grandes surfaces à bas coût en utilisant peu de matière première [41].

4.6 MODULE PHOTOVOLTAÏQUE

Typiquement une cellule photovoltaïque produit moins de 2 watts sous approximativement 0,5V. Alors pour produire plus de puissance les cellules sont assemblées pour former un module.

Une association série de plusieurs cellules donne un module et une association série et/ou parallèle de plusieurs modules permet de réaliser un panneau photovoltaïque (Fig.13) [42].

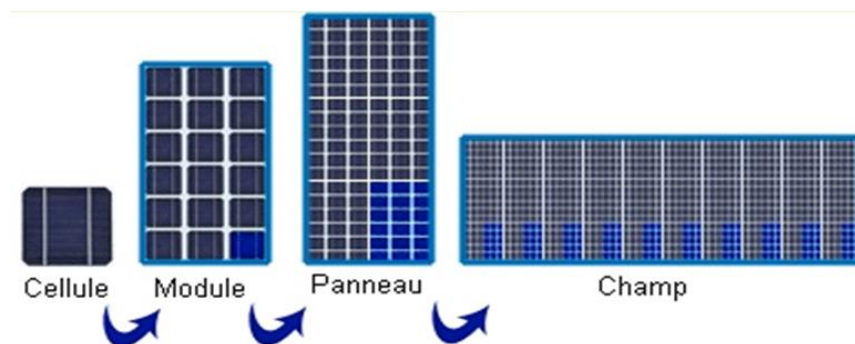


Figure 13 : Cellules, module et panneau photovoltaïque

Un module photovoltaïque se compose généralement d'un circuit de 36 cellules en série, protégées de l'humidité par un capsulage de verre et de plastique. L'ensemble est ensuite muni d'un cadre et d'une boîte de jonction électrique [43].

Le passage d'un module à un panneau se fait par l'ajout de diodes de protection, une en série pour éviter les courants inverses et une en parallèle, dite diode by-pass, qui n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de production associée [43].

Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. La puissance crête, obtenue sous un éclairage maximal sera proportionnelle à la surface du module. La rigidité de la face avant (vitre) et l'étanchéité sous vide offerte par la face arrière soudée sous vide confèrent à l'ensemble sa durabilité [43].

4.7 GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

Dans des conditions d'ensoleillement standard ($1000\text{W}/\text{m}^2$; 25°C ; AM 1.5), la puissance maximale délivrée par une cellule silicium de 150 cm^2 est d'environ 2.3 W sous une tension de 0.5V .

Une cellule photovoltaïque élémentaire constitue donc un générateur électrique de faible puissance insuffisante en tant que telle pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Les générateurs photovoltaïques sont, de ce fait réalisés par association, en série et/ou en parallèle, d'un grand nombre de cellules élémentaires [19].

$$V_{co}(ns) = ns \cdot V_{co} \quad (1)$$

Une association de ns cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule (Fig.14). L'équation (1) résume les caractéristiques électriques d'une association série de ns cellules.

Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce. Comme la surface des cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible. L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble. Les panneaux commerciaux constitués de cellules de première génération sont habituellement réalisés en associant 36 cellules en série ($V_{co}(ns)=0,6.36=21,6\text{V}$) afin d'obtenir une tension optimale du panneau V_{opt} proche de celle d'une tension de batterie de 12V

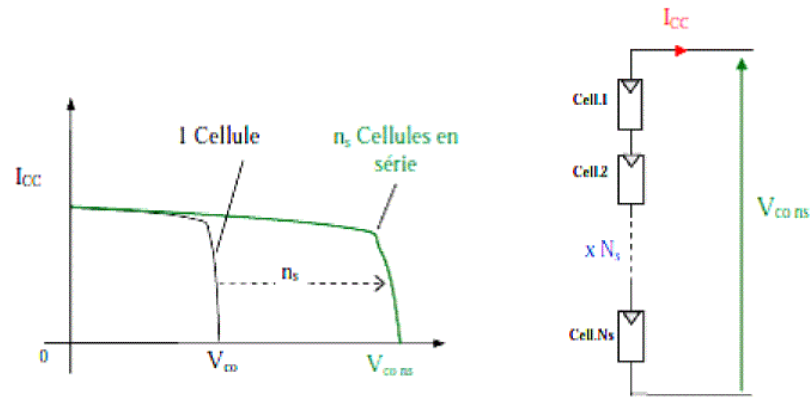


Figure 14 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de ns cellules en série

D'autre part, une association parallèle de np cellules est possible et permet d'accroître le courant sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants (Fig.15). L'équation (2) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de np cellules.

$$I_{sc}(np) = np \cdot I_{sc} \tag{2}$$

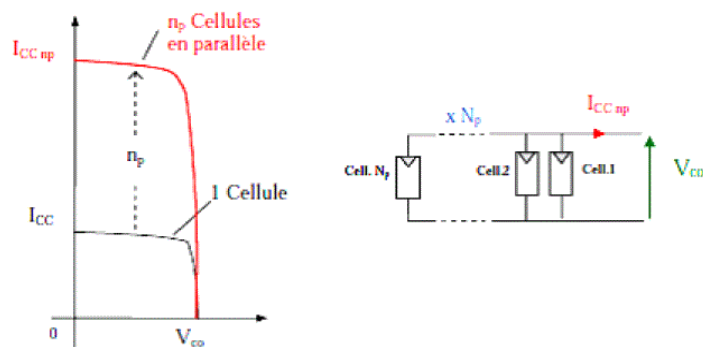


Figure 15 : Caractéristiques résultant d'un groupement de np cellules en parallèle

Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaités.

Ainsi, pour ns cellules en série, constituant des branches elles-mêmes np en parallèle, la puissance disponible en sortie du générateur PV est donné par :

$$V_{pv} = (ns \cdot V_{pv}) \cdot (np \cdot I_{pv}) \tag{3}$$

Si l'on désire avoir un générateur PV ayant un courant de sortie plus intense, on peut soit faire appel à des cellules PV de plus grande surface et de meilleur rendement, soit associer en parallèle plusieurs modules PV de caractéristiques similaires. Pour qu'un générateur PV ainsi constitué puisse fonctionner de façon optimale, il faut que les (ns, np) cellules se comportent toutes de façon identique.

Elles doivent pour cela être issues de la même technologie, du même lot de fabrication et qu'elles soient soumises aux mêmes conditions de fonctionnement (éclairage, température, vieillissement et inclinaison).

La puissance du générateur PV sera optimale si chaque cellule fonctionne à sa puissance maximale notée P_{max} . Cette puissance est le maximum d'une caractéristique $P(V)$ du générateur et correspond au produit d'une tension optimale notée V_{opt} et d'un courant optimal noté I_{opt} [44]. Cette caractéristique dépend fortement de l'éclairage auquel est soumis le générateur et de sa température.

4.8 CONVERSION DE L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE

Dans le cas d'installations autonomes, l'énergie produite par les panneaux solaires photovoltaïques est utilisée immédiatement (pompage, ventilation, etc...) ou stockée dans des batteries pour une utilisation différée. Le courant continu produit alimente directement des appareils prévus à cet effet ou est transformé en 230 V alternatif [45].

Le système peut également être connecté au réseau. L'avantage du raccordement est de se dispenser du coûteux et problématique stockage de l'électricité. Dans ses versions les plus économiques l'onduleur ne peut fonctionner qu'en présence du réseau, une éventuelle panne de ce dernier rend le système de production d'origine renouvelable inopérant. Un onduleur réversible est nécessaire si on a une charge à courant continu. Si la consommation locale est supérieure à la production de la centrale, l'appoint est fourni par le réseau. Dans le cas contraire, l'énergie est fournie au réseau public et sert à alimenter les consommateurs voisins [46].

4.9 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA TECHNOLOGIE PHOTOVOLTAÏQUE

➤ Avantages [23], [47]

- ❖ Haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- ❖ Caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du Milliwatt au Mégawatt.
- ❖ Coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- ❖ Technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant (électricité propre), silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.
- ❖ Fonctionnent de façon rentable dans les régions éloignées et dans de nombreuses applications résidentielles et commerciales.

- ❖ Flexibilités et peuvent être élargis à n'importe quel moment pour répondre à vos besoins en matière d'électricité.
- ❖ Temps de réalisation d'une centrale PV minimum.
- ❖ Longue durée de vie.
- ❖ Elimination des frais des risques de transport associé des énergies fossiles.
 - **Inconvénients [1], [23]**
- ❖ Fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des Investissements d'un coût élevé.
- ❖ Rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%.
- ❖ Générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- ❖ Tributaire des conditions météorologiques.
- ❖ Beaucoup d'appareils vendus dans le marché fonctionnent au 220 à 230V alternatif. Or, l'énergie issue du générateur PV est unidirectionnel et de faible voltage (< 30V), elle doit donc être transformée par l'intermédiaire d'un onduleur.
- ❖ Stockage de l'énergie électrique dans des accumulateurs qui sont les plus souvent des batteries au Plomb. Sachant que les batteries ne doivent pas se décharger à plus de 60% (70% maximum) de leur capacité maximale. En outre, les batteries ont une faible durée de vie (3 à 5ans), ce qui entraîne un surcoût au fonctionnement.

5. GÉNÉRALITÉS SUR LES SYSTÈMES DE CONVERSION D'ÉNERGIE ÉOLIENNE

La production d'électricité à partir de l'énergie éolienne est l'une des plus importantes et prometteuses solutions, car elle est considérée comme source d'énergie renouvelable non polluante et économique viable. De plus, cette énergie qui a été depuis des siècles, a conduit à de nombreuses investigations en vue d'améliorer la technologie des aérogénérateurs dans la conversion électromécanique de l'énergie [48]. Parmi eux, le développement des technologies de l'électronique de puissance qui joue un rôle important dans la production décentralisés et l'intégration de ces sources d'énergie renouvelable dans le réseau électrique [49].

5.1 PRINCIPE DE CONVERSION

Dans un système de génération éolienne, une turbine éolienne convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique utile sur son arbre, et entraîne une génératrice électrique (synchrone ou asynchrone) pour produire de l'électricité (Fig.16) [50].

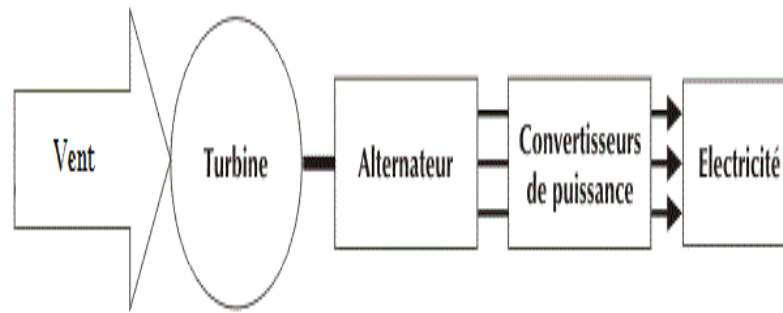


Figure 16 : Conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique

5.2 TYPES D'ÉOLIENNES

Il existe principalement deux types de turbines éoliennes qui se différencient essentiellement dans leur organe capteur d'énergie à savoir l'aéroturbine. En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol on obtient une éolienne à axe vertical ou à axe horizontal (Fig.17) [51].

5.2.1 Eoliennes à axes vertical

Leur axe de transmission est perpendiculaire au sol. Le principal avantage de cette structure est que le dispositif de génération électrique repose sur le sol, facilement accessible, et ne nécessite aucun système d'orientation des pales. Ce type d'éolienne présente des qualités particulières pour la production d'énergie de très faible puissance et se divise en deux familles :

➤ L'éolienne à rotor de SAVONIUS

Elle a été inventée par l'ingénieur Sigurd Savonius en 1924 et a été brevetée en 1929 [52], [53]. Elle est constituée de demi-cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. Le fonctionnement du stator de Savonius est basé sur un couple aérodynamique induit par la déflexion de l'écoulement sur les pales. Le principe de la mise en mouvement de ce type de machine est la trainée différentielle [54].

➤ Eoliennes de DARRIEUS

Inventée par le français Darrieus [55], la forme de son rotor peut être cylindrique ou parabolique. Le Darrieus repose sur l'effet de portance d'un profil soumis à l'action d'un vent relatif et se base sur le principe de la variation cyclique d'incidence [53].

5.2.2 Eoliennes à axes horizontal

Elles présentent généralement un nombre des pales compris entre 1 et 3 et peuvent développer des puissances élevées (plusieurs Mégawatts) [56]. En forme d'hélice, l'éolienne à axe horizontal utilise la force de portance du vent pour générer un couple moteur entraînant sa rotation. Elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position de récepteur offre le privilège de son efficacité [57]. C'est ce type d'éolienne tripale qui sera adopté par la suite.

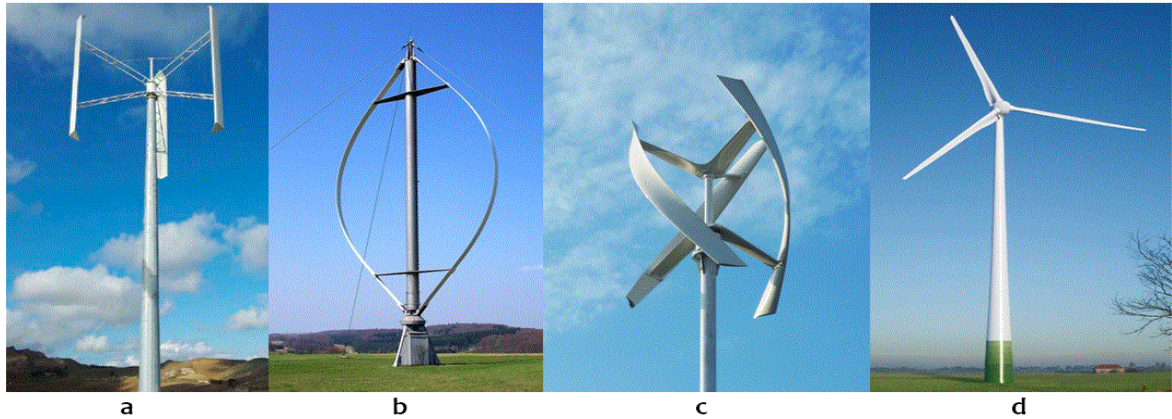


Figure 17 : Exemples des éoliennes à axe verticale (a, b et c) et à axe horizontale (d)

5.3 LES DIFFERENTES CHAINES DE CONVERSION EOLIENNE

L'application la plus fréquente des turbines éoliennes est aujourd'hui la production d'électricité. Pour cela, l'utilisation d'une machine électrique est indispensable. Les générateurs habituellement rencontrés dans les éoliennes sont présentés dans ce qui suit. Différents types de machines électriques peuvent être utilisés pour la génération de puissance éolienne [58]. Des facteurs techniques et économiques fixent le type de machine pour chaque application. Pour les petites puissances (< 20 kW), la simplicité et le coût réduit des générateurs synchrones à aimants permanents (PMSG) expliquent leur prédominance. Dans les applications de plus forte puissance, jusqu'à 2 MW environ, le générateur asynchrone est plus courant et économique [59].

5.3.1 Générateur asynchrone

Le générateur à induction est largement utilisé dans les turbines éoliennes de moyenne et grande puissance en raison de sa robustesse, sa simplicité mécanique et son coût réduit. Son inconvénient majeur est la consommation d'un courant réactif de magnétisation au stator [60].

➤ Générateur asynchrone à cage d'écureuil

Jusqu'à présent le Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil correspond au choix prépondérant par sa simplicité, son bon rendement et une maintenance réduite [61]. La demande de puissance réactive est compensée par la connexion d'un groupe de condensateurs en parallèle avec le générateur (Fig.18), ou par la mise en œuvre d'un convertisseur statique de puissance.

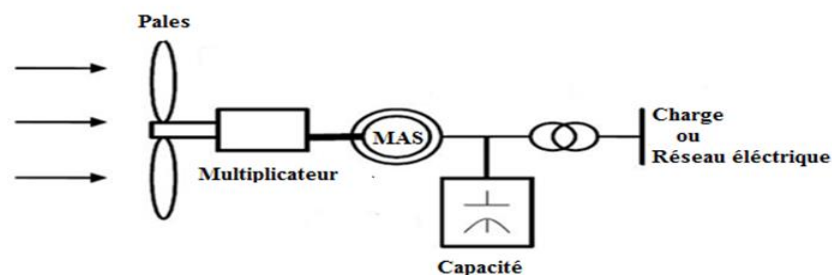


Figure 18 : Système de conversion éolien utilisant la machine asynchrone

➤ Générateur asynchrone à double alimentation

Une des configurations en forte croissance dans le marché des turbines éoliennes est connue sous le nom de machine asynchrone double alimentation (MADA) [62], [63]. Celui-ci est un générateur dont le stator est relié directement au réseau de puissance et dont le rotor est connecté à un convertisseur de type source de tension en « back-to-back » qui fait office de variateur de fréquence. La double alimentation fait référence à la tension du stator prélevée au réseau et à la tension du rotor fournie par le convertisseur. Ce système permet un fonctionnement à vitesse variable sur une plage spécifique de fonctionnement. Le convertisseur compense la différence des fréquences mécanique et électrique par l'injection d'un courant à fréquence variable au rotor (Fig.19).

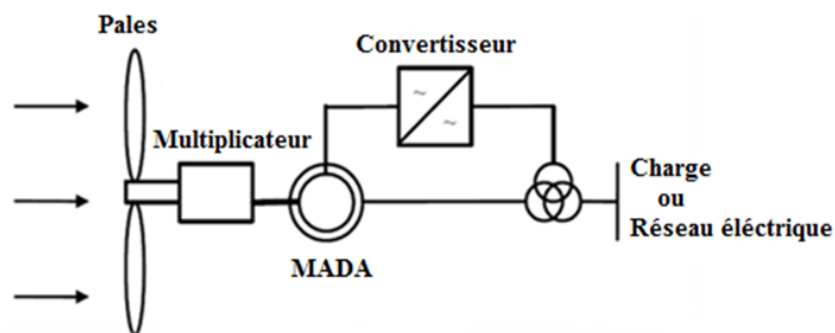


Figure 19 : Système avec MADA pour l'opération à vitesse variable

Les points forts de la MADA sont [64]:

- ❖ Sa capacité de commander la puissance réactive et, de cette façon, de découpler la commande des puissances active et réactive,
- ❖ Il peut se magnétiser à partir du rotor sans prélever au réseau la puissance réactive nécessaire,
- ❖ Il est capable d'échanger de la puissance réactive avec le réseau pour faire la commande de tension,
- ❖ La taille du convertisseur n'est pas simplement en rapport avec la puissance totale du générateur, mais aussi avec la gamme de vitesse choisie. En fait, le coût du convertisseur augmente avec la gamme de vitesse autour de la vitesse de synchronisme. Son inconvénient réside dans la présence obligatoire de bagues et balais.

5.3.2 Générateur synchrone

L'avantage du Générateur Synchrone (GS) sur le Générateur Asynchrone (GA) est l'absence de courant réactif de magnétisation. Le champ magnétique du Générateur Synchrone peut être obtenu par des aimants ou par un bobinage d'excitation conventionnel [65]. Si le générateur possède un nombre suffisant de pôles, il peut s'utiliser pour les applications d'entraînement direct (direct-drive)

qui ne nécessitent pas de boîte de vitesses (Fig.20). Pour des unités de petites tailles, le générateur à aimants permanents (GSAP) est plus simple et moins coûteux.

Au-delà de 20 kW (environ), le générateur synchrone est plus coûteux et complexe qu'un générateur asynchrone de taille équivalente [66].

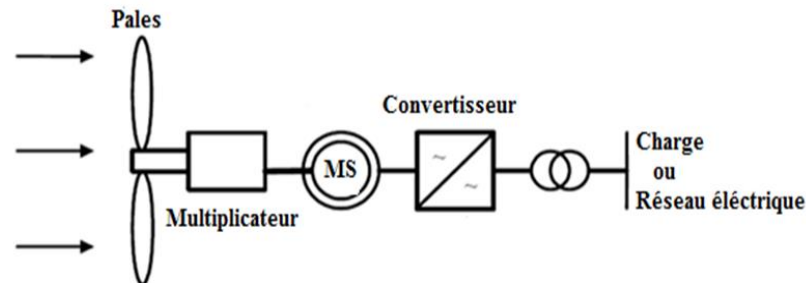


Figure 20 : Système avec générateur synchrone pour un fonctionnement à vitesse variable

➤ Générateur synchrone à rotor bobiné

La connexion directe au réseau de puissance implique que le générateur synchrone tourne à vitesse constante, laquelle est fixée par la fréquence du réseau et le nombre de pôles de la machine. L'excitation est fournie par le système de bagues et balais ou par un système brushless avec un redresseur tournant. La mise en œuvre d'un convertisseur dans un système multipolaire sans engrenages permet un entraînement direct à vitesse variable. Cette solution implique l'utilisation d'un générateur surdimensionné et d'un convertisseur dimensionné pour la puissance totale du système [67].

➤ Générateur synchrone à aimants permanents

La caractéristique d'auto excitation du GSAP lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement ce qui le rend propice à l'application à des systèmes de génération éolienne [68]. Dans la catégorie des petites turbines, son coût réduit et sa simplicité en font le générateur le plus employé. Cependant, dans les applications de plus grande puissance, les aimants et le convertisseur (pour transiter toute la puissance générée), sont les moins compétitifs [69].

5.4 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

➤ Avantages [70], [71]

- ❖ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable contrairement aux énergies fossiles.
- ❖ L'énergie éolienne est une énergie propre. Elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement comme les autres sources d'énergie qui ont causé un changement radical du climat par la production énorme et directe du CO₂.
- ❖ L'énergie éolienne ne présente aucun risque et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs contrairement à l'énergie nucléaire.

❖ Mode d'exploitation des éoliennes et la possibilité de les arrêter à n'importe quel moment, leur donne l'avantage d'avoir un bon rendement, contrairement aux modes de fonctionnement continus de la plupart des centrales thermiques et nucléaires.

➤ **Inconvénients [70], [71]**

❖ Nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour les gérants des réseaux.

❖ Coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés.

❖ Bruit : il a nettement diminué grâce aux progrès réalisés au niveau des Multiplicateurs.

6. GENERALITES SUR LES SYSTEMES DE STOCKAGE

Les unités de stockage sont des éléments indispensables dans les systèmes en site isolé. Elles participent en effet à garantir l'autonomie du site, en constituant une réserve d'énergie lorsque les sources produisent en excédent et en restituant l'énergie emmagasinée lorsque la production est faible [72].

Le stockage d'énergie est un facteur clef dans un système d'énergie hybride en site isolé. Dans la plupart des cas les batteries représentent encore la technologie la plus rentable. Elles sont d'habitude du type plomb acide. Les batteries nickel cadmium sont rarement utilisées, la technologie des batteries plomb acide bénéficie en effet d'avantages tels sont faible coût (par rapport à d'autres technologies) et une maturité étayée par un retour d'expérience conséquent. Cette technologie est par ailleurs largement disponible dans le commerce [73].

Le stockage d'énergie est souvent utilisé dans les petits systèmes hybrides afin de pouvoir alimenter la charge pour une durée relativement longue (des heures ou même des jours). Il est parfois aussi utilisé avec les systèmes hybrides connectés à des réseaux de courant alternatif isolés. Dans ce cas il est utilisé pour éliminer les fluctuations de puissance à court terme [9].

L'emploi des batteries plomb acide est sujet à des contraintes qu'il est nécessaire de respecter pour garantir son bon fonctionnement et sa longévité. Elles ne peuvent rester longtemps inutilisées sans conséquences néfastes sur leur durée de vie.

Les cycles répétés de charge/décharge aléatoires doivent être évités. Leur état de charge ne doit pas atteindre de valeurs extrêmes pour éviter toute dégradation prématurée.

6.1 DIFFERENTS SYSTEMES DE STOCKAGE D'ENERGIE

L'énergie électrique peut être convertie en des formes très diverses pour les stockages [74], [75]:

- ❖ Stockage sous forme d'énergie cinétique
- ❖ Stockage par inductance supraconductrice
- ❖ Stockage hydrogène

❖ Stockage sous forme chimique

6.1.1 Stockage sous forme d'énergie cinétique : les accumulateurs à volant d'inertie

Les volants d'inertie constituent l'une des techniques compétitives de stockage d'énergie des aérogénérateurs (Fig.21) [72], [74].

➤ Principe des accumulateurs à volant d'inertie

Le principe de base du stockage de l'énergie à l'aide d'un solide en mouvement est le suivant : Un corps solide de moment d'inertie J (en Kg.m^2), tournant à la vitesse angulaire ω autour d'un axe passant par son centre de gravité possède une quantité d'énergie cinétique de valeur :

$$E_c = \frac{1}{2}J\omega^2 = \iiint \frac{1}{2}V^2 dm \quad (4)$$

Avec la vitesse périphérique du solide (volant), R son rayon moyen et m sa masse.

La puissance transférée pour un système stationnaire de géométrie constante est :

$$P = \frac{dE_c}{dt} = J\omega^2 \quad (5)$$

Cette énergie stockée est limitée dans la pratique par la contrainte maximale admissible liée aux efforts centrifuges. Cette contrainte est proportionnelle à la masse volumique du matériau constituant le solide et au carré de la vitesse périphérique V :

$$\sigma_{max} = \rho V_{max}^2 \quad (6)$$

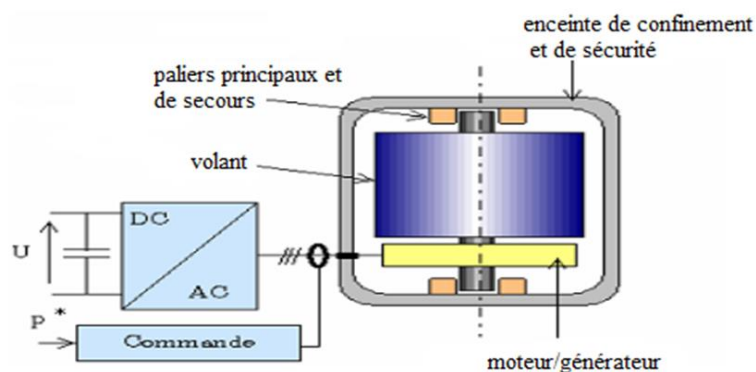


Figure 21 : Principaux éléments d'un accumulateur à volant d'inertie

➤ Avantages des batteries électromécaniques

Les batteries électromécaniques présentent comme avantage une longue durée de vie qui se traduit par une bonne tenue au recyclage [76].

➤ Limites des batteries électromécaniques

Les principales limites des batteries électromécaniques sont :

- ❖ Leur caractère non statique : les pièces en mouvement provoquent de faibles bruits acoustiques,
- ❖ Leur sensibilité aux vibrations et aux mouvements,
- ❖ Leur coût relativement élevé.

6.1.2 Stockage par Inductance Supraconductrice

Le stockage de l'énergie dans les inductances supraconductrices (SMES : Supraconductor Magnetic Energy Storage) est, avec le stockage par super condensateurs, le moyen de stockage direct de l'électricité [77], [78].

➤ Principe du stockage par inductance supraconductrice

Le stockage de l'énergie se fait sous la forme d'un courant électrique continu circulant dans une bobine supraconductrice court-circuitée. Le courant circule sans perte dans le supraconducteur (porté en dessous de la température critique) et stocke ainsi une certaine quantité d'énergie pour une durée théoriquement infinie [76].

La bobine supraconductrice court-circuitée permet de stocker l'énergie sous la forme :

$$W = \frac{1}{2}LI^2 \quad (7)$$

L : étant son inductance et I : le courant qui la traverse.

La résistance du supraconducteur étant nulle, les seules pertes sont dues aux résistances de contacts et à la puissance nécessaire pour maintenir la bobine à une température cryogénique. Pour récupérer cette énergie, il suffit d'ouvrir le circuit et de le brancher sur le récepteur électrique à alimenter. L'énergie stockée dans la bobine supraconductrice est transférée avec un temps très court.

➤ Les avantages des inductances supraconductrices

Un des avantages des inductances supraconductrices est leur très bon rendement instantané, voisin de 95 % pour un cycle de charge décharge [79]. De plus, elles présentent une très grande puissance caractérisée par la possibilité de décharge à 50% en moins de 1s; cet atout, associé à leur temps de réponse rapide (inférieur à 100ms) fait des inductances supraconductrices des systèmes que l'on peut utiliser pour le réglage de la stabilité du réseau.

➤ Inconvénients des inductances supraconductrices

La limite majeure est liée au système de réfrigération qui, même s'il ne pose plus aujourd'hui de problème, accroît considérablement le coût et complique l'exploitation.

6.1.3 Stockage Hydrogène

L'hydrogène, associé aux piles à combustible constitue l'un des moyens utilisés pour le stockage, puis la restitution de l'énergie électrique [74], [80].

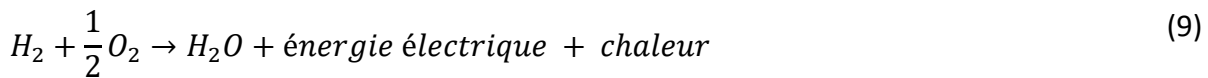
➤ Principe de l'électrolyseur à eau

L'électrolyseur à eau met en œuvre la décomposition de l'eau grâce à l'énergie électrique pour produire de l'hydrogène et de l'oxygène :



Cette réaction est un moyen de stocker l'énergie électrique ayant permis sa réalisation, sous forme d'énergie chimique en stockant l'hydrogène produit. Cet hydrogène constitue un vecteur

d'énergie qui pourra se recombinaer à l'oxygène de l'air pour restituer l'énergie électrique de l'eau et de la chaleur à travers la réaction suivante :



➤ **Avantage des électrolyseurs à eau**

Les électrolyseurs à eau présentent les avantages suivants :

- ❖ Ils sont plus propres pour l'environnement,
- ❖ Ils présentent des densités de courant élevées leur permettant d'avoir des masses et volumes inférieures à la production de gaz équivalente,
- ❖ Ils ont des rendements élevés,
- ❖ L'hydrogène produit est d'une grande pureté.

➤ **Limites du stockage sous forme d'hydrogène**

L'association d'un électrolyseur à eau et d'une pile à combustible pour la production de l'énergie électrique à un rendement global très faible (35% au mieux), et le coût d'investissement est encore prohibitive. Par ailleurs, la durée de vie est insuffisante, surtout dans le contexte des applications au réseau électrique [81].

6.1.4 Stockage sous forme chimique : les accumulateurs électrochimiques

Les accumulateurs électrochimiques sont des dispositifs qui conservent l'énergie sous une forme chimique pour qu'elle puisse être libérée quand il est nécessaire [82], [83].

➤ **Principe des accumulateurs électrochimiques**

Une batterie est composée d'une série de cellules individuelles, dont chacune est capable de fournir un courant défini sous une tension donnée. Chaque cellule contient deux électrodes, une anode et une cathode plongées dans un électrolyte. Une connexion électrique entre les deux électrodes est nécessaire pour permettre le passage d'électrons d'une électrode à l'autre afin de compléter la réaction. Les cellules sont organisées en série et en parallèle de façon à fournir la tension et le courant désirés pour une application particulière.

➤ **Les avantages des accumulateurs électrochimiques**

Les batteries sont l'une des technologies de stockage d'énergie les plus intéressantes pour leur disponibilité et pour leur rendement élevé (75-90%) [84]. Les facteurs clés des batteries pour les applications de stockage incluent : haute densité d'énergie, haute capacité d'énergie, rendement d'aller et retour, capacité de cycle, durée de vie, coût initial. Ces facteurs sont assez attrayants pour une large gamme de batteries. Certaines batteries offrent des possibilités de décharge profonde, favorisant ainsi les stockages à grande échelle pour des applications de grande puissance.

➤ **Les limites des accumulateurs électrochimiques**

- ❖ Une des limites fondamentales des batteries électrochimiques est leur tendance à vieillir.

- ❖ Ce vieillissement est dû à de récurrentes décharges rapides et profondes des cellules ; en effet, le réchauffage fréquent causé par ces décharges réduit la durée de vie des batteries.
- ❖ La plupart des batteries souffrent aussi de la perte d'énergie. Laisse inutilisée trop
- ❖ Longtemps, la cellule se décharge. Cela signifie que les systèmes de batterie peuvent être utilisés seulement pour le stockage sur des temps relativement courts.

6.2 LES TYPES DES BATTERIES

➤ Les batteries au nickel

Le nickel est un métal plus léger que le plomb et propose un potentiel électrochimique intéressant pour une application pour les batteries. On distingue quatre différents couples électrochimiques utilisés par des batteries au nickel : nickel fer, nickel cadmium et nickel métal hydrure [82].

➤ Nickel fer (Ni-Fe)

Thomas Edison en 1901 a mis au point la première batterie nickel fer. Ce type de batterie a été beaucoup utilisé (50 % du marché des voitures électriques) au début du XXème siècle. Cette batterie utilise une électrode positive en nickel et une électrode négative en fer. L'électrolyte est une solution d'hydroxyde de potassium [85].

➤ Nickel cadmium (Ni-Cd) :

Les accumulateurs nickel-cadmium ont été découverts en Suède par Waldemar Jungner, qui déposa un premier brevet en 1899, qu'il étendit aux États-Unis en 1901 [86]. Elles utilisent de l'hydroxyde de Nickel pour les plaques positives et de l'oxyde de Cadmium pour les plaques négatives. L'électrolyte est de l'hydroxyde de Potassium. La tension de ce type d'accumulateur varie entre 1,15 et 1,17 Volts, par élément suivant l'état de charge. Le rendement énergétique est de l'ordre de 70%.

➤ Nickel métal hydrure (Ni-MH)

Les batteries Ni-MH ont remplacé les batteries nickel cadmium dans de nombreuses applications ces dernières années. Elles offrent de meilleures performances sans les problèmes de toxicité du cadmium [85]. Les batteries Ni-MH sont constituées d'une électrode positive en nickel et d'une électrode négative en hydrogène absorbé dans du métal [87].

L'électrolyte est composé d'une solution d'hydroxyde de potassium. Ce type de batterie est très sensible à l'intrusion d'air. L'hydrogène réagirait immédiatement. Elles sont pourvues d'une soupape de sécurité pour pouvoir dégazer lors de surcharges. La tension à vide d'une cellule de nickel métal hydrure varie peu en fonction de son état de charge. Elle reste très proche de 1, 2 V.

➤ Les batteries acides plomb

Dans un système autonome de production de l'énergie électrique, l'unité de stockage est requise pour assurer un approvisionnement continu en énergie électrique. Parmi les nombreuses

technologies de stockage, la batterie au plomb est la plus utilisée dans les installations PV autonomes.

La batterie acide plomb a été inventée en 1859 par Gaston Planté [88] et fut utilisée dans le premier véhicule électrique («la jamais contente») en France en 1881. Ces batteries sont peu chères et leur technologie est maîtrisée. Elles comptent un grand nombre d'applications et permettent de fournir des courants importants. La batterie au plomb ne présente pas seulement des avantages. La densité énergétique du couple plomb/acide est assez faible. Ces performances sont très dépendantes de la température. En dessous de 10°C, la puissance et la capacité sont alors fortement réduites. L'utilisation de batterie au plomb dans des pays froids nécessite un système de chauffage des batteries pour que ces dernières soient pleinement efficaces.

6.3 CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES DES BATTERIES

➤ Capacité en Ampère heure

Les Ampères heure d'une batterie sont simplement le nombre d'Ampères qu'elle fournit multiplié par le nombre d'heures pendant lesquelles circule ce courant [89].

➤ Température

Un autre facteur qui influence la capacité est la température de la batterie et celle de son atmosphère. Le comportement d'une batterie est spécifié à une température de 27 degrés. Des températures plus faibles réduisent leur capacité significativement. Des températures plus hautes produisent une légère augmentation de leur capacité, mais ceci peut augmenter la perte d'eau et diminuer la durée de vie de la batterie [90].

➤ La durée de vie

Est le nombre de cycles charge/décharge que la batterie peut soutenir avant de perdre 20% de sa capacité nominale [89].

➤ Le taux d'autodécharge

L'autodécharge est la perte de capacité en laissant l'accumulateur au repos (sans charge) pendant un temps donné.

➤ La tension d'utilisation

Dans le cas de la décharge d'une batterie, la tension minimale acceptable est appelée tension seuil de décharge. La baisse au-dessous de cette tension est appelée décharge profonde, durant laquelle la batterie peut être endommagée.

En ce qui concerne la recharge d'une batterie, une tension supérieure à la tension nominale doit être appliquée. Cependant, cette tension ne doit pas dépasser une certaine valeur appelée tension de charge maximale pour une batterie de 12V, la tension de recharge est comprise entre 12V et 14,4V [90].

7. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons brièvement présenté les principales sources renouvelables de production d'électricité. Parmi ces sources renouvelables, l'énergie solaire et l'énergie éolienne ont connu un progrès important.

Pour les systèmes de production d'électricité basés sur les énergies renouvelables, nous avons vu qu'il existait des solutions pour les sites isolés et que différentes combinaisons de sources pouvaient être envisagées.

Nous avons aussi présenté un état de l'art sur les systèmes de production d'énergie d'origine éolienne et photovoltaïque ainsi que les différents moyens de stockage.

Ce chapitre nous a donc permis de fixer notre choix sur la structure du système à étudier : un système de production déconnecté du réseau, destiné à alimenter en électricité un site isolé, hybridé en sources et associé à un système de stockage : il sera composé des panneaux photovoltaïques, d'une éolienne, d'un banc de batteries.

La modélisation et la commande de la chaîne de conversion seront développées dans le chapitre suivant.

MODELISATION ET COMMANDE DE LA CHAINE DE CONVERSION

Chapitre 2

MODELISATION ET COMMANDE DE LA CHAINE DE CONVERSION

1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous étudions une chaîne de génération hybride composée d'une éolienne utilisant une génératrice synchrone à aimants permanents fonctionnant à vitesse variable, des panneaux solaires et des batteries. Nous décrivons la modélisation et la commande de chaque source d'énergie, ainsi que le contrôle des convertisseurs de puissance : redresseur, hacheur et onduleur. Ensuite, nous passons à la gestion de l'énergie produite afin de fournir aux clients de l'énergie électrique avec des valeurs d'amplitude et de fréquence préétablies.

2. PRESENTATION DE LA CHAINE DE CONVERSION

Le système étudié dans ce travail comporte trois principaux sous-systèmes à savoir le générateur éolien, le générateur photovoltaïque et le système de stockage pour emmagasiner l'excès énergétique lorsqu'il existe et de le restituer lors des périodes de manque d'apport, plus le système de conditionnement de puissance composé des convertisseurs et des régulateurs. Le système considéré est représenté par la figure 1.

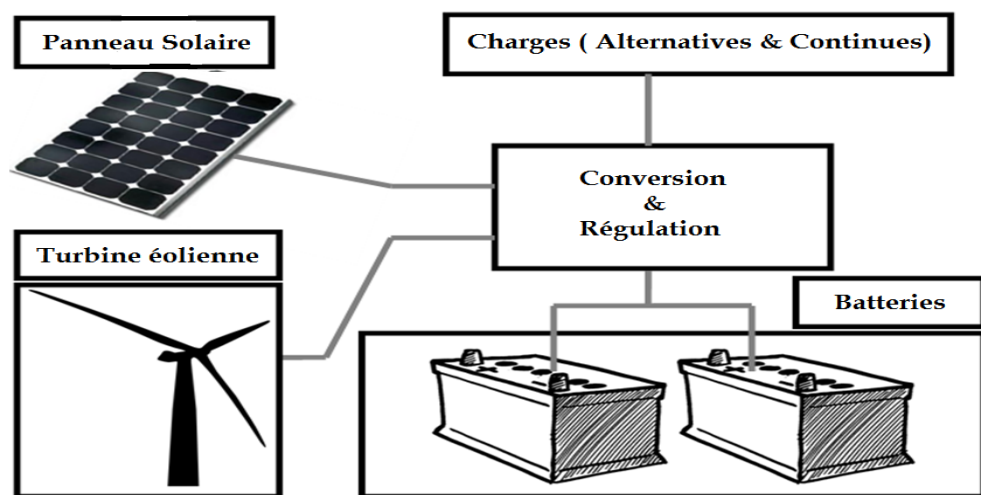


Figure 1 : Système de conversion étudié

3. MODELISATION DE LA CHAÎNE DE CONVERSION

3.1 MODELISATION DE LA TURBINE EOLIENNE

3.1.1 Hypothèses simplificatrices [51], [71]

La partie mécanique de la turbine que nous étudions comprend trois pales orientables et de longueur R . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse qui est relié à un multiplicateur de gain. Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique (Fig.2).

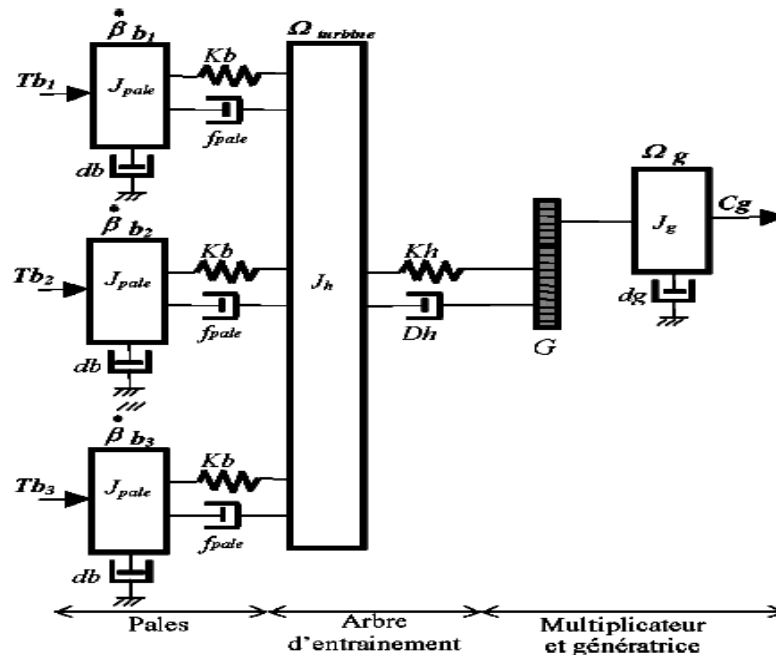


Figure 2 : Système mécanique de l'éolienne

- ❖ Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc :
- ❖ La même inertie J_{pale} ;
- ❖ La même élasticité K_b ;
- ❖ 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 $\beta b_1, \beta b_2, \beta b_3$.
- ❖ 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 K_h ;
- ❖ Son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur D_h .
- Le rotor de la génératrice possède :
- ❖ Une inertie J_g

- ❖ Un coefficient de frottement f_g ,

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 part la conception aérodynamique des pales, leur coefficient de frottement par rapport à l'air (f_g) 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 du côté de la génératrice.

On obtient alors un modèle mécanique comportant deux masses (Fig.3).

