

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira de Bejaia
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique
2^{eme} Année Master

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de master 2 En Electrotechnique

Option : Énergies Renouvelables

Thème

Commande non linéaire d'un système
de pompage photovoltaïque

Présenté par :

BOUDRAHEM Lyes

DJOUADI Lamine

Promoteurs :

M^{me} S. BELAID

M^r K. IDJDARENE

Année Universitaire : 2011-2012

Remerciement

Nos remerciements les plus vifs et chaleureux, vont à notre promotrice M^{me} S.BELAID, pour son aide, son orientation judicieuse et sa disponibilité, aussi pour la, patience et la compréhension qu'elle nous a toujours manifestées.

Nous remercions également M^r K.IDJDARENE, qui nous a apporté un aide appréciable pour l'élaboration de ce travail.

Et nous adressons nos chaleureux remerciements aux membres du jury pour nous avoir fait l'honneur d'évaluer notre travail.

A travers ce mémoire, nous adressons notre reconnaissance à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

*D*édicaces

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents, à

mes frères et sœurs, à toute ma famille et

à tous mes amis qui m'aiment et qui m'apprécient.

Lyes

*D*édicaces

Je dédie ce travail à la mémoire de mon père, à ma

très chère mère,

à mon frère et mes très chères sœurs, à toute ma

famille, et à tous mes amis en particulier Lyes et

Samir.

Lamine

Liste des symboles

Liste des symboles

- R_r : Résistance rotorique (Ω).
- R_{st} : Résistance statorique (Ω).
- T_{stc} : Température dans les conditions standards ($^{\circ}\text{C}$).
- V_{dc} : Tension à l'entrée de l'onduleur (V).
- α_{cc} : Coefficient d'incrémentement du courant I_{cc} ($\text{mA}/^{\circ}\text{C}$).
- T_r : Couple résistant (N.m).
- E_{ele} : Energie électrique requis par la pompe (W).
- E_{ph} : L'énergie du photon (ev).
- G_{stc} : Ensoleillement dans les conditions standards (W/m^2).
- H_g : Hauteur géométrique entre la nappe d'eau pompée et le plan d'utilisation (m).
- I_{cc} : Courant de court-circuit (A).
- I_d : Courant de polarisation de la jonction PN de la diode (A).
- I_{mpp} : Courant au point de Puissance maximale (A).
- I_{ph} : Courant produit par la photopile (A).
- I_{pv} : Courant photovoltaïque (A).
- I_s : Courant de saturation de la diode ou courant à l'obscurité(A).
- I_{sabc} : Courants des phases statotiques (A).
- K_p : Constante de la canalisation.
- L_s, L_r : Inductances propres statoriques et rotoriques de la machine asynchrone (H).
- N_p : Nombre de module en parallèle.
- N_{pv} : Nombre de panneaux nécessaire.
- N_s : Nombre de module en série.
- P_c : Pertes de charge produites par le frottement d'eau sur les parois des conduites(m).
- P_c : Puissance crête (W).
- P_{mpp} : Puissance maximale fournie par le générateur (W).
- P_n : Puissance nominale du moteur asynchrone (W).
- P_{pv} : Puissance photovoltaïque (W).
- R_p : Rendement de groupe motopompe.
- R_s : Résistance série (Ω).
- R_{sh} : Résistance shunt (Ω).

T_c : Température dans les conditions quelconque ($^{\circ}\text{C}$).

T_{em} : Couple électromagnétique (N.m).

V_{mpp} : Tension au point de Puissance maximale (V).

V_{oc} : Tension de circuit ouvert (V).

V_{pv} : Tension photovoltaïque (V).

β_{co} : Coefficient d'incrémentation de la tension V_{oc} (mV/ $^{\circ}\text{C}$).

Φ_{ref} : Flux de référence (Wb).

Ω_{ref} : Vitesse de référence (rad/s).

Ω_n : Vitesse nominale du moteur asynchrone (rad/s).

α : Rapport cyclique.

A : Coefficient d'idéalité de la diode.

C : Vitesse de la lumière (m/s).

D : Diamètre des canalisations (m).

f.e.m : La force électromotrice (V).

FF : Facteur de forme.

g : Accélération de la pesanteur (9.81 m/s^2).

G : Ensoleillement (W/m^2).

h: Constante de planck.

HMT : Hauteur manométrique totale atteinte par la pompe (m).

J : Inertie de la machine (Kg.m^2).

k : Constante de Boltzmann ($k = 1,38.10^{-23} \text{ J/K}$).

L : Longueur des canalisations (m).

M : Inductance mutuelle maximale entre une phase de stator et une phase de rotor (H).

P : Nombre de paires de pôles.

q : Charge de l'électron ($q = 1,602.10^{-19} \text{ C}$).

Q : Débit d'eau pompé (m^3/s).

ε : Coefficient d'amortissement.

λ : Coefficient de pertes de charge linéaire.

σ : Coefficient de dispersion de blondel.

Liste des figures

Liste des figures

N° de figure	Titres	pages
I. 1	Spectre de rayonnement solaire.	4
I.2	Composante diffuse en provenance du sol sur un capteur incliné d'un angle quelconque.	5
I.3	Un système de pompage photovoltaïque.	7
I.4	Type d'une cellule photovoltaïque.	8
I.5	Schéma d'une cellule photovoltaïque.	9
I.6	Association des cellules identiques en série.	10
I.7	Association de cellules identiques en parallèle.	10
I.8	Schéma d'un panneau photovoltaïque.	11
I.9	Caractéristique d'un générateur photovoltaïque.	12
I.10	Schéma d'un hacheur parallèle.	13
I.11	Schéma d'un hacheur série.	14
I.12	Caractéristique d'un onduleur à onde sinusoïdale modifiée.	14
I.13	Caractéristique d'un onduleur à modulation de largeur d'impulsion(MLI).	15
I.14	Illustration d'une centrifuge à turbine.	17
I.15.a	Le couple augmente très rapidement en fonction de la vitesse.	18
I.15.b	Le débit est proportionnel à la vitesse, toutefois il faut une vitesse minimale à une HMT donnée pour obtenir débit.	18
I.16	Pompe volumétrique palette.	19
I.17.a	Le couple est pratiquement constant vitesse.	19
I.17.b	Le débit est proportionnel à la en fonction de la vitesse.	19
II.1	Modèle d'un générateur photovoltaïque à une diode	22
II.2.a	Caractéristique courant-tension du module photovoltaïque pour différents niveaux d'irradiations ($G=400, 600, 800, 1000W/m^2$) et $T_c=25^\circ C$.	25
II.2.b	Caractéristique puissance-tension du module photovoltaïque pour différents niveaux d'irradiations ($G=400, 600, 800, 1000W/m^2$) et $T_c=25^\circ C$.	25