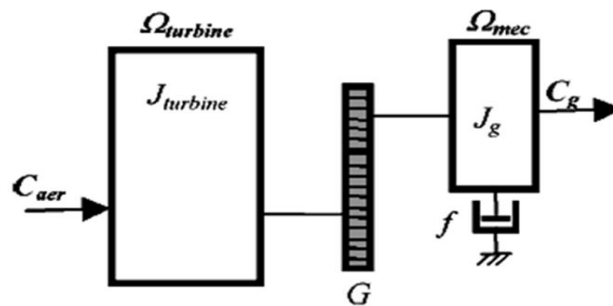


Figure 3 : Modèle mécanique de la turbine

3.1.2 Modélisation de la turbine

Le dispositif, que nous étudions ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R_p entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G (Fig. 4) [51], [71].

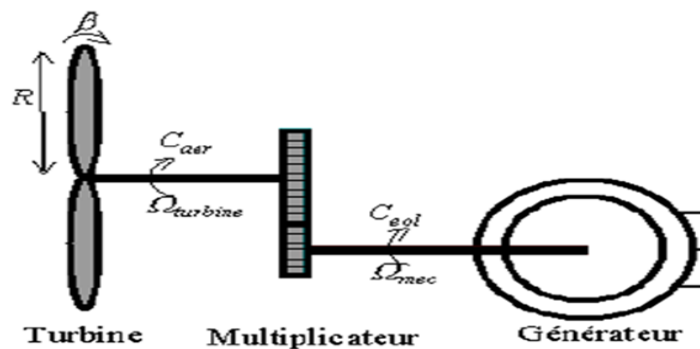


Figure 4 : Schéma de la turbine éolienne

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

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \tag{1}$$

Où :

ρ est la densité de l'air (approximativement 1.225 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 s'écrit alors :

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

3.1.3 Conversion aérodynamique

La modélisation de la turbine consiste à exprimer la puissance extractible en fonction de la vitesse incidente du vent et des conditions de fonctionnement, cela permettra de connaître le couple éolien appliquée sur l'arbre lent de l'éolienne.

Cette modélisation (essentiellement dépendante du coefficient de puissance C_p ou rendement énergétique de l'éolienne) s'appuie sur des recoupements bibliographiques ou des informations extraites de brochures des différents constructeurs[91].

3.1.4 Théorie de BETZ

La théorie globale du moteur éolien à axe horizontal a été établie par « Albert Betz »[92]. A. Betz suppose que le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini en amont d'une vitesse V et à l'infini en aval d'une vitesse v . La production d'énergie ne pouvant se faire que par la conversion de l'énergie cinétique, la vitesse v est nécessairement inférieure à V . Il en résulte que la veine de fluides traverse le générateur éolien en s'élargissant.

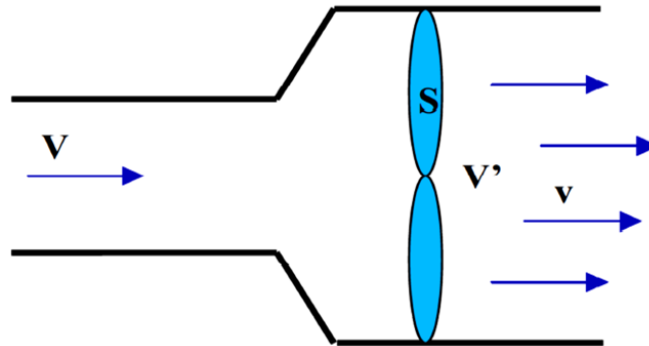


Figure 5 : Théorie de Betz - schéma de principe

Soit donc V la vitesse de l'air en amont, v celle en aval et V' celle au travers la section (S) balayée par les pales de l'éolienne (Fig. 5) et m : la masse d'air qui traverse l'éolienne, la variation d'énergie cinétique de l'air ΔE est :

$$\Delta E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (V^2 - v^2) \quad (3)$$

La puissance de l'éolienne P_T est alors :

$$P_T = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V' \cdot (V^2 - v^2) \quad (4)$$

Avec :

ρ : La densité de l'air.

S : La surface balayée par les pales de la turbine.

Par ailleurs, la force de l'air F sur l'éolienne est :

$$F = \rho \cdot S \cdot V' \cdot (V - v) \tag{5}$$

D'où :

$$P_T = F \cdot V' = \rho \cdot S \cdot V'^2 \cdot (V - v) \tag{6}$$

En identifiant les équations (4) et(6), il vient :

$$V' = \frac{V+v}{2} \tag{7}$$

Et donc :

$$P_T = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S \cdot (V^2 - v^2) \cdot (V + v) \tag{8}$$

3.1.5 Limite de BETZ

La puissance de l'éolienne sera alors maximale quand sa dérivée $\frac{dP_T}{dv}$ sera nulle, soit

pour $v = \frac{V}{3}$. La puissance est alors maximale et vaut :

$$P_T = P_{T_max} = \frac{16}{27} \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \tag{9}$$

On peut donc en déduire que même si la forme des pales permet d'obtenir $v = V/3$. Le coefficient C_p est une grandeur variable en fonction de λ , la valeur maximale théorique possible du coefficient de puissance C_p , appelée limite de Betz est de $\frac{16}{27} = 0.593$ [79], [93] ; 0.593 fois l'énergie cinétique de la masse d'air amont. On écrira en notant la vitesse du vent amont V.

$$P_T = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2_T \cdot V^3 \cdot C_p \quad \text{Et} \quad C_{p_max} = \frac{16}{27} = 0.593 \tag{10}$$

Où :

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine. La figure 6 représente la variation de ce coefficient en fonction du ratio de vitesse λ , et de l'angle de l'orientation de la pale β .

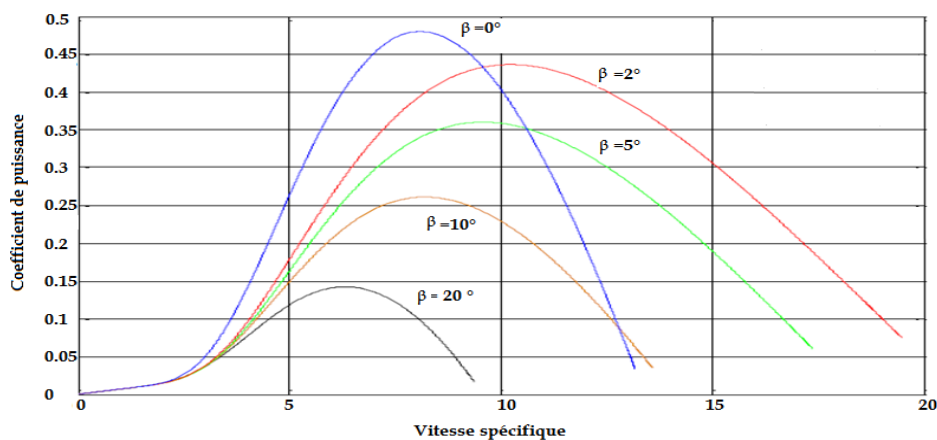


Figure 6 : Coefficient aérodynamique (C_p) en fonction du ratio de vitesse de la turbine (λ)

L'expression du coefficient de puissance a été approchée, pour ce type de turbine, par l'équation suivante[94] :

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 * \left(C_2 * \frac{1}{\lambda_i} - C_3 * \beta - C_4 \right) * \exp\left(\frac{-C_5}{\lambda_i}\right) + C_6 * \lambda_i \quad (11)$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08 * \beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3} \quad C1=0.5176 \quad C2=116 \quad C3=0.4 \quad C4=5 \quad C5=21 \quad C6=0.0068$$

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique est donc directement déterminé par :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (12)$$

3.1.6 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice (Fig. 4). Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (13)$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (14)$$

3.1.7 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 $T_{turbine}$ 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 reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice.

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (15)$$

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. A titre illustratif, pour une éolienne de 2 MW, une pale a une longueur de 39m et pèse 6.5 tonnes. 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 :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (16)$$

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 .

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (17)$$

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

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \quad (18)$$

Le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine est représenté par la figure 7.

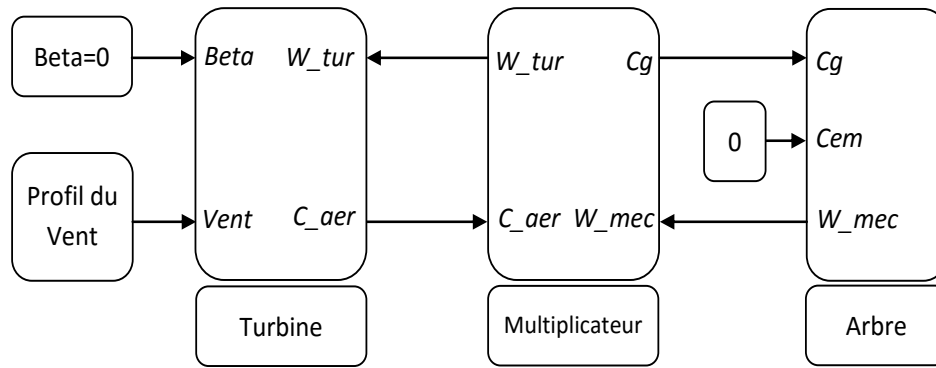


Figure 7: Schéma bloc de la turbine

3.2 MODELISATION DE LA MSAP

Afin d'établir un modèle de la MSAP on adopte certaines hypothèses simplificatrices :

- ❖ La saturation du circuit magnétique est négligée ;
- ❖ La distribution des F.m.m créés par les enroulements statoriques est sinusoïdale (L'effet d'encoche est négligé) ;
- ❖ La résistance des enroulements ne varie pas avec la température ;
- ❖ L'hystérésis, l'effet de peau et les courants de Foucault son aussi négligés.

La machine synchrone à aimants permanents est constituée par trois bobinages statiques qui constituent les trois phases, et des aimants au rotor distribués sur les pôles.

Les flux créés par les aimants permanents sont de forme sinusoïdale le long de l'entrefer. Les expressions des flux mutuels inducteur-phase sont données par[95] :

$$\begin{aligned} \phi_a &= \phi_f \cos(p\theta) \\ \phi_b &= \phi_f \cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \phi_c &= \phi_f \cos\left(p\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned} \tag{19}$$

ϕ_f : C'est la valeur crête du flux crée par l'aimant permanent à travers les enroulements statiques.

Les équations électriques de la MSAP dans le plan (a, b, c) sont :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} \tag{20}$$

$[\phi_a \phi_b \phi_c]$: Vecteur des flux statiques

$[R_s]$: Résistance d'une phase d'enroulement statique

➤ Equation de la MSAP dans le repère de PARK

Afin de simplifier l'étude, on utilise la transformation de Park qui est un outil mathématique permettant de transformer les axes magnétiques des bobines statoriques (a, b, c) en axes orthogonaux (d, q). Ce qui se traduit par le remplacement des bobinages statoriques (a, b, c) par des bobinages équivalents (d,q) [95] .

La transformation de Park est donnée par :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (21)$$

Et inversement, pour passer des équations dans le plan de Park aux équations dans le plan (a,b,c) on utilise la transformation de Park inverse qui est donnée par :

$$P(\theta)^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (22)$$

En appliquant la transformation de Park aux équations des tensions, courants et flux, on obtient :

$$\begin{aligned} [i_{dq}] &= P(\theta)[i_{abc}] \\ [v_{dq}] &= P(\theta)[v_{abc}] \\ [\phi_{dq}] &= P(\theta)[\phi_{abc}] \end{aligned} \quad (23)$$

Enfin, les équations de la machine synchrone dans le repère de Park sont données par les expressions suivantes :

$$v_q = R_s \cdot i_q + L_q \cdot \frac{di_q}{dt} + p \cdot \Omega_t \cdot L_d \cdot i_d \quad (24)$$

$$v_d = R_s \cdot i_d + L_d \cdot \frac{di_d}{dt} + p \cdot \Omega_t \cdot L_q \cdot i_q \quad (25)$$

Expression du couple électromagnétique

$$C_{em} = (K_t \cdot i_q + p \cdot (L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q) \quad (26)$$

$$K_t = p\phi_f \quad (27)$$

Où

P : Le nombre de paires de pôles, v_d et v_q : Les tensions statoriques sur l'axe d et sur l'axe q, i_d et i_q : Les courants statoriques sur l'axe d et sur l'axe q, L_d et L_q : L'inductance statorique sur l'axe d et sur l'axe q, K_t : Le coefficient de couple.

En convention génératrice, on inverse le sens des courants i_{sd} et i_{sq} dans le repère (dq). Ainsi, le modèle de la GSAP s'écrit :

$$v_d = -R_s \cdot i_d + L_q \cdot \frac{di_d}{dt} - \omega_r \cdot \phi_q \quad (28)$$

$$v_q = -R_s \cdot i_q + L_q \cdot \frac{di_q}{dt} + \omega_r \cdot \phi_d \quad (29)$$

3.3 MODELISATION DU PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE

Le circuit équivalent représenté sur la figure 8 et décrit par l'équation 30 représente une cellule photovoltaïque [96], [97]:

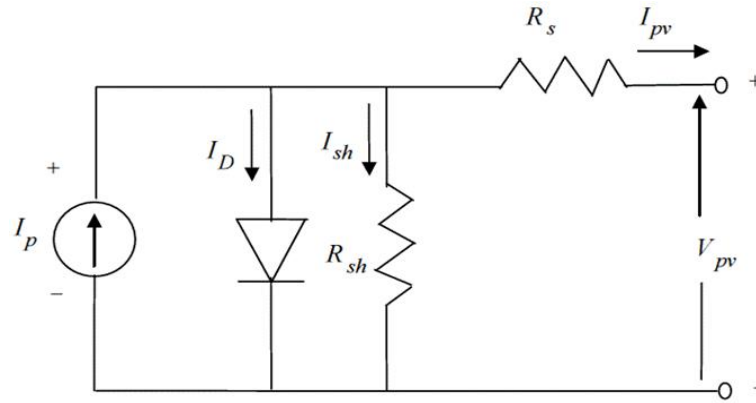


Figure 8 : Circuit équivalent de la cellule photovoltaïque

$$I_{pv} = I_p - I_D - I_{sh}$$

$$I_{pv} = I_p - I_0 \left[e^{\frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{N k T}} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \quad (30)$$

Où :

I_p : Photocourant [A], V_{pv} : Tension aux bornes de la cellule [V], I_D : courant de diode [A], I_0 : courant de saturation [A], I_{sh} : courant Shunt [A], N : facteur d'idéalité, q : Charge électronique [C], k : la constante de Boltzmann, T : température de jonction [K], R_s : la résistance série [Ω], R_{sh} : résistance shunt [Ω]

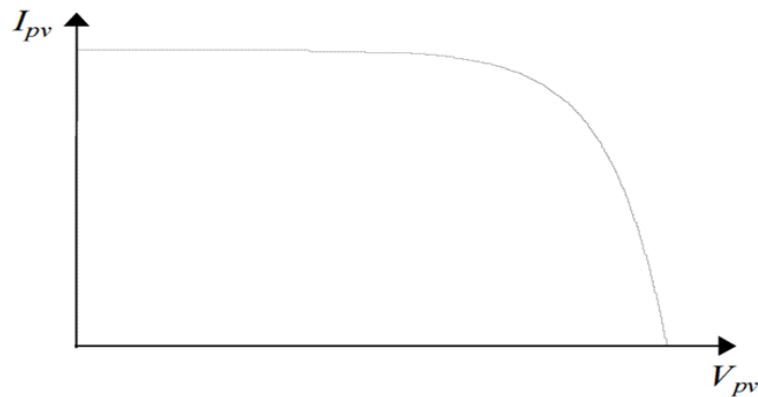


Figure 9 : Caractéristique de la cellule photovoltaïque

La figure 9 montre la caractéristique (I_{pv} - V_{pv}) de fonctionnement d'une cellule solaire. Le générateur photovoltaïque se compose d'un certain nombre de cellules photovoltaïques individuelles qui sont reliées entre elles pour obtenir un générateur photovoltaïque avec une puissance appropriée. La caractéristique du générateur photovoltaïque peut être déterminée en multipliant la tension d'une cellule individuelle, par le nombre de cellules connectées en série et en multipliant le courant par le nombre de cellules connectées en parallèle.

Trois points de fonctionnement importants doivent être notés sur la figure 10.

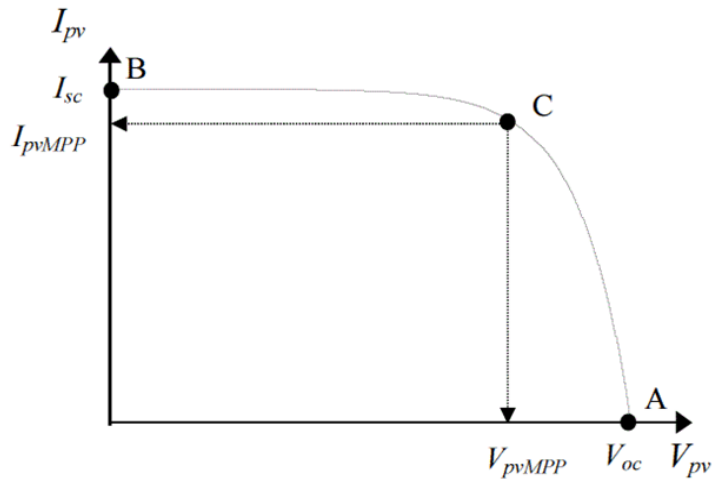


Figure 10 : Point de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

3.3.1 Tension à circuit ouvert

La tension au point de fonctionnement A sur la figure 10 est la tension à circuit ouvert. La figure 11 montre le schéma équivalent au circuit ouvert avec un courant shunt I_{sh} négligé. Elle peut être représentée par l'équation comme indiqué dans l'équation 32.

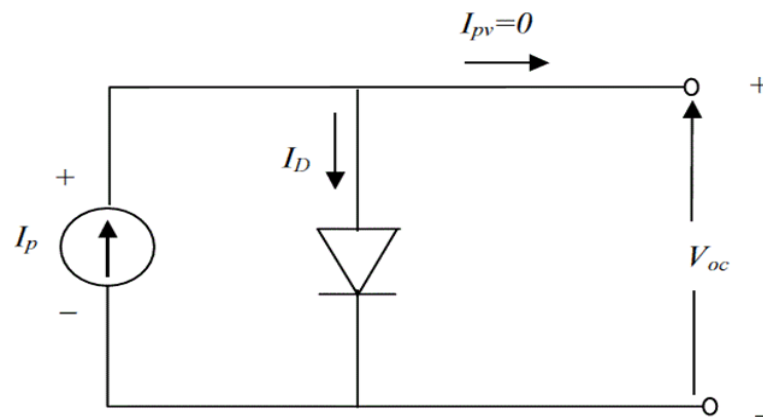


Figure 11: Tension à circuit ouvert

$$I_p - I_0 \left[e^{\frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{N.k.T}} - 1 \right] = 0 \tag{31}$$

$$V_{oc} = \frac{N.k.T}{q} \ln \left[\frac{I_p + I_0}{I_0} \right] \tag{32}$$

3.3.2 Courant de court-circuit

Le courant au point de fonctionnement B, comme le montre la figure 10 est le courant de court-circuit.

La figure 12 présente une condition de court-circuit avec la résistance série (R_s) négligée. Elle peut être représentée par l'équation 33.

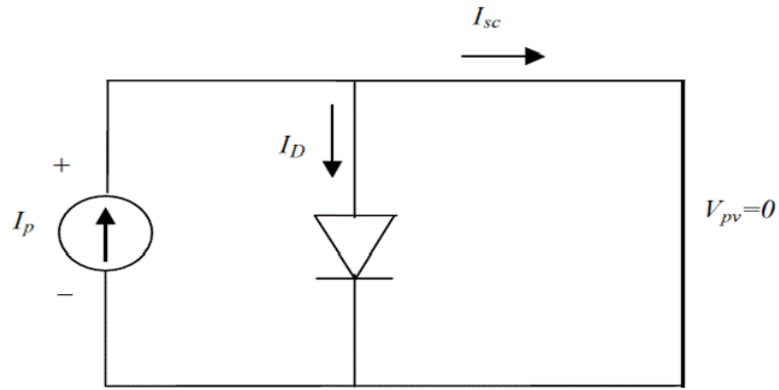


Figure 12 : Tension de court-circuit

$$I_{sc} = I_p \tag{33}$$

3.3.3 Le point de puissance maximale

Sous éclairage constant et la température de la cellule, le point de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque est déterminé par l'intersection de la caractéristique ($I_{pv} - V_{pv}$) avec la caractéristique de charge telle que représentée sur la figure 13.

La caractéristique de charge est représentée par une droite avec une pente $M = I_{charge}/V_{charge}$. Le point de fonctionnement du système se déplace le long de la courbe caractéristique du panneau ($I_{pv} - V_{pv}$) du point B au point A, comme l'augmentation de la résistance à la charge à partir de zéro à l'infini. La position C est le point de fonctionnement à puissance maximale. A ce stade, l'aire sous la courbe caractéristique ($I_{pv} - V_{pv}$), qui est équivalente à la puissance de sortie, est maximum.

Si la résistance de charge est trop élevée, les points de fonctionnement seraient dans les régions de CA. Si la résistance de charge est trop faible, les points de fonctionnement seraient dans les régions CB. Par conséquent, le point de puissance maximale peut être obtenu en faisant correspondre la résistance de charge aux caractéristiques de panneaux photovoltaïques.

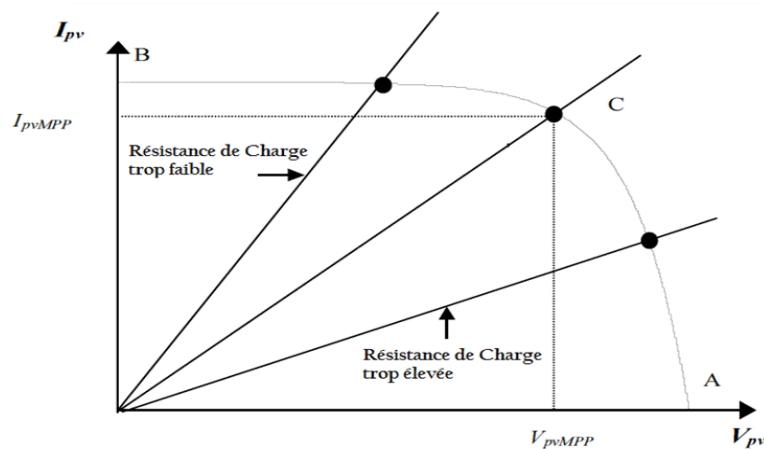


Figure 13 : Intersection de la courbe caractéristique ($I_{pv} - V_{pv}$) et la caractéristique de charge

3.3.4 Effet de l'éclairement et de la température

La conception d'une installation photovoltaïque efficace nécessite la prise en compte de plusieurs paramètres ayant une influence directe sur la performance du système. Parmi lesquels [98], [99] :

- ❖ L'irradiation globale disponible G (W/m^2) ;
- ❖ La température ambiante T (K).

L'effet de l'irradiation et de la température de la cellule sur la courbe caractéristique (I_{pv} - V_{pv}) est représenté par les figures 14 et 15 respectivement.

La figure 14 montre que la puissance de sortie varie presque linéairement avec l'éclairement. La figure 15 montre que la puissance de sortie du panneau diminue lorsque la température augmente.

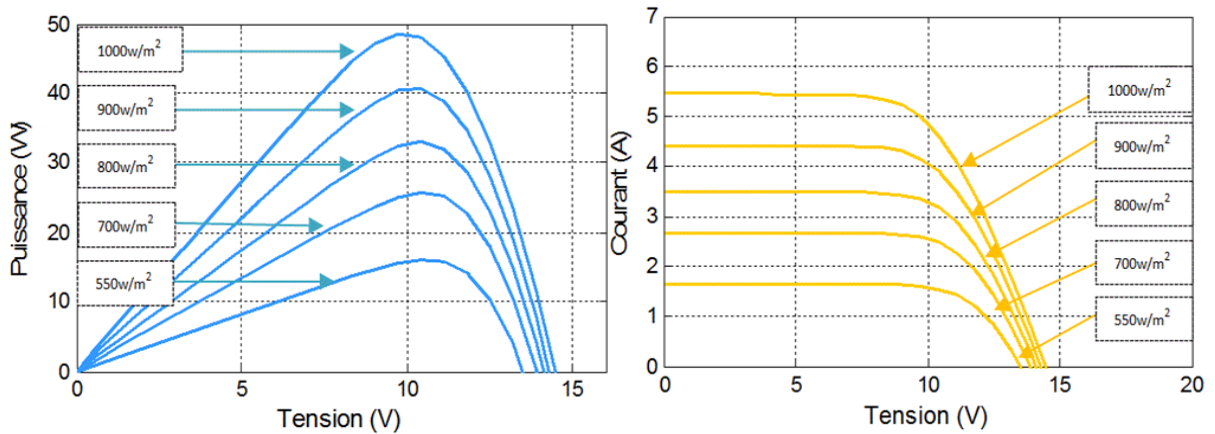


Figure 14 : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique P (V) et I (V) d'une cellule PV

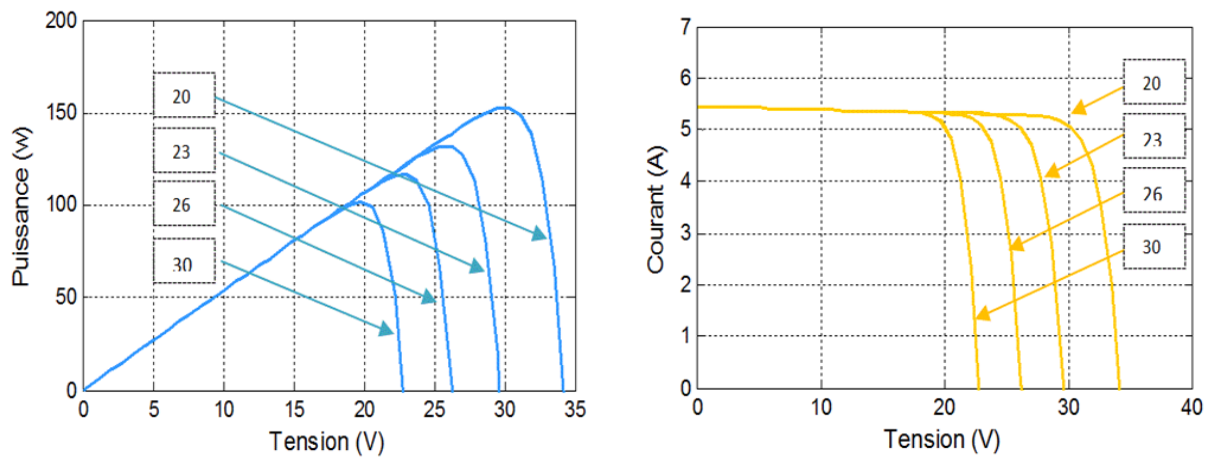


Figure 15 : Influence de la température sur la caractéristique I (V) et P (V) d'une cellule PV

3.4 MODELISATION DU DISPOSITIF DE STOCKAGE

Puisque le vent varie continuellement, il n'est pas possible de rencontrer les besoins de la charge électrique en tout temps en réseau isolé. On doit donc disposer d'un moyen permettant de découpler la production et la consommation afin d'alimenter la charge lorsqu'elle vent est faible, et d'absorber les surplus de production lorsque le vent est fort. Les technologies présentes et futures qui permettent

d'emmagasiner de l'énergie et qui peuvent être considérées pour les systèmes éoliens sont : le volant d'inertie, l'air comprimé, les accumulateurs hydrauliques, la bobine supraconductrice, les super capacités, la pile électrochimique, l'hydrogène et la pile à combustible [86].

Le modèle électrique simple comprend une **fem** E_0 modélisant la tension à vide de la batterie, un condensateur modélisant la capacité interne de la batterie (C_b) et une résistance interne (R_s) [100].

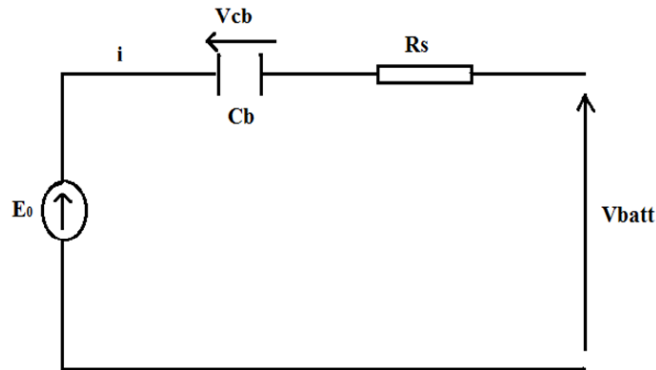


Figure 16 : Modèle R-C de la batterie

Nous avons donc :

$$V_{batt} = E_0 - R_s * i - V_{cb} \quad (34)$$

On définit également l'état de charge (EDC) de la batterie par :

$$EDC = \frac{Qd}{C_b} \quad (35)$$

Avec C_b la capacité (Ah) nominale de la batterie et Qd la quantité de charge manquante par rapport à C_b [101].

D'après le modèle R-C de la batterie présentée à la figure 16 la capacité en ampères heure est modélisée par C_b dont la valeur est donnée par l'expression suivante :

$$Q_{batt} = I * t_{batt} \quad (36)$$

$$C = \frac{Q_{batt}}{V} \quad (37)$$

Avec:

Q_{batt} : La quantité de charge électrique en Coulomb,

I : Le courant à travers la capacité,

t_{batt} : Le temps de fonctionnement,

C : La valeur de la capacité en Farad,

V : La différence de potentiel correspondant à une plage de l'état de charge de la batterie

allant de 0% à 100%. Nous considérons $V=2V$ pour une batterie au plomb de 12V.

4. COMMANDE DE LA CHAÎNE DE CONVERSION

Afin de valider notre étude théorique de la chaîne de conversion d'énergie éolienne, la simulation du processus est nécessaire. La chaîne de conversion a été modélisée et simulée à l'aide du logiciel Matlab/Simulink.

4.1 EXTRACTION DU MAXIMUM DE LA PUISSANCE EOLIENNE

La technique d'extraction du maximum de puissance (MPPT) appliquée au générateur éolien est conçue pour opérer ce générateur à sa vitesse de rotation optimale permettant d'extraire le maximum de puissance éolienne pour les différentes vitesses du vent sans mesure du vent assuré par un anémomètre (situé derrière le rotor de la turbine et peut fournir des imprécisions de lecture de vitesse du vent). L'utilisation de cet élément augmente le matériel et le coût d'entretien du système de génération éolienne [102].

Cette méthode de MPPT consiste à suivre l'optimum des courbes de la figure 6 caractérisant la turbine éolienne à vitesse variable.

Le vent est une grandeur de nature fluctuante dont les variations constituent la perturbation principale de la chaîne de conversion éolienne.

Pour notre étude on suppose que quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique développé est à tout instant égal à sa valeur de référence.

$$C_{em} = C_{em-ref} \quad (38)$$

Les techniques d'extraction du maximum de puissance consistent à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. Plusieurs dispositifs de commande peuvent être imaginés.

A partir des relations (17), (18) et (19) on déduit la relation suivante :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (39)$$

Avec : C_{em} : couple produit par la génératrice

C_g : couple issu du multiplicateur

C_{vis} : couple résistant dû au frottement : $C_{vis} = f * \Omega_{mec}$

A partir des expressions de la turbine éolienne, on déduit le schéma bloc de maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse mécanique.

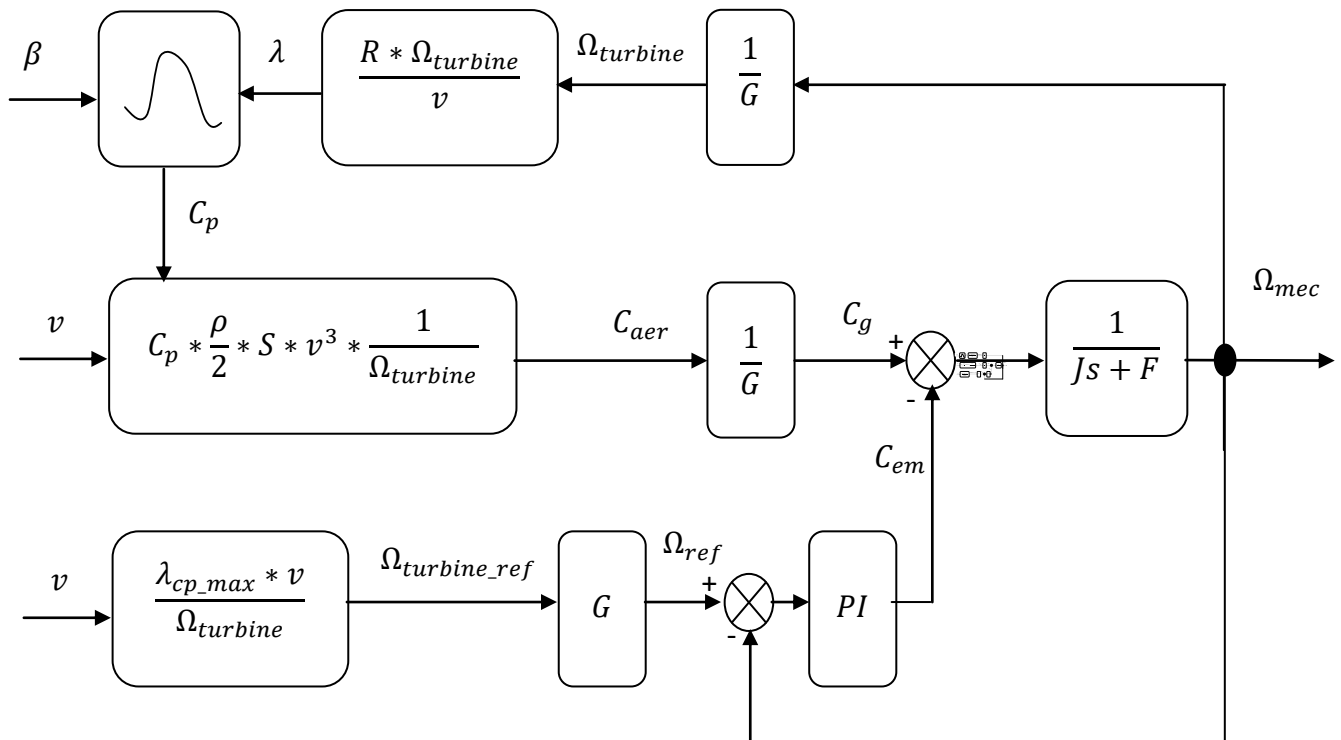


Figure 17 : Schéma bloc de la MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique

Avec :

Ω_{ref} : la vitesse mécanique de référence.

PI : le régulateur de vitesse.

v : vitesse du vent

La référence de la vitesse de la turbine est celle correspondante à la valeur optimale du ratio de vitesse λ_{cp_max} (pour β égal à 0°) permettant d'obtenir la valeur maximale du C_p (Fig. 18) (C_{p_max} le rendement aérodynamique maximal obtenu pour une valeur d'angle d'orientation des pales égale à 0°).

Elle est donnée par :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\lambda_{cpmax} v}{R} \tag{40}$$

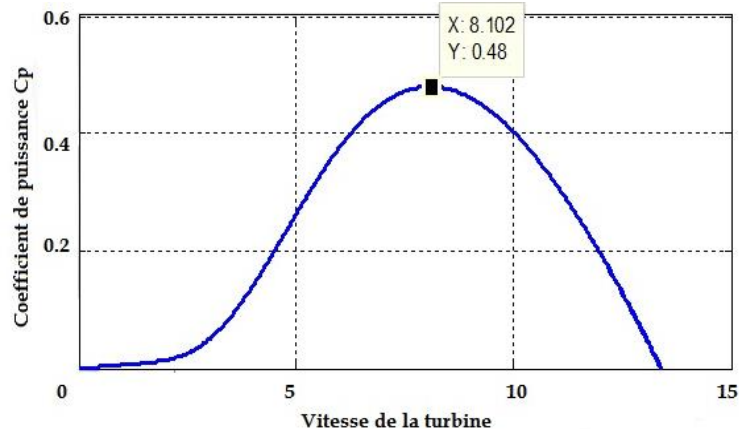


Figure 18 : Point de fonctionnement optimal

➤ Synthèse du régulateur

Le calcul du régulateur est basé sur la méthode de compensation des pôles. La boucle de régulation de vitesse est présentée par le schéma bloc de la figure 19.

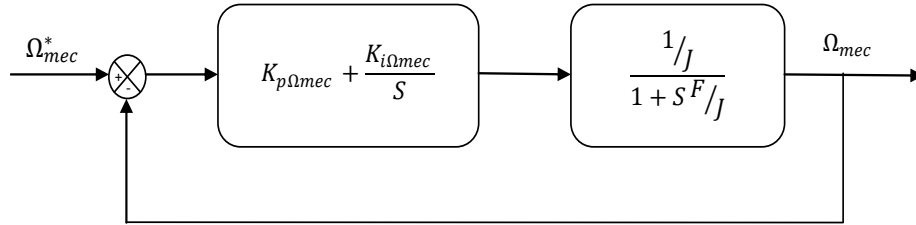


Figure 19 : Schéma fonctionnel de régulation de vitesse

Le régulateur PI est donné par :

$$R_{pi}(s) = \frac{K_{p\Omega_{mec}}}{s} \left(s + \frac{K_{i\Omega_{mec}}}{K_{p\Omega_{mec}}} \right) \tag{41}$$

Par compensation :

$$\frac{F}{J} = \frac{K_{i\Omega_{mec}}}{K_{p\Omega_{mec}}} \tag{42}$$

La fonction de transfert en boucle fermée est :

$$\frac{\Omega_{mec}}{\Omega_{mec}^*} = \frac{1}{\frac{J}{K_{p\Omega_{mec}}s} + 1} \tag{43}$$

Le système est de premier ordre, sa fonction de transfert s'écrit comme suit :

$$\frac{\Omega_{mec}}{\Omega_{mec}^*} = \frac{K}{1 + \tau s} \tag{44}$$

$$\tau = \frac{J}{K_{p\Omega_{mec}}} \tag{45}$$

Les paramètres du régulateur de vitesse sont :

$$K_{i\Omega_{mec}} = J/\tau \tag{46}$$

$$K_{p\Omega_{mec}} = F/\tau \tag{47}$$

4.2 COMMANDE VECTORIELLE DE LA MSAP

La principale stratégie de commande vectorielle appliquée à la MSAP est celle qui consiste à imposer le courant statorique direct i_{sd} égal à zéro [103] pour obtenir un couple maximale avec un courant minimum. De plus, ce choix permet d'éviter la démagnétisation des aimants permanents due à la réaction d'armature selon l'axe d et les puissances de pertes seront minimisées [104], [105] Mais le facteur de puissance $\cos \phi$ n'est pas unitaire.

L'expression (26) montre que le couple électromagnétique peut être contrôlé directement par le courant statorique d'axe q i_{sq} , alors que la composante de l'axe d du courant statorique i_{sd} est maintenue égale à zéro.

La figure 20 représente le schéma bloc de la commande du redresseur côté machine. Les termes de découplages et de compensation (Annexe C) sont ajoutés afin de pouvoir contrôler indépendamment les courants statoriques des axes d et q et pour améliorer la réponse dynamique.

Suivant l'axe q, le contrôle du redresseur côté machine assure l'extraction du maximum de puissance éolienne imposé par le couple électromagnétique de référence. La modulation vectorielle est utilisée pour générer les signaux de commande du redresseur.

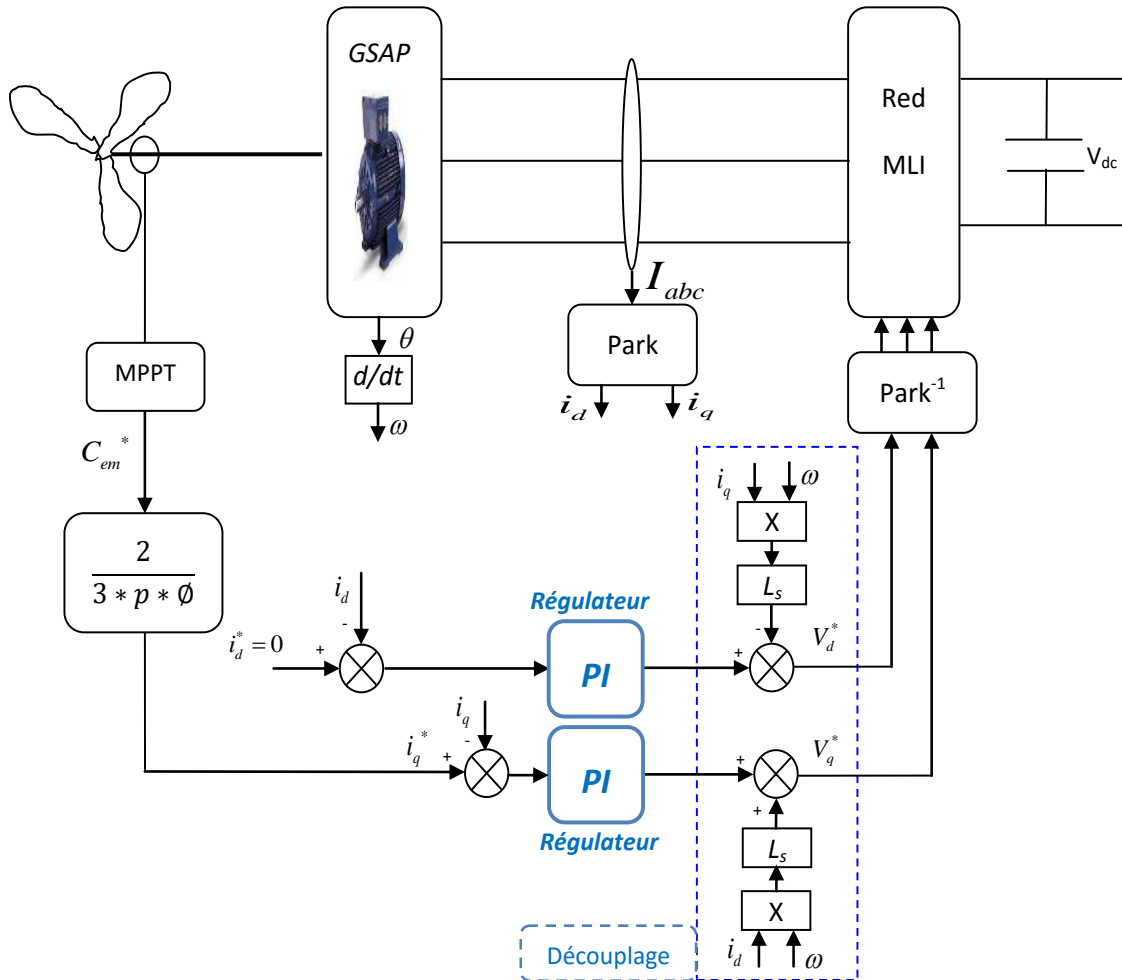


Figure 20 : Schéma bloc de la commande du redresseur côté MSAP

4.3 EXTRACTION DU MAXIMUM DE LA PUISSANCE PHOTOVOLTAÏQUE

Pour trouver le point de puissance maximale, des informations sur la puissance actuelle doit être extraite du champ photovoltaïque.