II.3.a	Caractéristique courant-tension du module photovoltaïque pour une variation de température ($T_c=0, 25, 50, 75^\circ\text{C}$) et $G=1000\text{W}/\text{m}^2$.	26
II.3.b	Caractéristique puissance-tension du module photovoltaïque pour une variation de température ($T_c=0, 25, 50, 75^\circ\text{C}$) et $G=1000\text{W}/\text{m}^2$.	26
II.4	Schéma de l'onduleur triphasé à deux niveaux.	28
II.5	Les différents systèmes d'axes utilisés.	31
III.1	Organigramme de la méthode Perturbation et Observation.	37
III.2	Représentation des variables binaires.	39
III.3	Représentation des variables floues.	40
III.4	Les différentes formes de la fonction d'appartenance.	40
III.5	Fonction d'appartenance singleton.	41
III.6	Le schéma synoptique d'un système flou.	42
III.7.	Structure du contrôleur MPPT flou appliqué au système photovoltaïque.	45
III.8	Fonction d'appartenance des entrées et de la sortie du régulateur flou choisi.	45
III.9	Principe de fonctionnement du contrôleur MPPT flou.	46
III.10	Table de règles à cinq classes.	47
III.11.a	Allure de la puissance photovoltaïque.	47
III.11.b	Allure de la puissance photovoltaïque en régime transitoire.	48
III.11.c	Allure de la puissance photovoltaïque en régime permanent.	48
III.11.d.	Allure de la tension photovoltaïque.	48
III.11.e	Allure de la tension photovoltaïque en régime transitoire.	49
III.11.f	Allure de la tension photovoltaïque en régime permanent.	49
III.12.a	Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ pour différentes irradiation.	50
III.12.b	Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ pour différentes irradiation.	50
III.13.a	Caractéristiques $P_{pv}(V_{pv})$ pour différentes température.	51
III.13.b	Caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ pour différentes température.	51
IV.1	Irradiation globale moyenne mensuelle journalière sur plan horizontal du site de Bejaia de 1998 à 2007.	54
IV.2	Illustration de la bande de courant à hystérésis.	57
IV.3.a	Flux rotorique non orienté.	59
IV.3.b	Flux rotorique non orienté.	59

IV.4	Schéma bloc de régulation de vitesse par un PI.	61
IV.5	Schéma du réglage de flux par un régulateur P.I.	62
IV.6	Schéma synoptique d'un régulateur flou de vitesse.	63
IV.7	Fonctions d'appartenance des entrées et de la sortie du régulateur flou choisi.	63
IV.8.a	Matrice d'inférence du régulateur flou. PI.	64
IV.8.b	Matrice d'inférence du régulateur flou. PD.	64
IV.9.a	Allure de flux régulé par un PI classique.	65
IV.9.b	Zoom sur le régime transitoire (PI classique).	66
IV.10.c	Zoom sur le régime permanent (PI classique).	66
IV.10.a	Allure de la vitesse régulée par un PI classique.	66
IV.10.b	Zoom sur le régime transitoire du (PI classique).	67
IV.10.c	Zoom sur le régime permanent (PI classique).	67
IV.11.a	Allure de la vitesse régulée par un PI flou.	67
IV.11.b	Zoom sur le régime transitoire du (PI flou).	68
IV.11.c	Zoom sur le régime permanent (PI flou).	68
IV.12.a	Allure de la vitesse régulée par un PD flou.	68
IV.12.b	Zoom sur le régime transitoire du (PD flou).	69
IV.12.c	Zoom sur le régime permanent (PD flou).	69
IV.13.a	Allure de la vitesse régulée par un PID flou.	70
IV.13.b	Zoom sur le régime transitoire du (PID flou).	70
IV.13.c	Zoom sur le régime permanent (PID flou).	70
IV.14	Schéma global du système de pompage photovoltaïque.	72
IV.15	L'évolution de l'irradiation ($G=1000$ et 800 W/m^2).	73
IV.16	L'évolution de la puissance ($G=1000$ et 800 W/m^2).	73
IV.17	L'évolution de la vitesse ($G=1000$ et 800 W/m^2).	73
IV.18	L'évolution de flux ($G=1000$ et 800 W/m^2).	74
IV.19.a	L'évolution de courant I_{sd} ($G=1000$ et 800 W/m^2).	74
IV.19. b	Zoom sur le courant I_{sd} ($G=1000$ et 800 W/m^2).	74
IV.20.a	L'évolution de courant I_{sq} ($G=1000$ et 800 W/m^2).	75
IV.20.b	Zoom sur le courant I_{sq} ($G=1000$ et 800 W/m^2).	75
IV.21.a	L'évolution des courants statorique ($G=1000$ et 800 W/m^2).	75
IV.21.b	Zoom sur les courants statoriques ($G=1000$ et 800 W/m^2).	76

IV.22.a	L'évolution de couple électromagnétique ($G=1000$ et 800 W/m^2).	76
IV.22.b	Zoom sur le couple électromagnétique ($G=1000$ et 800 W/m^2).	76
IV.23	L'évolution de débit ($G=1000$ et 800 W/m^2).	77
IV.24	Variation de l'éclairement le long d'une journée d'été.	77
IV.25	Variation de la température le long d'une journée d'été.	77
IV.26	Variation de la puissance le long d'une journée d'été.	78
IV.27	Variation de la vitesse le long d'une journée d'été.	78
IV.28	Variation de débit le long d'une journée d'été.	78
IV.29.a	Variation de débit en fonction de la vitesse.	79
IV.29.b	Variation de débit en fonction de l'irradiation.	79
IV.30	Variation de l'éclairement le long d'un mois d'été.	80
IV.31	Variation de la température le long d'un mois d'été.	80
IV.32	Variation de la tension V_{pv} le long d'un mois d'été.	80
IV.33	Variation de la puissance P_{pv} le long d'un mois d'été.	81
IV.34	Variation de la vitesse le long d'un mois d'été.	81
IV.35	Variation de débit le long d'un mois d'été.	81

Liste des tableaux

Liste des tableaux

N° de tableau	Titres	pages
I.1	L'éclairement énergétique du rayonnement solaire hors l'atmosphère dans les divers domaines de longueur d'onde.	4
IV.1	Les caractéristiques des différents régulateurs.	71

Sommaire

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur le système de pompage photovoltaïque	
I.1) Introduction.....	3
I. 2) La source solaire.....	3
I.2.1) Spectre de rayonnement solaire.....	3
I.2.2) Les différents types de rayonnement.....	5
I.2.2.1) Le rayonnement direct.....	5
I.2.2.2) Le rayonnement diffus.....	5
I.2.2.3) L'albédo.....	5
I.2.2.4) Le rayonnement global.....	5
I.3) Les systèmes de pompage photovoltaïque:	6
I.3.1) Le pompage avec stockage électrochimique (batteries).....	6
I.3 .2) Le pompage au fil de soleil.....	6
I. 3.3) Les différents composants d'un système de pompage photovoltaïque.....	6
I.4) Le générateur photovoltaïque.....	7
I.4. 1) La cellule photovoltaïque.....	8
I.4.1.1) Principe de fonctionnement.....	8
I.4.1.2) Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	9
I.4.2.1) Association en série.....	10
I.4.2.2) Association en parallèle.....	10
I.4.3) Le module photovoltaïque.....	10
I. 4.3.1) Caractéristiques d'un module photovoltaïque.....	11
I.4.3.2) Fonctionnement d'un générateur photovoltaïque a sa puissance maximale	12
I.5) Convertisseurs statiques.....	13
I.5.1) Convertisseur DC-DC (hacheur).....	13
I.5.1.1) Hacheur parallèle survolteur.....	13
I.5.1.2) Hacheur série dévolteur.....	13
I.5.2) Le convertisseur DC/AC	14
I.6) Les moteurs d'entraînement.....	15

I.6.1) Le moteur synchrone.....	15
I.6.2) Le moteur asynchrone à cage d'écureuil.....	16
I.6.3) Les moteurs à courant continu.....	16
I.7) Les différents types de pompes.....	16
I.7.1) Les pompes centrifuges.....	17
I.7.1.1) Principe de fonctionnement	17
I.7.1.2) Caractéristiques d'une pompe centrifuge.....	18
I.7.2) Les pompes volumétriques	18
I.7.2.1) Principe de fonctionnement	18
I.7.2.2) Caractéristiques d'une pompe volumétrique.	19
I.8) Choix de la structure à étudié.....	19
I.9) Conclusion	21

Chapitre II : Modélisation de la chaîne de système de pompage photovoltaïque

II.1) Introduction.....	22
II.2) Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque.....	22
II.3) Influence de la variation des conditions météorologiques sur les paramètres du panneau photovoltaïque..	25
II.4) Modalisation du hacheur survolteur.....	27
II.5) Modélisation de l'onduleur de tension.....	28
II.6) Modélisation de la machine asynchrone	29
II.6.1) Hypothèses de travail	30
II.7) Modélisation de la pompe.....	33
II.8. Conclusion.....	35

Chapitre III : Optimisation et simulation du système photovoltaïque

III.1) Introduction.....	36
III.2) Méthode de perturbation et d'observation (P&O)	36
III.3) Méthode à base de logique floue	37
III.3.1) Introduction à la logique floue.....	37
III.3.2) Logique floue, principes et définitions	38
III.3.2.1) Les ensembles flous.....	38
III.3.2.2) Variable linguistique.....	38
III.3.2.3) Univers du discours.....	39
III.3.2.4) Fonction d'appartenance	40

III.3.2.5) Opérateurs logiques flous	41
III.3.3) Description d'un régulateur flou.....	42
III.3.3.2) Bases Règles floues	43
III.3.3.3) Logique de prise de décision	43
III.3.3.4) Interface de défuzzification.....	44
III.3.4) Application de la logique floue pour l'optimisation de la puissance de générateur photovoltaïque.....	44
III.3.4.1) Fuzzification.....	45
III.3.4.2) Inférence floue.....	45
III.3.4.3) Défuzzification.....	47
III. 4) Résultats de simulation.....	47
III.5) Conclusion.....	52

Chapitre IV : Commande et simulation du système de pompage photovoltaïque

IV.1) Introduction.....	53
IV.2) Les étapes de dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque.	53
IV.2.1) Evaluation des besoins en eau.....	53
IV.2.2) Calcul de l'énergie quotidienne requise.....	53
IV.2.3) Détermination de l'énergie solaire disponible.....	54
IV.2.3.1) Inclinaison et orientation optimales des capteurs photovoltaïques.....	54
IV.2.3.2) Mois de dimensionnement.....	55
IV.2.4) Choix des composants de système.....	55
IV.2.4.1) Dimensionnement de la pompe centrifuge.....	55
IV.2.4.2) Dimensionnement du champ photovoltaïque.....	55
IV. 3) Commande de l'onduleur.....	56
IV.3.1) Contrôle des courants par régulateurs à hystérésis.....	56
IV.4) Commande de la machine asynchrone.....	57
IV.4.1) Principe de la commande vectorielle.....	58
IV.4.1.1) Estimation de Φ_{rd} , ω_r , θ_s	60
IV.4.1.2) Calculs des régulateurs.....	61
IV.4.1.2.1) Réglage de la boucle de vitesse	61
IV.4.1.2.2) Régulateur de flux.....	61
IV.4.2) Commande floue de la vitesse de la machine asynchrone (MAS) à flux rotorique orienté	62

IV.4.2.1) Fuzzification.....	63
IV.4.2.2) Inférence flou.....	64
IV.4.2.3) Défuzzification.....	65
IV.5) Résultats de simulation.....	65
IV.6) Interprétation des résultats.....	82
IV.6) Conclusion.....	82
Conclusion Générale	83
Références bibliographiques	84
Annexe	88

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie est le moteur de toute activité humaine, le pilier de l'économie moderne. Ses sources se sont diversifiées au cours du temps afin de satisfaire les besoins de plus en plus élevés de l'industrie et des consommateurs et pour remédier à certaines problématiques des énergies classique (fossiles), la solution est le recours aux énergies renouvelables. Celles-ci ne sont évidemment pas nouvelles, avec l'avènement de la révolution industrielle, elles ont été marginalisées au profit des sources d'énergie fossile que l'on pensait plus prometteuses. La consommation accrue des énergies ces dernier temps à cause de développement industriel dans différents pays, a largement augmenté le taux des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution atmosphérique et le réchauffement climatique. De plus la flambée des cours du brut et les risques du nucléaire ont fait prendre conscience de la nécessité d'une organisation de la société qui respecte l'environnement dans lequel nous vivons.

On considère qu'une énergie est renouvelable, toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable d'où son nom. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants, provoqués principalement par le soleil et la lune. Parmi les énergies renouvelables qui on prit un élan remarquable ces dernière années, le solaire photovoltaïque, et ça grâce aux multiples avantages [Che 07] :

- Offre illimitée de l'énergie photovoltaïque à utiliser. Cela signifie que notre dépendance aux combustibles fossiles peut être réduite.
- L'énergie photovoltaïque est une excellente source d'énergie alternative, car il n'y a pas de pollution générée pendant qu'elle est utilisée.
- Il n'y a pas de coûts liés à l'utilisation de l'énergie photovoltaïque autres que le coût de fabrication des composants, l'achat et l'installation du matériel. Après l'investissement initial, il n'y a pas de coûts supplémentaires associés à son utilisation.
- Les installations photovoltaïques sont facilement modulables. Il est assez facile d'augmenter ou de diminuer la taille de l'installation.
- L'énergie photovoltaïque est silencieuse. Pas de nuisance sonore.
- Une installation photovoltaïque peut s'implanter n'importe où dès qu'il y a un ensoleillement suffisant. C'est donc un réel avantage pour les endroits très isolés qui ont ainsi accès à l'électricité.

En dépit de coût de l'installation qui est relativement important, en revanche l'utilisation de certaines applications rentabilisera le coût dans un temps très réduit. Parmi ces applications on trouve le pompage solaire photovoltaïque. Il représente une solution efficace pour l'approvisionnement en eau dans les régions arides où il y a une pénurie d'eau et dans les zones isolées où il y a absence de réseau électrique. Néanmoins les performances d'une installation de pompage photovoltaïque dépendent de la commande appliquée à ce système.

La commande du système de pompage photovoltaïque fera l'objet de notre travail. Le plan de travail adopté se présente comme suite :

Le premier chapitre fera l'objet d'une recherche bibliographique sur l'énergie photovoltaïque. Nous allons présenter une description des différents éléments constituant le système de pompage photovoltaïque.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation de chaque élément constituant le système à savoir le générateur photovoltaïque, les convertisseurs statiques, le moteur asynchrone à cage d'écureuil et la pompe centrifuge.

Dans le troisième chapitre, nous allons s'intéresser à l'optimisation de la puissance produite par le générateur photovoltaïque. Une étude comparative entre deux méthodes MPPT sera présentée pour tester leurs performances et faire le choix sur la technique à adoptée pour la suite du travail.

Le quatrième chapitre sera consacré au dimensionnement et à la commande du système de pompage photovoltaïque. On s'intéresse dans cette partie au remplacement du régulateur linéaire de vitesse par des régulateurs non linéaires au sein de la commande vectorielle à flux rotorique orienté. Nous allons comparer leurs performances statiques et dynamiques.