Cela peut être fait en mesurant la tension de sortie du panneau V_{pv} et le courant de sortie du panneau I_{pv} et en multipliant ces deux paramètres pour obtenir la valeur réelle de la puissance de sortie du panneau $P_{pv} = V_{pv} \times I_{pv}$.

Avec ces valeurs, il existe différentes méthodes de suivi du point maximum de puissance dont on peut citer [106]:

- ❖ Méthode de la perturbation et l'observation

- ❖ Méthode de l'incrémentation de la conductance
- ❖ Méthode de la tension constante

Dans notre étude, on a choisi la méthode ***Perturb & Observe (P&O)***.

La méthode P & O est une approche largement utilisée dans MPPT par sa simplicité. Elle ne nécessite que des mesures de la tension (V_{pv}) et du courant (I_{pv}), et elle puisse suivre le point de puissance maximale assez précisément par des variations de l'éclairement et de la température.

Comme son nom l'indique, la méthode P & O fonctionne en perturbant V_{pv} et en observant l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du générateur photovoltaïque. La figure 21 est un organigramme de l'algorithme P & O.

A chaque cycle, V_{pv} et I_{pv} sont mesurés pour calculer $P_{pv}(k)$. Cette valeur de $P_{pv}(k)$ est comparée à la valeur $P_{pv}(k-1)$ calculée au cycle précédent. Si la puissance de sortie a augmenté, V_{pv} est ajustée en outre dans le même sens que dans le cycle précédent. Si la puissance de sortie diminue, V_{pv} est perturbée dans le sens opposé lors du cycle précédent. V_{pv} est donc perturbé à chaque cycle de MPPT. Lorsque le point de puissance maximale est atteint, V_{pv} oscille autour de la valeur optimale $V_{pv, mpp}$.

Cela provoque une perte de puissance qui augmente avec la taille du pas de la perturbation. Si le pas est grand, l'algorithme MPPT répond rapidement aux changements brusques des conditions de fonctionnement.

D'autre part, si la taille de pas est faible, les pertes (dans des conditions stables ou lentement variables) seront inférieures mais le système ne sera pas en mesure de répondre rapidement aux changements brusques de température ou d'éclairement

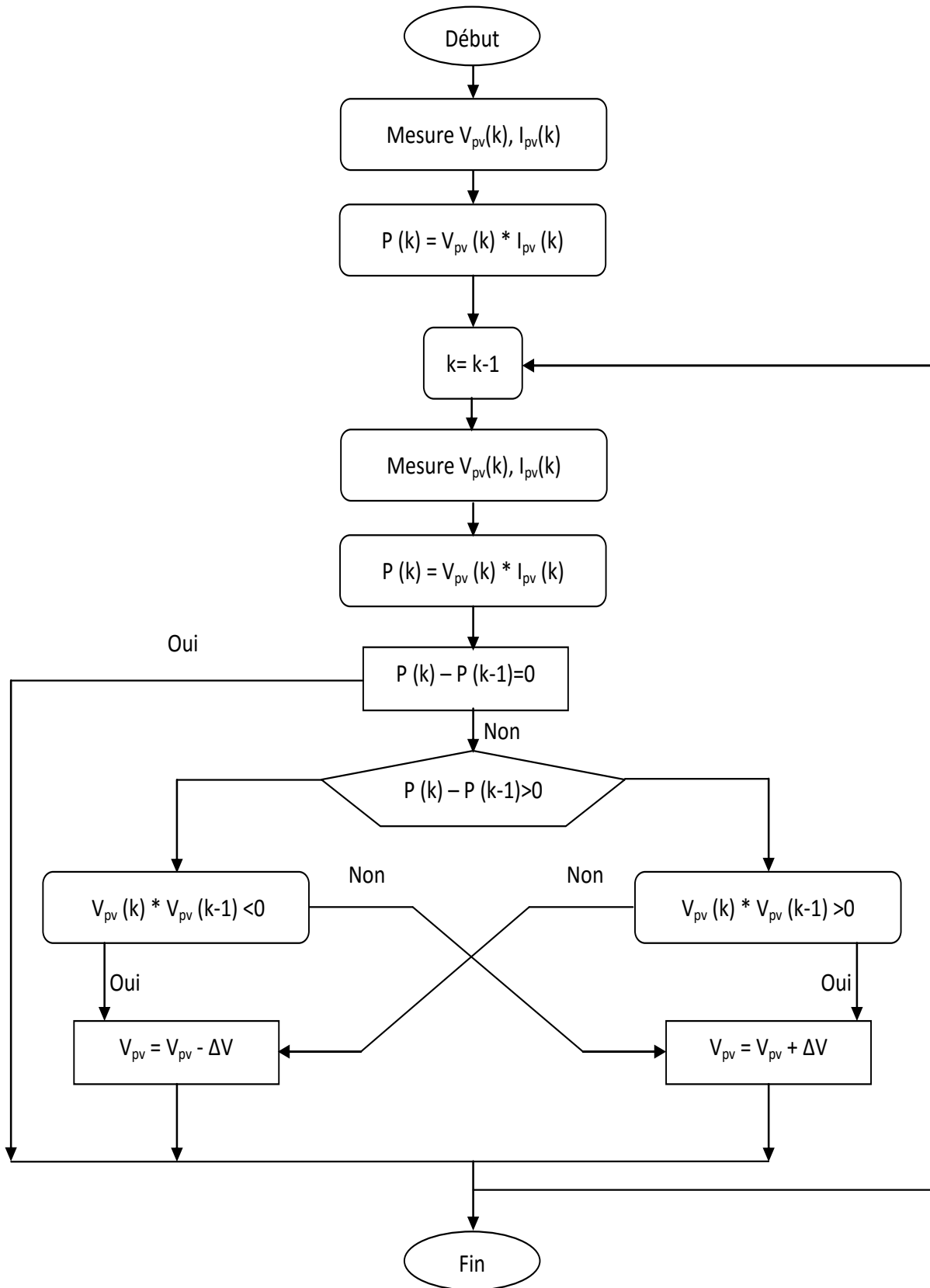


Figure 21 : Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation (P&O)

L'inconvénient de la technique P & O est que dans le cas d'un changement rapide dans des conditions atmosphériques, comme le passage d'un nuage, cette méthode peut déplacer le point de fonctionnement dans la mauvaise direction.

Ainsi, 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 plus de puissance perdue.

4.4 REGLAGE DE LA TENSION CONTINUE

Dans le cas du hacheur utilisé pour adapter la tension aux bornes du générateur éolien, le transfert d'énergie s'effectue dans un seul sens de la source (générateur éolien) vers le bus à CC. Dans le cas du hacheur utilisé par la charge /décharge des batteries, le courant électrique doit être réversible. Ainsi, pour réaliser le transfert d'énergie dans les deux sens, un hacheur survolteur et un hacheur dévolteur ont été associés[107] comme l'indique la figure 22.

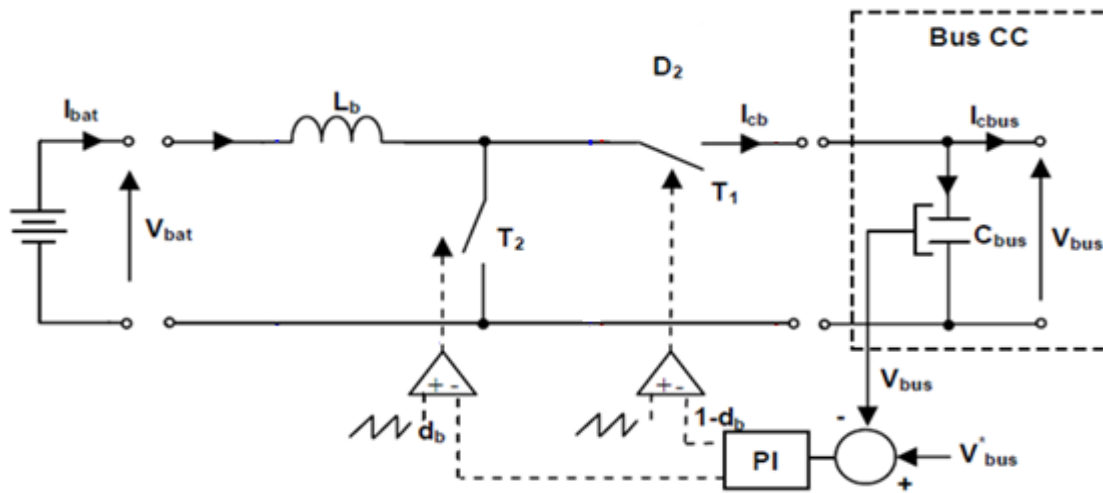


Figure 22 : Hacheur réversible

Les équations différentielles définissant le fonctionnement des deux hacheurs réunis sur la structure présentée dans la figure 22 ont été résolues en utilisant un modèle en valeur moyennes[108]. Sachant que la commande des interrupteurs T1 et T2 est simultanée avec des rapports cycliques d_b et $1 - d_b$ complémentaires, le fonctionnement du hacheur réversible en courant est décrit par :

$$\frac{di_{bat}}{dt} = \frac{1}{L} (d_b V_{bus} - V_{bat}) \tag{48}$$

En appliquant la loi de conservation de la puissance, le courant injecté ou absorbé du bus a CC s'exprime :

$$i_{cb} = d_b i_{bat} \tag{49}$$

Le rapport cyclique d_b est obtenu à partir d'un régulateur PI ayant comme entrée l'erreur de tension sur le bus à CC.

4.5 COMMANDE COTE CHARGE

La charge électrique représente le consommateur d'électricité qui est relié au système de production le plus souvent via un onduleur. Le modèle de la charge électrique est plutôt une série temporelle de la demande de puissance.

La solution la plus simple pour la commande de l'onduleur est la commande à hystérésis qui fournit une réponse dynamique rapide, une bonne précision, une robustesse élevée et il n'y a pas de compensation en CC. Cependant, le problème majeur de la commande à hystérésis est que sa fréquence moyenne de commutation varie avec le courant de charge, entraînant un comportement irrégulier et aléatoire des interrupteurs [8]. Ce comportement a comme conséquence une fatigue supplémentaire des interrupteurs et rend difficile le dimensionnement du filtre.

Le schéma de commande est présenté dans la figure 23:

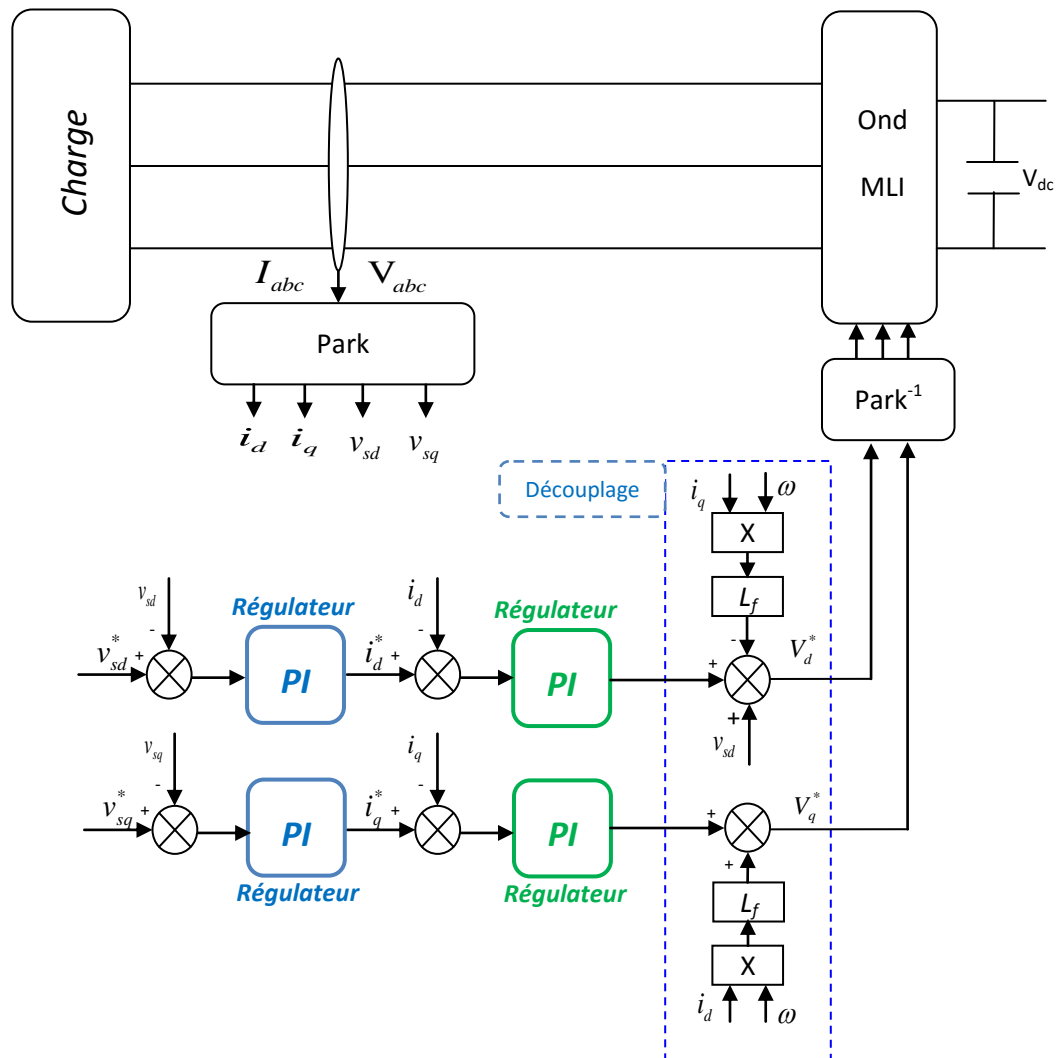


Figure 23 : Schéma de commande coté charge

Le principe de commande étant fixé, plusieurs stratégies de commande sont envisageables pour le contrôle des grandeurs électrique. Parmi celles-ci la stratégie de commande basée sur la régulation du

courant (tension) en coordonnées continues dq est largement utilisée. Les boucles fermées de régulation utilisées par ces commandes assurant une réponse rapide en régime transitoire et une performance élevée en régime stationnaire [109], [110].

Il s'agit d'une stratégie de commande permettant à l'onduleur de contrôler de manière autonome en fréquence et en amplitude la tension délivrée à une charge. Cette stratégie contient deux boucles de régulation : une boucle interne pour la régulation du courant et une boucle externe pour la régulation de la tension. Le contrôle de ces grandeurs est réalisé dans un référentiel tournant dq (Fig.24)

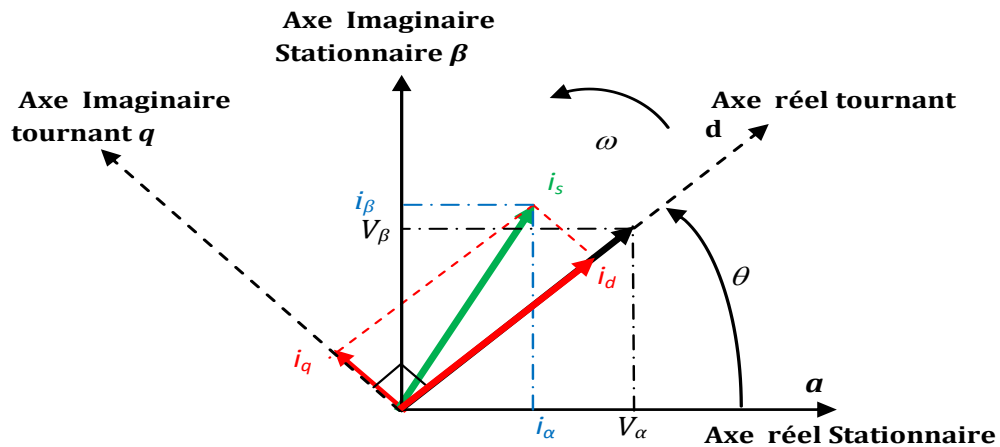


Figure 24 : Projection des différentes composantes des vecteurs courant et tension dans un référentiel tournant

La régulation de la composante i_d du courant permet d'agir sur le flux de puissance active, alors que la régulation de la composante i_q du courant agit sur le flux de puissance réactive. Dans un système de référence tournant lié à la tension aux bornes de la charge, on a :

$$0 = v_{sq} - R_f i_q - L_f \frac{di_q}{dt} - \omega L_f i_d \tag{50}$$

$$V_d = v_{sd} - R_f i_d - L_f \frac{di_d}{dt} + \omega L_f i_q \tag{51}$$

Deux régulateurs PI sont utilisés pour contrôler les courants i_d et i_q .

Cependant, pour le système décrit par les équations (50) et (51), les performances des régulateurs ne sont pas satisfaisantes à cause du couplage existant entre l'axe d et l'axe q [111].

Le découplage est possible en considérant les termes de couplage comme des termes de perturbation.

Les signaux de commande sont obtenus à partir des Equations (50) et(51) :

$$V_d = v_d + (k_p + \frac{k_i}{s})(i_d^* - i_d) - \omega L_f i_q \tag{52}$$

$$V_q = (k_p + \frac{k_i}{s})(i_q^* - i_q) + \omega L_f i_d \tag{53}$$

Les consignes i_d^* et i_q^* sont les sorties des PI utilisés dans la boucle externe de régulation des tensions v_{sd} et v_{sq} . Cette boucle de régulation permet de fixer l'amplitude de la tension sur le bus CA ($v_{sd}^* = cte$) et d'annuler v_{sq} .

$$i_d^* = \left(k_p + \frac{k_i}{s}\right)(v_d^* - v_d) \quad (54)$$

$$i_q^* = \left(k_p + \frac{k_i}{s}\right)(v_q^* - v_q) \quad (55)$$

Les signaux de commande v_{sd}^* et v_{sq}^* sont ramenés dans la base de départ (transformation inverse de Park) pour servir des signaux de commande (calculer les rapports cycliques). L'angle θ utilisé dans les transformations de Park est obtenu en intégrant la vitesse angulaire w ($w = 2\pi f$) f : la fréquence des grandeurs alternatives.

4.6 SUPERVISION ET GESTION D'ÉNERGIE

Dans un système hybride il est primordial de gérer de façon optimale le flux d'énergie entre les différents composants. Le module de supervision a pour rôle de contrôler les échanges d'énergie entre les différents composants du système et de réguler le système de stockage.

L'algorithme de supervision gère l'énergie provenant des deux sources, le générateur photovoltaïque et l'éolienne ainsi que celle du stockage suivant la demande du consommateur.

L'algorithme de contrôle est basé sur trois scénarios :

- ❖ Alimentation du consommateur et du stockage par les panneaux PV si l'énergie solaire suffisante.
- ❖ Alimentation du consommateur par les panneaux et l'éolienne si l'énergie solaire insuffisante.
- ❖ Alimentation du consommateur par système de stockage si l'énergie fournie par les deux sources est insuffisante.

Un algorithme de gestion d'énergie pour maîtriser l'échange d'énergie entre les deux sources, la batterie et la charge (Fig.25).

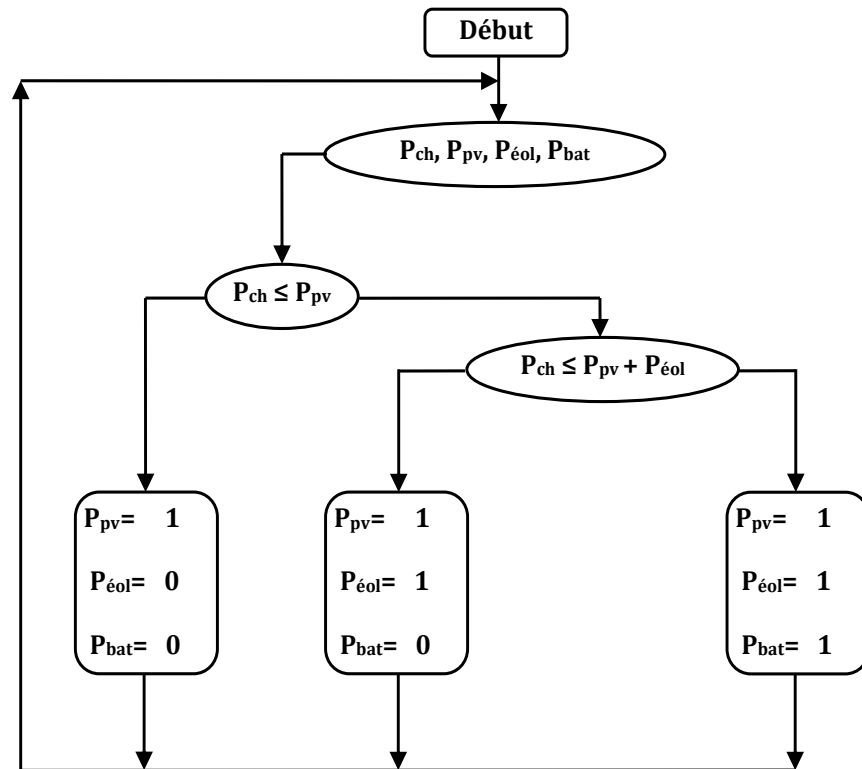


Figure 25: Organigramme du contrôleur de charge et de gestion de l'énergie

➤ Validation de l'algorithme de gestion énergétique

Pour confirmer l'importance de cet algorithme et pour justifier l'efficacité de ce module de gestion, plusieurs tests ont été effectués.

Test 01: $P_{PV} \geq P_{ch}$ avec $P_{PV} = 1000W$

On alimente une charge d'une puissance de 600W pendant la phase [0s 5s], ensuite on ajoute une deuxième charge d'une puissance égale à 350W pendant l'intervalle [5s 10s].

Test 02: $P_{PV} < P_{ch} \leq P_{PV} + P_{éol}$ avec $P_{PV} = 1000 W$ & $P_{éol} = 2000 W$

On alimente une charge d'une puissance de 900 W pendant la phase [0s 5s], ensuite on ajoute une deuxième charge d'une puissance égale à 1500 W pendant l'intervalle [5s 10s].

Test 03: $P_{PV} + P_{éol} < P_{ch} \leq P_{PV} + P_{éol} + P_{bat}$ avec $P_{PV} = 1kW$ & $P_{éol} = 2kW$ & $P_{bat} = 500W$

On alimente une charge d'une puissance de 2800W pendant la phase [0s 5s], ensuite on ajoute une deuxième charge d'une puissance égale à 400W pendant l'intervalle [5s 10s].

Test 04: $P_{PV} = 1000 W$ & $P_{éol} = 2000 W$ & $P_{bat} = 500 W$

On fait varier la charge comme suit :

[0s 5s] $\rightarrow P_{ch} = 300W$	[5s 10s] $\rightarrow P_{ch} = 900W$
[10s 15s] $\rightarrow P_{ch} = 1700W$	[15s 20s] $\rightarrow P_{ch} = 2600W$
[20s 25s] $\rightarrow P_{ch} = 3100W$	[25s 30s] $\rightarrow P_{ch} = 3400W$

5. RESULTATS DE SIMULATION

Pour effectuer les différentes simulations de notre système, nous avons besoin d'avoir un profil de vent reflétant au maximum la réalité de ce qu'on peut trouver sur un site éolien.

Le modèle de vent considéré ici est simplifié car ne prenant pas en compte la direction : on considère ainsi une fonction scalaire qui évolue dans le temps. Dans cette étude, nous avons retenu un chronogramme issu de mesures réelles, modélisé sous forme déterministe par une somme d'harmoniques [112]–[114].

$$V(t) = 6.5 + (0.2 \sin (0.1047t) + 2 \sin (0.2665t) + \sin (1.2930t) + 0.2 \sin (3.6645t)) \quad (56)$$

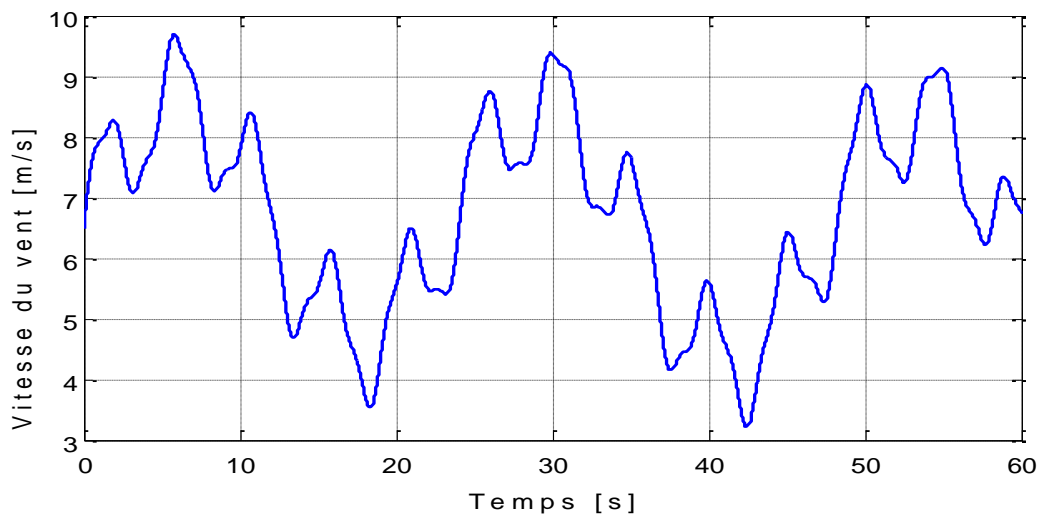
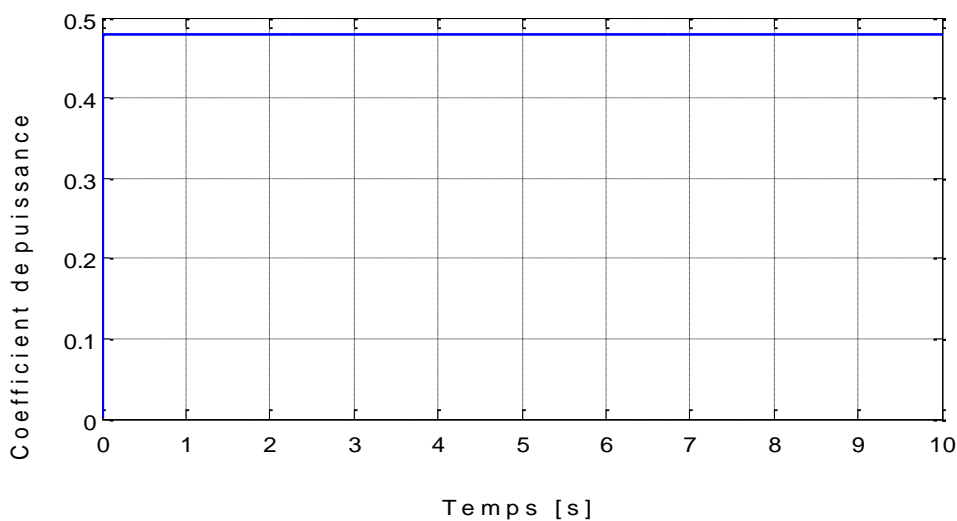


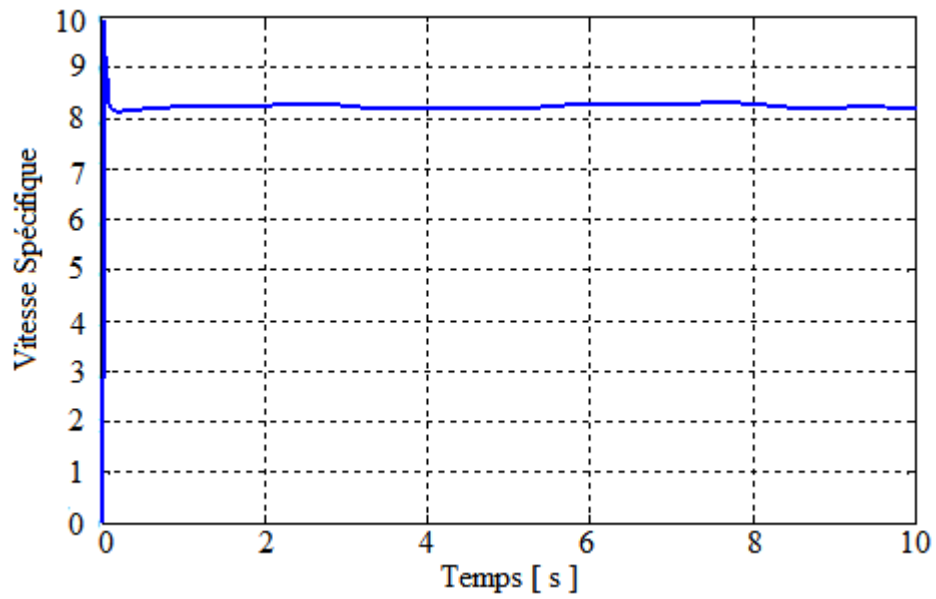
Figure 26: Profil du vent

5.1 LA TURBINE

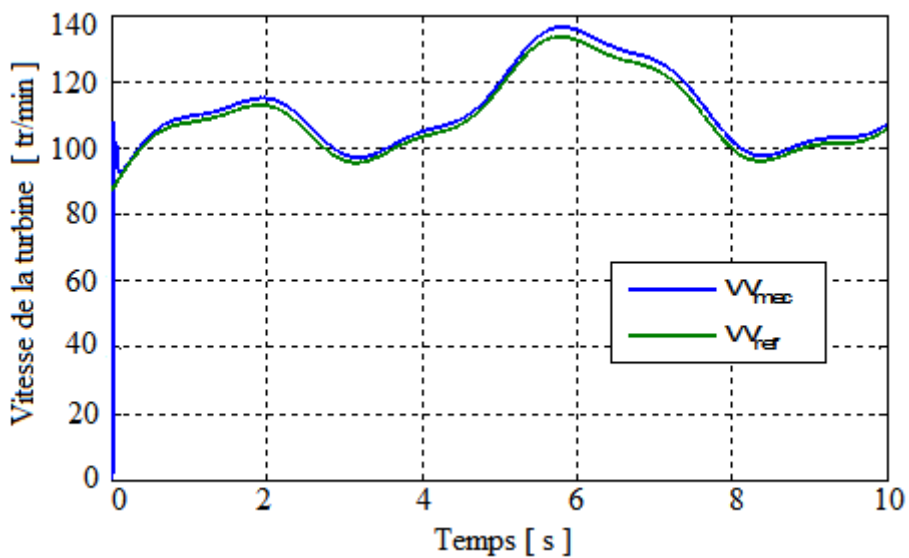
Les figures 27.a et 27.b présente le coefficient aérodynamique C_p et la vitesse spécifique, ainsi la figure 27.c présente la vitesse de rotation de la turbine



[a]



[b]

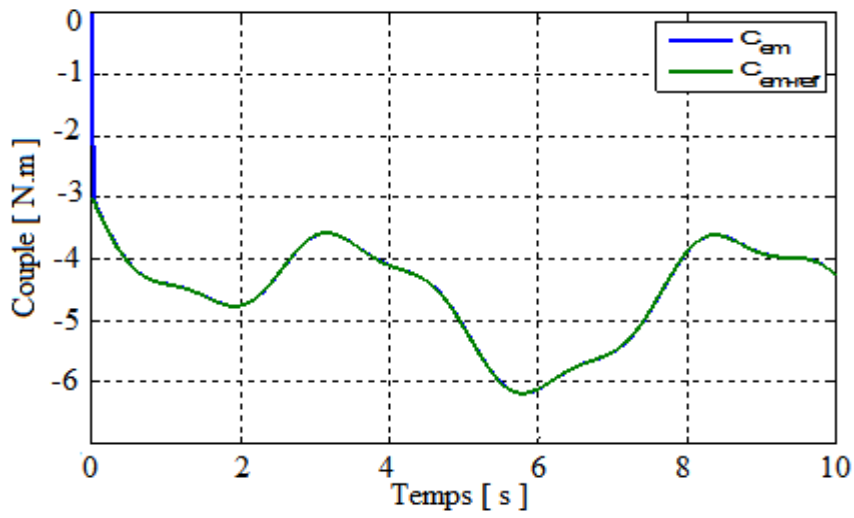


[c]

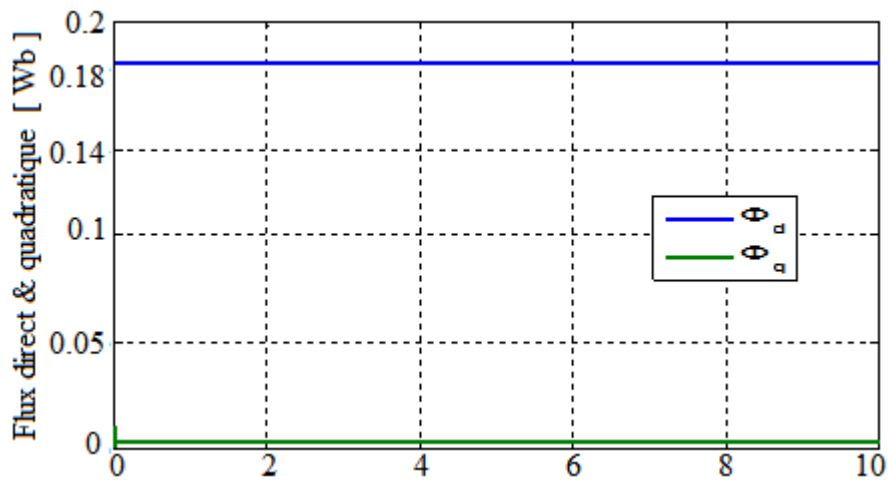
Figure 27 : [a]- Coefficient aérodynamique C_p , [b]- Vitesse spécifique, [c]- Vitesse mécanique de la turbine

Les résultats obtenus sont très satisfaisants vu que le coefficient de puissance C_p prend une forme d'allure croissante pendant le temps de démarrage, puis se met à osciller autour de sa valeur optimale ($C_p = 0.48$), de la même façon, la vitesse spécifique λ est asservie à sa valeur optimale ($\lambda = 8.1$), donc une transmission de puissance optimale vers la génératrice. La vitesse de référence et celle mesurée sont presque confondues.

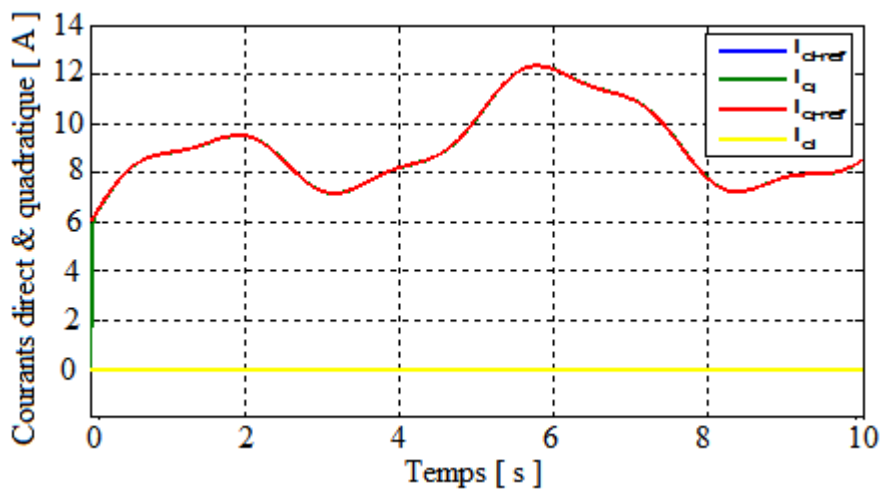
5.2 LA GSAP



[a]



[b]

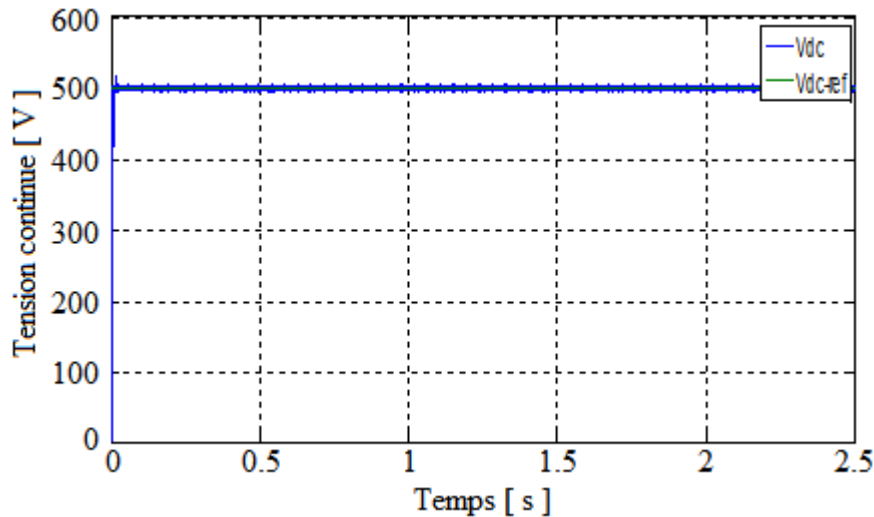


[c]

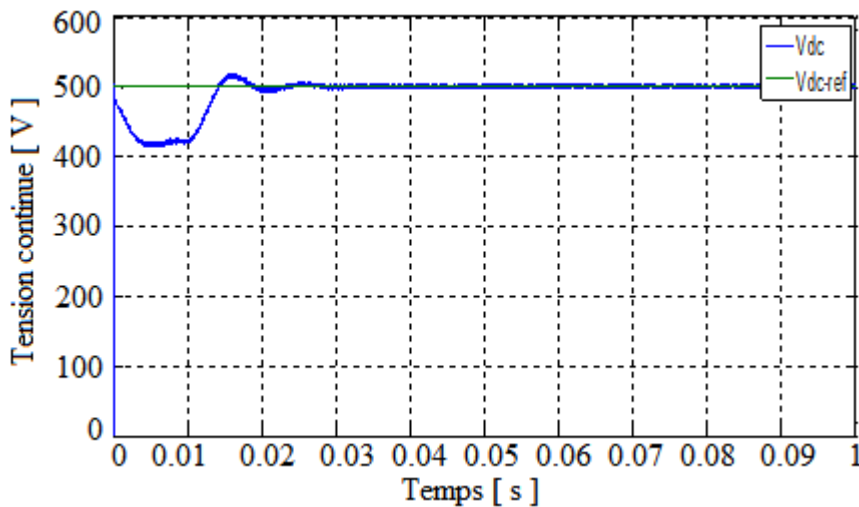
Figure 28 : [a]-Couple électromagnétique C_{em} , [b]- Flux quadratique q et directe d , [c]- Courant i_q et i_d

Les résultats de simulation de la GSAP montrent que l'allure du couple électromagnétique est de forme fluctuante et suit sa référence, c'est ce qui apparaît clairement dans la figure 28.a.

Les courants i_d et i_q sont décrits par la figure 28.c, qui montre que le courant i_d oscille autour de sa référence $i_{d-ref} = 0A$, il est d'une valeur moyenne presque nulle. Tandis que le courant i_q est superposé à sa référence.



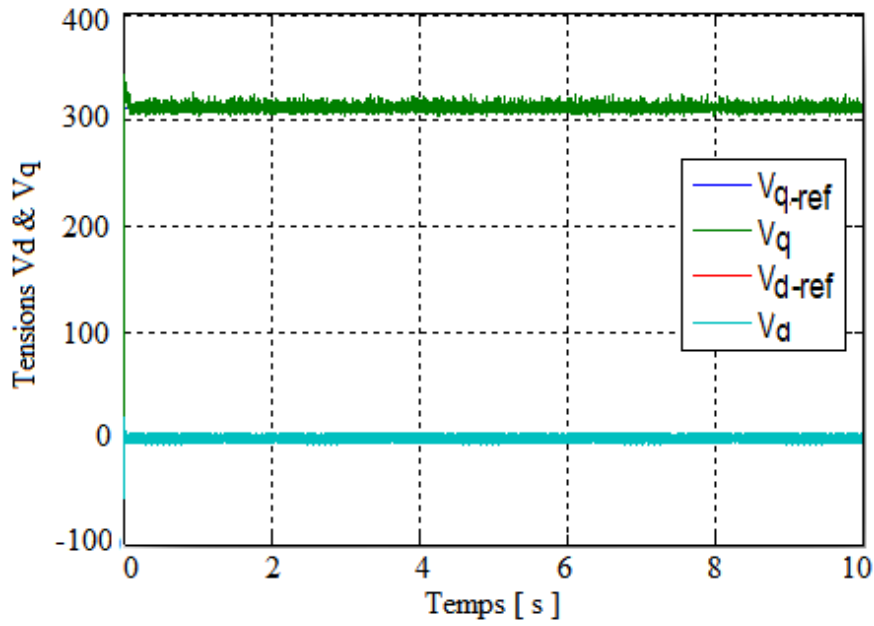
[a]



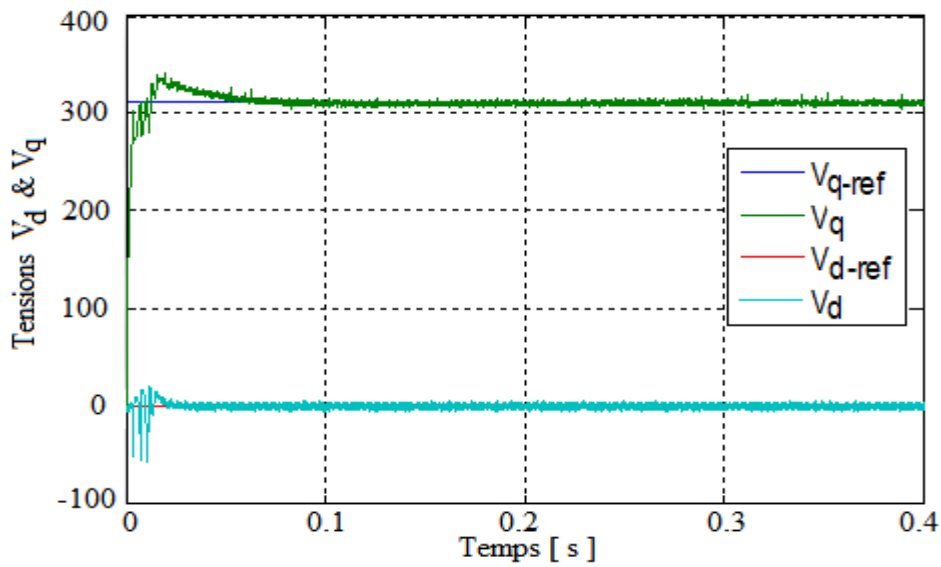
[b]

Figure 29 : [a]- Régulation de la tension du bus continu V_{dc} , [b]- Zoom de V_{dc}

La régulation de la tension du bus continu est présentée sur la figure 29.a et la figure 29.b, la tension du bus continu V_{dc} est bien asservie à sa consigne 500V après un temps de réponse de 0.02s. La figure 29.b montre une perturbation de la tension V_{dc} à $t=0s$ (la tension du bus continu augmente ou diminue lors d'une augmentation ou diminution de la puissance électrique exploitée).



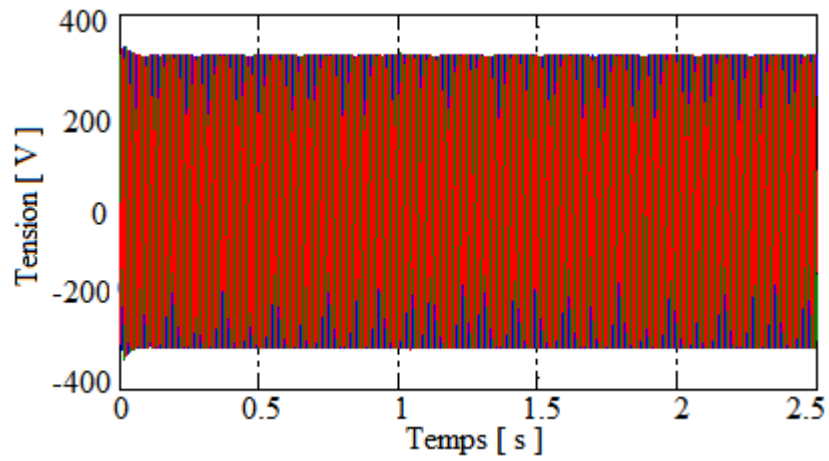
[a]



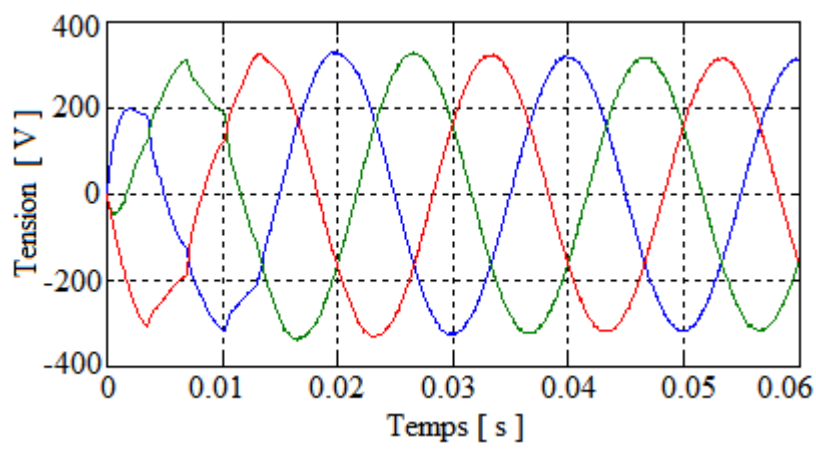
[b]

Figure 30 : [a]- Tension V_d , V_q , [b]-Zoom de V_d , V_q

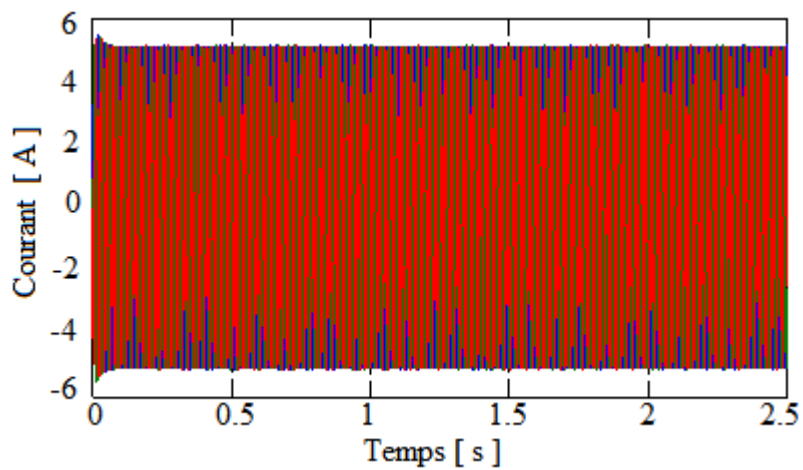
Les résultats du réglage des tensions directe et quadratique sont présentés par les figure 30.a et la figure 30.b. On constate que les tensions V_d et V_q suivent leurs références et se stabilisent après un temps de réponse qui dure 0.04 s.



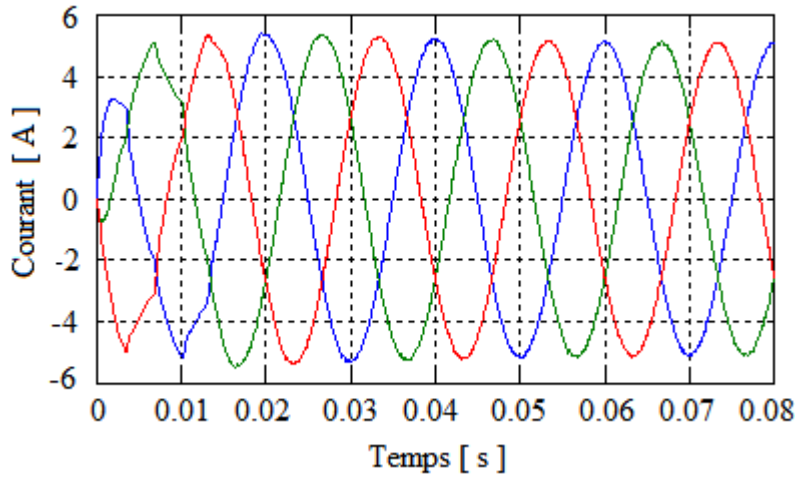
[a]



[b]



[c]



[d]

Figure 31 : [a]-Tension aux bornes de la charge, [b]-Zoom V_{abc} , [c]- Courant de charge, [d]- Zoom i_{abc}

La figure 31 représente l'évolution des tensions et des courants de charge, ils sont parfaitement sinusoïdaux en régime stable avec une amplitude de 311 V et une fréquence de 50 Hz.

5.3 SUPERVISION ET GESTION D'ENERGIE

TEST 01

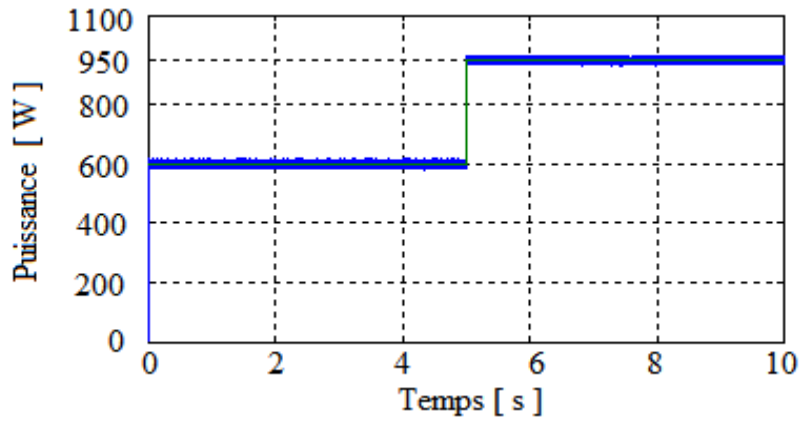


Figure 32: Puissance (Test 01)

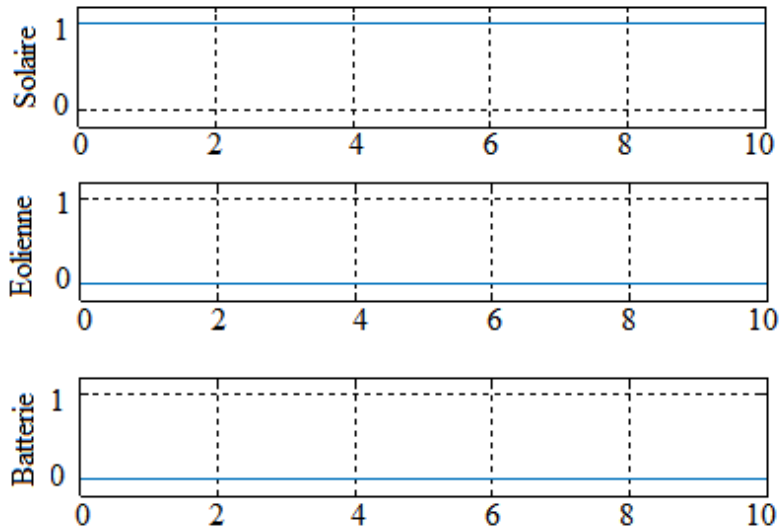


Figure 33 : Etat des sources (Test 01)

TEST 02

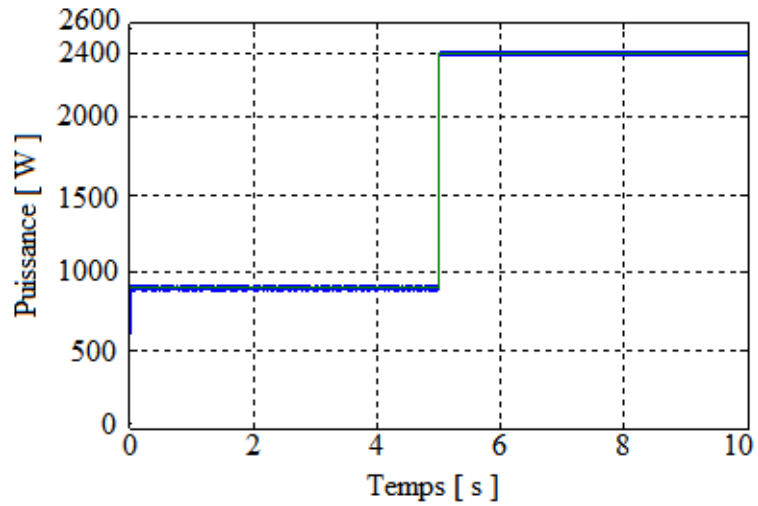


Figure 34: Puissance (Test 02)

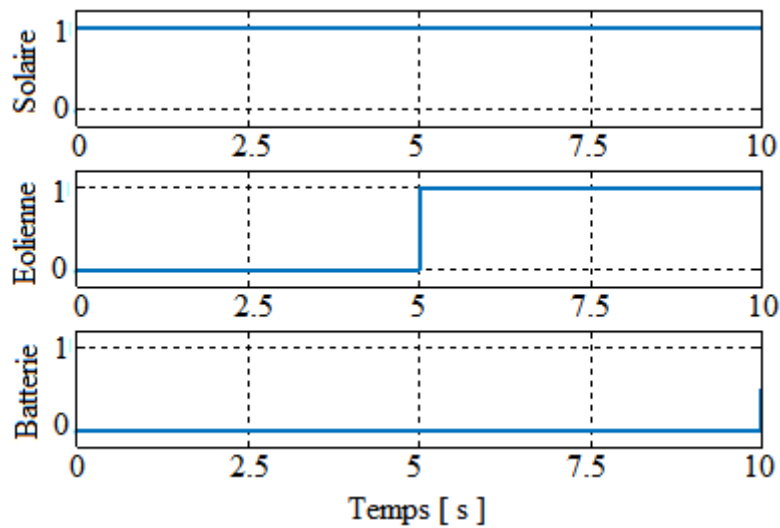


Figure 35 : Etat des sources (Test 02)

TEST 03

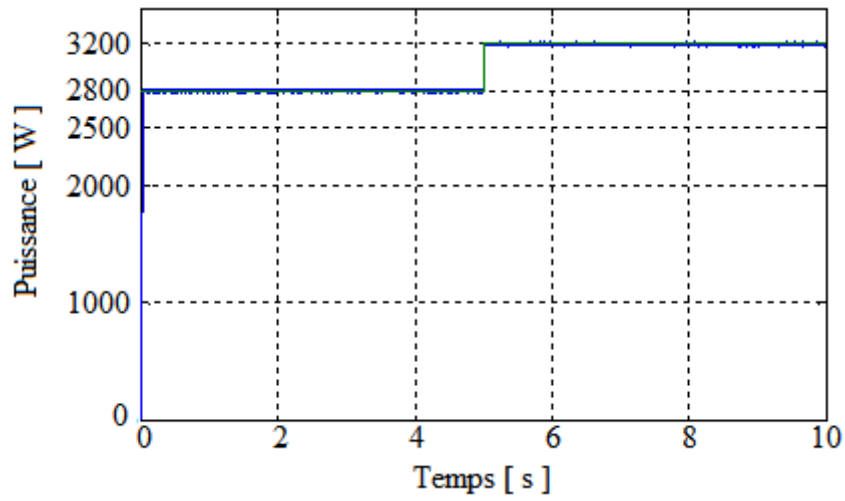


Figure 36: Puissance (Test 03)

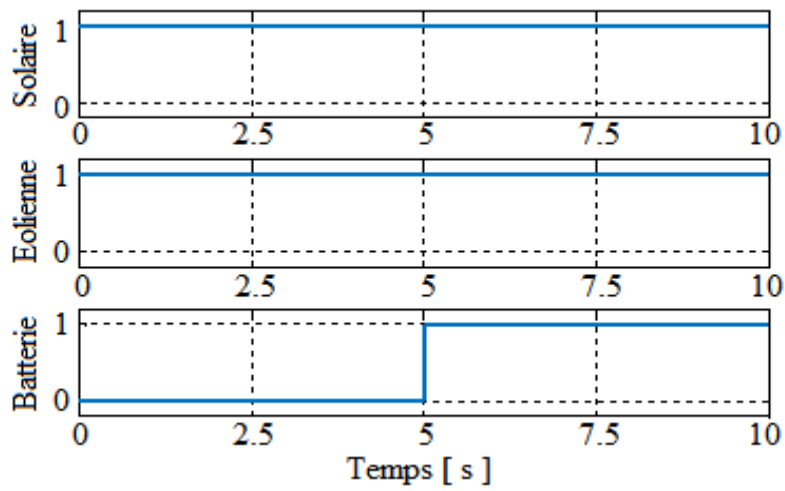


Figure 37: Etat des sources (Test 03)

TEST 04

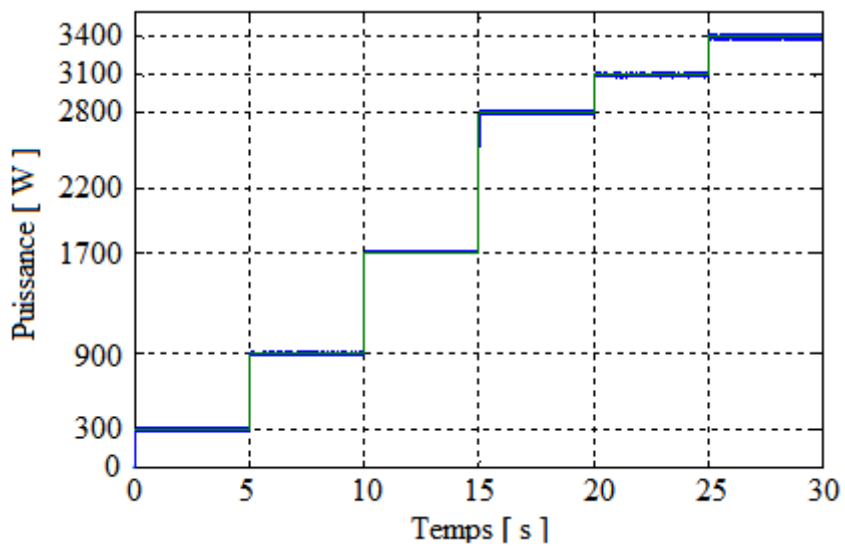


Figure 38: Puissance (Test 04)

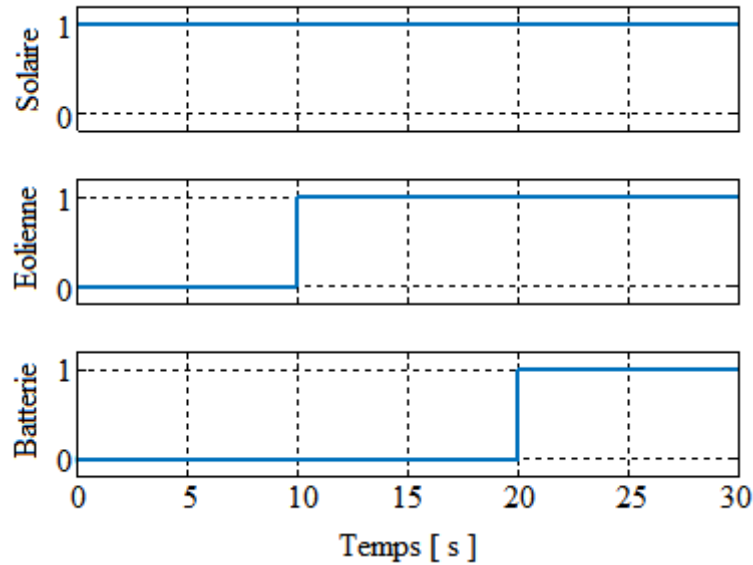


Figure 39: Etat des sources (Test 04)

Plusieurs tests ont été faits pour valider l'algorithme de gestion des sources renouvelables dont le but de suivre la demande de la charge.

Les figures 38 et 39 présentent l'évolution des puissances produites suivant le profil de la charge demandée et l'état des sources renouvelables.

Dans l'intervalle [0 10s], la charge demandée peut être assurée par la source solaire seule. Une fois la puissance demandée par la charge dépasse l'énergie solaire produite, il est nécessaire d'introduire la source éolienne (intervalle de 10s à 20s).

Dans l'intervalle [20s à 30s], l'énergie produite est entièrement fournie à la charge avant d'utiliser la batterie comme complément.

Dans les différents cas, la demande de charge est toujours respectée.

Ces simulations montrent que notre contrôleur présente de bons résultats tout en assurant la demande de charge.

6. CONCLUSION

La modélisation de chaque composant du système hybride a été élaborée à partir des modèles de la littérature (champ PV, éolienne, batteries de stockage) cette modélisation est une étape essentielle car elle permet d'introduire le modèle de chaque sous-système puis évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi que les paramètres constitutifs.

L'implémentation de ces modèles dans un environnement de simulation adapté nous a permis d'étudier le comportement des composants en fonction de certains paramètres.

Les résultats de la simulation montrent l'intérêt de la maximisation de puissance dans les systèmes à base des énergies renouvelables.

Pour avoir un comportement optimal de l'installation d'un point de vue flux de puissance, nous avons développé un superviseur. Celui-ci permet une gestion efficace de l'énergie pour satisfaire les besoins du consommateur en énergie. Plusieurs résultats de simulation ont été présentés afin d'illustrer les performances de notre installation en présence de variations de la consommation d'énergie.

La commande avec des régulateurs classiques PI permet l'obtention de bonnes performances dynamiques, mais pouvant être sensible aux variations de la charge.

C'est pour cette raison que l'implantation d'autres commandes avancées est devenue une nécessité pour l'amélioration des performances et la robustesse de cette commande

LOGIQUE FLOUE, RESEAUX DE NEURONES ET COMMANDE PREDICTIVE

Chapitre 3

RESEAUX DE NEURONES, LOGIQUE FLOUE ET COMMANDE PREDICTIVE

1. INTRODUCTION

Ce chapitre décrit les techniques de commande utilisées pour l'optimisation de la production de l'énergie électrique à partir des énergies renouvelables.

Nous présentons dans un premier temps la commande par la logique floue, ensuite nous donnons un bref rappel sur les réseaux de neurones artificiels. En dernier, nous parlons sur l'état de l'art de la commande prédictive.

2. LA LOGIQUE FLOUE

La logique floue est une branche des mathématiques, basée sur la théorie des probabilités et des concepts flous. A ce titre, toute une série de notions fondamentales a été développée. Ces notions permettent de justifier et de démontrer certains principes de base de la logique floue.

Dans cette partie, on présentera un aperçu général sur la théorie de la logique floue et ses principes de base. Ensuite, on montrera comment construire un régulateur flou et son application au réglage de vitesse de la turbine.

2.1 HISTORIQUE

Les prémisses de la logique floue sont apparues avant les années 1940, avec les premières approches, par des chercheurs américains, du concept d'incertitude. Il a fallu attendre 1965, pour que le concept de sous ensemble floue soit proposé par L. A. Zadeh, automaticien de réputation internationale, professeur à l'université de Berkeley en Californie, qui a contribué à la modélisation de phénomène sous forme floue, en vue de pallier les limitations dues aux incertitudes des modèles classiques à équation différentielle. En 1974, M. Mamdani expérimentait la théorie énoncée par Zadeh sur une chaudière à vapeur, matériel dont on connaît la complexité, introduisant ainsi la commande floue dans la régulation d'un processus industriel[115].

La commande floue est un domaine d'application de la théorie des ensembles flous qui a été abordé très tôt, proposé par L.A. Zadeh est développé par des chercheurs européens[116]. Son principe a été introduit en Angleterre par Mamdani et Assilian pour la commande d'une machine à vapeur expérimentale. Il a ensuite été exploité, toujours en Europe, pour la commande d'une usine d'eau

chaude et un échangeur de chaleur, pour la régulation de la vitesse d'un moteur en France et pour la réalisation industrielle d'un four à ciment au Danemark. La commande floue a été largement développée au Japon à partir du début des années 80, où il existe actuellement de nombreuses réalisations industrielles[117].

2.2 DOMAINES D'APPLICATION

Les systèmes flous ont été utilisés dans une large variété d'applications industrielles, gestionnaires et médicales. Parmi ses applications, on peut citer [118] :

- ❖ Systèmes audio-visuels (appareils de photos autofocus, caméscope à stabilisateur d'images, photocopieurs, ...),
- ❖ Appareils électroménagers (lave-linge, aspirateurs, autocuiseurs, ...etc.),
- ❖ Systèmes autonomes mobiles,
- ❖ Systèmes de transport (train, métro, ascenseur, ...),
- ❖ Systèmes de conditionnement d'ambiance,
- ❖ Systèmes de contrôle/commande dans la plupart des domaines industriels de production, transformation, traitement de produit et déchet,
- ❖ Systèmes de décision, diagnostic, reconnaissance,
- ❖ Systèmes d'autoroute automatisés : direction automatique, freinage et contrôle de la manette des gaz pour les véhicules,
- ❖ Robotique : contrôle de la place et organisation de chemin,
- ❖ Produits de consommation courante.

2.3 LA THEORIE DES ENSEMBLES FLOUS

La logique de propositions est la logique associée à la théorie classique des ensembles qui est une logique formelle s'appuyant sur la tables de vérité, la logique floue est associée de la même manière à la théorie des sous-ensembles floue, elle s'appuie sur des opérations floues réalisées sur les ensembles flous.

La logique floue est plus proche de la manière avec laquelle l'être humain pense que la logique traditionnelle, puisqu'elle s'exprime en langage naturel, elle fournit un moyen efficace pour capturer la nature inexacte et approximative du monde réel.

2.3.1 Système flou

Un système flou (S.F) est une relation non linéaire qui permet de prendre des données numérique (entrée nettes) les faire passer dans un domaine flou, puis avoir une sortie scalaire (sortie nette). La structure générale de ce traitement est donnée [119] par la figure (1).

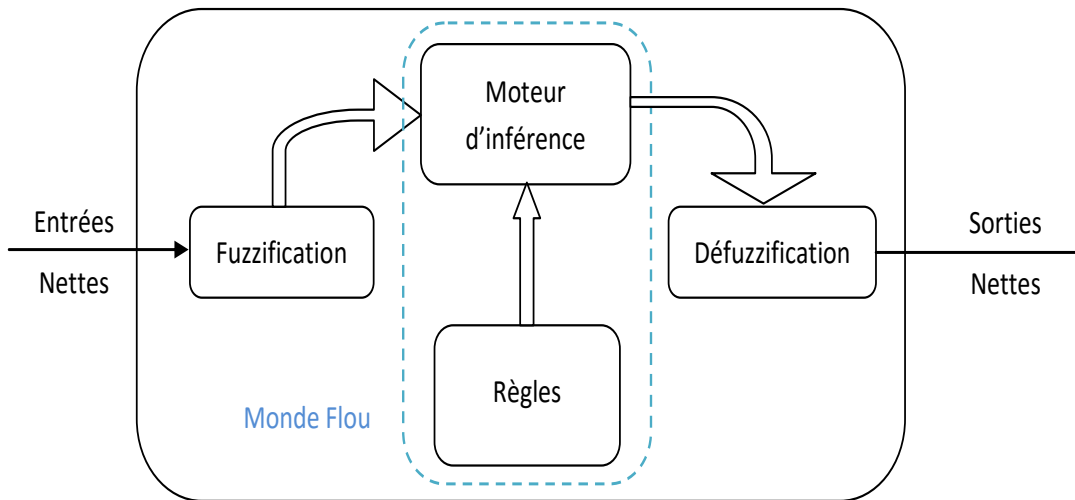


Figure 1 : Schéma bloc représentant un système flou.

- ❖ L'interface de fuzzification pour passer du monde réel au monde flou.
- ❖ Mécanisme d'inférence avec les règles pour le traitement de données.
- ❖ Défuzzification pour passer du monde flou au monde réel.

2.3.2 Ensemble flous

La notion d'ensemble flou permet de définir une appartenance graduelle d'un élément à une classe, c'est-à-dire d'autoriser un élément à appartenir plus ou moins fortement à cette classe. Cette notion permet le passage progressif et non exclusif d'un ensemble à un autre.

Un ensemble flou F est caractérisé par une fonction d'appartenance $\mu_F(x)$ qui prend ses valeurs dans l'intervalle $[0,1]$, cette fonction nous donne le degré d'appartenance d'un Elément à l'ensemble F . Cependant l'appartenance dans un ensemble net prend deux valeurs soit « 0 » soit « 1 » [120].

L'ensemble flou constitué de l'élément X et de la valeur de sa fonction d'appartenance :

$$F = \{(X, \mu_F(x)) / x \in U\} \tag{1}$$

1- Continu : F est noté sous la forme suivante :

$$F = \int \mu_F(x) / x \tag{2}$$

2- Discret : F est noté sous la forme suivante :

$$F = \sum_u \mu_F(x) / x \tag{3}$$

2.3.3 Variables linguistiques

La description d'une situation, d'un phénomène ou d'un procédé contient en général des variables dont les valeurs ne sont pas des nombres mais des mots ou des phrases exprimés en langage naturel ou artificiel, la raison pour laquelle on utilise des mots ou des phrases à la place des nombre, est que le caractère linguistique est moins spécifique que le caractère numérique.

Une variable linguistique est une variable dont les valeurs sont définies en termes linguistiques, elle est caractérisée par un triplé $(U, T(U), X)$ [119] où :

- ❖ U est le nom de la variable,
- ❖ $T(U)$ l'ensemble des termes primaires affectés à la variable,
- ❖ X est le référentiel sur lequel sont définis les sous-ensembles (termes).

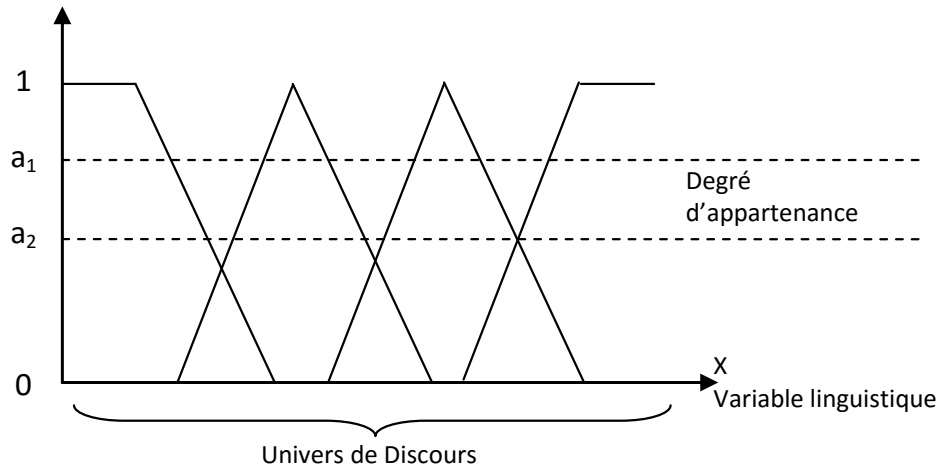


Figure 2 : Élément de la logique floue.

Exemple :

En logique booléenne, la température peut être :

- ❖ Faible : $\mu_{\text{faible}}(T) = 1, \mu_{\text{moyenne}}(T) = 0, \mu_{\text{élevée}}(T) = 0$
- ❖ Moyenne : $\mu_{\text{faible}}(T) = 0, \mu_{\text{moyenne}}(T) = 1, \mu_{\text{élevée}}(T) = 0$
- ❖ Elevée : $\mu_{\text{faible}}(T) = 0, \mu_{\text{moyenne}}(T) = 0, \mu_{\text{élevée}}(T) = 1$

Elle ne peut pas prendre deux qualificatifs à la fois (Fig.3)

En logique floue, $\mu_{\text{moyenne}}(T)$ par exemple, permet de quantifier le fait que la température puisse être considérée comme moyenne.

Dans ce cas, la température peut être considérée à la fois, comme faible avec un degré d'appartenance de 0.2 et comme moyenne avec un degré d'appartenance de 0.8.

$$\mu_{\text{faible}}(T) = 0.2, \mu_{\text{moyenne}}(T) = 0.8, \mu_{\text{élevée}}(T) = 0$$

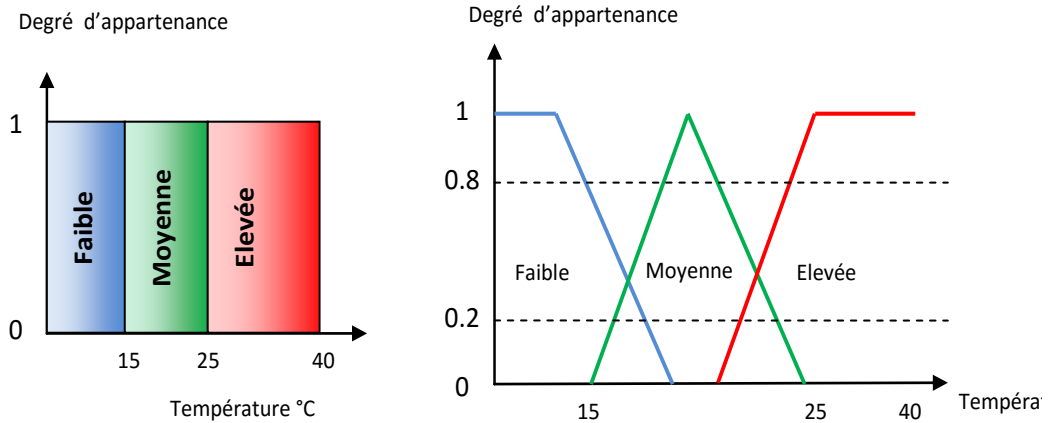


Figure 3 : Exemple d'ensemble en logique booléenne et en logique floue.

2.4 OPERATION SUR LES ENSEMBLES FLOUS

Comme dans la théorie des ensembles classiques on définit l'intersection, l'union des ensembles flou ainsi que le complémentaire d'un ensemble flou, ces relation sont traduites par les opérateurs «et», «ou» et «non»[121].

L'opérateur "ET", qui correspond à l'intersection de deux ensembles A et B il peut être réalisé par la fonction "Min" :

$$\mu_{A \cap B}(x) = \text{Min}(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

La fonction arithmétique "Produit" :

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x)$$

L'opérateur "OU", qui correspond à l'union de deux ensembles A et B il peut être réalisé par la fonction "Max" :

$$\mu_{A \cup B}(x) = \text{Max}(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

La fonction arithmétique "somme" :

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x)$$

L'opérateur "Non" est réalisé par :

$$\mu_{A^-}(x) = 1 - \mu_A(x)$$

2.5 PROPRIETES DES ENSEMBLES FLOUS

Soit une fonction $T : [0 \ 1] \times [0 \ 1] \rightarrow [0 \ 1]$ telle que $\forall x, y, z \in [0 \ 1]$:

1. Commutativité : $xTy = yTx$.
2. Associativité : $xT(yTz) = (xTy)Tz$.
3. Distribution : $xT(yTz) = (xTy)T(xTz)$.
4. Idempotence : $xTx = x$.

Admet 0 comme élément absorbant et 1 comme élément neutre : $0Tx = 0$ et $1Tx = x$.

2.6 STRUCTURE D'UNE COMMANDE PAR LOGIQUE FLOUE

❖ La commande floue (linguistique) s'est révélée, durant ces dernières années, comme un domaine de recherche actif, elle est basée sur la logique floue. Comme en automatique classique, son but est de traiter des problèmes de commande de processus, c'est à dire de gérer un processus en fonction d'une consigne donnée, par action sur les variables qui décrivent le processus, mais son approche est différente par les points suivants [118]:

- ❖ La connaissance mathématique du fonctionnement du processus n'est pas nécessaire,
- ❖ La maîtrise du système à régler avec un comportement complexe (non Linéaire) ou mal connus un contrôleur flou s'avère très intéressant,
- ❖ Le contrôleur flou reste clair pour tous les opérateurs et les utilisateurs de la machine,
- ❖ L'obtention fréquente de meilleures prestations dynamiques (régulateur non linéaire),
- ❖ Piloter un processus en utilisant les connaissances et l'expérience d'un opérateur qualifié «expert ». Les connaissances de l'expert sont schématisées à l'aide d'un ensemble de règles de conduite basées sur un vocabulaire symbolique,
- ❖ Le régulateur par logique floue ne traite pas une relation mathématique bien définie (algorithme de réglage), mais utilise des inférences avec plusieurs règles se basant sur des variables linguistiques.

2.7 CONTROLEUR FLOU

Un contrôleur flou n'est autre qu'un système flou destiné à appliquer une action de commander à un processus. La valeur de cette commande est déterminée à partir des valeurs des variables d'entrée par des relations floues, ou règles floues. En général, la structure d'un système de contrôle flou est composée de quatre principales distinctes, comme le montre la figure 4.

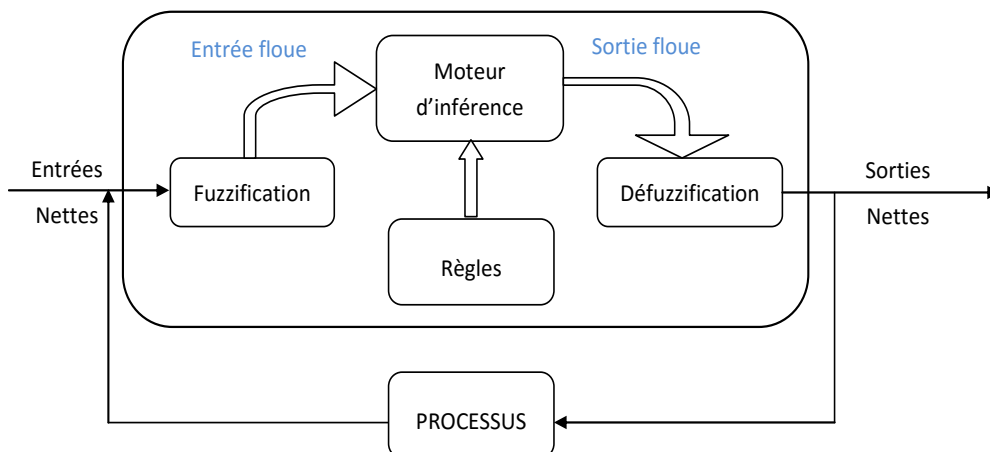


Figure 4: Structure d'un système de contrôle flou.

2.7.1 Interface de fuzzification

C'est la première étape du traitement d'un problème par la logique floue, elle consiste donc à modéliser chacune des entrées du système par des courbes donnant les degrés d'appartenance à

différents états identifiés. On utilise en général des fonctions d'appartenances de forme triangulaire et trapézoïdale, bien qu'il en existe d'autre, ces deux formes, à caractère linéaire, facilitent l'étape de fuzzification et le temps de calcul.

2.7.2 Base de règle

Le système de contrôle flou comprend un nombre de règles liant les ensembles flous (basée sur la règle logique) ayant la forme « si- alors ».

L'établissement de ces règles est généralement basé sur la connaissance du problème et sur l'expérience de l'opérateur qui peut fixer le nombre de sous ensemble, leurs fonctions d'appartenance ainsi que les variables linguistiques, ils existent plusieurs présentation de la base de règles telle que la description linguistique, symbolique ou par une matrice d'inférence.

Ces règles sont de deux types[122] :

- ❖ Mamdani :

La méthode Mamdani consiste à utiliser l'opérateur Min pour le **Et**, et l'opérateur Max pour le **Ou**

- ❖ Sugeno :

La règle générale de type Sugeno est donné sous forme de composition d'opérateurs arithmétique.

L'établissement des règles de commande floue est généralement basé sur un des points suivants:

- ❖ Expérience d'un expert et connaissance du problème de commande,
- ❖ Un modèle flou du processus pour lequel on souhaite synthétiser le régulateur,
- ❖ Les actions de l'opérateur, s'il n'arrive pas à exprimer linguistiquement les règles qu'il utilise, implicitement,
- ❖ L'apprentissage : c'est-à-dire que la synthèse de règle se fait par un procédé automatique également appelé superviseur.

2.7.3 Mécanisme d'inférence

Dans cette, étape, il s'agit de déterminer comment le système interprète les variables linguistiques floues. Les variables linguistiques [entrées et sorties] sont liées par les règles d'inférence.

Il existe deux règles d'inférence :

- ❖ Méthode d'inférence MAX – MIN
- ❖ Méthode d'inférence SOMME – PROD

2.7.4 Interface de défuzzification

Dans cette étape se fait le retour aux grandeurs de sortie réelles. Il s'agit de calculer, à partir des degrés d'appartenances à tous les ensembles flous de la variable de sortie, l'abscisse qui correspond à la valeur de sortie. Plusieurs stratégies de défuzzification existent. Les plus utilisées sont :

- ❖ Méthode du maximum,

- ❖ Méthode de la moyenne des maximums,
- ❖ Méthode du centre de gravité,
- ❖ Méthode des hauteurs pondérées.

2.8 LE CONTROLE ADAPTATIF

La commande adaptative consiste à utiliser un ensemble de techniques pour l'ajustement automatique en ligne des boucles de commande afin de réaliser et de maintenir de meilleures performances dynamiques au système à commander.

Deux types de structures de commande sont utilisés d'une manière générale :

- ❖ Indirect : où on estime les paramètres en ligne par un mécanisme d'adaptation. La loi de commande est calculée à partir des paramètres estimés.
- ❖ Direct : où on peut également calculer les paramètres du régulateur à partir du mécanisme d'adaptation paramétrique.

Le schéma de la figure 5 montre une configuration de la première approche.

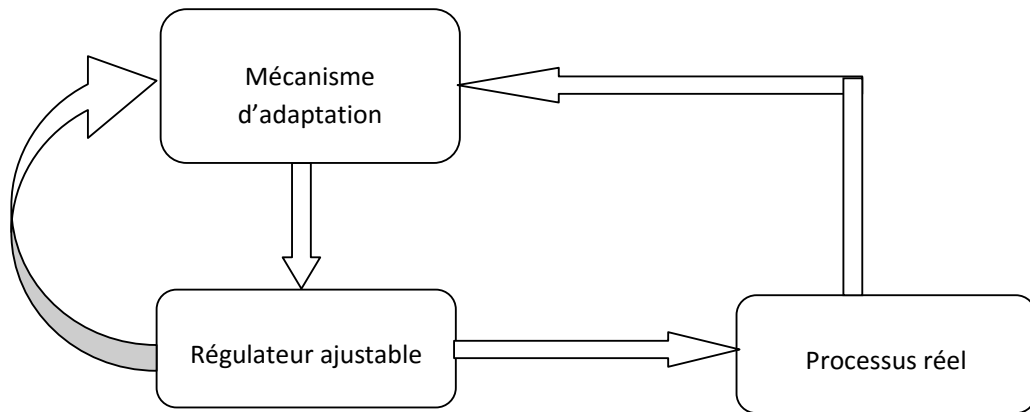


Figure 5 : Structure de base de la commande adaptative utilisée.

Le mécanisme d'adaptation dans notre cas est remplacé par un contrôleur flou qui sera présenté par la suite (Fig.6).

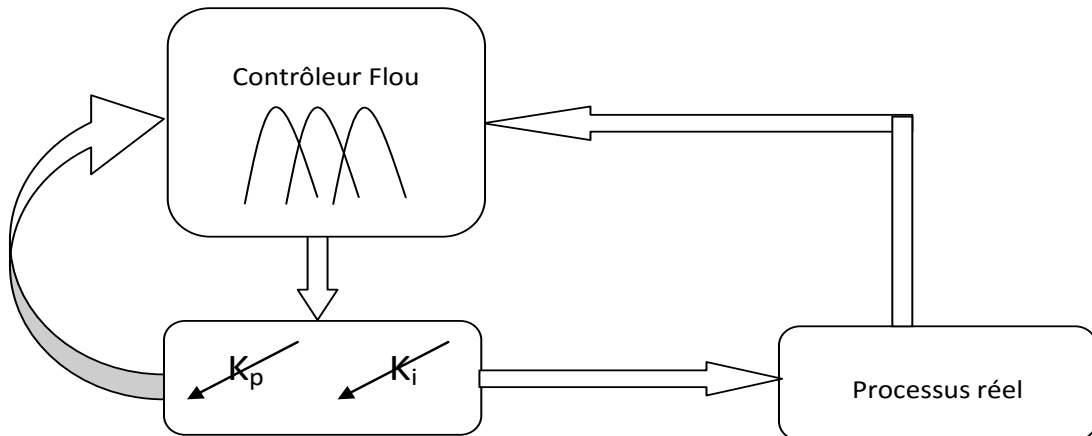


Figure 6: Structure du contrôleur flou adaptatif utilisé pour la commande de vitesse de la turbine.

3. RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS

L'origine des réseaux de neurones vient de l'essai de modélisation mathématique du cerveau humain.

3.1 HISTORIQUE

L'histoire des réseaux de neurones est donc tissée à travers des découvertes conceptuelles et des développements technologiques survenus à diverses époques [123], [124].

- ❖ W. James (1890): Introduit le concept de mémoire associative et propose une loi de fonctionnement pour l'apprentissage des réseaux de neurones.
- ❖ Mac Culloch et Pitts (1943) : définition d'un neurone formel.
- ❖ Loi de Hebb (1949).
- ❖ Rosenblatt (1958), Widrow et Hoff : modèle avec processus d'apprentissage, perceptron.
- ❖ B. Widrow (1960, automaticien) : Développe le modèle Adaline (Adaptive Linear Element).
- ❖ Minsky et Papert (1969) : limites des perceptrons.
- ❖ Kohonen (1972) : mémoires associatives.
- ❖ Rumelhart – Mc Clelland (1980), Werbos – Le Cun : perceptron multi-couches, mécanismes d'apprentissage performants (rétropropagation du gradient).
- ❖ 1985 : L'algorithme de rétro-propagation de gradient est développé.
- ❖ Actuellement : Les réseaux multicouches et la rétro-propagation du gradient restent les plus étudiés et les plus productifs au niveau des applications.

3.2 LE NEURONE BIOLOGIQUE

Les neurones sont les éléments de base du système nerveux. Ils possèdent de nombreux points communs avec les autres cellules du corps humain [123], [124]. Il comprend:

- ❖ Le corps cellulaire, qui fait la somme des influx qui lui parviennent.
- ❖ Les dendrites, qui sont les récepteurs principaux du neurone, captant les signaux qui lui parviennent.
- ❖ L'axone qui permet de transmettre les signaux émis par le corps cellulaire aux autres neurones.
- ❖ Les synapses, qui permettent aux neurones de communiquer avec les autres via les axones et les dendrites.