Nous terminons par une conclusion générale sur l'ensemble de cette étude et nous proposons quelques perspectives.

Chapitre I

Généralités sur le système du
pompage photovoltaïque

I.1) Introduction :

Pour commencer cette partie nous allons présenter des généralités sur l'énergie solaire, en suite citer les différents type de pompage existant. Dans cette partie nous allons aussi définir les constituants d'un système de pompage photovoltaïque. En fin nous ferons le choix sur chaque composant de système.

I. 2) La source solaire :

Le soleil est une étoile de plasma (matière complètement ionisé) sous forme d'une sphère située à environ 150 millions de kilomètres de la terre composée de l'hydrogène à 80% d'hélium à 19% et 1% d'un mélange de 100 éléments chimiques différent, Son rayon est 109 fois celui de la terre (soit 696 000 km) et sa masse 333 000 fois celle de notre planète. Le Soleil est semblable à une méga central thermonucléaire, dont la température de noyau atteint 15 millions de degrés avec une pression qui avoisine 2.10^{11} bar. Compte tenu des températures et des pressions énormes qui y règnent, toute la matière se trouve à l'état gazeux ou plasma. La couche externe du Soleil, dénommée photosphère, celle qui est visible de la terre, à une température considérablement plus faible qui décroît vers l'extérieur, jusqu'à un palier d'environ 5 800 K [Bes 00], [Rod 06], [Ait 11].

Le soleil transforme chaque seconde, de façon irréversible, 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions de tonnes d'hélium. Le soleil est allège de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement, l'énergie émise par seconde par le Soleil est donc d'environ $3,85.10^{26}$ W, cependant seule une infime partie de cette puissance est reçue par la Terre du fait du faible angle solide sous lequel est vue notre planète à partir du Soleil : environ deux milliards de fois moins, ce qui donne un chiffre qui reste fort respectable (environ $1,9.10^{17}$ W), tel que L'énergie solaire reçue par unité de surface perpendiculaire aux rayons solaires et pour une distance Terre-Soleil égale à sa valeur moyenne, est appelée la constante solaire, qui est estimée à $1\ 367\ \text{W.m}^{-2}$ [Bes 00], [Ait 11].

I.2.1) Spectre de rayonnement solaire :

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de $0,22\ \mu\text{m}$ à $10\ \mu\text{m}$ [Bou 10].

Tableau I.1 : L'éclairement énergétique du rayonnement solaire hors l'atmosphère dans les divers domaines de longueur d'onde [Bes 00].

Régions spectrales	Longueurs d'onde (µm)	Eclairement énergétique (W.m ⁻²)	Pourcentage(%)
Infrarouge	> 0,70	695	50,8
Visible	0,40 à 0,70	559	40,9
UV-A	0,32 à 0,40	86	6,3
UV-B	0,28 à 0,32	21	1,5
UV-C	< 0,28	06	0,4

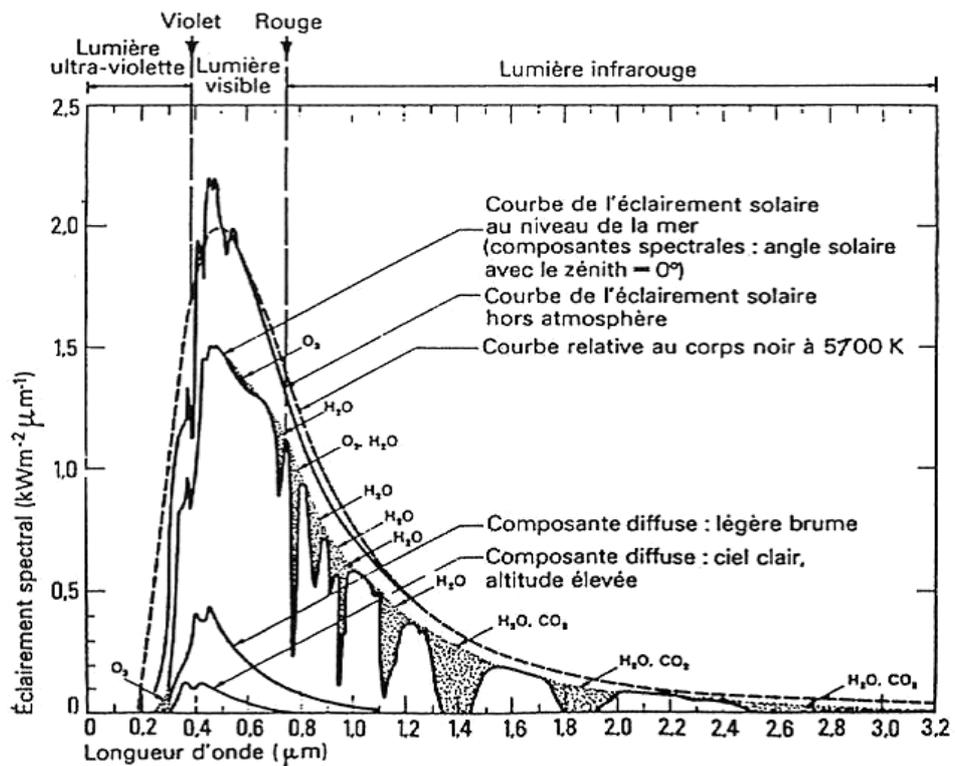


Figure I.1: Spectre de rayonnement solaire [Ric 11].

I.2.2) Les différents types de rayonnement :

I.2.2.1) Le rayonnement direct :

Le rayonnement direct est défini comme étant le rayonnement provenant au sol sous un angle solide limité au seul disque solaire sans aucun intermédiaire et reçu sur une surface normale à l'axe de cet angle solide [Ait 11].

I.2.2.2) Le rayonnement diffus :

La composante diffuse provenant de toute la voûte céleste à l'exception de rayonnement provenant de disque solaire elle est émise par des obstacles (nuage, sol, édifices), donc elle n'a pas d'orientation privilégiée, la part de rayonnement diffus n'est pas négligeable et peut atteindre 50 % du rayonnement globale [Ric 11].

I.2.2.3) L'albédo :

C'est la fraction d'un rayonnement incident diffusée ou réfléchi par un obstacle. Ce terme étant généralement réservé au sol ou aux nuages, c'est une valeur moyenne de leur réflectance pour le rayonnement considéré et pour tous les angles d'incidences possibles [Ric 11].

I.2.2.4) Le rayonnement global :

Le rayonnement solaire arrivant au sol a plusieurs composantes à traiter différemment : une composante directe I , une composante diffuse (D), et l'albédo, le tout formant le rayonnement global (G) [Ric11].