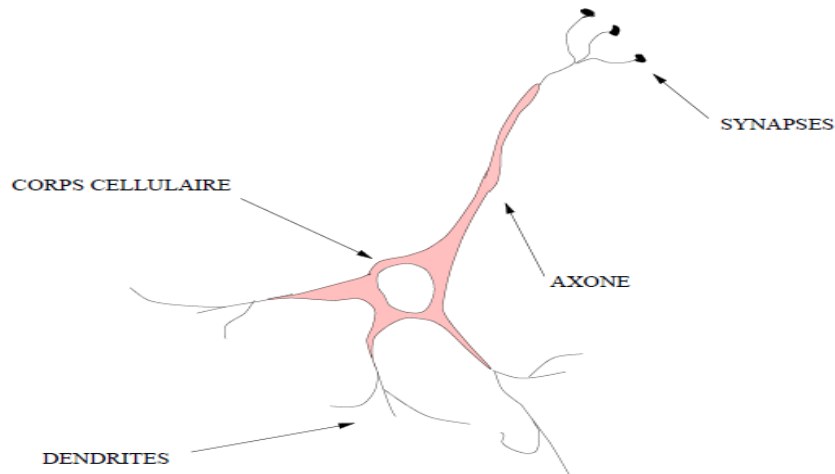


Figure 7 : Neurone biologique et ses principaux composants.

3.3 LE NEURONE FORMEL

Le neurone formel est un modèle mathématique simplifié du neurone biologique. Cet opérateur possède une sortie et plusieurs entrées pouvant être les sorties d'autres neurones, ou des signaux extérieurs. Il est défini par les cinq éléments suivants (Fig.8).

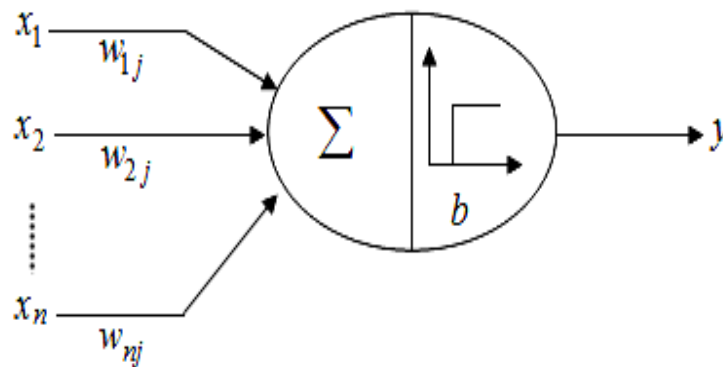


Figure 8 : Neurone formel.

La nature des entrées : Elles peuvent être binaires ou réelles. Le vecteur d'entrée de chaque neurone possède une entrée spéciale appelée le biais.

La fonction d'entrée totale : Elle définit le prétraitement des entrées. Elle peut être : Booléenne, linéaire, affine, polynomiale de degré supérieur à deux.

La fonction d'activation : C'est une fonction non-linéaire qui définit l'état interne du neurone en fonction de son entrée totale. Elle peut être une fonction binaire à seuil, linéaire à seuil ou multi-seuil, sigmoïde, stochastique ou une autre fonction généralement choisie croissante et impaire (Fig.9).

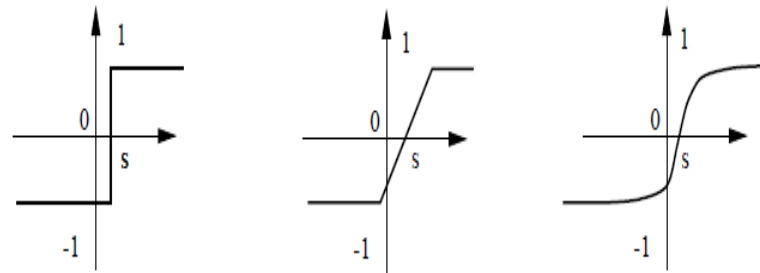


Figure 9 : Quelques fonctions d'activation.

La fonction de sortie : Elle calcule la sortie du neurone en fonction de son état d'activation.

La nature de la sortie du neurone : Elle peut être binaire ou réelle.

3.4 DOMAINES D'APPLICATION

Les réseaux de neurones ont aujourd'hui un impact considérable et, il y a fort à parier, que leur importance ira grandissant dans le futur. Il est utilisé dans plusieurs domaines, parmi ces derniers on cite [123], [125] :

- ❖ Statistiques : analyse de données / prévision / classification,
- ❖ Robotique : contrôle et guidage de robots ou de véhicules autonomes,
- ❖ Imagerie / reconnaissance de formes,
- ❖ Traitement du signal,
- ❖ Simulation de l'apprentissage,
- ❖ Aérospatial : pilotage automatique, simulation du vol.

3.5 ARCHITECTURE DES RESEAUX DE NEURONES

Il existe deux grandes catégories de structures de RN : les RN acyclique (ou réseau feed-forward) et les réseaux de neurone cycliques (ou récurrents).

3.5.1 Les réseaux non bouclés

Ce sont des réseaux unidirectionnels sans retour arrière (feed forward networks). Le signal de sortie est directement obtenu après l'application du signal d'entrée. Il est le plus souvent utilisé dans les applications de commande de systèmes non linéaires.

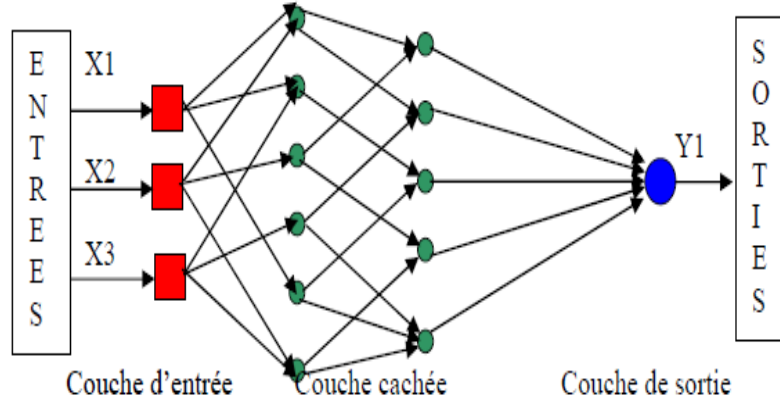


Figure 10 : Réseau non bouclé.

3.5.2 Les réseaux bouclés

Il s'agit de réseaux de neurones avec retour en arrière (feedback network ou récurrent network).

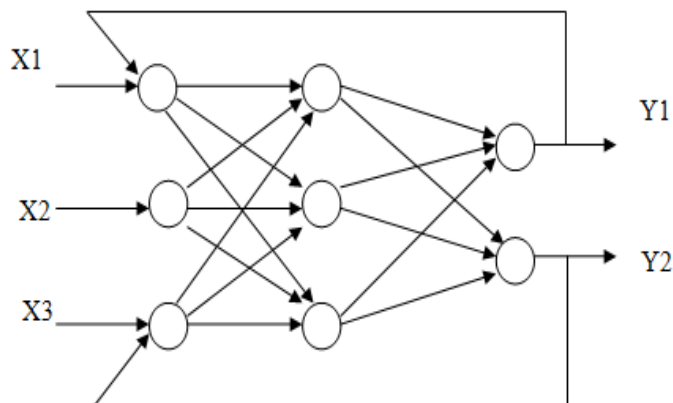


Figure 11 : Réseau bouclé.

3.6 PROCESSUS D'APPRENTISSAGE

L'apprentissage est une phase du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré. Le rôle de l'apprentissage est de définir le poids de chaque connexion. Le type d'apprentissage est déterminé par la manière dont les changements de paramètre surviennent.

3.7 TYPES D'APPRENTISSAGE

L'apprentissage est la propriété la plus intéressante des réseaux neuronaux. Trois types existent: l'apprentissage supervisé et l'apprentissage non supervisé, l'apprentissage auto supervisé.

3.7.1 Apprentissage supervisé

L'apprentissage dit superviser est caractérisé par la présence d'un «professeur» qui possède une connaissance approfondie de l'environnement dans lequel évolue le réseau de neurones, fournit au réseau des couples d'entrées-sorties. L'apprentissage est terminé lorsque tous les couples entrées-sorties sont reconnus par le réseau. Ce type d'apprentissage se retrouve, entres autres, dans le perceptron.

3.7.2 Apprentissage non supervisé

Cet apprentissage consiste à détecter automatiquement des régularités qui figurent dans les exemples présentés et à modifier les poids des connexions pour que les exemples ayant les mêmes caractéristiques de régularité provoquent la même sortie. Les réseaux à apprentissage non supervisé les plus connus sont les réseaux auto-organiseurs de Kohonen.

3.7.3 Apprentissage auto-supervisé

Le réseau de neurone évalue lui-même ses performances sans l'aide d'un « professeur ».

Un objet est présenté à l'entrée du réseau de neurones, à qui on a indiqué la classe à laquelle appartient cet objet. Si le réseau ne le classe pas correctement, il mesure lui-même l'erreur, et propage cette erreur vers l'entrée. Le réseau procède à autant d'itérations qu'il est nécessaire jusqu'à obtenir la réponse correcte.

3.8 AVANTAGES ET INCONVENIENTS

➤ Avantages

- ❖ Capacité de représenter n'importe quelle fonction,
 - ❖ Faculté d'apprentissage à partir d'exemples représentatifs par "rétro propagation des erreurs".
- L'apprentissage (ou construction du modèle) est automatique,
- ❖ Résistance au bruit ou au manque de fiabilité des données,
 - ❖ Simple à manier, beaucoup moins de travail personnel à fournir que dans l'analyse statistique classique. Aucune compétence en matis, informatique statistique requise,
 - ❖ Comportement moins mauvais en cas de faible quantité de données,
 - ❖ Pour l'utilisateur novice, l'idée d'apprentissage est plus simple à comprendre que les complexités des statistiques multi variables.

➤ Inconvénients

- ❖ L'absence de méthode systématique permettant de définir la meilleure topologie du réseau et le nombre de neurones à placer dans la (ou les) couche(s) cachée(s),
- ❖ Le choix des valeurs initiales des poids du réseau et le réglage du pas d'apprentissage, qui jouent un rôle important dans la vitesse de convergence,
- ❖ Le problème du sur-apprentissage (apprentissage au détriment de la généralisation),

❖ La connaissance acquise par un réseau de neurone est codée par les valeurs des poids synaptiques, les réseaux de neurones sont donc des boites noires où les connaissances sont inintelligibles pour l'utilisateur.

4. LA COMMANDE PREDICTIVE

Cette section a pour objectif de rappeler les principes généraux et de donner un aperçu sur les méthodes les plus couramment utilisés de la commande prédictive. Ensuite, le développement théorique de l'algorithme de commande prédictive généralisée GPC sera présenté.

4.1 DEFINITION

La commande prédictive est une technique de commande avancée de l'automatique. Elle a pour objectif de commander des systèmes industriels complexes [126]. Le principe de cette technique est d'utiliser un modèle dynamique du processus à l'intérieur du contrôleur en temps réel afin d'anticiper le futur comportement du procédé. La commande prédictive fait partie des techniques de contrôle à modèle interne (IMC: Internal Model Controller). En anglais on utilise le terme MPC ou MBPC pour qualifier la commande prédictive : Model (Based) Predictive Control [127]. Cette méthode a été inventée par un Français, J. Richalet, en 1978 et généralisée par D.W. Clarke en 1987 en accord avec de grands groupes industriels aux États-Unis et en Europe (Shell et Adersa) [128], [129].

4.2 PRINCIPE DE LA COMMANDE PREDICTIVE

Le principe de la commande prédictive [130], [131] consiste à optimiser une fonction de coût, qui décrit l'objectif de contrôle sur un horizon de temps fini. Afin de calculer la séquence de commandes qui optimise le critère défini, le contrôleur dispose d'un modèle (mathématique) du processus pour prédire son comportement. A chaque instant, une séquence de commandes optimales en boucle ouverte, minimisant la fonction de coût, sur l'horizon de prédiction est calculée, mais seul le premier élément est appliqué au système.

Cette procédure est reprise à la période d'échantillonnage suivante (Fig.12), mettant à jour les paramètres courants du système (mesures ou estimations), selon le principe d'horizon fuyant.

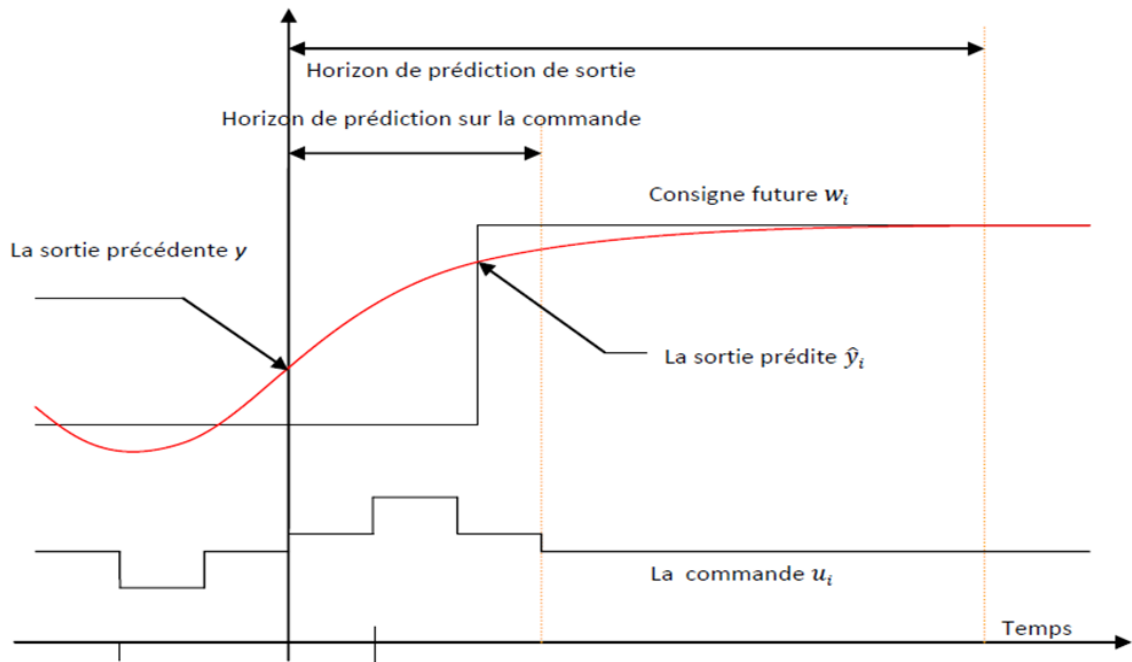


Figure 12 : Principe de base de la commande prédictive

En fait, la technique prédictive est similaire au comportement anticipatif de l'être humain. Pour une analogie simple, prenons le cas de la conduite d'une voiture. Le conducteur connaît la trajectoire à suivre sur un horizon fini et, prenant en compte les caractéristiques de la voiture (modèle mental), décide d'actionner ses commandes. En utilisant un régulateur classique, comme le PID, les actions sont prises en fonction des erreurs passées entre la sortie et la consigne, ce qui est équivalent, dans cet exemple, à conduire la voiture en regardant le rétroviseur. Cette comparaison est pourtant légèrement inéquitable pour le PID, sachant qu'il n'utilise pas les connaissances sur la consigne future à suivre.

4.3 HISTORIQUE DES METHODES MPC

Depuis la fin des années 70, de nombreuses catégories et dénominations de la commande prédictive ont été proposées. La liste ci-dessous propose un aperçu non exhaustif des plus connues :

4.3.1 MAC (Model Algorithmic Control)

Model Algorithmic Control (MAC), dont le logiciel est appelé commande d'identification (IDCOM), a été initialement appelé Model Predictive Heuristic contrôle (MPHC). En 1978, Richalet décrit des applications réussies de MPHC [132]. Il utilise le modèle de réponse impulsionnelle.

Cette méthode est très similaire au DMC avec des différences suivantes [133] :

- ❖ A la place du modèle de réponse indicielle, un modèle de réponse impulsionnelle impliquant u est utilisé.
- ❖ Le nombre de mouvements d'entrée ne soit pas utilisé pour le réglage.
- ❖ L'estimation de perturbation $\hat{x}(t+j|t)$ est filtrée.

L'horizon de prédiction(λ) et le facteur de pénalisation α sont les paramètres de réglage. α est choisi en tant que paramètre de réglage principal. $\alpha = 0$ donne un contrôle plus rapide tandis que λ est ajusté pour le lissage des signaux de commande.

Dans le MAC, la réponse impulsionnelle permet l'amélioration de la robustesse contre les erreurs d'identification et l'effet de perturbation sur l'erreur de modélisation des paramètres est moindre par rapport aux techniques de vecteur d'état. Cependant, MAC est applicable en boucle ouverte des processus stables.

Le MAC est utilisé dans les centrales électriques, fours de verre, générateur de vapeur et dans la colonne de distillation dans une raffinerie de pétrole, etc. [132].

4.3.2 DMC (Dynamic Matrix Control)

Les ingénieurs de Shell Oil ont développé leur propre technologie MPC indépendante dans le début des années 1970, avec une première application en 1973. Cutler et Ramaker présentés les détails d'un algorithme de contrôle multivariable sans contrainte qu'ils ont appelé Dynamic Matrix Control (DMC) lors de la réunion nationale AIChE 1979 [134] et à la Conférence de contrôle automatique de 1980 [135].

Dans un document d'accompagnement à la réunion 1980 Prett et Gillette (Prett et Gillette, 1980) décrit une application de la technologie DMC à un réacteur/régénérateur dans lequel l'algorithme a été modifié pour gérer les non-linéarités et les contraintes. Aucun papier discuté de leur technologie d'identification de processus.

Les principales caractéristiques de l'algorithme de contrôle DMC comprennent:

- ❖ Modèle linéaire de réponse Step du système,
- ❖ Objectif de performance quadratique sur un horizon de prédiction finie,
- ❖ Le comportement de sortie d'installation future déterminée en essayant de suivre le point de consigne aussi près que possible,
- ❖ Entrées optimales calculées comme la solution à un problème des moindres carrés.

Le modèle de réponse indicielle linéaire utilisé par l'algorithme DMC concerne les changements dans un signal de sortie de processus à une somme pondérée des variations d'entrée passées, appelés mouvements d'entrée. Pour le cas SISO le modèle de réponse de l'étape ressemble à:

$$y_{k+j} = \sum_{i=1}^{N-1} s_i \Delta u_{k+j-i} + s_N u_{k+j-N} \quad (6)$$

Le poids de déplacement s_i sont les coefficients de réponse de l'étape.

. Plusieurs sorties ont été traitées par superposition. En utilisant le modèle de réponse de l'étape, on peut écrire les changements futurs de sortie prédit comme une combinaison linéaire des futurs mouvements d'entrée.

La matrice qui lie les deux ensembles est que l'on appelle la matrice dynamique. En utilisant cette représentation permet au vecteur de mouvement optimal à calculer analytiquement comme solution à

un problème des moindres carrés. Faire avancer le contrôle est facilement inclus dans cette formulation en modifiant les sorties futures prévues. En pratique, la matrice inverse requise peut être calculée hors ligne pour sauver calcul.

Seul le premier rang de la matrice finale de gain du régulateur doit être stocké car seul le premier mouvement doit être calculé.

4.3.3 EHAC (*Extended Horizon Adaptive Control*)

B. E. Ydstie développé le contrôle adaptatif à horizon étendu (EHAC) en 1984. Il utilise un modèle de processus paramétrique. Cette approche est appelée le contrôle adaptatif à horizon étendu car elle permet plus de temps pour conduire la sortie de processus à sa valeur désirée au lieu d'utiliser un temps de retard fixe et un intervalle court [133], [136].

EHAC conduit à une structure de commande à plusieurs étapes car la sortie finale dépend de l'entrée courante, ainsi que sur les entrées qui sont implémentées à l'avenir. Ainsi, la loi de commande ne dépend que du paramètre de processus et le seul paramètre de réglage dans la méthode EHAC est l'horizon de prédiction N .

Dans le contrôle adaptatif à horizon étendu, seul l'écart à un moment dans le futur est pris en compte, et par conséquent, il est facile à mettre en œuvre.

Avec un choix approprié de l'horizon de temps, certains systèmes instables peuvent être stabilisés. Cependant, pour $\alpha_0 = 0$, aucun contrôle n'est obtenu. Certaines fréquences ne peuvent pas être éliminées, car il est impossible de considérer l'effort de commande à chaque point et l'extension de l'horizon de contrôle se traduira par un contrôle plus lent.

L'utilisation d'EHAC est étendue à multivariables systèmes en boucle ouverte en 1986. L'algorithme ne nécessite pas la connaissance de la matrice du système et il tolère l'effet des perturbations de sortie.

Cependant, les contrôleurs multivariables basés sur un critère d'avance sont sensibles au choix d'une structure de retard. Le comportement cyclique est évité en utilisant le contrôle de recul de l'horizon.

4.3.4 EPSAC (*Extended Prediction Self-Adapted Control*)

De Keyser et Van Cauwenberghe ont développés l'EPSAC (*Extended Prediction Self-Adaptive Control*) en 1985 [137]. Il utilise une fonction de transfert discrète (transformée en z) pour modéliser le processus et propose un signal de commande constant à partir du moment présent tout en utilisant un prédicteur sous-optimale au lieu de résoudre une équation Diophantine [133], [138].

Les paramètres de réglage sont : l'horizon de prédiction, le facteur de pondération et le polynôme de filtre. Néanmoins, le réglage en ligne de l'horizon de prédiction influence la structure du prédicteur et la structure du contrôle.

Les zéros en boucle ouverte apparaissent également sous forme de zéros en boucle fermée. Parce que les zéros de processus ne sont pas annulés, la stratégie de contrôle prédictif à long terme peut attaquer les procédés en phase non-minimale. Une consigne constante est suivie sans erreur [138].

4.3.5 GPC (*Generalized Predictive Control*)

La commande prédictive généralisée (GPC) est l'une des méthodes les plus populaires dans le contrôle prédictifs développés par D. W. Clarke en 1987 [128]. Elle prend en considération des Signaux de compensations (car elle utilise le modèle « CARIMA ») et des signaux d'anticipation. La principale différence entre GPC et DMC est le modèle utilisé pour décrire le système et la formulation de la matrice dynamique.

Pour satisfaire les objectifs de contrôle, il rend l'utilisation d'un modèle CARIMA et les différents horizons. Ce modèle est plus approprié dans les applications industrielles où les perturbations sont non stationnaires.

Un modèle CARIMA permet d'obtenir de bonnes prédictions de sortie et d'optimiser une séquence de futurs signaux de commande pour minimiser une fonction de coût définie sur un horizon de prédiction. L'inclusion de la perturbation est nécessaire pour déduire la structure du contrôleur correct.

GPC dépend de l'intégration des hypothèses dans le modèle CARIMA du système, récursivité de l'équation diophantienne, la considération des poids des incréments de contrôle dans la fonction coût et le choix d'un horizon de contrôle [139]. Il est capable de tenir compte à la fois les consignes constantes et variables dans le futur. Il n'est pas affecté (contrairement à des stratégies pôle de placement) si le modèle du système est sur paramétrés.

Cependant, GPC a des limites avec les processus à phase minimale [138]. GPC montre une meilleure performance dans les usines de ciment, les tours de séchage par atomisation et les bras de robot [140].

4.3.6 PFC (*Predictive Functional Control*)

PFC est un algorithme prédictif simple, utilisé surtout pour des systèmes SISO industriels rapides et/ou non linéaires, s'avérant pratique pour l'ingénieur en permettant le réglage direct des paramètres (par exemple la constante de temps) associées au temps de montée pour garder la simplicité, un manque de rigueur en performance et surtout dans la garantie des contraintes est associée avec cet algorithme.

La commande prédictive fonctionnelle 'PFC' (Predictive Functional Control) a été développée par Richalet et la société ADERSA [141]. Elle fait partie des commandes prédictives dites à modèles internes MPC (Model Predictive Control). Le principe de la commande prédictive PFC consiste à utiliser un modèle dynamique du processus à l'intérieur du contrôleur en temps réel afin d'anticiper le comportement futur du procédé [141]. Cette commande se structure autour de quatre notions essentielles :

- ❖ Le modèle interne,
- ❖ La trajectoire de référence,
- ❖ Calcul de la variable manipulée
- ❖ Et la compensation de l'erreur modèle-processus (auto-compensateur).

4.3.7 CRHPC (Constrained Receding Horizon Predictive Control)

Dans ce type de commande, Clarke propose de prendre en compte des contraintes terminales sous forme d'égalité sur la sortie sur un horizon fini au-delà de l'horizon de prédiction [142].

4.3.8 MPC (Model Predictive Control)

Cette commande est formulée dans l'espace d'état par Lunstrom [143] utilise le formalisme de la représentation d'état pour faciliter l'analyse de la stabilité et de la robustesse.

En fait, toutes ces variantes de stratégies de commande prédictive sont aujourd'hui regroupées sous le terme générique MPC, illustrant ainsi le rôle fondamental du modèle. Ce bref rappel historique a permis de donner une idée de l'évolution de la commande prédictive. Dans ce chapitre, seule la Commande Prédictive Généralisée (GPC) sera examinée.

4.4 APPLICATIONS INDUSTRIELLES DE LA COMMANDE PREDICTIVE

La commande prédictive est une technique de commande avancée de l'automatique, elle est née d'un besoin réel dans le monde industriel. Un besoin de système de régulation capable de performances plus élevées que les contrôleurs classiques tel que le régulateur de type PID tout en respectant des contraintes de fonctionnement et de production toujours plus sévères. Sa mise en œuvre pratique dans l'industrie a vu le jour dans le domaine pétrolier et pétrochimique, notamment avec les travaux de Richelet en 1976 [129].

La commande prédictive est devenue la méthode de choix pour des problèmes difficiles de commande. Elle a prouvé ses performances au travers de nombreuses applications industrielles dans plusieurs domaines dont on peut citer : le raffinage, la pétrochimie, le papier, la métallurgie, l'alimentaire, le polymère, l'aérospatial et l'automobile [126].

4.5 COMMANDE PREDICTIVE GENERALISEE

La commande prédictive généralisée GPC est une des derniers membres de la famille des commandes à horizon étendu LRPHC (Long range horizon prédictive control).

Elle présente une généralisation des algorithmes de cette famille.

Elle se base sur les concepts suivants :

- ❖ Le modèle de prédiction utilisé est un modèle CARIMA (Controlled Auto-Regressive Integral Moving Average) qui est une extension du modèle CARMA comportant une action intégrale dans le but d'éliminer l'écart permanent et l'effet des perturbations constantes ;
- ❖ L'utilisation de la prédiction à horizon étendu;

- ❖ La résolution récursive de l'équation de Diophantine;
- ❖ L'introduction de la pondération sur les incréments de commande dans le critère à minimiser ;
- ❖ Le choix de l'horizon de commande à partir duquel tous les incréments sont pris nuls.

La combinaison de ces concepts, issus de plusieurs algorithmes, a permis l'obtention d'une méthode de commande puissante et performante qui a donné des résultats très satisfaisants dans plusieurs applications industrielles.

Dans cette partie nous présentons successivement la loi de commande GPC standard.

4.5.1 Présentation de la loi de commande : Modèle employé

Le modèle employé pour la synthèse de la loi de commande est formulé comme suit :

Soit un système mono variable dont le comportement peut être approché par le modèle paramétrique linéaire [128], [139]:

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})u(t - 1) + v(t) \tag{7}$$

Où : $A(z^{-1})$, $B(z^{-1})$ sont des polynômes en fonction de l'opérateur retard z^{-1} :

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_{na}z^{-na}$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_{nb}z^{-nb}$$

$y(t)$ est la sortie à commander, $u(t)$ est la commande, $v(t)$ représente la perturbation.

Il n'y a pas d'hypothèse spéciale sur $A(z^{-1})$ et $B(z^{-1})$. Le système peut être instable en boucle ouverte ou /et à phase non minimale.

Si le système possède un temps mort non nul, les (k) premiers éléments de $B(z^{-1})$ deviennent nuls (k :Nombres d'échantillons du temps mort).

La perturbation $v(t)$ peut être modélisée sous la forme de moyenne mobile :

$$v(t) = C(z^{-1})e(t) \tag{8}$$

Où : $C(z^{-1}) = C_0 + C_1z^{-1} + C_2z^{-2} + \dots + C_{nc}z^{-nc}$

$e(t)$ est une séquence aléatoire non corrélée de moyenne nulle et de variance finie.

Le modèle CARMA (Controlled Auto-Regressive and Moving Average) est obtenu à partir des équations (7) et (8).

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})u(t-1) + C(z^{-1})e(t) \tag{9}$$

Dans la pratique, les perturbations les plus fréquentes sont les échelons de grandeur de durée et d'occurrence aléatoire, d'où l'utilisation d'un modèle de perturbation plus approprié :

$$v(t) = C(z^{-1})e(t)/\Delta \tag{10}$$

$\Delta (\Delta= 1 - z^{-1})$: est l'opérateur de différence.

Ceci permet d'introduire l'action intégrale d'une façon naturelle. A partir des équations (9) et (10) on obtient le modèle CARIMA (Controlled Auto-Regressive Integrated Moving Average) :

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})u(t-1) + C(z^{-1})e(t)/\Delta \quad (11)$$

4.5.2 Philosophie de la loi de commande :

Nous nous intéressons à la commande GPC développée par Clarke et Mohtadi qui fait partie des lois de commande à horizon de prédiction étendu [128].

Le critère à minimiser est :

$$J = E \left\{ \sum_{j=N_1}^{N_2} [y(t+j) - w(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda_j [\Delta u(t+j-1)]^2 \right\} \quad (12)$$

- Où N_1 : horizon minimum de prédiction ;
- N_2 : horizon maximum de prédiction (horizon de prédiction).
- N_u : horizon de commande.
- λ : pondération de la séquence de commande.

L'idée de base de cette loi de commande est de calculer une séquence de commande telle que l'écart entre la sortie prédite et la consigne désirée soit minimale par rapport au critère (12) sur un horizon de prédiction N_2 (Fig.12).

Les termes $\{e(t+j), \dots, e(t+1)\}$ constituent la partie non prédictible.

Pour expliciter analytiquement cette décomposition, on introduit l'identité polynomiale suivante :

$$I = E_j(z^{-1})A(z^{-1})\Delta + z^{-j}F_j(z^{-j}) \quad (13)$$

Où E_j, F_j des polynômes uniquement définis par $A(z^{-1})$ et l'intervalle de prédiction j donnés.

L'équation (12) est appelée équation de Diophantine.

Les polynômes (E_j) et (F_j) sont de degrés $(j-1)$ et (n) respectivement leur détermination est faite à partir d'un algorithme récursif développé par Clarke.

Multipliant l'équation (13) par $(E_j A \Delta)$ et remplaçant $(E_j A \Delta)$ à partir de (12), on obtient alors la sortie à l'instant $(t+j)$.

$$y(t+j) = E_j B \Delta u(t+j-1) + F_j y(t) + E_j e(t+j) \quad (14)$$

Comme le polynôme $E_j(q^{-1})$ est de degré $(j-1)$ alors les composantes du bruit sont toutes dans le futur, de façon que le prédicteur optimal obtenu à partir des données de mesure de la sortie jusqu'à l'instant (t) et de n'importe quelle commande $u(t+i)$ pour $(i > 1)$ soit : (Où $G_j = E_j B$)

$$Y(t+j/t) = G_j \Delta u(t+j-1) + F_j y(t) \quad (15)$$

La structure de ce prédicteur optimal est représentée sur la figure (13)

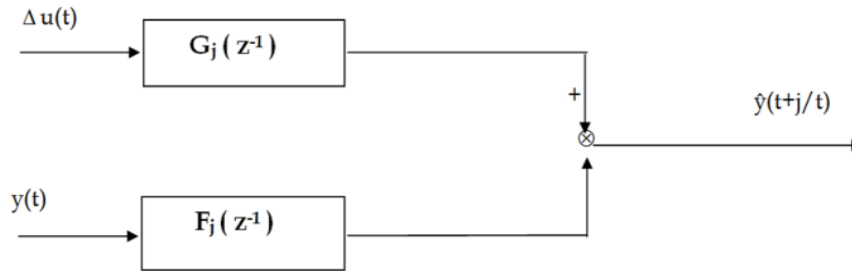


Figure 13 : Structure du prédicteur optimal

Seule la prédiction $\hat{y}(t + k/t)$ est utilisée où (k) est la valeur du temps mort du système (retard), par contre dans la commande prédictive généralisée on considère un ensemble de prédiction au (j) pas, où (j) varie dans un intervalle appelé **horizon de prédiction**.

4.5.3 Réursion de l'équation de diophantine (résolution itérative) :

L'implantation de la GPC nécessite la résolution de l'équation de Diophantine (12). D.clarke a proposé une méthode de résolution qui consiste à utiliser une récursion de cette équation de façon que (E_{j+1}, F_{j+1}) sont obtenus à partir de (E_j, F_j) connus. Cette procédure récursive se résume par les étapes suivantes :

- **Etape 1 :**

$$E_1 = 1$$

$$F_1 = z(1 - \tilde{A}) = z(1 - \Delta - A)$$

Cette étape correspond à une initialisation des polynômes (E) et (F), de sorte que : $j = N_1$ (en général $N_1 = 1$).

- **Etape 2 :**

Pour (j) allant de la valeur 2 (autrement dit $N_1 + 1$) jusqu'à (N_2) , on a :

$$E_j = E_{j-1} + f_{j-1,0} \cdot z^{-j+1}$$

$$F_j = z[F_{j-1} - \tilde{A} \cdot f_{j-1,0}] = z[F_{j-1} - \Delta \cdot A \cdot f_{j-1,0}]$$

Où $(f_{j-1,0})$ est le premier monôme (monôme de rang zéro) du polynôme (F) précédent, c'est à dire du polynôme (F_{j-1}) avec :

$$E_j = e_{j0} + e_{j1} \cdot z^{-1} + e_{j2} \cdot z^{-2} + \dots + e_{jj} \cdot z^{-(j-1)}$$

$$F_j = f_{j0} + f_{j1} \cdot z^{-1} + f_{j2} \cdot z^{-2} + \dots + f_{jna} \cdot z^{-na}$$

Note:

on a $E_{0j}=1$, quelque soit la valeur du pas de prédiction (j).

Les étapes 1 et 2 sont répétées d'une façon séquentielle de sorte qu'à chaque échantillonnage on puisse disposer des polynômes (E_j) et (F_j) pour tout (j) appartenant au segment $[N_1, N_2]$.

4.5.4 CALCUL DE LA COMMANDE

Comme nous l'avons vu précédemment la sortie du système à l'instant (t+j) s'écrit sous la forme suivante :

$$y(t + j) = G_j \Delta u(t + j - 1) + F_j y(t) + E_j e(t + j) \tag{16}$$

En prenant l'horizon minimum de prédiction (N₁=1) et l'horizon maximum de prédiction (N₂=N), on peut écrire :

$$\begin{aligned} y(t + 1) &= G_1 \Delta u(t) + F_1 y(t) + E_1 e(t + 1) \\ y(t + 2) &= G_2 \Delta u(t + 1) + F_2 y(t) + E_2 e(t + 2) \end{aligned} \tag{17}$$

$$\begin{aligned} &\vdots \\ &\vdots \\ &\vdots \\ y(t + N) &= G_N \Delta u(t + N - 1) + F_N y(t) + E_N e(t + 1) \end{aligned}$$

y(t + j) est composée de trois termes :

- ❖ Un terme dépendant des actions des commandes futures à déterminer ;
- ❖ Un terme dépendant des commandes passées connues ;
- ❖ Un terme dépendant des composantes futures du bruit.

Soit f(t + j) une composante de y(t + j) composée de signaux qui sont connus à l'instant (t) de façon que :

$$\begin{aligned} f(t + 1) &= G_1(z^{-1}) - g_{10} \Delta u(t) + F_1 y(t) \\ f(t + 2) &= G_2(z^{-1}) - g_{21} z^{-1} - g_{20} z^{-2} \Delta u(t) + F_1 y(t) \\ G_i(z^{-1}) &= g_{i0} + g_{i1} z^{-1} + g_{i2} z^{-2} \dots \dots \dots \end{aligned}$$

D'où l'équation du prédicteur optimal peut être écrite sous la forme vectorielle suivante :

$$\hat{Y} = G\tilde{U} + f \tag{18}$$

Avec :

$$\begin{aligned} \hat{Y} &= [\hat{Y}(t + 1), \hat{Y}(t + 2), \dots, \hat{Y}(t + N)]^T \\ \tilde{U} &= [\Delta u(t), \Delta u(t + 1), \dots, \Delta u(t + N - 1)]^T \\ f &= [f(t + 1), f(t + 2), \dots, f(t + N)]^T \end{aligned}$$

Les (j) premiers termes dans G_j(z⁻¹) sont les paramètres de la réponse indicielle.

Sous l'hypothèse (g_{ij} = g_j) pour (j = 0, 1, 2, ... < i), on écrit :

$$\begin{pmatrix} \hat{Y}(t + 1/t) \\ \hat{Y}(t + 2/t) \\ \dots \\ \hat{Y}(t + N/t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ g_1 & g_0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{N-1} & g_{N-2} & \dots & \dots & g_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta u(t) \\ \Delta u(t + 1) \\ \dots \\ \Delta u(t + N - 1) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} f(t + 1) \\ f(t + 2) \\ \dots \\ f(t + N) \end{pmatrix} \tag{19}$$

La matrice (G) est alors sous forme triangulaire inférieure de dimension (N x N).

$$G = \begin{pmatrix} g_0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ g_1 & g_0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{N-1} & g_{N-2} & \dots & \dots & g_0 \end{pmatrix} \tag{20}$$

Il est à noter que si un système possède un temps mort ($k > 1$), les $(k-1)$ premières lignes de (G) seront nulles.

N.B :

Si l'horizon minimum (N_1) est pris égal au retard (k), le premier élément est non nul.

Le critère donné par l'équation 12 peut être écrit sous la forme vectorielle suivante :

$$J(N_1, N_2, N_u) = \text{Eps}[\tilde{U}(G\tilde{U} + f - W)^T(G\tilde{U} + f - W) + \lambda\tilde{U}^T\tilde{U}] \quad (21)$$

La minimisation de ce critère par rapport à (U) revient à annuler la dérivée de (J) par rapport à (U) :

$$\frac{dJ}{d\tilde{U}} = 0 \quad (22)$$

En supposant qu'il existe aucune contrainte sur les commandes futures on obtient :

$$\tilde{U} = (G^T G + \lambda)^{-1} G^T (W - f) \quad (23)$$

En se basant sur le principe d'horizon fuyant, la première commande $u(t)$ est appliquée au procédé.

$$U(t) = U(t - 1) + \check{g}^T (W - f) \quad (24)$$

Avec : (\check{g}^T) est la première ligne de $(G^T G + \lambda I)^{-1} G^T$

4.6 CHOIX DES PARAMETRES DE SYNTHESE

De nombreuses études ont permis aux scientifiques d'énoncer le choix suivant [144]:

4.6.1 Horizons de prédiction

L'horizon initial (minimum) de prédiction (N_1) est égal au retard (k) si ce dernier est connu sinon il est pris égal à 1.

L'horizon final (maximum) de prédiction (N_2) est choisi de façon que $(N_2 \times h)$ est de même amplitude que le temps de montée du système où (h) est le temps d'échantillonnage du contrôleur.

4.6.2 Horizon de commande

Pour les processus simples, prendre l'horizon de commande (N_u) égal à 1 donne souvent de bons résultats, par contre, pour les processus complexes (N_u) doit être égal au moins au nombre des pôles instables ou mal amortis.

L'horizon de commande ne doit en aucun cas avoir une valeur supérieure à celle de l'horizon de prédiction maximal.

4.6.3 La pondération

Le bon choix de la pondération ($\lambda = 0$) donne généralement des résultats satisfaisants, mais des fois on prend ($\lambda = \text{eps}$ (eps très faible)) pour améliorer la robustesse.

Si (λ) est suffisamment grand, le système en boucle fermée est instable si le processus en boucle ouverte est instable.

4.6.4 FORMULATION DE LA LOI DE COMMANDE GPC SOUS LA FORME CANONIQUE RST

L'un des moyens employés dans la mise en œuvre de la commande prédictive généralisée est l'utilisation de la structure de réglage (R-S-T) cette structure est représentée ci-dessous [145], [146].

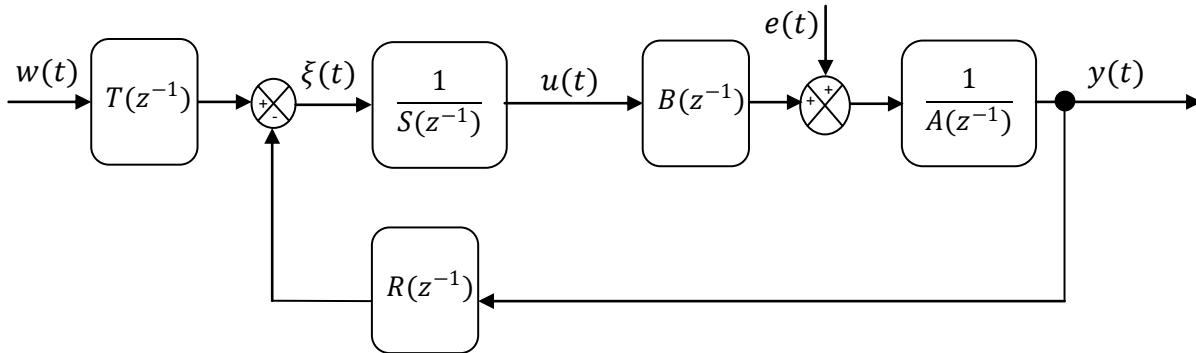


Figure 14 : Structure de réglage (R-S-T)

Avec : $S(z^{-1})$, $R(z^{-1})$ et $T(z^{-1})$ de degrés respectivement n_s , n_r , n_t

En faisant quelques développements mathématiques, nous obtenons l'algorithme de la GPC qui nous mènera à l'équation suivante :

$$\Delta u(t) = \sum_{j=N_1}^{N_2} K_{1j} [W(t+j) - F(t+j)] \quad (25)$$

avec K_{ij} les éléments de la matrice définie par :

$$K = (G^T G + \lambda)^{-1} G^T \quad (26)$$

Où: $i = 1 \dots N_u$ et $j = 1 \dots N_2 - N_1 - 1$

En remplaçant l'expression de $F(t+j)$ dans l'équation $\Delta u(t)$

$$\Delta u(t) \left[1 + z^{-1} \sum_{j=N_1}^{N_2} K_{1j} g_j \right] = W(t) \sum_{j=N_1}^{N_2} K_{1j} z^{-j} - y(t) \sum_{j=N_1}^{N_2} K_{1j} F_j \quad (27)$$

Comme la structure R-S-T fournit (pour $n_s = 1$, $n_t = N_2$, $n_r = N_2$) [05] :

$$S(z^{-1}) \cdot u(t) = T(z^{-1}) \cdot W(t) - R(z^{-1}) \cdot y(t) \quad (28)$$

Nous obtenons, par identification membre à membre l'équation des polynômes R-S-T suivante :

$$R(z^{-1}) = \sum_{j=N_1}^{N_2} K_{1j} F_j \quad (29)$$

$$S(z^{-1}) = 1 + z^{-1} \sum_{j=N_1}^{N_2} K_{1j} g_j \quad (30)$$

$$T(z^{-1}) = \sum_{j=N_1}^{N_2} K_{1j} z^{-j} \quad (31)$$

L'expression de la fonction de transfert en boucle fermée s'écrit alors :

$$Y(t) = \frac{BT}{SA\Delta + BR} W(t) + \frac{S}{SA\Delta + BR} \xi(t) \quad (32)$$

Analyse de l'influence du choix de l'horizon de prédiction final sur la position des pôles du système en boucle fermée :

Soit à considérer le système de premier ordre (stable en boucle ouverte et à phase non-minimale) suivant :

$$y(t) = u(t) \frac{z^{-1} + 2z^{-2}}{1 - 0.9z^{-1}} \quad (33)$$

Pour le contrôleur GPC de la forme : $R(z^{-1})\Delta u(t) = w(t) - S(q^{-1})y(t)$, le polynôme caractéristique déterminant la position des pôles en boucle fermée est :

$$P_c = RA\Delta + q^{-1}SB \quad (34)$$

Dans tous les cas que nous allons voir l'horizon de prédiction initial (N_1), l'horizon de commande N_u et la pondération (λ) sont pris respectivement égales à 1, 1 et 0.

Pour une valeur de l'horizon de prédiction final (N_2) égale au degré du polynôme $B(z^{-1})$, c'est à dire ($N_2=1$), le polynôme caractéristique est $P_c = 1 - 2z^{-1}$.

Ce polynôme contient un pôle à l'extérieur du cercle unité ce qui provoque une instabilité en boucle fermée.

Cette instabilité est due à la présence d'un zéro instable dans le système en boucle ouverte (phase non-minimale).

En choisissant une valeur de l'horizon N_2 supérieur au degré du polynôme $B(z^{-1})$, par exemple, ($N_2=2$), le polynôme caractéristique devient $P_c = 1 - 0.09z^{-1}$.

Nous remarquons ici la disparition du pôle instable et apparition d'un pôle à l'intérieur du cercle unité ce qui mène à une stabilité en boucle fermée.

En augmentant la valeur de l'horizon de prédiction final (N_2) jusqu'à la valeur ($N_2=3$), le polynôme caractéristique sera : $P_c = 1 - 0.416z^{-1}$.

La racine du polynôme (P_c) est encore à l'intérieur du cercle unité alors le système reste stable en boucle fermée.

D'après les valeurs de la solution du polynôme caractéristique, nous pouvons signaler que le pôle du système en boucle fermée tend vers celui du système en boucle ouverte par l'augmentation de la valeur de l'horizon de prédiction final (maximal).

Le traitement des contraintes pour la GPC à été introduit par T.SANG et CLARKE où deux algorithmes ont été développés pour prendre en considération les contraintes sur l'entrée des procédés pour le cas particulier de (N_u) (horizon de commande) égal à deux. Le premier traite les contraintes sur l'incrément de commande alors que le deuxième traite les contraintes sur la commande.

CLARKE et MOHTADI, utilisent la programmation quadratique pour résoudre le problème des contraintes d'une façon générale, c'est cette hypothèse qu'on va appliquer pour traiter notre problème, en faisant appel à la fonction, QP(*quadratic programming*) disponible dans le toolbox de Matlab.

5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, un aperçu a été donné sur les techniques de commande avancées tels que la commande par la logique floue, les réseaux de neurones et la commande prédictive.

Ces différentes techniques seront appliquées pour l'optimisation de la production de l'énergie électrique à partir des énergies renouvelables qui est l'objectif du chapitre suivant.

Chapitre 04

OPTIMISATION DE LA PRODUCTION DE L'ENERGIE ELECTRIQUE

Chapitre 4

OPTIMISATION DE LA PRODUCTION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

1. INTRODUCTION

Dans la première partie de ce chapitre, nous proposons un contrôleur MPPT basé sur la logique floue afin d'effectuer la poursuite du PPM d'une chaîne de conversion photovoltaïque. Le but est de concevoir un contrôleur MPPT non seulement robuste et efficace, mais aussi afin de le faire fonctionner correctement sous toutes les variations. Nous avons testé notre contrôleur proposé pour surmonter les inconvénients de l'algorithme de perturbation et observation (P&O).

Dans ce contexte, un contrôleur flou a été proposé. Ce régulateur devrait assurer un fonctionnement aux caractéristiques maximales quelques soient les comportements aléatoires de la source avec un haut rendement.

La deuxième partie traite la commande de la chaîne de conversion éolienne. Dans les systèmes de conversion à base de l'énergie éolienne, la vitesse de rotation du générateur éolien est proportionnelle à la tension de celui-ci. Les commandes électriques pour extraire la puissance maximale des systèmes éoliennes sont basées sur le réglage de la vitesse de rotation d'un générateur éolien qui produit une tension à courant alternatif. Nous proposons trois contrôleurs (FLC, ANFIS et GPC) afin d'effectuer la poursuite du PPM d'une chaîne de production éolienne de petite puissance qui fonctionne à vitesse variable avec l'aide des convertisseurs d'électronique de puissance.

Des résultats de simulation seront montrés pour prouver l'efficacité de ces contrôleurs proposés.

2. OPTIMISATION DE LA PRODUCTION DE L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) constitue l'une des solutions la plus convenable aux besoins énergétiques dans le futur sur le plan environnemental mais aussi sur le plan pratique. Elle contribue donc à l'électrification des zones en milieu urbain ainsi qu'aux zones rurales ou aux sites isolés.

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 quel que soient les variations de température et d'ensoleillement (Fig.1).

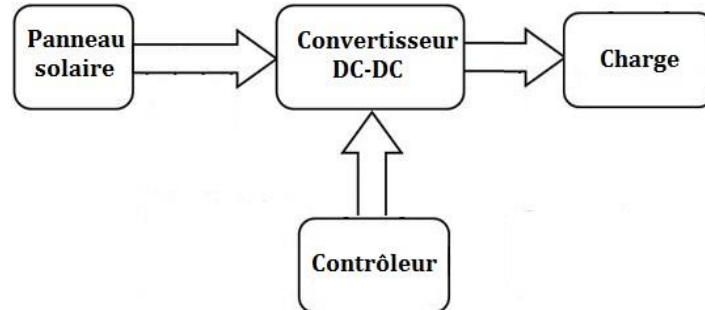


Figure 1: Structure d'un système de production d'énergie photovoltaïque

Dans cette partie, nous proposons un contrôleur MPPT basé sur la logique floue afin d'effectuer la poursuite du PPM d'une chaîne de conversion photovoltaïque. Le but est de concevoir un contrôleur MPPT non seulement robuste et efficace, mais aussi afin de le faire fonctionner correctement sous toutes les variations. Nous avons testé notre contrôleur proposé pour surmonter les inconvénients de l'algorithme de perturbation et observation (P&O). Les résultats de simulation seront montrés pour prouver l'efficacité de notre contrôleur proposé.

2.1 PRINCIPE DU SUIVI DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE

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 (Fig.2).

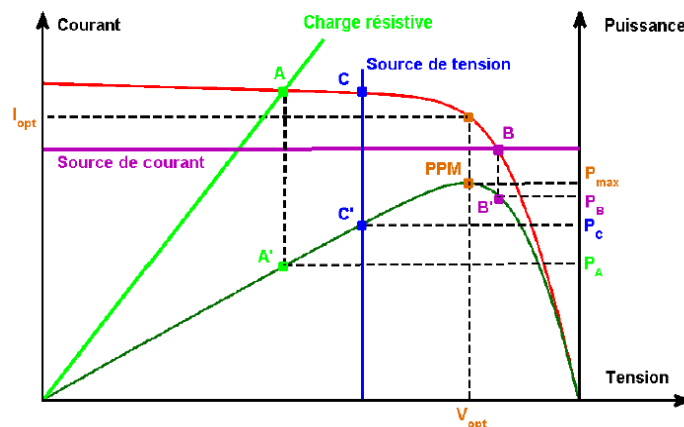


Figure 2 : Fonctionnement d'un panneau photovoltaïque

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.

En changeant le temps d'ouverture (le rapport cyclique) de l'interrupteur de ce convertisseur selon la variation des conditions atmosphériques, on change la tension de sortie du panneau, par conséquent la puissance produite par celui-ci (Fig.3).

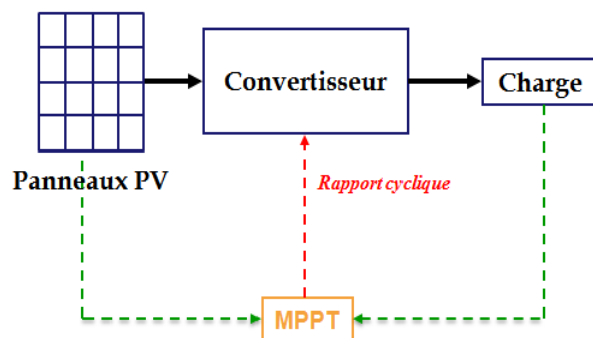


Figure 3 : Principe de MPPT d'un panneau photovoltaïque

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 [147].

2.2 TECHNIQUES DE SUIVI DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE

Différents types d'algorithmes effectuant la recherche du PPM ont été déjà publiés [44], [148]–[152].

Ces algorithmes peuvent être classés selon le principe de fonctionnement comme suit :

- ❖ Méthodes indirectes : le PPM est estimé à partir de la courbe de puissance du générateur photovoltaïque
- ❖ Méthodes directes : le réglage du PPM est obtenu à partir de la mesure de la puissance instantanée du générateur photovoltaïque.

➤ Méthodes indirectes

Les méthodes indirectes sont basées sur la connaissance de la caractéristique non linéaire du générateur photovoltaïque, qui n'est pas disponible avec précision. Elles ont besoin aussi de mesurer

l'ensoleillement des panneaux photovoltaïques et la température ambiante, puis consulter la courbe de puissance pour avoir la tension (ou le courant) de fonctionnement optimale correspondante.

On peut comparer la tension mesurée du panneau aux valeurs optimales stockées dans le système de commande selon des conditions atmosphériques mesurées et puis effectuer la commande pour atteindre celles-ci. Pourtant, cet algorithme nécessite une grande capacité de mémoire pour le stockage des données et il faut mettre à jour des données pour chaque panneau. En outre, il est difficile d'enregistrer et de stocker toutes les conditions possibles du système et la mesure des conditions atmosphériques n'est pas facile et n'est pas précise non plus [153], [154].

Les courbes caractéristiques peuvent être obtenues par la modélisation hors ligne à l'aide des équations mathématiques ou approximations numériques. Cependant, leur résolutions sont impossibles à appliquer sur les commandes analogiques et très difficiles à appliquer sur les commandes numériques classiques [155], [156]. Par conséquent, leurs applications ne semblent pas appropriées pour l'obtention du PPM. Néanmoins, d'autres méthodes basées sur la modélisation de ces caractéristiques sont encore utilisées [157], [158].

➤ Méthodes directes

Les méthodes directes n'ont pas besoin de connaître ni la courbe de puissance du générateur ni l'ensoleillement réel ou la température et la détermination de leur point de fonctionnement est indépendant des conditions climatiques [153].

Une de ces méthodes est celle nommée "algorithme d'incrément de conductance", elle se base sur la dérivée de la conductance du générateur ($dG = dI=dV$) pour connaître la position relative du PPM et enfin pour appliquer une action de contrôle adéquate au suivi de ce PPM [44], [159]. Il existe aussi la méthode similaire à la méthode de l'incrément de conductance, c'est celui de la capacité parasite [160], qui est basé sur l'effet de la capacité parasite de la cellule photovoltaïque.

La méthode la plus utilisée dans le domaine du photovoltaïque est celle de Perturbe & Observe (P&O) [149], [151]. Son principe consiste à perturber le rapport cyclique pour faire déplacer le point de fonctionnement le long de la caractéristique du générateur présentant un maximum. A gauche du PPM, l'augmentation de la tension fait augmenter la puissance. Dans le coté droit du PPM, la diminution de la tension fait augmenter la puissance (Fig.4). Alors, si une perturbation entraîne une augmentation de la puissance, on devrait continuer dans la même direction pour atteindre le PPM et s'il y a une diminution de la puissance, la perturbation devrait être inversée. La recherche s'arrête théoriquement quand le système atteint le PPM.

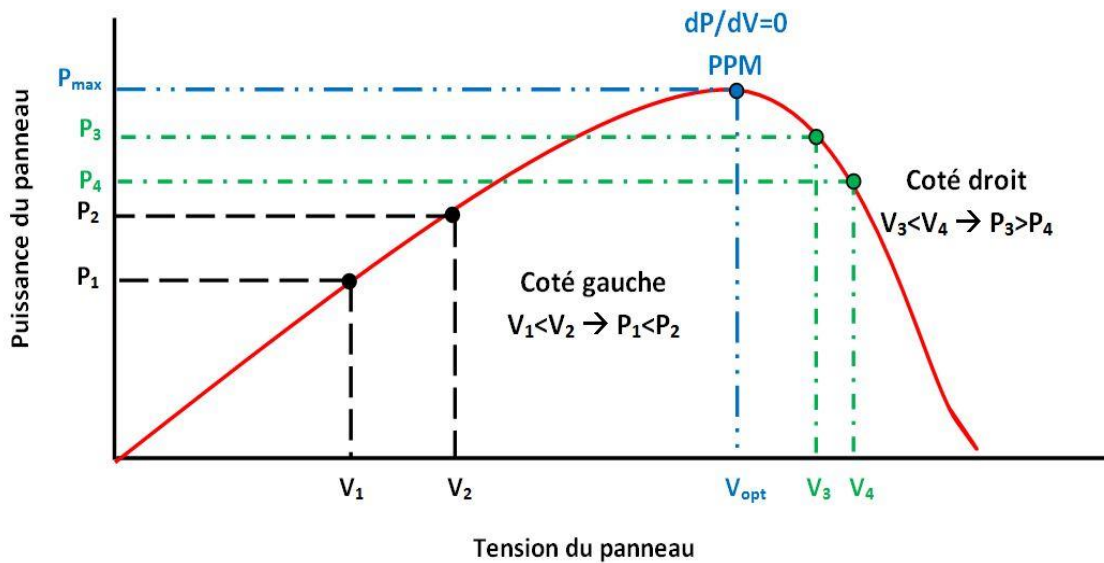


Figure 4 : Principe de la méthode P&O

Le premier inconvénient de cette méthode est que l'on impose toujours une oscillation autour du PPM. En effet, cette oscillation est nécessaire pour connaître les variations de la puissance de sortie du générateur et ainsi réajuster le rapport cyclique du convertisseur en faisant en sorte que le point de fonctionnement oscille le plus près possible du PPM, même si les conditions de fonctionnement sont inchangées. L'oscillation peut être minimisée en réduisant le pas de perturbation. Cependant, une taille plus petite du pas de perturbation ralentit le temps de réponse du MPPT. Une solution à ce problème consiste à avoir un pas de perturbation variable qui devient de plus en plus petit lorsque que l'on se rapproche du PPM comme dans [161]–[163].

De plus, cette méthode peut échouer sous l'évolution rapide de condition atmosphérique comme illustré dans la figure 5. A partir d'un point de fonctionnement A, si l'ensoleillement reste constant, une perturbation dV dans la tension V va amener le point de fonctionnement à B et elle sera annulée en raison d'une diminution de puissance.

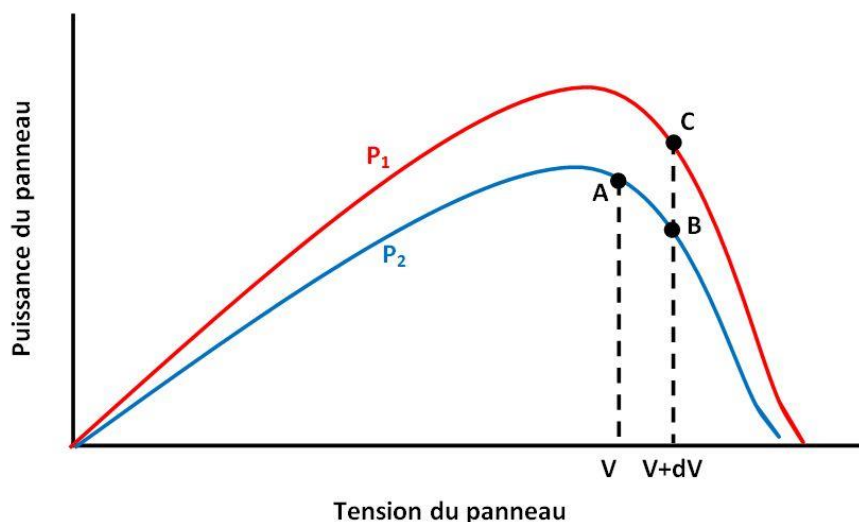


Figure 5 : Fonctionnement de la méthode P&O sous l'évolution rapide de l'ensoleillement

Toutefois, si l'ensoleillement augmente, la courbe de puissance change de P_1 à P_2 au sein d'une période d'échantillonnage, le point de fonctionnement se déplacera de A à C. Cela représente une augmentation de la puissance et la perturbation est maintenue dans la même direction. En conséquence, le point de fonctionnement est loin du PPM et restera de plus en plus loin si l'ensoleillement augmente régulièrement.

Pour assurer le suivi du PPM, même lors de changements rapides de l'ensoleillement, la méthode P&O de "three-point weight comparaison" est utilisée pour comparer le point de puissance actuel aux deux précédents avant de prendre une décision sur la prochaine direction de perturbation [164]. optimise le taux d'échantillonnage [162]. Le travail de Xiao [163] permet de basculer entre le traditionnel algorithme P&O adaptatif et une mise à jour du mécanisme pour empêcher la déviation du PPM.

D'autres algorithmes se basent sur l'introduction de variations sinusoïdales en petit signal sur la fréquence de découpage du convertisseur pour comparer la composante alternative et la composante continue de la tension du générateur et pour ainsi placer le point de fonctionnement du générateur le plus près possible du PPM [165].

Parfois, les algorithmes établissent des approximations afin que le point de fonctionnement du générateur soit le plus proche possible du PPM, nous parlons alors de méthodes complexes assistées par ordinateur. Par exemple pour [150], la commande MPPT se base sur une estimation du point de fonctionnement du générateur réalisée à partir d'un modèle paramétrique du générateur défini au préalable. Dans [166], *Kasa et al* ont proposés une méthode qui épargne le capteur de courant en calculant le courant du générateur à partir de la tension du générateur à l'aide d'un DSP.

2.3 UTILISATION DU CONTROLEUR FLOU

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. Récemment, un ensemble de stratégies, inspirées de l'intelligence artificielle sont conçues et implémentées comme algorithmes MPPT, dites : intelligentes, de par leur robustesse, tolérant des imprécisions de modélisation.

Ces méthodes d'intelligence artificielle (le réseau de neurone, la logique floue ...) ont les qualités des mécanismes adaptatifs et flexibles, sont capables d'améliorer l'efficacité en présence de ces incertitudes.

La théorie de la logique floue permet la modélisation et le traitement rigoureux d'information imprécise, incertaine et subjective, permettant d'approximer des fonctions non linéaires. C'est donc une

théorie tout à fait adaptée au problème d'optimisation que nous avons à traiter dans ce paragraphe. En revanche, la connaissance parfaite et complète du système PV par l'opérateur pour l'établissement des règles d'inférences est très nécessaire [167].

La conception du régulateur flou, type MAMDANI, utilisé comme algorithme MPPT, passe par la synthèse de quatre étapes : fuzzification, bases des règles, inférence floue et défuzzification, comme le montre la figure 6.

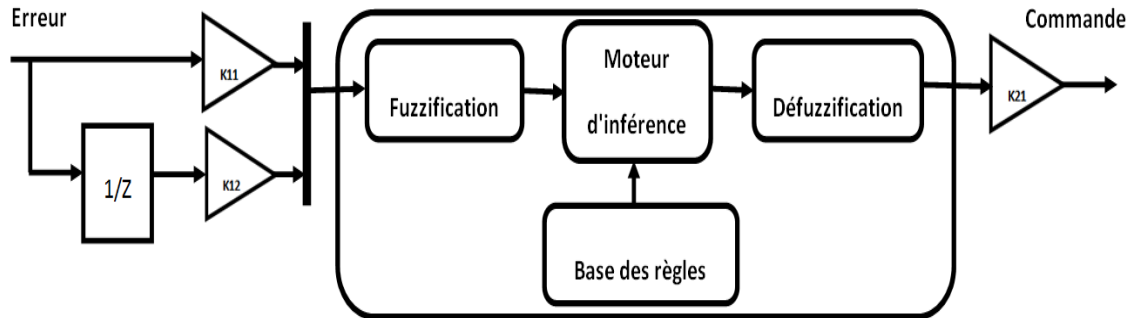


Figure 6 : Structure du contrôleur MPPT flou.

Le contrôleur MPPT flou proposé, possède deux entrées et une sortie. Les deux variables d'entrées du régulateur flou sont l'erreur (e) et la variation de l'erreur (Δe) prélevés à chaque pas d'échantillonnage et la variable de sortie ($\Delta\alpha$) représente l'incrément du rapport cyclique.

Les deux entrées e et Δe sont définies comme suit :

$$e = \frac{\Delta V_{PV}}{\Delta I_{PV}} I_{PV} + V_{PV} \quad (1)$$

$$\Delta e = e(k) - e(k-1) \quad (2)$$

Où ΔV_{PV} et ΔI_{PV} sont respectivement la variation de la tension et du courant du GPV mesurées à deux périodes d'échantillonnage (k) et ($k-1$).

La valeur de l'erreur $e(k)$ démontre en fait la condition de la conductance incrémentale et son éloignement à droite ou à gauche de sa valeur optimale nulle. La valeur de Δe détermine l'effort de commande fourni pour atteindre l'optimum en temps fini.

➤ Fuzzification

La fuzzification désigne le processus de détermination du degré d'appartenance de chaque variable à une partition floue. Le nombre de ces ensembles flous est déterminé après expertise du comportement du système. Dans le présent travail, le domaine d'existence est partagé en cinq intervalles pour chacune des trois variables e , Δe et la sortie $\Delta\alpha$ pour permettre un bon suivi du point MPP lors des variations notables et rapides de l'éclairement solaire.

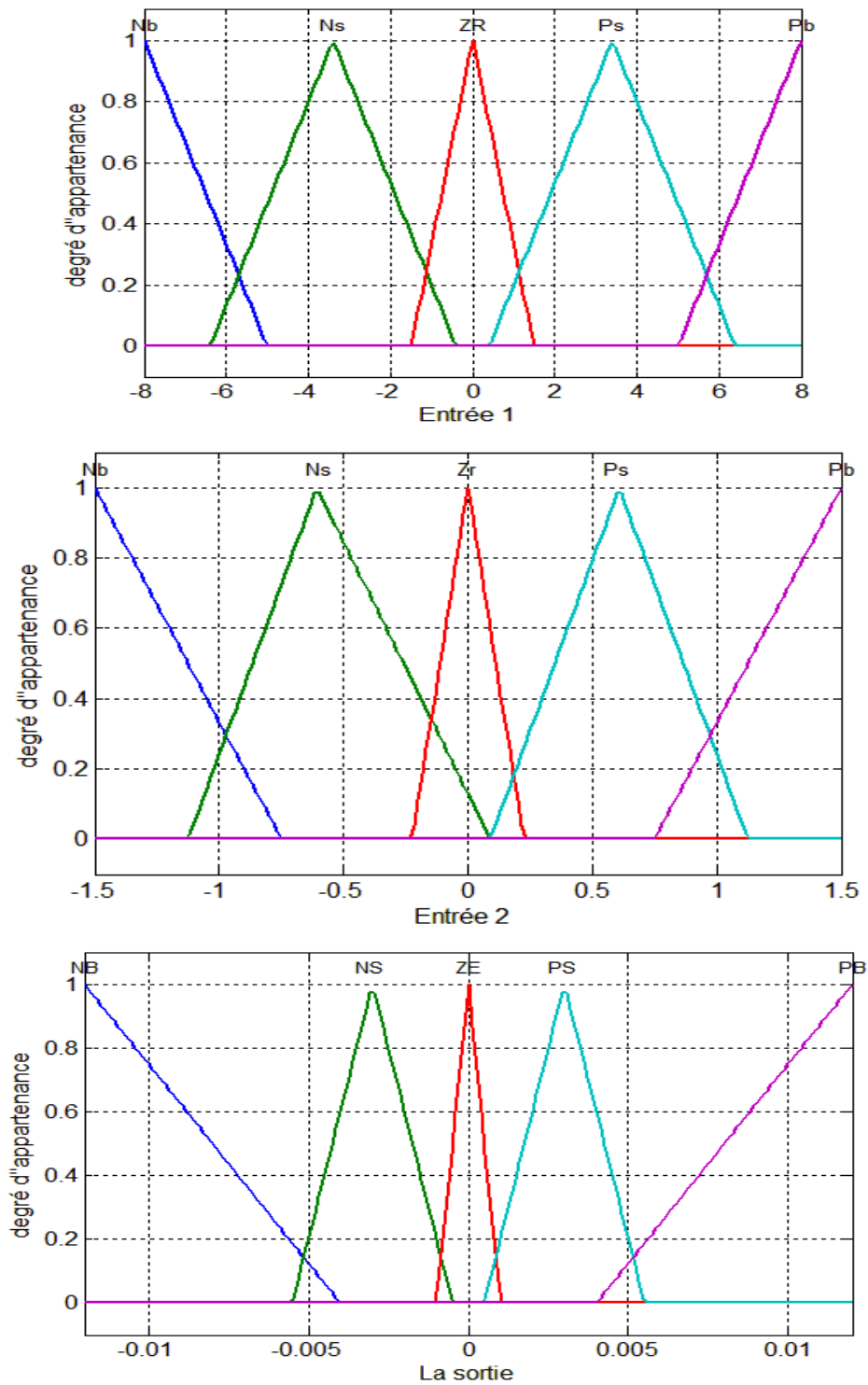


Figure 7 : Fonctions d'appartenance des entrées et de sortie

➤ **Inférence**

Le tableau.1 présente la matrice d'inférence du régulateur. Les variables d'entrées numériques sont converties en variables linguistiques pour prendre les cinq valeurs suivantes :

NB: grand Négatif, **NS:** Négatif Petit, **ZE:** Zéro, **PS:** Petit positive, **PB:** grand positive.

Le choix de cette classification est basé sur le raisonnement où on va travailler sur deux ou plusieurs suivies. La première phase est une phase rude où on utilise un pas de recherche important pour accélérer la recherche, une fois le point de fonctionnement s'approche du PPM l'algorithme floue fonctionne dans la phase fine ou le pas de recherche est faible, ce qui va diminuer les oscillations, ainsi l'efficacité du système sera améliorée [168].

La méthode d'inférence choisie est de MAMDANI avec une opération (Max-Min). Elle consiste à utiliser l'opérateur Min pour le (ET) et l'opérateur Max pour le (OU).

		<i>e</i>				
		NB	NS	ZE	PS	PB
Δe	NB	ZE	PB	PS	ZE	NB
	NS	PB	PS	ZE	ZE	NB
	ZE	PB	PS	ZE	NS	NB
	PS	PB	ZE	ZE	NS	NB
	PB	PB	ZE	NS	NB	ZE

Tableau 1: Table des règles

➤ **Défuzzification**

Elle consiste à convertir les variables linguistiques en variables numériques. Les sorties floues des règles précédentes sont combinées en utilisant la fonction **Max** pour former un seul ensemble flou. Cet ensemble est défuzzifié et multiplié par le facteur d'échelle pour générer une seule valeur de commande. La méthode choisie pour la dernière étape de la conception du contrôleur flou est la méthode du centre de gravité. Elle permet le calcul de l'incrément du rapport cyclique $\Delta\alpha$:

$$\Delta\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n (d\alpha_i \cdot u_i)}{\sum_{i=1}^n u_i} \tag{3}$$

On déduit le rapport cyclique α par l'équation suivante :

$$\alpha = \Delta\alpha(k-1) + \Delta\alpha \tag{4}$$

Les trois gains de normalisation K_{11} , K_{12} permet de convertir les valeurs des entrées réelles en quantités floues et K_{21} effectue une opération inverse.

2.4 RESULTATS DE SIMULATION

De nombreuses simulations, vérifiant tous les différents cas possibles de fonctionnement ont été effectuées avec des variations aussi bien de la charge que des conditions atmosphériques.

Un convertisseur élévateur (DC/DC) est utilisé pour suivre le PPM du panneau en ajustant la tension du panneau. Le contrôleur a deux entrées : le courant et la tension du panneau photovoltaïque, et une sortie : le rapport cyclique du convertisseur.

Les paramètres du panneau photovoltaïque utilisé sont résumés dans l'annexe B.

➤ **Test1 : ensoleillement fixe (1000 W/m²) et température fixe (25 °C)**

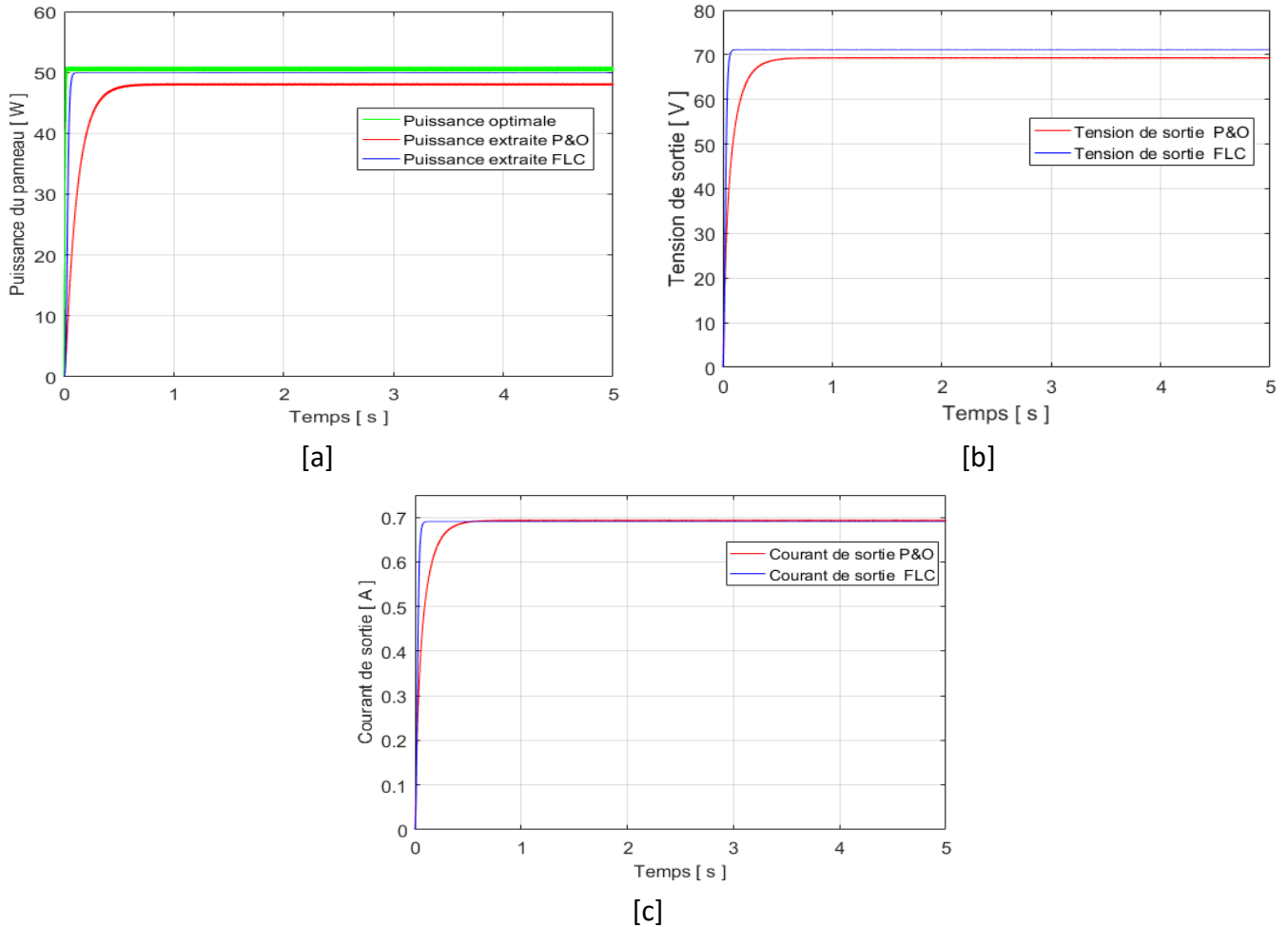
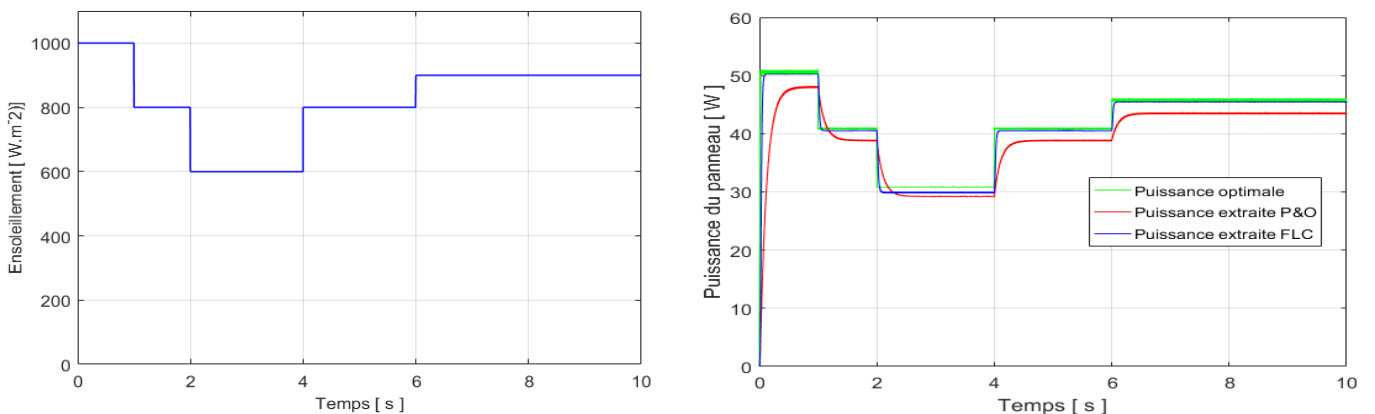


Figure 8 : Test 1 : [a] Puissance [b] Courant [c] Tension

On remarque que la puissance transmise par le hacheur boost à sa sortie suite à l'application de cet algorithme flou est quasiment confondue avec la puissance délivrée par le module solaire.

➤ **Test2 : Effet de la variation de l'ensoleillement**

L'ensoleillement est modifié pour tester le fonctionnement de nos contrôleurs proposés dans diverses conditions climatiques.



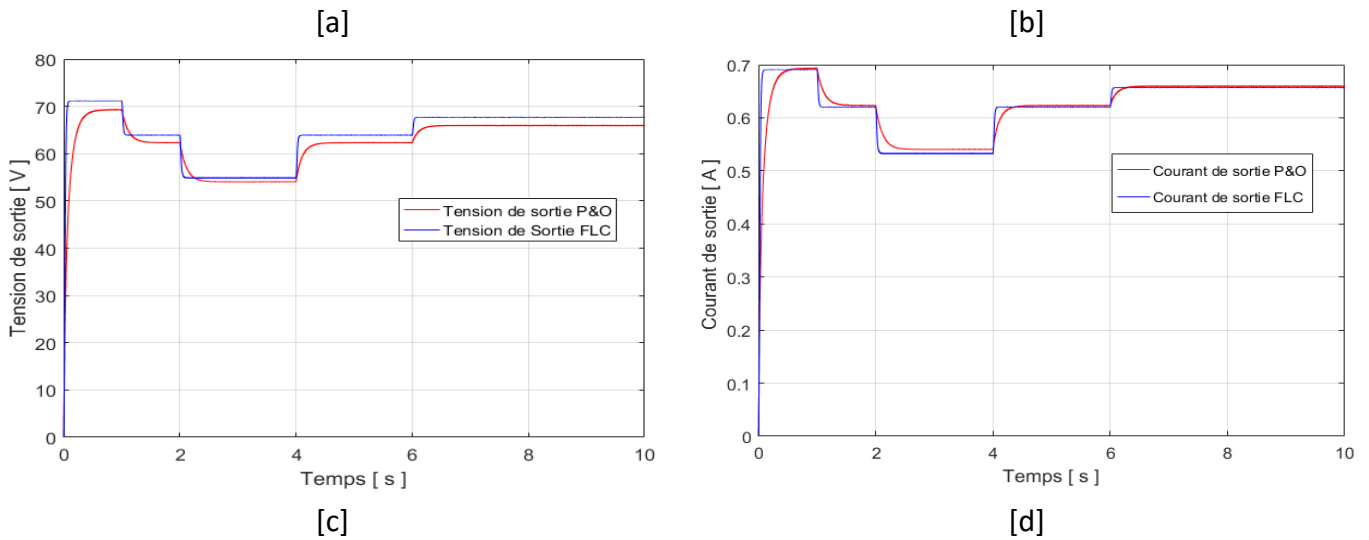


Figure 9 : Test 2 : [a] L'ensoleillement [b] Puissance [c] Courant [d] Tension

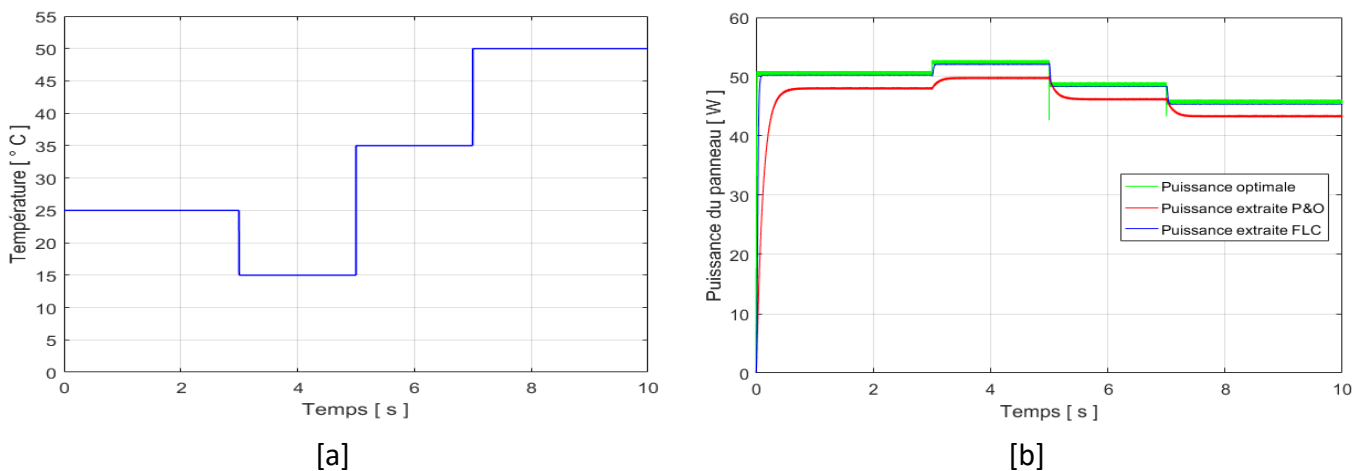
Sur la figure 9 [a], les allures des puissances extraites, pour un changement en échelon de l'éclairement solaire; respectivement (1000 W/m², 800W/m², 600W/m², 800W/m², 900 W/m²) sont présentées. Cette manière de variation permet aisément de tester l'efficacité de l'algorithme en régime statique et dynamique. Nous remarquons aussi que la puissance extraite suit les variations de l'ensoleillement.

On constate que la puissance du panneau suit bien la puissance optimale correspondant à chaque valeur de l'ensoleillement.

Vu les performances des deux algorithmes MPPT (Fig.9.[b], Fig.9.[c] et Fig.9.[d]), on peut constater que celui de la logique floue présente des meilleures performances par à l'algorithme de perturbation et observation (P&O).

➤ **Test 3 : Effet de la variation de la température**

La figure 10 [a] présente le changement en échelon de la température. L'influence de la température est indiquée aux figures 10 [b], 10 [c] et 10 [d]



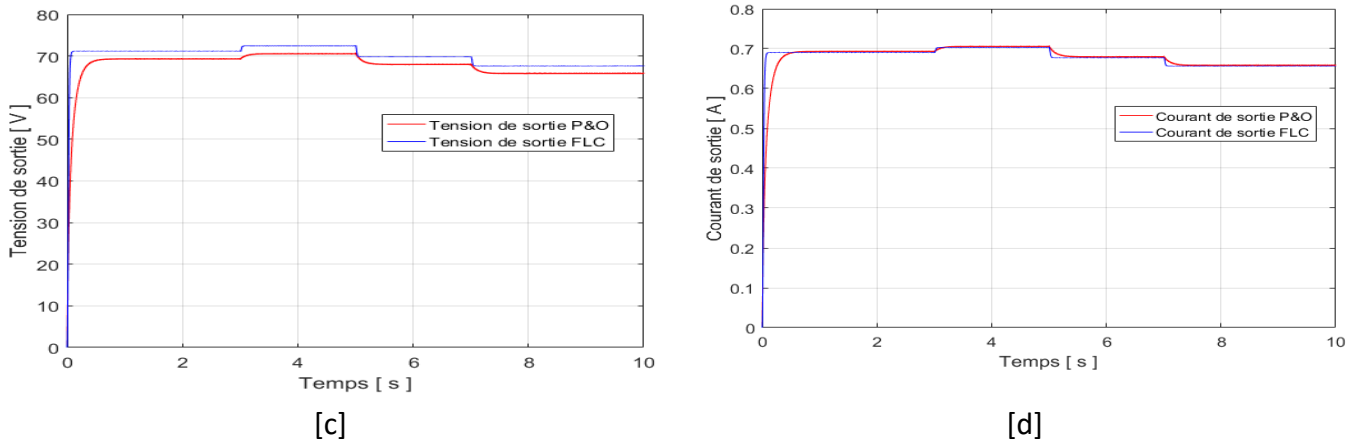


Figure 10 : Test 3 : [a] Température [b] Puissance [c] Courant [d] Tension

On remarque que le contrôleur arrive toujours à maintenir la puissance du panneau autour de sa valeur optimale pour extraire le maximum de puissance du soleil, ce qui prouve le bon fonctionnement du contrôleur flou pour la poursuite du PPM sous la variation des conditions climatiques.