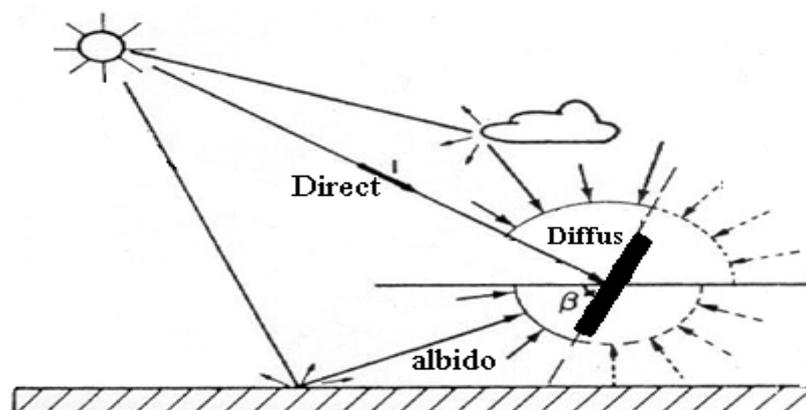


Figure I.2 : Composante diffuse en provenance du sol sur un capteur incliné d'un angle quelconque [Ric 11].

I.3) Les systèmes de pompage photovoltaïque:

Devant la demande croissante d'énergie électrique essentiellement pour les besoins des régions éloignées, désertes et montagneuses; les systèmes photovoltaïques, en particulier les systèmes de pompage d'eau commencent à trouver de grandes applications [Mou 02]. Selon le mode de fonctionnement de l'installation, on distingue deux types de pompage [Mer 10]:

-Le pompage avec stockage électrochimique.

-Le pompage au fil de soleil.

I.3.1) Le pompage avec stockage électrochimique (batteries) :

Très souvent, le pompage photovoltaïque ne correspond pas aux heures d'ensoleillement où nécessite une intensité régulière, ce qui implique un stockage. Cependant, le stockage en photovoltaïque apparaît actuellement comme le maillon faible et le plus coûteux. Lorsqu'un stockage de l'eau avec un réservoir n'est pas possible, l'installation de pompage photovoltaïque peut fonctionner sur batteries [Mer 10].

I.3.2) Le pompage au fil de soleil :

Pour éviter un coût supplémentaire de l'installation, la plus part des systèmes de pompage photovoltaïque fonctionnent au ' fil du soleil ' où le moteur d'entraînement est directement couplé au générateur sans stockage d'énergie (la puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'éclairage). Cet arrangement est bien adapté aux charges non critiques telles que les pompes, qui ne nécessitent pas une opération continue durant toute la journée, aussi, les horaires de cette production ne sont pas compatibles avec les horaires de la majorité des activités agricoles. (Elles commencent généralement à débiter vers 8h et fonctionnent à leur maximum de 11h à 13h et s'arrêtent vers 17h, soit environ 8 heures de fonctionnement par jour) [Mer 10].

Le pompage au fil du soleil n'est pas adapté aux régimes particuliers (applications domestiques à débit faible, applications particulières avec une hauteur manométrique totale (HMT) élevée,...). En revanche, le système au fil du soleil fonctionne parfaitement pour le pompage de l'eau qui est alors directement stockée dans un réservoir.

I.3.3) Les différents composants d'un système de pompage photovoltaïque :

De point de vue conception, le système de pompage illustré dans le schéma ci-dessus est généralement constitué de [Mer10] :

- Un générateur photovoltaïque, constitué de modules photovoltaïques; eux-mêmes constitués de cellules photovoltaïques

- Un équipement électronique de puissance (système de commutation, onduleur, hacheur,etc.).
- Un groupe moto-pompe, qui se décompose en deux parties : le moteur et une pompe généralement centrifuge ou volumétrique.
- Autres éléments peuvent être associés à ce système, et qui dépendent de sa technique de conception, avec stockage ou sans stockage.

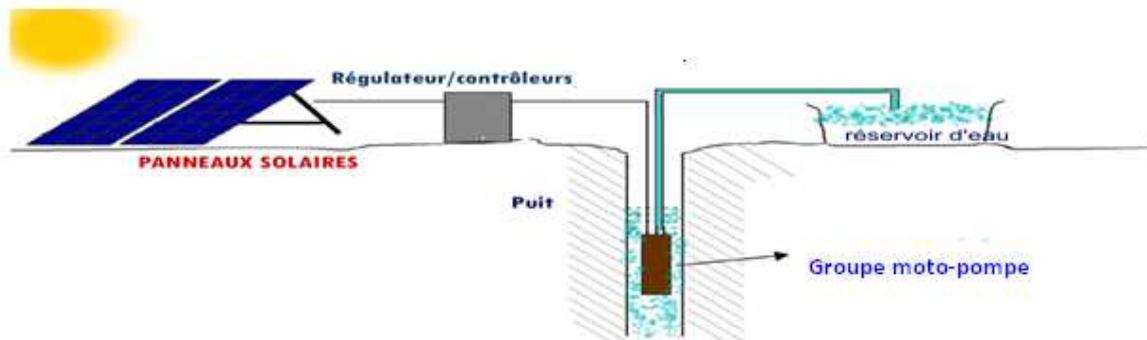


Figure I.3 : Un système de pompage photovoltaïque [Mer10].

I.4) Le générateur photovoltaïque :

Le rayonnement solaire est constitué de photons transportant chacun une énergie E_{ph} qui répend a la relation suivante [Dje 09] :

$$E_{ph} = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (I.1)$$

E_{ph} : L'énergie de photon.

λ : C'est la longueur d'onde.

h : La constante de Planck.

c : La vitesse de la lumière.

Lorsqu'un photon est absorbé, il éjecte un électron d'un niveau d'énergie inférieur, vers un niveau d'énergie plus élevé, créant ainsi une paire électron-trou, de même énergie électrique. Généralement cette paire électron-trou revient à l'équilibre en transformant son énergie électrique en énergie thermique, le matériau chauffe au soleil.

Récupérer toute ou une partie de cette énergie sous forme électrique est justement l'objectif de la conversion photovoltaïque, qui est assurée par un dispositif appelée cellule photovoltaïque.

I.4. 1) La cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque est un composant électronique qui représente l'élément de base dans un générateur photovoltaïque, quand elle est exposée à la lumière elle génère de l'électricité. Cette énergie est obtenue grâce au phénomène physique appelé l'effet photovoltaïque, qui est rapporté par Edmond Becquerel en 1839 [Ber 09] [Deb 09].

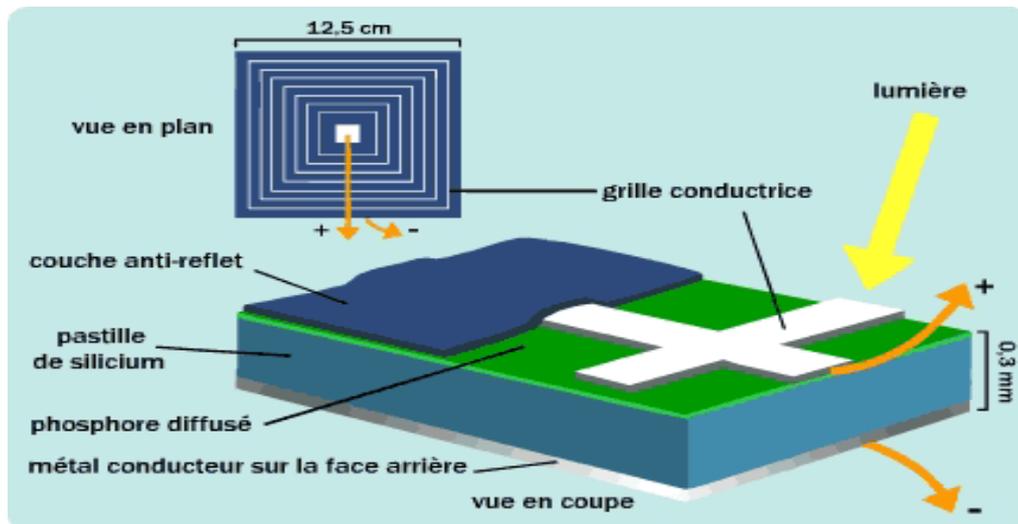


Figure I.4 : Type d'une cellule photovoltaïque [Cel 12].

I.4.1.1) Principe de fonctionnement :

Une cellule solaire est constituée par une jonction PN, lorsque la surface libre est éclairée les photons d'énergies supérieures à la largeur de la bande interdite E_g peuvent exciter des paires électron-trou dans les régions quasi neutres P et diffusent et atteignent la zone de charge d'espace, accélérés par le champ électrique interne, ils traversent la zone de transition. La région N reçoit des électrons et se charge négativement ; la région P accepte des trous et se charge positivement. Si on relie les cotés de la jonction à une charge R_c , un courant I la parcourt et une différence de potentiel apparaît: Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. La tension ainsi générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule [Ber 09], [Ben 09], [Deb 09].

I.4.1.2) Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque :

Une cellule solaire peut être schématisée comme suit [Roy 98], [Ben 09] :

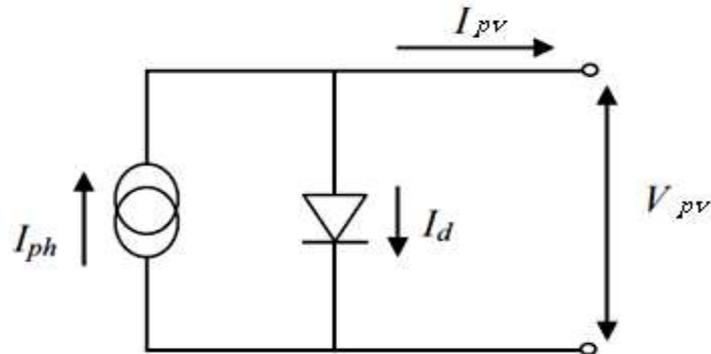


Figure I.5 : Schéma d'une cellule photovoltaïque [Ben 09].

Pour la cellule idéale on peut écrire :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (I.2)$$

I : Courant disponible.

V : Tension aux bornes de la jonction.

I_d : Courant de la jonction.

I_{ph} : Courant produit par la photopile, ce courant est proportionnel au flux lumineux.

$$I_d (V) = I_s \left(e^{\frac{qV}{AkT}} - 1 \right) \quad (I.3)$$

$kT/q = 26 \text{ mV}$ à 300°K (27°C) pour le silicium.

A : Coefficient d'idéalité de la diode.

I_s : Courant de polarisation de la diode.

Cette représentation schématique de la photopile est idéalisée. Une photopile comporte en réalité une résistance série (R_s) et une résistance en dérivation ou shunt (R_{sh}). Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I-V de la photopile :

- la résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.
- la résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction ; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

I.4.2.1) Association en série :

Les tensions des cellules s'additionnent tandis que le courant résultant est le même.

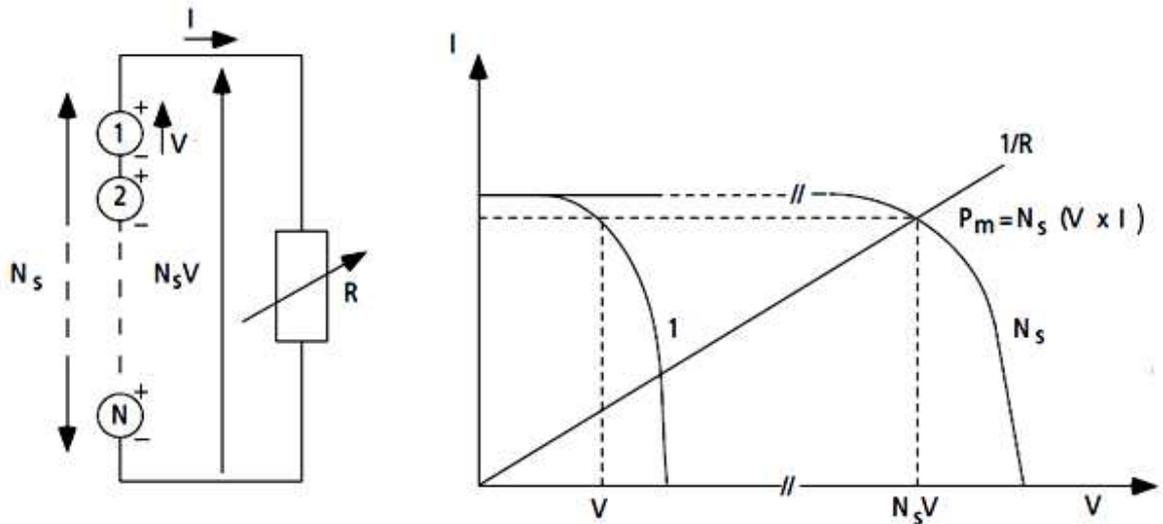


Figure I.6 : Association des cellules identiques en série [Roy 98].

I.4.2.2) Association en parallèle :

Les courants des cellules s'additionnent tandis que la tension résultante est la même.

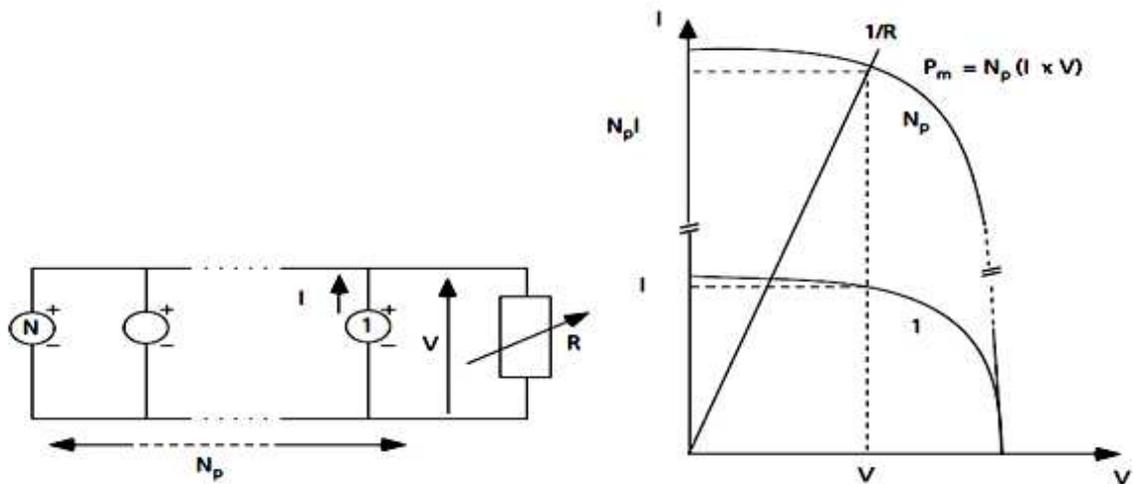


Figure I.7 : Association de cellules identiques en parallèle [Roy 98].

I.4.3) Le module photovoltaïque :

La puissance disponible aux bornes d'une cellule unitaire est très faible. Il est donc nécessaire d'associer en série et en parallèle plusieurs cellules afin d'augmenter la puissance et de rendre la puissance compatible avec l'équipement électrique usuel. De plus, la fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci

sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique. Le module est composé aussi d'un cadre rigide (le plus souvent en aluminium) permettant la fixation, Le tout est appelé un module photovoltaïque [Roy 98], [Ait 11].