Les performances présentées par le MPPT flou sont justifiées par le fait que ce dernier permet une incrémentation proportionnelle à la variation subit par la puissance de panneau fournie. Les règles qui lui sont imposées sont à base d'une connaissance substantielle de l'évolution des paramètres influençant. Elles sont imposées de sorte que la commande délivrée soit assez grande ou petite suivant que la puissance croît (fortement ou non) ou décroît (fortement ou non).

Ces résultats montrent que le contrôle par la logique floue présente des bonnes performances par rapport la méthode de perturbation et observation (P&O). Il a assuré la poursuite du PPM sous toutes les variations de conditions climatiques avec précision et rapidité.

3. OPTIMISATION DE LA PRODUCTION DE L'ENERGIE EOLIENNE

Cette partie traite l'application des techniques de commande (logique floue [169], réseaux de neurones et prédictive[170]) dans l'algorithme MPPT de la partie éolienne en vue de maximiser la puissance extraite de l'éolienne.

3.1 DESCRIPTION DU CONTROLEUR FLOU ADAPTATIF

➤ Fuzzification

Les entrées du contrôleur FLC sont :

✓ E : l'erreur, elle est définie par :

$$E(k) = \omega^*(k) - \omega(k) \tag{5}$$

dE : la dérivée de l'erreur, elle est approchée par :

$$dE(k) = \frac{E(k) - E(k-1)}{T_e} \tag{6}$$

Te : période d'échantillonnage.

Le régulateur admet pour chaque variable d'entrée les Sept ensembles flous :

NG : Négatif grand, **NM** : Négatif moyen, **NP** : Négatif petit, **ZE** : Environ de zéro,
PP : Positif petit, **PM** : Positif moyen, **PG** : Positif grand.

Les sorties de ce contrôleur flou est les poids attribué aux paramètres du régulateur PI.

Pour la sortie on a les ensembles flous suivants :

Grand noté **G**, Petit noté **P**.

Pour les fonctions d'appartenance, on utilise généralement les formes triangulaires et trapézoïdales.

Les fonctions des entrées et de la sortie sont représentées par les figures suivantes :

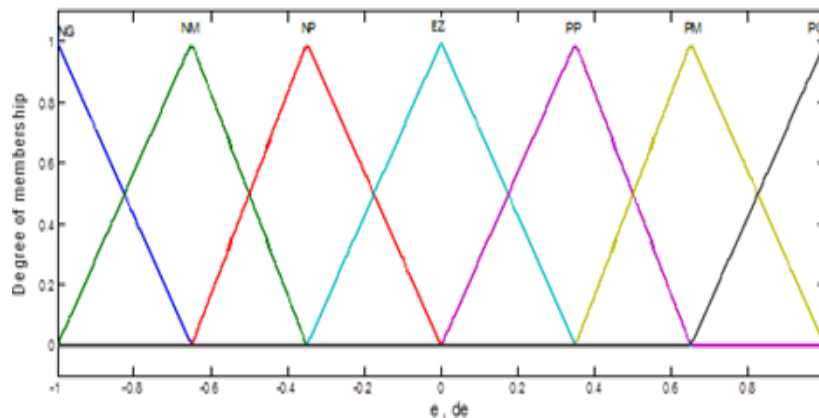


Figure 11 : Formes des fonctions d'appartenances des entrées du régulateur flou adaptatif.

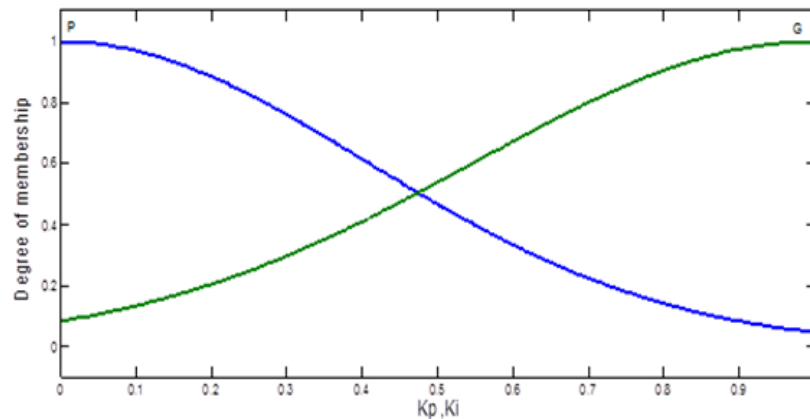


Figure 12 : Formes des fonctions d'appartenances de la sortie du régulateur flou adaptatif.

➤ Inférence

La stratégie de réglage dépend essentiellement des inférences adoptées. Il s'agit souvent d'inférence avec plusieurs règles qui peuvent être activées en même temps. Ces règles doivent tenir compte du comportement du système à régler, ainsi que des buts du réglage envisagé.

Les matrices d'inférence prendront les formes suivantes :

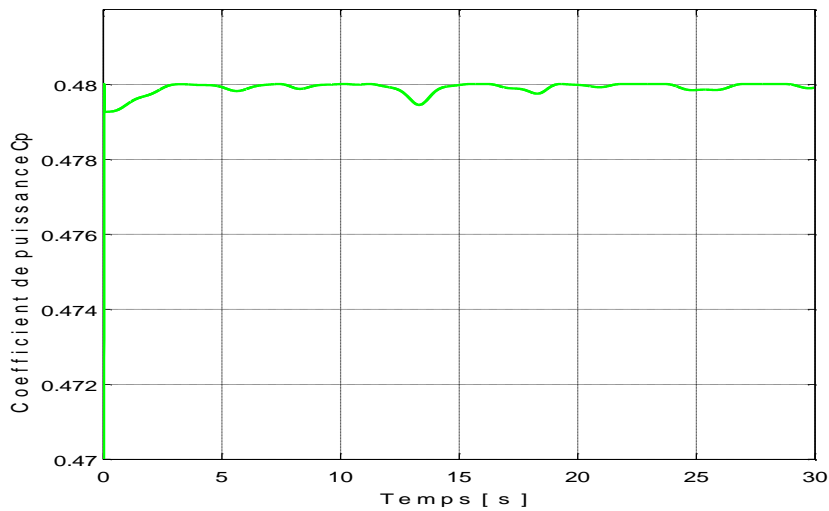
U		dE						
		NG	NM	NP	ZE	PG	PM	PP
E	NG	G	G	G	G	G	G	G
	NM	P	G	G	G	G	G	P
	NP	P	P	G	G	G	P	P
	ZE	P	P	P	G	P	P	P
	PG	P	P	G	G	G	P	P
	PM	P	G	G	G	G	G	P
	PP	G	G	G	G	G	G	G

Tableau 2- Matrice d'inférence des règles floues

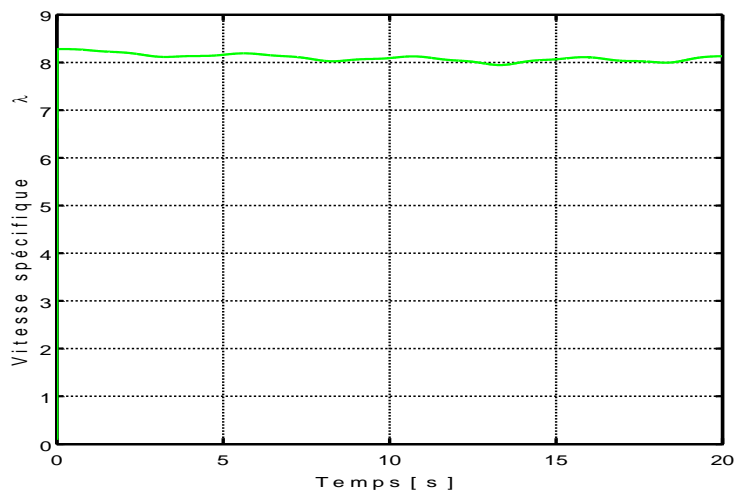
➤ **Défuzzification**

La méthode d'inférence utilisée est la méthode MAX-Min, on prend comme critère de Défuzzification la méthode de centre de gravité.

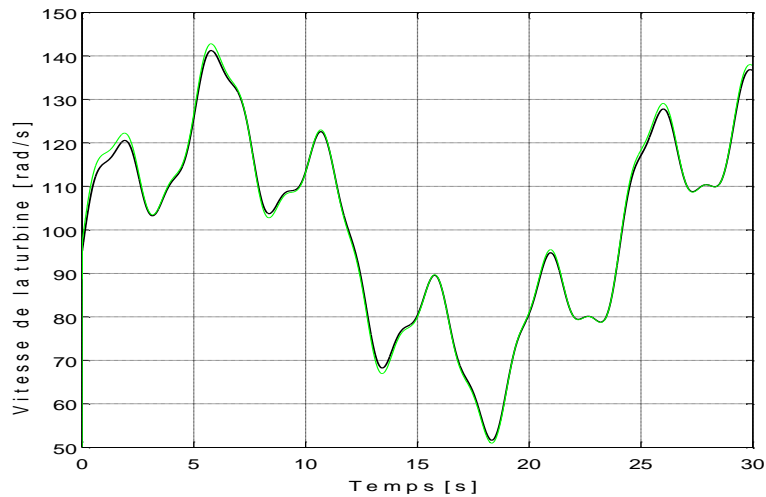
➤ **Résultats de simulation**



(a)



(b)



(c)

(a) : coefficient de puissance, (b) : vitesse spécifique, (c) : vitesse de la turbine

Figure 13 : Application du contrôleur flou

La figure 13 représente la vitesse spécifique λ et le coefficient de puissance C_p qui oscillent légèrement autour de leurs valeurs optimales. La rapidité de réponse du régime transitoire du système montre l'amélioration obtenue avec le régulateur flou.

3.2 COMMANDE PAR RESEAUX DE NEURONES

Dans cette partie, le PI flou est utilisé comme un modèle de référence, seule l'entrée E « erreur », qui est utilisée avec la sortie de ce dernier.

On aurait pu choisir deux entrées car L'ANFIS accepte plusieurs entrées. Pour un objectif de simplifier le système on a fait le choix d'une seule entrée. Cependant, on est limité à utiliser une seule sortie. Le couple de données (entrées, sortie) est utilisé comme données d'apprentissage (training Data). Le logiciel donne la main pour faire l'apprentissage en utilisant un système d'inférence flou en choisissant le nombre et le type de fonction d'appartenances (voir ANNEXE D).

Après plusieurs essais, on a choisi les types des fonctions d'appartenance d'entrées de type gaussiennes et les sorties de type constante avec la méthode d'optimisation « Hybride » et ceci en fonction de la convergence du système l'erreur doit tendre vers zéro.

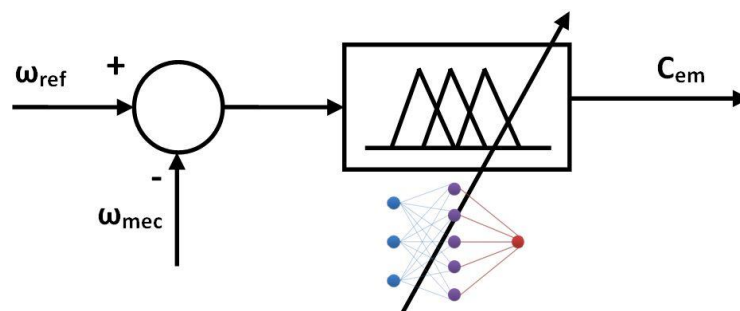


Figure 14 : Schémas bloc Simulink du régulateur neuro-flou utilisé.

Le système flou obtenu à partir de l'ANFIS.

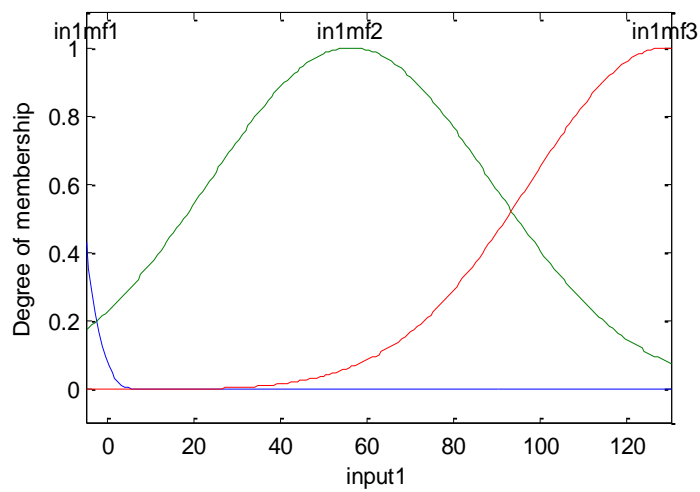


Figure 15 : Fonctions d'appartenance des entrées

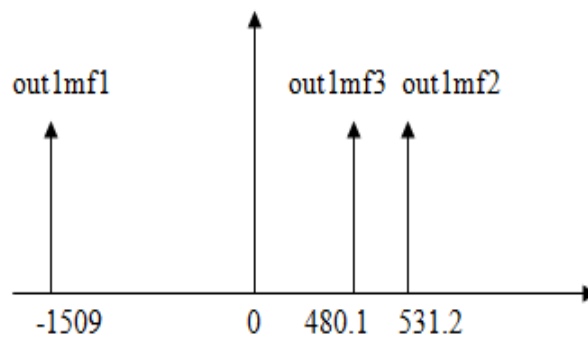


Figure 16 : Fonctions d'appartenance des sorties

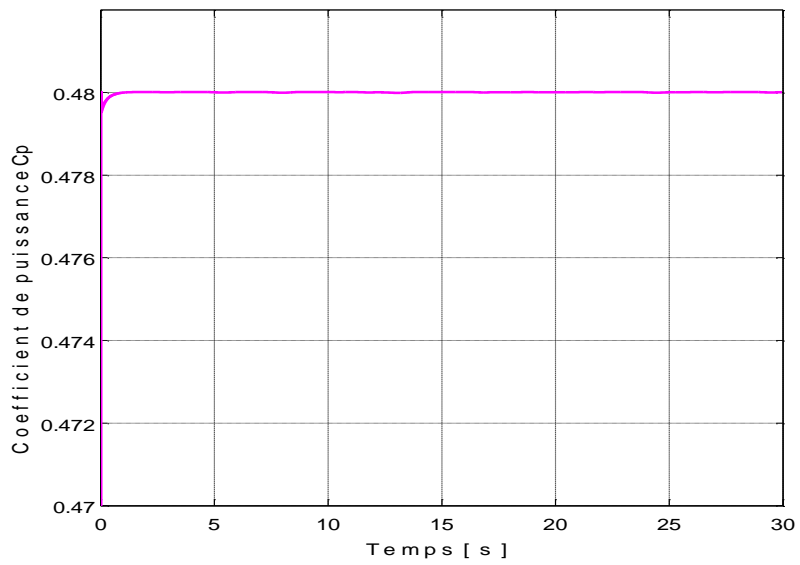
Les trois règles floues résultantes sont :

Si input1 est in1mf1 alors output est out1mf1.

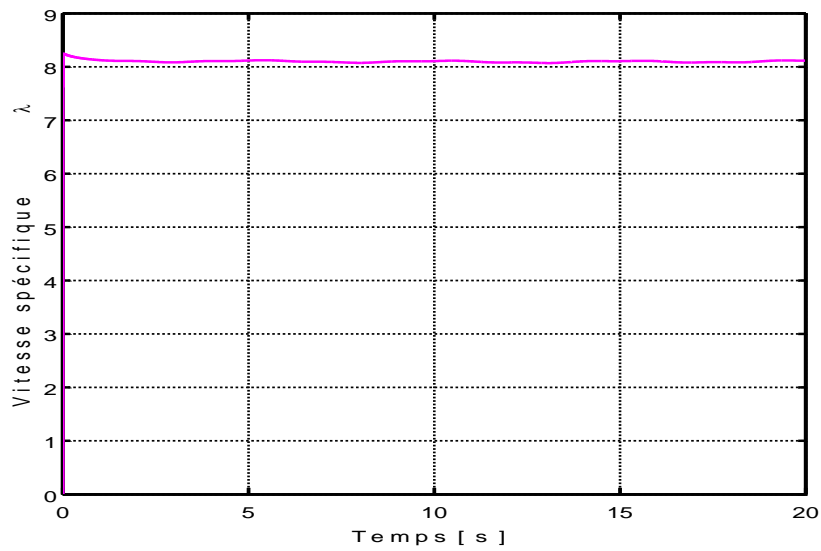
Si input1 est in1mf2 alors output est out1mf2.

Si input1 est in1mf3 alors output est out1mf3.

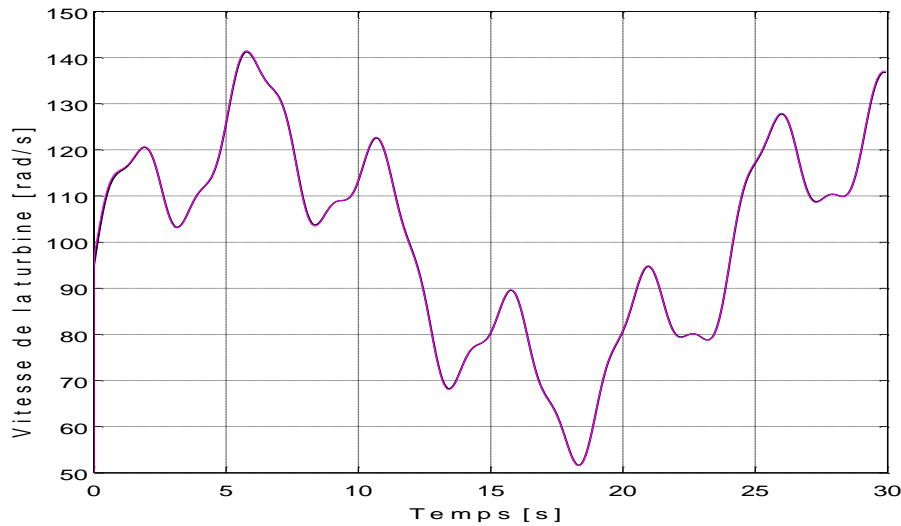
➤ Résultats de simulation



(a)



(b)



(c)

(a) : coefficient de puissance, (b) : vitesse spécifique, (c) : vitesse de la turbine

Figure 17 : Application du contrôleur ANFIS

D'après la figure 17 on constate que les grandeurs C_p et λ conservent les mêmes allures correspondantes aux valeurs optimales du coefficient de puissance (C_p) qui est de 0.48 et la valeur optimale de la vitesse spécifique (λ) qui est de 8.1. Ainsi, le suivi de la vitesse mécanique est amélioré.

3.3 COMMANDE PREDICTIVE GENERALISEE

La méthode GPC a été proposée par [19] et a été mise en œuvre avec d'autres stratégies de contrôle nouvelles dans les applications industrielles [23]. Dans une présentation classique, on suppose qu'un modèle du système est donné sous la forme suivante:

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t-1) + \frac{C(q^{-1})}{\Delta(q^{-1})}e(t) \tag{7}$$

$u(t)$, $y(t)$ et $e(t)$ sont respectivement le signal d'entrée, le signal de sortie et le processus de perturbation à l'instant t.

$A(q^{-1})$, $B(q^{-1})$ et $C(q^{-1})$ sont des polynômes dans l'opérateur de retard d'unité q^{-1} .

Le rôle de l'opérateur Δ ($\Delta = 1 - q^{-1}$) est d'assurer une action intégrale du contrôleur afin d'annuler l'effet des perturbations de sortie

Afin d'obtenir une formulation GPC, les résultats futurs du système sont prévus grâce à la connaissance des entrées futures et des entrées et sorties passées. Les relations suivantes sont employées à cet égard.

$$y(t+j) = f(t+j) + G_j \Delta u(t+j-1) \tag{8}$$

Où :

$$f(t+j) = H_j \Delta u(t-1) + F_j y(t) \tag{9}$$

Nous notons que les polynômes G_j, H_j et F_j sont des termes qui représentent respectivement le passé, le présent et l'avenir.

La forme de relation vectorielle-matrice (19) est donnée comme suit:

$$y = G\Delta u + f \tag{10}$$

Où :

$$\Delta u = [\Delta u(t) \ \Delta u(t+1) \cdots \Delta u(t+P-1)]^T$$

$$y = [y(t+1) \ y(t+2) \cdots y(t+P)]^T$$

$$f = [f(t+1) \ f(t+2) \cdots f(t+P)]^T$$

$$G = \begin{bmatrix} g_1 & 0 & \cdots & 0 \\ g_2 & g_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_P & g_{P-1} & \cdots & g_1 \end{bmatrix}$$

L'algorithme GPC consiste à appliquer une séquence de contrôle pour minimiser la fonction de coût suivante:

$$J = \sum_{j=N_1}^{N_2} [\hat{y}(t+j) - w(t+j)]^2 + \lambda' \sum_{j=1}^{N_u} \Delta u^2(t+j-1) \tag{11}$$

Avec $\Delta u(t+j+N_u) = 0, j = 0, 1, \dots$

Dans cette expression, $w(t+j)$ décrit la future trajectoire de référence, N_2 est appelé horizon de prédiction, $N_u \leq N_2$ est l'horizon de contrôle, λ' est un paramètre qui tient compte de l'importance relative de l'effort de contrôle par rapport à l'erreur de sortie.

Pour un couple de charge égal à zéro, la fonction de transfert en boucle ouverte peut être exprimée par :

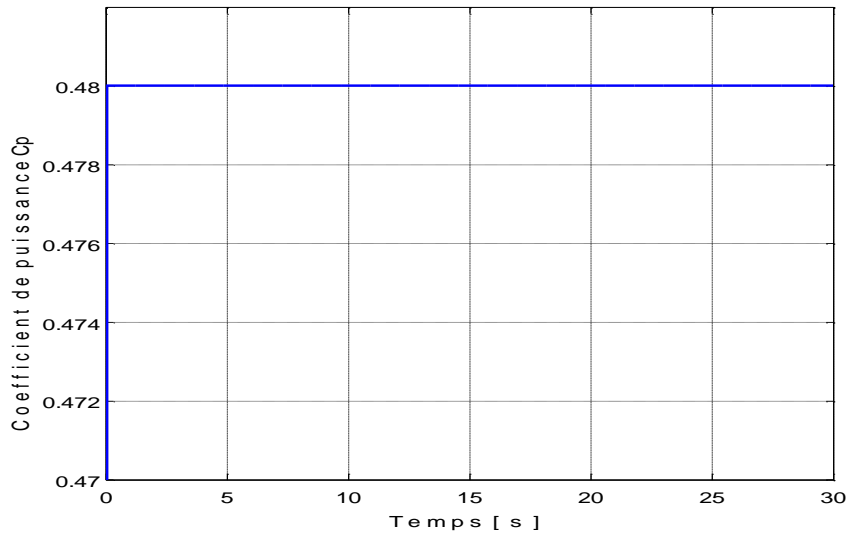
$$\frac{w}{C_{em}} = \frac{1}{Js + F} \tag{12}$$

Où s est l'opérateur de Laplace.

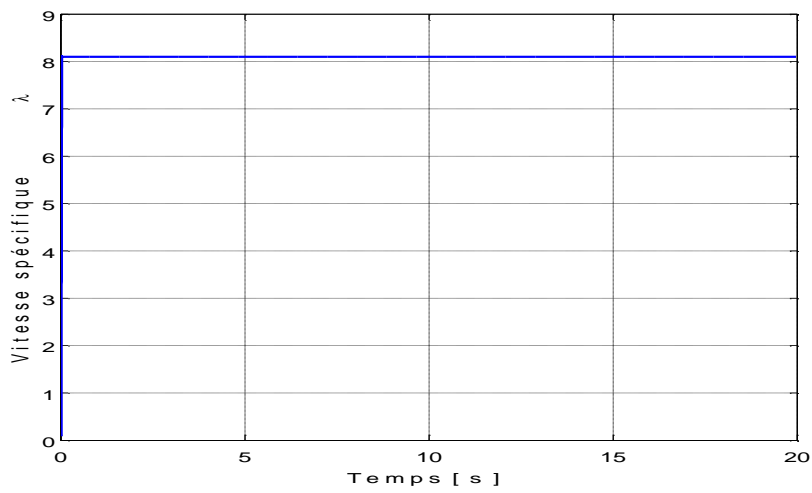
Pour cette fonction de transfert, le régulateur prédictif de la boucle de vitesse est synthétisé pour les paramètres de réglage suivants:

$$N_1=1 \qquad N_2=1000 \qquad N_u=1 \qquad \lambda'=25$$

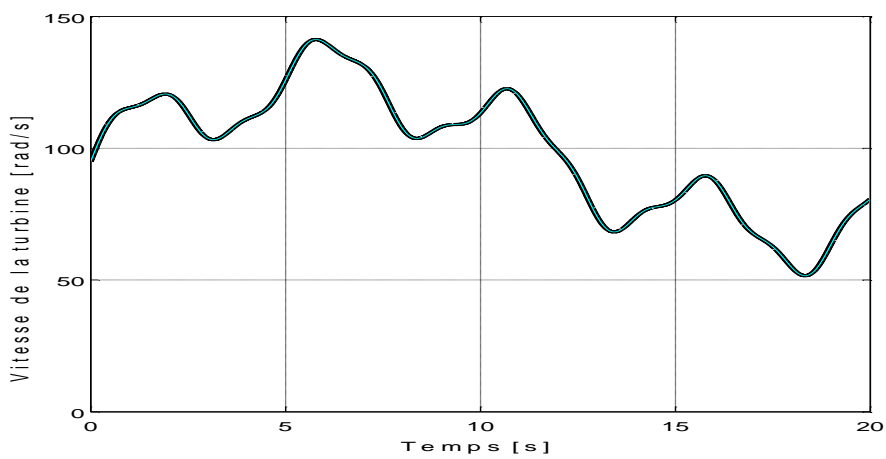
➤ **Résultat de simulation**



(a)



(b)



(c)

(a) : coefficient de puissance, (b) : vitesse spécifique, (c) : vitesse de la turbine

Figure 18: Application du contrôleur prédictif

La figure 18 montre les résultats de simulation obtenus lors de l'utilisation du contrôleur prédictif pour la commande de vitesse. La vitesse spécifique λ et le coefficient de puissance C_p atteignent leurs valeurs optimales avec un temps de réponse très court. Le suivi de vitesse est assuré avec beaucoup plus de précision.

4. ETUDE COMPARATIVE

On fait une comparaison entre les différents régulateurs utilisés (PI, Flou, Neuro-flou et prédictif).

Les figures 19 et 20 représentent le contrôle par les différentes méthodes du coefficient de puissance C_p et de la vitesse spécifique λ . Le contrôle par la commande prédictive généralisée donne des meilleures performances par rapport aux autres régulateurs. Il ne présente pas des oscillations autour de la valeur optimale.

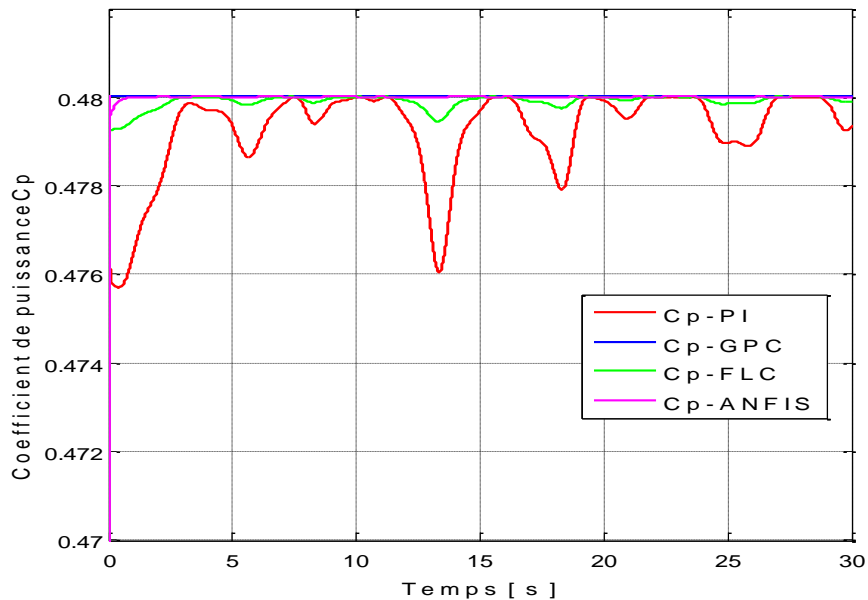
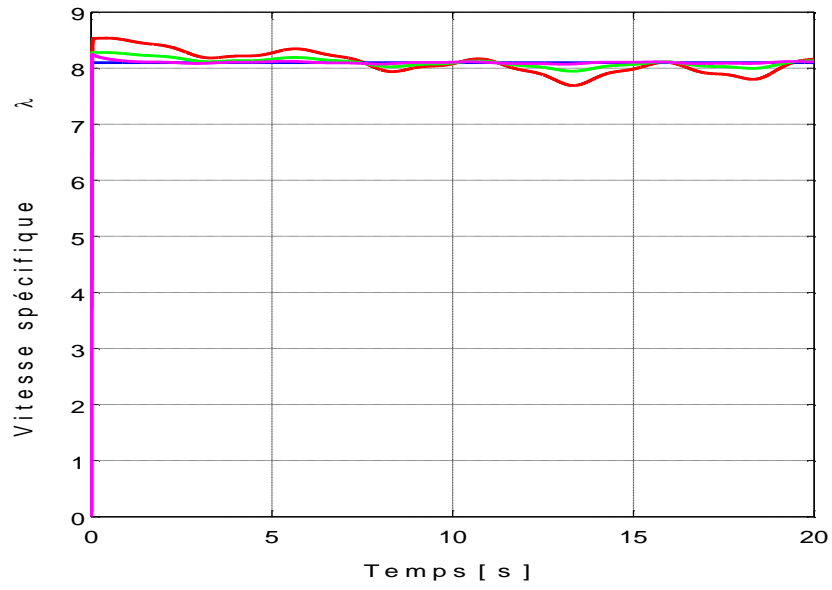
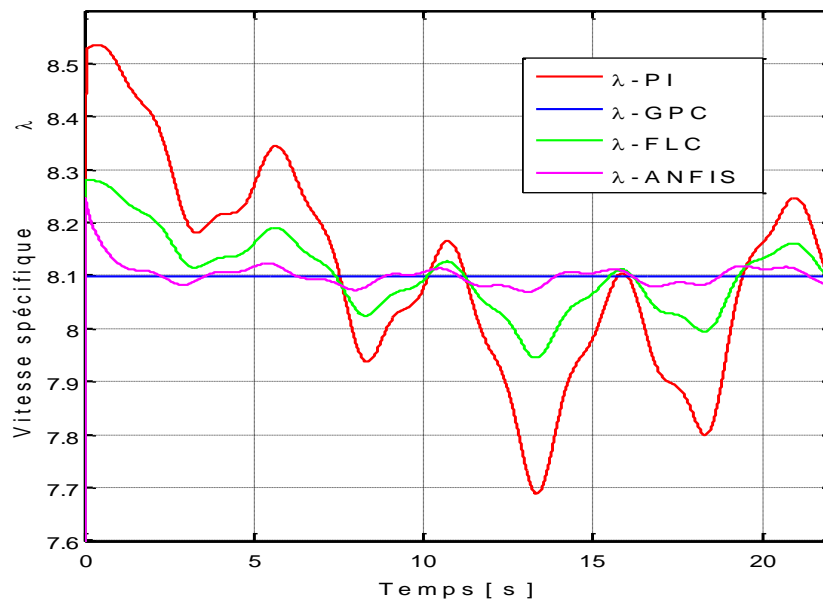


Figure 19 : Coefficient de puissance

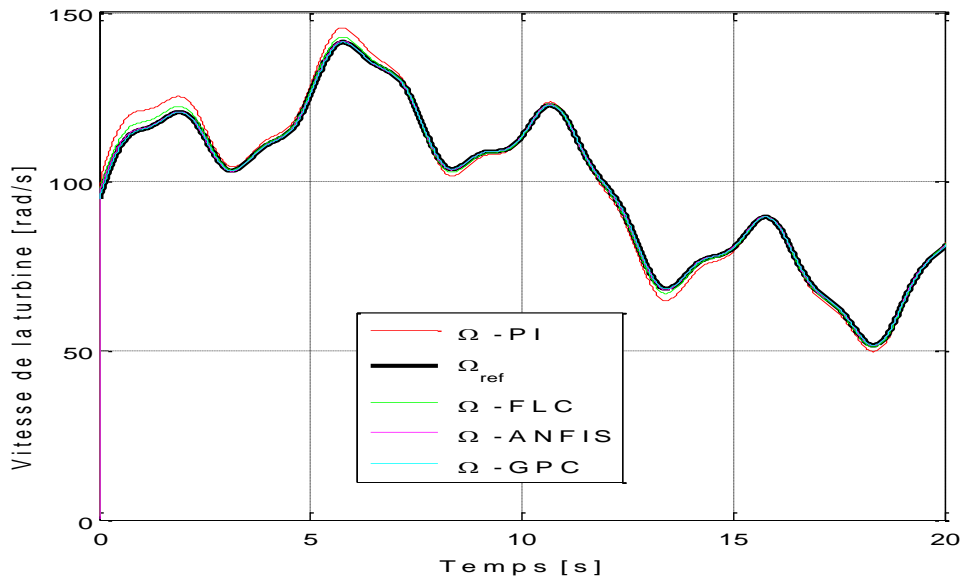


(a)

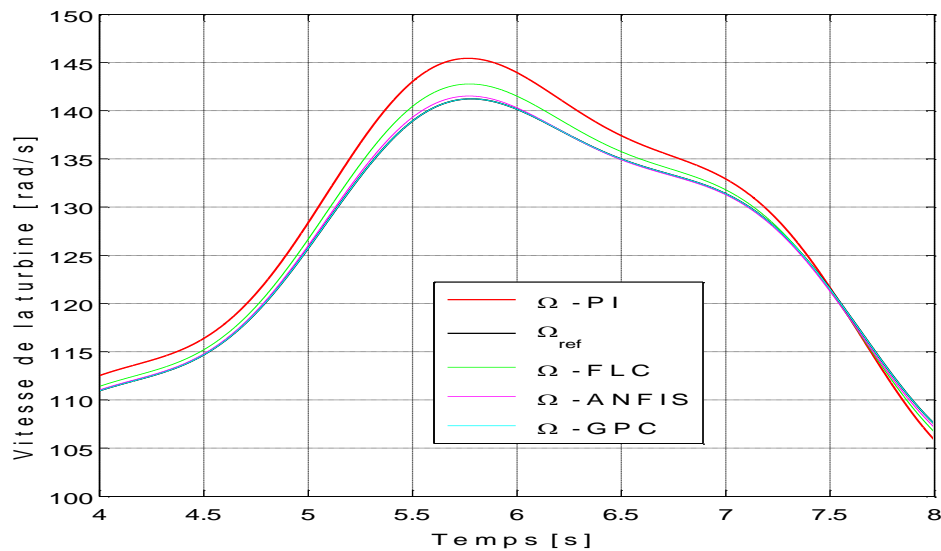


(b)

Figure 20 : (a) : vitesse spécifique, (b) : zoom



(a)



(b)

Figure 21 : (a) : vitesse de la turbine, (b) : zoom

D'après les allures de la vitesse représentées sur la figure 21, on constate que l'utilisation des techniques « floue et neuro-floue » donnent de meilleurs résultats par rapport au PI classique qui présente un écart important (la valeur de l'erreur est assez importante au démarrage) et prend plus de temps pour atteindre la valeur de la référence. L'utilisation de la GPC donne des résultats très satisfaisant en termes de rapidité et de précision. Ceci peut être vérifié par un zoom de la réponse en vitesse (Fig.21(b)).

5. CONCLUSION

Ce chapitre traite l'optimisation de la production de l'énergie électrique à partir de l'énergie solaire et éolienne.

Les résultats de la simulation montrent l'intérêt de la maximisation de puissance dans les systèmes à base des énergies renouvelables.

La commande avec des régulateurs classiques PI permet l'obtention de bonnes performances dynamiques, mais pouvant être sensible aux variations de la charge.

C'est pour cette raison que l'implantation d'autres commandes avancées est devenue une nécessité pour l'amélioration des performances du système

D'après les résultats obtenus, on constate que l'utilisation des techniques de l'intelligence artificielle à savoir la commande floue et la commande neuro-floue d'une manière générale donnent de meilleurs résultats par rapport au régulateur classique de type PI. Les résultats obtenus par la commande prédictive généralisée sont toujours meilleurs.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Cette thèse propose le contrôle d'un système hybride autonome pour la production de l'énergie électrique. Il est composé de deux différentes sources renouvelables, à savoir les panneaux solaires et les éoliennes en utilisant un dispositif de stockage. Ce système est modélisé et commandé afin d'être destiné à une application d'alimentation d'un site isolé.

Un superviseur a été introduit dont le but d'assurer une gestion efficace de l'énergie pendant les conditions de vent défavorables avec un stockage d'énergie inadéquat afin d'éviter la mise hors service du système et pour satisfaire les besoins du consommateur en énergie.

Le système de contrôle proposé est implémenté dans le logiciel MATLAB et testé pour diverses conditions de charge et de vent. Les résultats sont présentés et discutés

Les principales réalisations de la thèse sont résumées comme suit:

- ❖ Extraction de puissance optimale à partir de vent variable

L'algorithme optimal d'extraction de puissance est proposé en contrôlant la vitesse du rotor de l'éolienne. Il permet d'assurer un fonctionnement très efficace du PMSG à différentes vitesses de vent et de rotor.

- ❖ Modélisation et contrôle du système de stockage

Le système de stockage de la batterie est principalement utilisé dans le projet pour améliorer la stabilité transitoire du système en cas de changement de charge et de vent.

Le flux de puissance du système de stockage de la batterie est contrôlé en utilisant un convertisseur bidirectionnel DC-DC.

- ❖ Contrôle de l'onduleur

En raison de changements constants du vent et de la vitesse de charge, l'onduleur doit contrôler la tension de sortie et la fréquence du système. Un onduleur commandé PWM triphasé est utilisé pour contrôler la tension de sortie et la fréquence de l'onduleur.

- ❖ Système de gestion de l'énergie et de régulation de puissance

Le système de production global composé de l'éolienne, du panneau solaire, du système de stockage de la batterie et des charges est exploité par un système de gestion de l'énergie et de régulation de puissance.

Sur la base du profil du vent, de l'ensoleillement, de la charge et du statut du stockage de l'énergie, la gestion de l'énergie et le système de régulation de puissance génère le signal de référence dynamique à chaque contrôleur individuel.

- ❖ Application des techniques de commande avancées

Plusieurs techniques de commande (la logique floue, les réseaux de neurones et la commande prédictive) ont été appliquées pour améliorer les performances du système de production de l'énergie électrique à partir des sources renouvelables.

PERSPECTIVES

Comme suite à ces travaux, plusieurs pistes peuvent être envisagées pour contribuer à l'amélioration de la chaîne de conversion. Parmi, on envisage de :

- ❖ Implémenter d'autres techniques de commande telle que les autres techniques de l'intelligence artificielle et celles issues de la commande robuste.
- ❖ Ajouter d'autres sources afin d'augmenter la fiabilité de notre système hybride.
- ❖ Réaliser un prototype expérimental (Didactique) du système hybride.
- ❖ Implémentation des stratégies de commande proposées pour valider ces travaux et l'efficacité de ces commandes. La plate-forme expérimentale est en cours d'élaboration.
- ❖ Afin de compléter le système, un algorithme de supervision pourrait être développé, chargé d'optimiser les flux d'énergie, de favoriser une source ou une autre par rapport à leur fiabilité et de surveiller l'état de charge des batteries.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] J. A. Turner, "A Realizable Renewable Energy Future," *Science*, vol. 285, no. 5428, pp. 687–689, Jul. 1999.
- [2] I. Dincer, "Renewable energy and sustainable development: a crucial review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 4, no. 2, pp. 157–175, Jun. 2000.
- [3] R. E. H. Sims, H.-H. Rogner, and K. Gregory, "Carbon emission and mitigation cost comparisons between fossil fuel, nuclear and renewable energy resources for electricity generation," *Energy Policy*, vol. 31, no. 13, pp. 1315–1326, Oct. 2003.
- [4] M. Kaltschmitt, W. Streicher, and A. Wiese, *Renewable Energy: Technology, Economics and Environment*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [5] P. Bajpai and V. Dash, "Hybrid renewable energy systems for power generation in stand-alone applications: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 5, pp. 2926–2939, Jun. 2012.
- [6] A. Chauhan and R. P. Saini, "A review on Integrated Renewable Energy System based power generation for stand-alone applications: Configurations, storage options, sizing methodologies and control," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 38, pp. 99–120, Oct. 2014.
- [7] B. Sorensen, *Renewable Energy, Fourth Edition: Physics, Engineering, Environmental Impacts, Economics & Planning*. Elsevier, 2011.
- [8] M. H. Nehrir *et al.*, "A Review of Hybrid Renewable/Alternative Energy Systems for Electric Power Generation: Configurations, Control, and Applications," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 2, no. 4, pp. 392–403, Oct. 2011.
- [9] X. Li, D. Hui, and X. Lai, "Battery Energy Storage Station (BESS)-Based Smoothing Control of Photovoltaic (PV) and Wind Power Generation Fluctuations," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 4, no. 2, pp. 464–473, Apr. 2013.
- [10] P. L. Hir, "2015, année record pour les énergies renouvelables dans le monde," *Le Monde.fr*, 01-Jun-2016.
- [11] E. Hau, "Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics," *Springer Berl. Ger.*, 2006.
- [12] M. Tsili and S. Papathanassiou, "A review of grid code technical requirements for wind farms," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 3, no. 3, pp. 308–332, 2009.
- [13] A. Luque and S. Hegedus, *Handbook of photovoltaic science and engineering*. John Wiley & Sons, 2011.
- [14] M. Stiebler, *Wind energy systems for electric power generation*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [15] M. Dali, J. Belhadj, and X. Roboam, "Design of a stand-alone hybrid Photovoltaic-Wind generating system with battery storage," in *ICEEDT Conference*, 2008.
- [16] M. Kalantar and others, "Dynamic behavior of a stand-alone hybrid power generation system of wind turbine, microturbine, solar array and battery storage," *Appl. Energy*, vol. 87, no. 10, pp. 3051–3064, 2010.
- [17] G. Bopp, H. Gabler, K. Preiser, D. U. Sauer, and H. Schmidt, "Energy storage in photovoltaic stand-alone energy supply systems," *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, vol. 6, no. 4, pp. 271–291, 1998.
- [18] M. A. Butler and D. S. Ginley, "Principles of photoelectrochemical, solar energy conversion," *J. Mater. Sci.*, vol. 15, no. 1, pp. 1–19.
- [19] H. S. Rauschenbach, *Solar Cell Array Design Handbook: The Principles and Technology of Photovoltaic Energy Conversion*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [20] S. H. Alawaji, "Evaluation of solar energy research and its applications in Saudi Arabia — 20 years of experience," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 5, no. 1, pp. 59–77, Mar. 2001.
- [21] S. Mekhilef, A. Safari, W. E. S. Mustafa, R. Saidur, R. Omar, and M. A. A. Younis, "Solar energy in Malaysia: Current state and prospects," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 1, pp. 386–396, Jan. 2012.