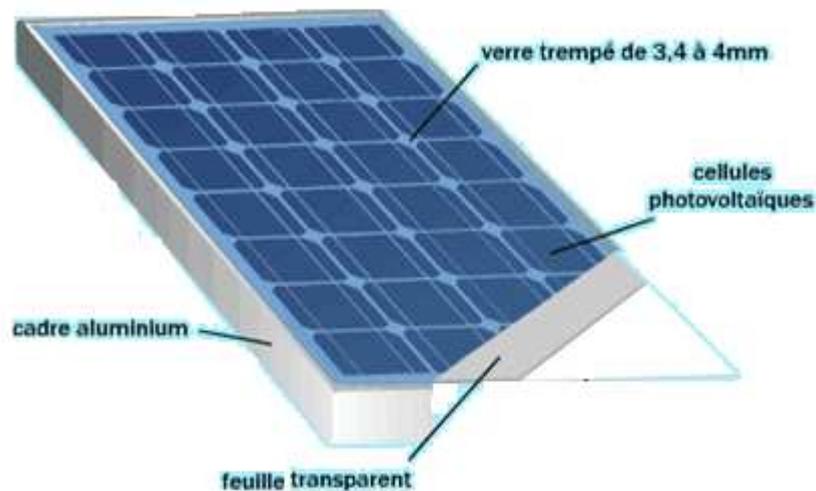


Figure I.8 : Schéma d'un panneau photovoltaïque [Eco 12].

I.4.3.1) Caractéristiques d'un module photovoltaïque [Ben 09], [Roy 98] :

- La puissance de crête, P_m : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m^2).
- La caractéristique I/V : Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- Tension à vide, V_{CO} : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ".
- Courant de court-circuit, I_{CC} : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".
- Point de fonctionnement optimum, (V_m, I_m) : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil.

$$P_{mpp} = V_m \cdot I_m \quad (\text{I.4})$$

- Rendement : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- Facteur de forme : Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule.

$$\circ \text{FF} = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (I.5)$$

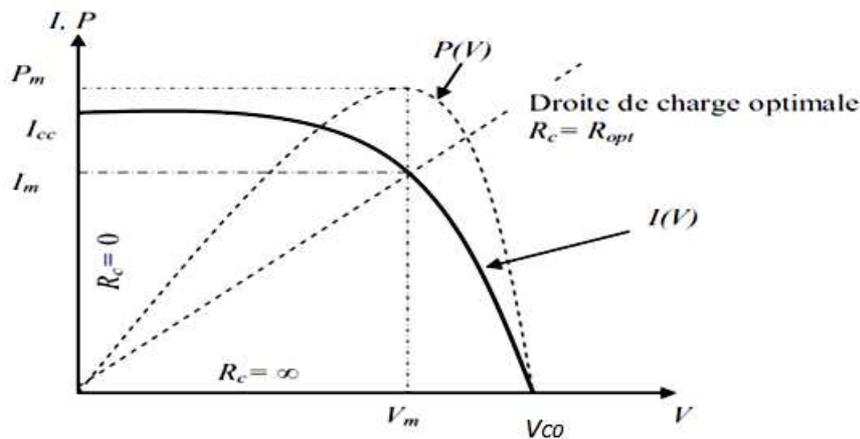


Figure I.9 : Caractéristiques type d'un générateur photovoltaïque.

Les modules PV sont les éléments de base de tout système photovoltaïque. Ils peuvent être branchés en série pour augmenter leur tension d'utilisation et en parallèle pour augmenter leur courant. Cet ensemble est appelé le champ de module photovoltaïque. Pour chaque panneau on peut avoir autant de sorties que de modules, ce qui permet d'effectuer les connections entre les modules pour obtenir une puissance optimale en sortie.

I.4.3.2) Fonctionnement d'un générateur photovoltaïque à sa puissance maximale :

La conception globale d'un système photovoltaïque optimisé est par nature difficile. De coté de la source, pour un générateur photovoltaïque, la production de la puissance varie fortement en fonction de l'éclairement, de la température, et aussi la variation de comportement de la charge en fonction de la consommation, ce qui est souvent difficile à prévoir. En effet, sous ces conditions changeantes, la puissance extractible est variable. Il est donc nécessaire que le système d'exploitation s'adapte pour extraire le plus de puissance possible : c'est ainsi que naît en quelque sorte l'idée de MPPT (Maximum Power Point Tracking). La méthode MPPT est basée sur l'utilisation d'un algorithme de recherche où le maximum de la courbe de puissance est estimé sans interrompre le fonctionnement normal du panneau photovoltaïque, contrairement au contrôle à tension fixe. Le maximum de puissance est atteint par contrôle actif de la puissance, en forçant la dérivée de la puissance par rapport au temps à être nulle. Le MPPT n'est pas basé sur une valeur de référence prédéterminée mais il s'agit d'une recherche de la valeur de référence pour atteindre le maximum de la puissance sur la caractéristique $I=f(V)$. A noter que le MPPT joue un rôle très important parce qu'il maximise le

rendement et il réduit au maximum le coût. La MPPT peut extraire plus de 97% de puissance photovoltaïque une fois correctement optimisé.

Parmi les solutions MPPT actuellement disponibles sur le marché : Méthode de perturbation et observation (P&O), Algorithme d'incrémentation de la conductance et Approche Logique Floue...etc. [Ber 09], [Meh 07].

I.5) Convertisseurs statiques :

Un convertisseur statique est un montage utilisant des interrupteurs à semi-conducteurs permettant par une commande convenable de ces derniers de régler un transfert d'énergie entre une source d'entrée et une source de sortie [Jmr 12].

I.5.1) Convertisseur DC-DC (hacheur) :

Le hacheur est un convertisseur continu- continu mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs commandés et qui permet de modifier la valeur de la tension d'une source de tension continue avec un rendement élevé [Meh 07].

I.5.1.1) Hacheur parallèle survolteur :

On utilise un hacheur parallèle lorsqu'on désire augmenter la tension disponible d'une source continue (les panneaux, les batteries). Sa commande à l'amorçage et au blocage est basée sur un interrupteur commandé (IGBT, MOSFET, Bipolaire) et une diode [Hac12].

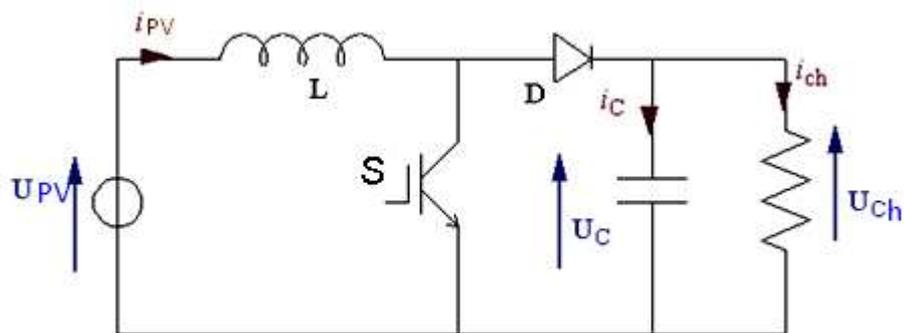


Figure I.10 : Schéma d'un hacheur parallèle [Meh 07].