- [22] V. Fthenakis, J. E. Mason, and K. Zweibel, "The technical, geographical, and economic feasibility for solar energy to supply the energy needs of the US," *Energy Policy*, vol. 37, no. 2, pp. 387–399, Feb. 2009.
- [23] A. Fahrenbruch and R. Bube, *Fundamentals Of Solar Cells: Photovoltaic Solar Energy Conversion*. Elsevier, 2012.
- [24] D. M. Chapin, C. S. Fuller, and G. L. Pearson, "A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power," *J. Appl. Phys.*, vol. 25, no. 5, pp. 676–677, May 1954.
- [25] L. M. Fraas and L. D. Partain, *Solar Cells and Their Applications*. John Wiley & Sons, 2010.
- [26] "Research Trends," *Photovolt. Bull.*, vol. 2003, no. 8, pp. 9–11, Aug. 2003.
- [27] M. A. Green, "World solar challenge 1993: The trans-australian solar car race," *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, vol. 2, no. 1, pp. 73–79, Jan. 1994.
- [28] A. E. Becquerel, "The photovoltaic effect," *Comptes Rendus*, vol. 9, p. 145, 1839.
- [29] A. W. Copeland, O. D. Black, and A. B. Garrett, "The Photovoltaic Effect.," *Chem. Rev.*, vol. 31, no. 1, pp. 177–226, Aug. 1942.
- [30] P. Rappaport, "The photovoltaic effect and its utilization," *Sol. Energy*, vol. 3, no. 4, pp. 8–18, Dec. 1959.
- [31] M. Sidrach-de-Cardona and L. Mora López, "Performance analysis of a grid-connected photovoltaic system," *Energy*, vol. 24, no. 2, pp. 93–102, Feb. 1999.
- [32] D. D. Nguyen and B. Lehman, "Modeling and Simulation of Solar PV Arrays under Changing Illumination Conditions," in *2006 IEEE Workshops on Computers in Power Electronics*, 2006, pp. 295–299.
- [33] A. Martí *et al.*, "Production of Photocurrent due to Intermediate-to-Conduction-Band Transitions: A Demonstration of a Key Operating Principle of the Intermediate-Band Solar Cell," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 97, no. 24, p. 247701, Dec. 2006.
- [34] P. Würfel and U. Würfel, *Physics of Solar Cells: From Basic Principles to Advanced Concepts*. John Wiley & Sons, 2009.
- [35] H. J. Hovel, "Semiconductors and semimetals. Volume 11. Solar cells," Jan. 1975.
- [36] K. A. Munzer, K. T. Holdermann, R. E. Schlosser, and S. Sterk, "Thin monocrystalline silicon solar cells," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 46, no. 10, pp. 2055–2061, Oct. 1999.
- [37] M. A. Green, "Crystalline and thin-film silicon solar cells: state of the art and future potential," *Sol. Energy*, vol. 74, no. 3, pp. 181–192, Mar. 2003.
- [38] A. F. B. Braga, S. P. Moreira, P. R. Zampieri, J. M. G. Bacchin, and P. R. Mei, "New processes for the production of solar-grade polycrystalline silicon: A review," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 92, no. 4, pp. 418–424, Apr. 2008.
- [39] K. L. Chopra, P. D. Paulson, and V. Dutta, "Thin-film solar cells: an overview," *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, vol. 12, no. 2–3, pp. 69–92, Mar. 2004.
- [40] D. E. Carlson and C. R. Wronski, "Amorphous silicon solar cell," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 28, no. 11, pp. 671–673, Jun. 1976.
- [41] D. E. Carlson, "Amorphous silicon solar cells," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 24, pp. 449–453, Apr. 1977.
- [42] H. Tian, F. Mancilla-David, K. Ellis, E. Muljadi, and P. Jenkins, "A cell-to-module-to-array detailed model for photovoltaic panels," *Sol. Energy*, vol. 86, no. 9, pp. 2695–2706, Sep. 2012.
- [43] A. Labouret and M. Villoz, *Energie solaire photovoltaïque-4ème édition*. Dunod, 2009.
- [44] K. H. Hussein, I. Muta, T. Hoshino, and M. Osakada, "Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions," *Transm. Distrib. IEE Proc. - Gener.*, vol. 142, no. 1, pp. 59–64, Jan. 1995.
- [45] M. Buresch, "Photovoltaic energy systems: design and installation," Jan. 1983.
- [46] H. Shao, C. Y. Tsui, and W. H. Ki, "A micro power management system and maximum output power control for solar energy harvesting applications," in *2007 ACM/IEEE International Symposium on Low Power Electronics and Design (ISLPED)*, 2007, pp. 298–303.
- [47] S. A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. Academic Press, 2013.

- [48] J. F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers, *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. John Wiley & Sons, 2010.
- [49] J. M. Carrasco *et al.*, "Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 4, pp. 1002–1016, Jun. 2006.
- [50] S. Heier, *Grid Integration of Wind Energy: Onshore and Offshore Conversion Systems*. John Wiley & Sons, 2014.
- [51] W. Tong, *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*. WIT Press, 2010.
- [52] S. J. Savonius, *Wind rotor*. Google Patents, 1930.
- [53] I. Paraschivoiu, *Wind Turbine Design: With Emphasis on Darrieus Concept*. Presses inter Polytechnique, 2002.
- [54] I. Ross and A. Altman, "Wind tunnel blockage corrections: Review and application to Savonius vertical-axis wind turbines," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 99, no. 5, pp. 523–538, May 2011.
- [55] M. Islam, D. S.-K. Ting, and A. Fartaj, "Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 12, no. 4, pp. 1087–1109, May 2008.
- [56] D. M. Eggleston and F. Stoddard, "Wind turbine engineering design," Jan. 1987.
- [57] D. A. (ed) Spera, "Wind Turbine Technology," Jan. 1994.
- [58] J. A. Baroudi, V. Dinavahi, and A. M. Knight, "A review of power converter topologies for wind generators," *Renew. Energy*, vol. 32, no. 14, pp. 2369–2385, Nov. 2007.
- [59] R. C. Bansal, T. S. Bhatti, and D. P. Kothari, "On some of the design aspects of wind energy conversion systems," *Energy Convers. Manag.*, vol. 43, no. 16, pp. 2175–2187, Nov. 2002.
- [60] M. Ermiş *et al.*, "Various induction generator schemes for wind-electricity generation," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 23, no. 1, pp. 71–83, Jan. 1992.
- [61] G. K. Singh, "Self-excited induction generator research—a survey," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 69, no. 2–3, pp. 107–114, May 2004.
- [62] S. Muller, M. Deicke, and R. W. D. Doncker, "Doubly fed induction generator systems for wind turbines," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 8, no. 3, pp. 26–33, May 2002.
- [63] H. T. Jadhav and R. Roy, "A comprehensive review on the grid integration of doubly fed induction generator," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 49, pp. 8–18, Jul. 2013.
- [64] J. Ekanayake, "Control of DFIG wind turbines," *Power Eng.*, vol. 17, no. 1, p. 28, 2003.
- [65] H. Li and Z. Chen, "Overview of different wind generator systems and their comparisons," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 2, no. 2, pp. 123–138, Jun. 2008.
- [66] G. M. Joselin Herbert, S. Iniyan, E. Sreevalsan, and S. Rajapandian, "A review of wind energy technologies," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 11, no. 6, pp. 1117–1145, Aug. 2007.
- [67] T. Ackermann, *Wind power in power systems*. John Wiley & Sons, 2005.
- [68] A. Rolan, A. Luna, G. Vazquez, D. Aguilar, and G. Azevedo, "Modeling of a variable speed wind turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator," in *2009 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2009, pp. 734–739.
- [69] M. Chinchilla, S. Arnaltes, and J. C. Burgos, "Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 21, no. 1, pp. 130–135, Mar. 2006.
- [70] B. Wu, Y. Lang, N. Zargari, and S. Kouro, *Power Conversion and Control of Wind Energy Systems*. John Wiley & Sons, 2011.
- [71] O. Anaya-Lara, N. Jenkins, J. Ekanayake, P. Cartwright, and M. Hughes, *Wind Energy Generation: Modelling and Control*. John Wiley & Sons, 2011.
- [72] H. Ibrahim, A. Ilinca, and J. Perron, "Energy storage systems—Characteristics and comparisons," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 12, no. 5, pp. 1221–1250, Jun. 2008.

- [73] N.-K. C. Nair and N. Garimella, "Battery energy storage systems: Assessment for small-scale renewable energy integration," *Energy Build.*, vol. 42, no. 11, pp. 2124–2130, Nov. 2010.
- [74] H. Chen, T. N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, and Y. Ding, "Progress in electrical energy storage system: A critical review," *Prog. Nat. Sci.*, vol. 19, no. 3, pp. 291–312, Mar. 2009.
- [75] I. Hadjipaschalis, A. Poullikkas, and V. Efthimiou, "Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 6–7, pp. 1513–1522, Aug. 2009.
- [76] F. Stefanescu and A.-I. Dolan, "Conceptual design of 21 kJ superconducting magnetic energy storage device," *Ann. Univ. Craiova Ser. Electr. Eng.*, no. 34, pp. 109–112, 2010.
- [77] L. Chen, Y. Liu, A. B. Arsoy, P. F. Ribeiro, M. Steurer, and M. R. Iravani, "Detailed modeling of superconducting magnetic energy storage (SMES) system," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 21, no. 2, pp. 699–710, Apr. 2006.
- [78] S. Vazquez, S. M. Lukic, E. Galvan, L. G. Franquelo, and J. M. Carrasco, "Energy Storage Systems for Transport and Grid Applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 12, pp. 3881–3895, Dec. 2010.
- [79] B. Multon and J.-M. Peter, "Le stockage de l'énergie électrique. Moyens et applications," *Rev. 3EI*, p. pp–59, 1996.
- [80] F. Barbir, "PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources," *Sol. Energy*, vol. 78, no. 5, pp. 661–669, May 2005.
- [81] H. Ibrahim, A. Ilinca, and J. Perron, "Solutions de stockage de l'énergie éolienne," *Rapp. Interne UQAR UQAC*, 2006.
- [82] K. C. Divya and J. Østergaard, "Battery energy storage technology for power systems—An overview," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 79, no. 4, pp. 511–520, Apr. 2009.
- [83] B. Dunn, H. Kamath, and J.-M. Tarascon, "Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices," *Science*, vol. 334, no. 6058, pp. 928–935, Nov. 2011.
- [84] M. Lopez, "Contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée," Université Paris Sud-Paris XI, 2008.
- [85] A. Poullikkas, "A comparative overview of large-scale battery systems for electricity storage," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 27, pp. 778–788, Nov. 2013.
- [86] X. Luo, J. Wang, M. Dooner, and J. Clarke, "Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation," *Appl. Energy*, vol. 137, pp. 511–536, Jan. 2015.
- [87] G. L. Soloveichik, "Battery Technologies for Large-Scale Stationary Energy Storage," *Annu. Rev. Chem. Biomol. Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 503–527, 2011.
- [88] P. Kurzweil, "Gaston Planté and his invention of the lead–acid battery—The genesis of the first practical rechargeable battery," *J. Power Sources*, vol. 195, no. 14, pp. 4424–4434, Jul. 2010.
- [89] D. Linden, *Handbook of batteries and fuel cells*. 1984.
- [90] R. P. Hamlen, T. B. Atwater, D. Linden, and T. B. Reddy, "Handbook of Batteries," *McGraw-Hill N. Y. USA*, pp. 38–1, 2002.
- [91] N. Laverdure, "Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires," Thèse de Doctorat d'institut national polytechnique de Grenoble, 2005.
- [92] F. Iov, A. D. Hansen, P. Sørensen, and F. Blaabjerg, "Wind Turbine Block-set in Matlab/Simulink-General Overview and Description of the Models. AalborgUniversity," ISBN 87-89179-46-3, 2004.
- [93] Y. Soufi, T. Bahi, M. F. Harkat, and M. Mohamedi, "OPTIMIZATION OF WIND ENERGY CONVERSION," *J. Fundam. Appl. Sci.*, vol. 2, no. 1, pp. 183–191, 2010.
- [94] B. Boukhezzer, "Sur les stratégies de commande pour l'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes à vitesse variable," Thèse de Doctorat, université paris XI, FRANCE, 2006.
- [95] M. Yin, G. Li, M. Zhou, and C. Zhao, "Modeling of the wind turbine with a permanent magnet synchronous generator for integration," in *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE, 2007*, pp. 1–6.

- [96] J. A. Gow and C. D. Manning, "Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies," *IEE Proc. - Electr. Power Appl.*, vol. 146, no. 2, pp. 193–200, Mar. 1999.
- [97] A. N. Celik and N. Acikgoz, "Modelling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules using four- and five-parameter models," *Appl. Energy*, vol. 84, no. 1, pp. 1–15, Jan. 2007.
- [98] J. J. Wysocki and P. Rappaport, "Effect of Temperature on Photovoltaic Solar Energy Conversion," *J. Appl. Phys.*, vol. 31, no. 3, pp. 571–578, Mar. 1960.
- [99] E. Skoplaki and J. A. Palyvos, "On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations," *Sol. Energy*, vol. 83, no. 5, pp. 614–624, May 2009.
- [100] J. F. Manwell and J. G. McGowan, "Lead acid battery storage model for hybrid energy systems," *Sol. Energy*, vol. 50, no. 5, pp. 399–405, May 1993.
- [101] C.-Y. Wan, S.-C. Kim, and B. K. Bose, "Robust position control of induction motor using fuzzy logic control," in *Industry Applications Society Annual Meeting, 1992., Conference Record of the 1992 IEEE*, 1992, pp. 472–481.
- [102] D. Kumar and K. Chatterjee, "A review of conventional and advanced MPPT algorithms for wind energy systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 55, pp. 957–970, Mar. 2016.
- [103] P. Pillay and R. Krishnan, "Modeling, simulation, and analysis of permanent-magnet motor drives. I. The permanent-magnet synchronous motor drive," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 25, no. 2, pp. 265–273, Mar. 1989.
- [104] R. K. Sharma, V. Sanadhya, L. Behera, and S. Bhattacharya, "Vector control of a permanent magnet synchronous motor," in *2008 Annual IEEE India Conference*, 2008, vol. 1, pp. 81–86.
- [105] I. Boldea, "Control issues in adjustable speed drives," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 2, no. 3, pp. 32–50, Sep. 2008.
- [106] H. Rezk and A. M. Eltamaly, "A comprehensive comparison of different MPPT techniques for photovoltaic systems," *Sol. Energy*, vol. 112, pp. 1–11, Feb. 2015.
- [107] R. Bourgeois and D. Cogniel, *MémoTech électrotechnique*. Educavivres/Casteilla, 1996.
- [108] J. Sun and H. Grotstollen, "Averaged modelling of switching power converters: reformulation and theoretical basis," in *Power Electronics Specialists Conference, 1992. PESC'92 Record., 23rd Annual IEEE*, 1992, pp. 1165–1172.
- [109] C. N. Bhende, S. Mishra, and S. G. Malla, "Permanent Magnet Synchronous Generator-Based Standalone Wind Energy Supply System," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 2, no. 4, pp. 361–373, Oct. 2011.
- [110] F. Valenciaga and P. F. Puleston, "Supervisor control for a stand-alone hybrid generation system using wind and photovoltaic energy," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 20, no. 2, pp. 398–405, Jun. 2005.
- [111] M. Malinowski, "Sensorless control strategies for three-phase PWM rectifiers," *Rozpr. Doktorska Politech. Warsz. Warszawa*, 2001.
- [112] A. Mirecki, X. Roboam, and F. Richardeau, "Architecture Complexity and Energy Efficiency of Small Wind Turbines," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 1, pp. 660–670, Feb. 2007.
- [113] A. Abdelli, B. Sareni, and X. Roboam, "Optimization of a small passive wind turbine generator with multiobjective genetic algorithms," *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, vol. 26, no. 3,4, pp. 175–182, Jan. 2007.
- [114] D. H. Tran, B. Sareni, X. Roboam, and C. Espanet, "Integrated Optimal Design of a Passive Wind Turbine System: An Experimental Validation," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 1, no. 1, pp. 48–56, Apr. 2010.
- [115] L. Baghli, "Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques," thèse de Doctorat de l'université Honri Poincaré, Nancy-1, Janvier 1999.
- [116] F. Chevré and F. Guély, "La logique floue," *Cah. Tech. Schneider*, no. 191, 1998.
- [117] S. Chekroun, "COMMANDE EURO-FLOUE SANS CAPTEUR DE VITESSE D UNE MACHINE ASYNCHRONE TRIPHASEE," Ecole Nationale Polytechnique d'Oran, 2008.
- [118] Y. Elbia, "Commande floue optimisée d'une machine asynchrone à double alimentation et à flux orienté," *Mém. Magister*, 2009.

- [119] A. El Ougli, "Intégration des techniques floues à la synthèse de contrôleurs adaptatifs," *Dr. Natl. Sidi Mohamed Ben Abdellah Fès MAROC*, 2009.
- [120] W. Wu, "SYNTHESE D'UN CONTROLEUR FLOU PAR ALGORITHME GENETIQUE: APPLICATION AU REGLAGE DYNAMIQUE DES PARAMETRES DES SYSTEMS," Docteur, Université de Sciences et Technologies de Lille, 1998.
- [121] F. Boumaraf, "Commande intelligent d'une association convertisseur statique machine asynchrone à double alimentation," *Mém. Magistère En Electrotech. Univ. Batna Algér.*, 2009.
- [122] M. Fodil, "Commande adaptative par logique floue de la machine asynchrone," Magister En Electrotechnique, EL-HADJ LAKHDAR, BATNA, 2009.
- [123] A. Cochocki and R. Unbehauen, *Neural Networks for Optimization and Signal Processing*, 1st ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1993.
- [124] M. A. Shahin, "State-of-the-art review of some artificial intelligence applications in pile foundations," *Geosci. Front.*, vol. 7, no. 1, pp. 33–44, Jan. 2016.
- [125] I. A. Basheer and M. Hajmeer, "Artificial neural networks: fundamentals, computing, design, and application," *J. Microbiol. Methods*, vol. 43, no. 1, pp. 3–31, Dec. 2000.
- [126] S. J. Qin and T. A. Badgwell, "A survey of industrial model predictive control technology," *Control Eng. Pract.*, vol. 11, no. 7, pp. 733–764, Jul. 2003.
- [127] O. A. Z. Sotomayor and C. Garcia, "MODEL-BASED PREDICTIVE CONTROL OF A PRE-DENITRIFICATION PLANT: A LINEAR STATE-SPACE MODEL APPROACH," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 35, no. 1, pp. 429–434, 2002.
- [128] D. W. Clarke, C. Mohtadi, and P. S. Tuffs, "Generalized predictive control—Part I. The basic algorithm," *Automatica*, vol. 23, no. 2, pp. 137–148, Mar. 1987.
- [129] J. Richalet, A. Rault, J. L. Testud, and J. Papon, "Model predictive heuristic control: Applications to industrial processes," *Automatica*, vol. 14, no. 5, pp. 413–428, Sep. 1978.
- [130] S. Kouro, P. Cortés, R. Vargas, U. Ammann, and J. Rodríguez, "Model predictive control—A simple and powerful method to control power converters," *Ind. Electron. IEEE Trans. On*, vol. 56, no. 6, pp. 1826–1838, 2009.
- [131] L. Wang, *Model predictive control system design and implementation using MATLAB®*. Springer Science & Business Media, 2009.
- [132] R. Rouhani and R. K. Mehra, "Model algorithmic control (MAC); basic theoretical properties," *Automatica*, vol. 18, no. 4, pp. 401–414, Jul. 1982.
- [133] R. M. C. De Keyser, P. G. A. Van de Velde, and F. A. G. Dumortier, "A comparative study of self-adaptive long-range predictive control methods," *Automatica*, vol. 24, no. 2, pp. 149–163, Mar. 1988.
- [134] C. R. Cutler and B. L. Ramaker, "AIChE National Meeting," *Houst. TX*, 1979.
- [135] P. D. Roberts, "A brief overview of model predictive control," in *2000/023), IEE Seminar on Practical Experiences with Predictive Control (Ref. No, 2000*, pp. 1/1–1/3.
- [136] B. E. Ydstie, "Extended horizon adaptive control," in *Proceedings of the 9th IFAC World Congress*, 1984, vol. 7, pp. 133–138.
- [137] R. M. C. De Keyser and A. R. Van Cauwenberghe, "Extended prediction self-adaptive control," in *IFAC Symposium on Identification and System Parameter Estimation*, 1985, vol. 7, pp. 1255–1260.
- [138] P. Boucher and D. Dumur, *La commande prédictive*. Editions TECHNIP, 1996.
- [139] D. W. Clarke and C. Mohtadi, "Properties of generalized predictive control," *Automatica*, vol. 25, no. 6, pp. 859–875, Nov. 1989.
- [140] D. W. Clarke, "Application of generalized predictive control to industrial processes," *IEEE Control Syst. Mag.*, vol. 8, no. 2, pp. 49–55, Apr. 1988.
- [141] J. Richalet and D. O'Donovan, *Predictive Functional Control: Principles and Industrial Applications*. Springer Science & Business Media, 2009.

- [142] D. W. Clarke and R. Scattolini, "Constrained receding-horizon predictive control," *IEE Proc. - Control Theory Appl.*, vol. 138, no. 4, pp. 347–354, Jul. 1991.
- [143] P. Lundström, J. H. Lee, M. Morari, and S. Skogestad, "Limitations of dynamic matrix control," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 19, no. 4, pp. 409–421, Apr. 1995.
- [144] E. F. Camacho and C. B. Alba, *Model Predictive Control*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [145] P. Rodriguez and D. Dumur, "Generalized predictive control robustification under frequency and time-domain constraints," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 13, no. 4, pp. 577–587, Jul. 2005.
- [146] E. Mouni, S. Tnani, and G. Champenois, "Synchronous generator output voltage control via a generalized predictive RST controller," in *2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2008, pp. 718–723.
- [147] V. Salas, E. Olias, A. Barrado, and A. Lazaro, "Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 90, no. 11, pp. 1555–1578, 2006.
- [148] S. L. Brunton, C. W. Rowley, S. R. Kulkarni, and C. Clarkson, "Maximum power point tracking for photovoltaic optimization using extremum seeking," in *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2009 34th IEEE*, 2009, pp. 000013–000016.
- [149] T. Esum, P. L. Chapman, and others, "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques," *IEEE Trans. Energy Convers. EC*, vol. 22, no. 2, p. 439, 2007.
- [150] T. Ikegami, T. Maezono, F. Nakanishi, Y. Yamagata, and K. Ebihara, "Estimation of equivalent circuit parameters of PV module and its application to optimal operation of PV system," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 67, no. 1, pp. 389–395, 2001.
- [151] D. P. Hohm and M. E. Ropp, "Comparative study of maximum power point tracking algorithms using an experimental, programmable, maximum power point tracking test bed," in *Photovoltaic specialists conference, 2000. Conference record of the twenty-eighth IEEE*, 2000, pp. 1699–1702.
- [152] A. R. Reisi, M. H. Moradi, and S. Jamasb, "Classification and comparison of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 19, pp. 433–443, 2013.
- [153] H. Q. Minh, N. Frédéric, E. Najib, and H. Abdelaziz, "Fuzzy control of variable speed wind turbine using permanent magnet synchronous machine for stand-alone system," in *Sustainability in Energy and Buildings*, Springer, 2012, pp. 31–44.
- [154] H.-S. Ibrahim, F. F. Houssiny, H. Z. El-Din, and M. A. El-Shibini, "Microcomputer controlled buck regulator for maximum power point tracker for DC pumping system operates from photovoltaic system," in *Fuzzy Systems Conference Proceedings, 1999. FUZZ-IEEE'99. 1999 IEEE International*, 1999, vol. 1, pp. 406–411.
- [155] K. Nishioka *et al.*, "Analysis of the temperature characteristics in polycrystalline Si solar cells using modified equivalent circuit model," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 42, no. 12R, p. 7175, 2003.
- [156] J. C. H. Phang, D. S. H. Chan, and J. R. Phillips, "Accurate analytical method for the extraction of solar cell model parameters," *Electron. Lett.*, vol. 20, no. 10, pp. 406–408, 1984.
- [157] M. A. Hamdy, "A new model for the current-voltage output characteristics of photovoltaic modules," *J. Power Sources*, vol. 50, no. 1, pp. 11–20, 1994.
- [158] T. Takashima, T. Tanaka, M. Amano, and Y. Ando, "Maximum output control of photovoltaic (PV) array," in *Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit, 2000.(IECEC) 35th Intersociety*, 2000, vol. 1, pp. 380–383.
- [159] T.-Y. Kim, H.-G. Ahn, S. K. Park, and Y.-K. Lee, "A novel maximum power point tracking control for photovoltaic power system under rapidly changing solar radiation," in *Industrial Electronics, 2001. Proceedings. ISIE 2001. IEEE International Symposium on*, 2001, vol. 2, pp. 1011–1014.
- [160] A. Brambilla, M. Gambarara, A. Garutti, and F. Ronchi, "New approach to photovoltaic arrays maximum power point tracking," in *Power Electronics Specialists Conference, 1999. PESC 99. 30th Annual IEEE*, 1999, vol. 2, pp. 632–637.

- [161] A. Al-Amoudi and L. Zhang, "Optimal control of a grid-connected PV system for maximum power point tracking and unity power factor," in *Power Electronics and Variable Speed Drives, 1998. Seventh International Conference on (Conf. Publ. No. 456)*, 1998, pp. 80–85.
- [162] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, "Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 20, no. 4, pp. 963–973, 2005.
- [163] W. Xiao and W. G. Dunford, "A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems," in *Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual*, 2004, vol. 3, pp. 1957–1963.
- [164] Y.-T. Hsiao and C.-H. Chen, "Maximum power tracking for photovoltaic power system," in *Industry Applications Conference, 2002. 37th IAS Annual Meeting. Conference Record of the*, 2002, vol. 2, pp. 1035–1040.
- [165] K. K. Tse, B. M. Ho, H.-H. Chung, and S. R. Hui, "A comparative study of maximum-power-point trackers for photovoltaic panels using switching-frequency modulation scheme," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 51, no. 2, pp. 410–418, 2004.
- [166] N. Kasa, T. Iida, and L. Chen, "Flyback inverter controlled by sensorless current MPPT for photovoltaic power system," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 52, no. 4, pp. 1145–1152, 2005.
- [167] P. E. Kakosimos and A. G. Kladas, "Implementation of photovoltaic array MPPT through fixed step predictive control technique," *Renew. Energy*, vol. 36, no. 9, pp. 2508–2514, 2011.
- [168] A. Menadi, S. Abdeddaim, A. Ghamri, and A. Betka, "Implementation of fuzzy-sliding mode based control of a grid connected photovoltaic system," *ISA Trans.*, vol. 58, pp. 586–594, 2015.
- [169] B. M. Amine, Z. Souhila, and A. Tayeb, "Adaptive fuzzy logic control of wind turbine emulator," *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 4, no. 2, p. 241, 2014.
- [170] M. A. Bouzid, A. Massoum, and S. Zine, "Generalized Predictive Control of Standalone Wind Energy Generation System," *Int. J. Renew. Energy Res. IJRER*, vol. 6, no. 1, pp. 220–228, Mar. 2016.

ANNEXES

Annexe

ANNEXE A : Paramètres de la turbine, la génératrice et la batterie

A.1 : GENERATRICE + TURBINE

Symbole	Désignation	Valeur
P	Puissance de la machine	9.4 kW
R_s	Résistance statorique	2.8750 Ω
L_s	Inductance statorique	8.5e-3 H
Φ_f	Flux magnétique	0.18 Wb
J	Moment d'inertie	0.0008 kg·m ²
f	Coefficient de frottement	0.001Nm/rad/s
n_p	Nombre de paires de pole	4
R_p	Diamètre des pales	3 m
ρ	Densité de l'air	1.225 kg/m ³
$C_{p_{max}}$	Coefficient de puissance (valeur optimale)	0.48
λ_{opt}	Vitesse Spécifique (valeur optimale)	8.1

A.2 : BATTERIE (ACIDE-PLOMB)

Désignation	Valeur
Tension nominale	200 V
Tension (pleine charge)	235.5 V
Courant nominal	1.3 A
Capacité	6.5 Ah
Capacité (à la tension nominale)	6.25 Ah
Capacité maximale	7 Ah
Résistance interne	0.307 Ω

Annexe

ANNEXE B : Paramètres du panneau solaire

Désignation	Valeur
Imp	3.11 A
Vmp	17.4 V
Pmax	54 W
Isc	3.31 A
Voc	21.7 V
A(surface)	0.42 m ²
Efficacité de Conversion	16 %

ANNEXE C : synthèse des régulateurs

COMMANDE VECTORIELLE

Parmi les stratégies de commande vectorielle appliquées à la machine synchrone, celle qui consiste à imposer une référence du courant directe à zéro est la plus répandue. Cela permet de simplifier l'expression du couple électromagnétique de l'équation (C.1) en une expression linéaire donnée par :

$$C_{em} = K_t \cdot i_q \tag{C.1}$$

Ce dernier est réglé en agissant sur le courant en quadrature pour pouvoir appliquer la commande vectorielle nous devons :

- ✓ Poser une référence $i_{dref} = 0$
- ✓ Poser $C_{em_{ref}} = C^{te} * \Omega^2$
- ✓ Poser une référence $i_{qref} = \frac{C_{em_{ref}}}{K_t}$

Commande vectorielle avec découplage de la régulation des courants par compensation:

Afin de justifier le recourt à la commande vectorielle avec découplage de la régulation des courants par compensation, examinons d'abord le modèle de la machine synchrone dans le plan de Park qui est donné par les équations (C.2) (C.3)

$$v_d = R_s \cdot i_d + L_q \cdot \frac{di_d}{dt} - e_d \tag{C.2}$$

$e_d = \omega_r \cdot \Phi_q$: f.e.m de la machine sur l'axe q

$$v_q = R_s \cdot i_q + L_d \cdot \frac{di_q}{dt} + e_q \tag{C.3}$$

$e_q = \omega_r \cdot \Phi_d$: f.e.m de la machine sur l'axe d

La commande vectorielle avec découplage de la régulation des courants par compensation permet de découpler les courants et de permettre de faire la régulation adéquate à chacun des deux séparément. Cette commande nous mène à un modèle de la machine synchrone similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée. Les termes de couplage sont considérés comme des perturbations mesurables. Ainsi la machine peut être représentée par la fonction de transfert suivante :

$$G_s(p) = \frac{1}{R_s + L_q S} = \frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + T_e S} \tag{C.4}$$

Avec

- $T_e = \frac{L_s}{R_s}$: La constante de temps électrique

Afin d'imposer la référence du courant sur l'axe d égale à zéro on utilise un régulateur PI. La boucle de régulation du courant i_d est donnée par le schéma bloc suivant :

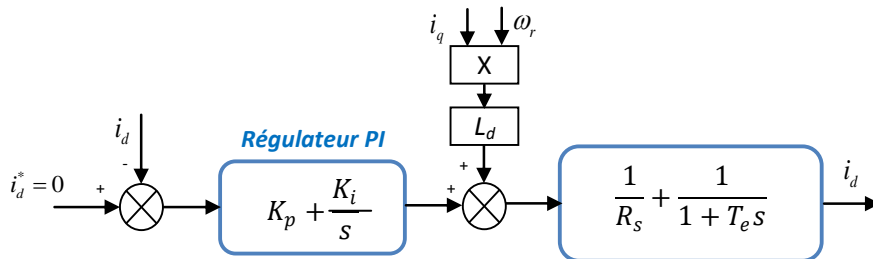


Figure C.1 : Boucle de régulation du courant

CALCUL DU REGULATEUR PI :

La fonction de transfert en boucle ouverte es donnée comme suit :

$$G_0(s) = \frac{K_{pd}s + K_{id}}{s} \cdot \frac{1}{R_s s + L_d} = \frac{K_{pd}s + K_{id}}{s} \cdot \frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + T_e s} \tag{C.5}$$

Annexe

En fin

$$G_0(s) = \frac{K_{pd}s + K_{id}}{s} \cdot \frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + T_e s} \quad (C.6)$$

$T_e = \frac{K_p}{K_i}$: La constante de temps électrique

G_0 : Le gain statique

La fonction de transfère en boucle fermée est donnée par $G(s) = \frac{G_0}{1+G_0(s)}$

Les paramètres du régulateur sont calculés par la méthode de placement de pole

La fonction de transfère en boucle ouverte est :

$$G_{bo}(s) = \frac{K_p s + K_i}{s} \cdot \frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + T_e s} \quad (C.7)$$

La fonction de transfère en boucle fermée est :

$$G_{bf}(s) = \frac{G_{bo}}{1+G_{bo}s} = \frac{K_p s + K_i}{R_p s^2 + (L_q + K_p)s + K_i} \quad (C.8)$$

$$K_p = \frac{2\xi_n K_i}{\omega_n} - J \quad (C.9)$$

$$K_i = \omega_n^2 J \quad (C.10)$$

La boucle de régulation du courant i_q est donnée par le schéma bloc suivant :

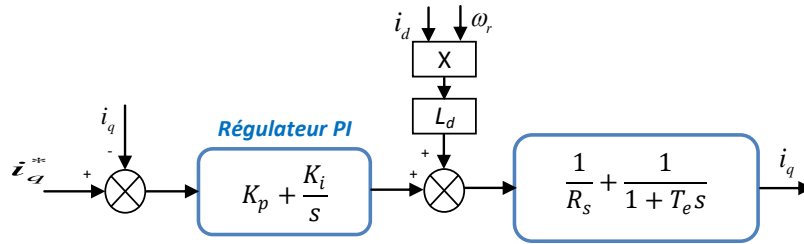


Figure C.2 : Boucle de régulation du courant

Avec :

$$i_{qref} = \frac{C_{em_ref}}{K_t} = Cte \cdot \frac{\Omega^2}{K_t} \quad (C.11)$$

$$C_{em_ref} = \frac{P_{éolmax}}{\Omega_t} \quad (C.12)$$

$$P_{éol} = \frac{1}{2} C_{pmax} \lambda \cdot \rho \cdot S \cdot v_v^2 \quad (C.13)$$

$$S = \pi R^2 \quad (C.14)$$

Si on remplace la puissance éolienne $P_{éol}$ et la surface active S , par leurs formules respectives, données en (C.13) et (C.14) on obtient :

$$\frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot C_{pmax}}{2 \cdot \lambda^3_{opt}} = Cte \quad (C.15)$$

ANNEXE D : Présentation du Systèmes Neuro-floue de type ANFIS et de la boite à outils floue

PRESENTATION DU TOOLBOX FUZZY LOGIC

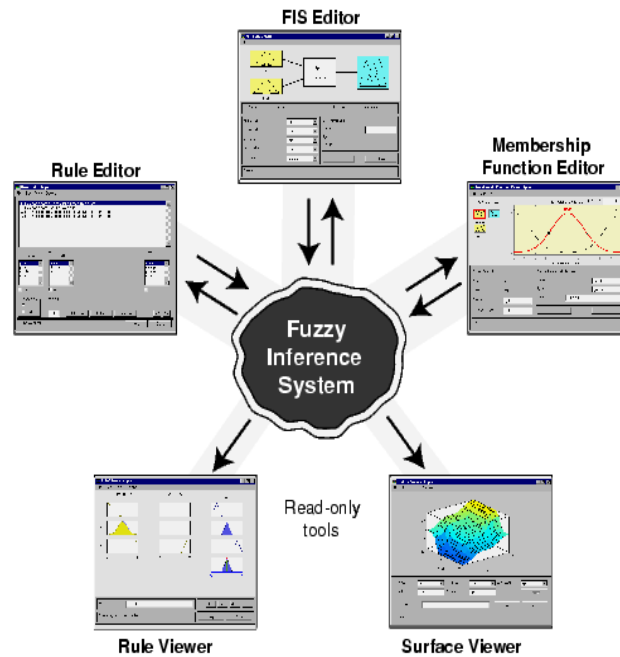


Figure D. 1 : Fuzzy Logic toolbox dans l'environnement MATLAB.

Cette boite à outils possède 3 éditeurs

- ❖ **FIS Editor** : l'éditeur des systèmes d'inférence floue qui l'éditeur principal pour définir le nombre d'entrées et de sorties, leur noms ainsi que le type : Mamdani ou sugeno.
- ❖ **Membership Function Editor** : éditeur de fonctions d'appartenance qui donne la main pour insérer, supprimer et paramétrer les fonctions d'appartenances. C'est là aussi qu'on peut définir l'univers de discours
- ❖ **Rule Editor** : éditeur de règles et de fonctions d'appartenance qui permettent de saisir l'ensemble des règle reliant les entrées et les sorties du FIS. On peut ajouter supprimer et modifier une règle changer de connecteur et /ou et encore plus modifier le poids
- ❖ **Rule viewer et surface viewer** : interfaces graphiques qui permettent de visualiser les inférences directement sur la base de règles, ainsi que des surfaces de contrôle. Dans la fenêtre du Rule viewer, on peut vérifier le fonctionnement du système en appliquant des entrées nettes (valeurs numériques pour voire le fonctionnement des systèmes et obtenir la sortie nette).

D.2. LE SYSTEMES NEURO-FLOUE DE TYPE ANFIS

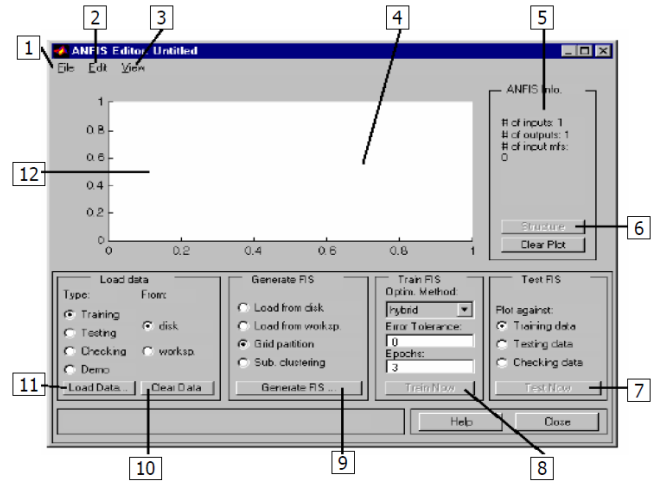
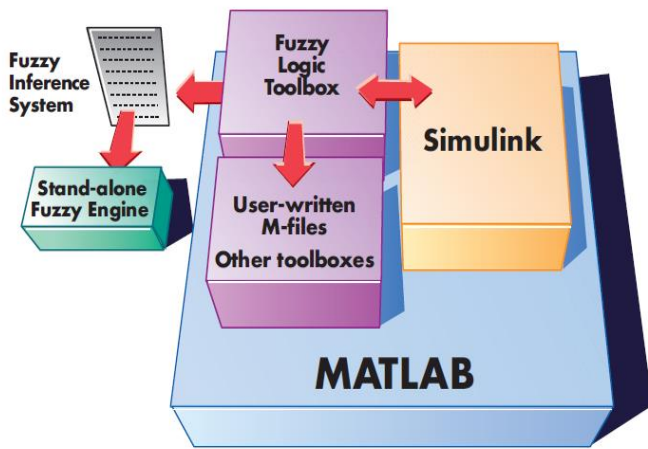


Figure D. 2 : ANFIS toolbox dans l'environnement MATLAB.

1. Fichier : Ouvrir ou sauvegarder.
2. Edition.
3. Affichage visualisé avec le GUI.
4. Zone graphique.
5. Etat entres sortie (nombres).
6. Permet de visualiser la structure graphique des entres/sorties.
7. Tests de données.
8. Entraînement du Fis après avoir choisi la méthode d'optimisation la tolérance d'erreur. Il génère l'erreur dans a zone graphique.
9. Importer ou créer un modèle FIS.
10. Effacer les données.
11. Importer les données.
12. Toutes les données apparaissent dans cette région.

ملخص

يركز هذا العمل على دراسة نظام هجين للطاقة (الطاقة الشمسية - طاقة الرياح) غير مربوط بالشبكة، ويستخدم لتغذية مكان معزول بالكهرباء من خلال تتبع نقطة الطاقة القصوى لكلا مصادر الطاقة من خلال دمج اثنين من موارد الطاقة المتجددة ، فإن تأثير الطبيعة المتغيرة للطاقة الشمسية وطاقة الرياح يمكن حلها جزئيا و يصبح تشغيل النظام أكثر وثوقا واقتصادا لهذا، تم استخدام خوارزمية التشويش والمراقبة وطريقة المنطق الضبابي في جهة المجموعة الكهروضوئية. في جانب مولد الرياح، وقد تم تطبيق منظم ، التحكم التنبؤي المعمم، التحكم عن طريق الشبكات العصبية وطريقة المنطق الضبابي لتحسين أداء هذا النظام. إن زيادة نظام التخزين أمر ضروري أثناء فترات انخفاض الإنتاجية و / أو الاستهلاك العالي . تم تقديم مقارنة بين النتائج المتحصل عليها من قبل المنظمات التقليدية وتلك التي تم الحصول عليها عن طريق التحكم التنبؤي ، التحكم عن طريق الشبكات العصبية وطريقة المنطق الضبابي .

Abstract

This work focuses on the study of a hybrid energy system (photovoltaic-wind), not connected to the grid, used for feeding an isolated location with electricity by tracking the maximum power point (MPPT) for the two energy sources. By integrating the two renewable resources into an optimum combination, the impact of the variable nature of solar and wind resources can be partially resolved and the overall system becomes more reliable and economical to run.

For this, the Perturb & Observe and fuzzy logic methods were used in the side of the PV array. In the wind generator side, PI regulator, Fuzzy logic control, neural network control and generalized predictive control have been applied to improve the performance of this system. The combination of a storage system is essential during periods of low productivity and / or high consumption. A comparison between the results obtained by conventional regulators and those obtained by predictive control, fuzzy control and neural network control was presented.

Résumé

Ce travail porte sur l'étude d'un système hybride d'énergie (photovoltaïque-éolien), non connecté au réseau électrique, utilisé pour l'alimentation d'un site isolé en électricité par le suivi du point de puissance maximum (MPPT) pour les deux sources d'énergie. En intégrant les deux ressources renouvelables dans une combinaison optimale, l'impact de la nature variable des ressources solaires et éoliennes peut être partiellement résolu et le système global devient plus fiable et économique à exécuter.

Pour cela, les méthodes Perturb & Observe et logique floue ont été utilisées dans le coté du générateur photovoltaïque. Pour ce qui est du générateur éolien, le régulateur PI, la commande logique Floue, la commande par réseaux de neurones et le contrôle prédictif généralisé ont été appliquées pour améliorer les performances de ce système. L'association d'un système de stockage est indispensable lors des périodes de faible productivité et/ou de forte consommation. Une comparaison entre les résultats obtenus par les régulateurs classiques et ceux obtenus par la commande prédictive, par la logique floue et par le contrôle neuronale a été présenté.