I.5.1.2) Hacheur série dévolteur :

Il délivre une tension à la sortie plus basse que celle de l'entrée (panneau ou batteries), sa structure demande un interrupteur à amorçage et à blocage commandé (transistor bipolaire, IGBT ...) et une diode [Hac 12].

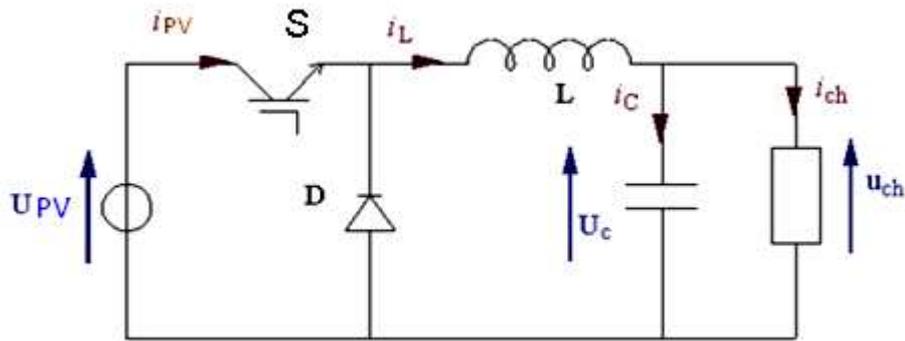


Figure I.11 : Schéma d'un hacheur série [Meh 07].

I.5.2) Le convertisseur DC/AC [Roy 98], [Mok 11] :

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant continu, produit par le générateur solaire, en courant alternatif monophasé ou triphasé. Un onduleur est habituellement conçu pour fonctionner sur une plage assez réduite. Il est très efficace pour des caractéristiques d'entrée et de sortie fixe. Il existe plusieurs types d'onduleurs DC/AC selon la qualité du signal de sortie :

- Onduleur à onde sinusoïdale modifiée.
- Onduleur à modulation de largeur d'impulsion (MLI).

L'onduleur à onde sinusoïdale modifiée peut supporter de fortes surcharges et sa distorsion harmonique est relativement faible, de sorte qu'il n'introduit que peu de pertes par effet Joule susceptibles de causer l'échauffement des moteurs. Il est souvent employé avec des petits systèmes de pompage.

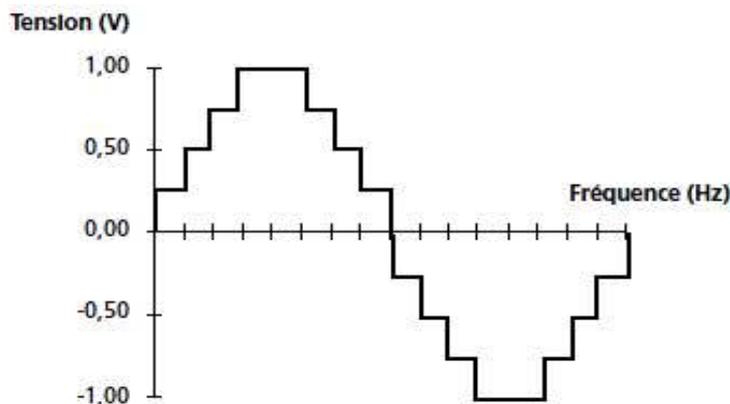


Figure I.12 : Caractéristique d'un onduleur à onde sinusoïdale modifiée [Roy 98].

L'onduleur à modulation de largeur d'impulsion utilise des commutateurs électroniques rapides pour varier la largeur d'impulsion. En utilisant un filtre à la sortie, l'onde sinusoïdale peut être reconstruite. Ces onduleurs relativement peu coûteux sont très efficaces, fonctionnant à près de 90%-95% de rendement. Ils sont employés par la plupart des systèmes de pompage à courant alternatif.

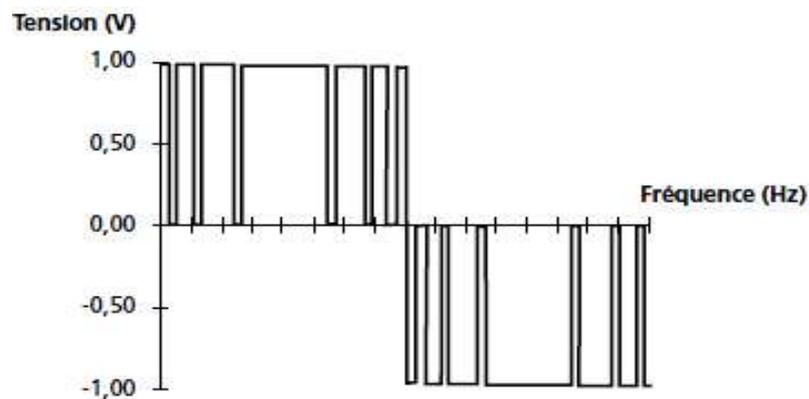


Figure I.13 : Caractéristique d'un onduleur à modulation de largeur d'impulsion (MLI)

[Roy 98].

I.6) Les moteurs d'entraînement :

Pour que les pompes fonctionnent elles ont besoin d'une énergie mécanique qui est fournie par le biais d'un moteur qui fait convertir l'énergie électrique en énergie mécanique, ces moteurs peuvent être à courant continu ou alternatif.

I.6.1) Le moteur synchrone :

Le terme de moteur synchrone regroupe toutes les moteurs dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant, ils ont des emplois spécifiques, par exemple là où une rotation uniforme est primordiale. Il présente des caractéristiques remarquables, qui sont, la vitesse constante quelque soit la charge. Il peut fournir de la puissance réactive, ce qui le rend capable d'améliorer le facteur de puissance d'une installation. Il peut supporter des chutes de tension relativement importantes et ceci grâce aux possibilités de surexcitation sans décrocher. Par contre l'inconvénient du moteur synchrone est la difficulté lors de son démarrage [Cha 2], [Meh 07].

I.6.2) Le moteur asynchrone à cage d'écureuil :

Les moteurs asynchrones sont très utilisés dans les applications de grande série car ils sont, a priori économiques (fabrication simple) pour une longue durée de vie, souvent limitée par les paliers. Ils sont évidemment intéressants lorsqu'ils peuvent fonctionner directement à partir du réseau alternatif. L'alimentation monophasée étant la seule souvent disponible et le moteur asynchrone monophasé ayant un couple de démarrage nul, il est nécessaire de trouver des solutions pour réaliser des moteurs asynchrones sensiblement diphasés alimentés en monophasé. On rencontre deux familles de solutions : celles à bagues de déphasage et celles diphasées à condensateur de déphasage. Dans tous les cas, le circuit magnétique est feuilleté (souvent des tôles de 0,5 mm ou plus), la cage est coulée en aluminium (sauf dans les moteurs de pompes à rotor immergé où elle est en cuivre), les barres sont souvent inclinées ou en chevron pour réduire les vibrations dues aux variations de réluctance locale (en chevron pour supprimer l'effort axial résultant de l'inclinaison. Comme leur couple de démarrage est assez faible, ces moteurs sont généralement utilisés dans des ventilateurs et des pompes [Mul 00].

I.6.3) Les moteurs à courant continu :

Leurs larges possibilités de réglage de vitesse ont favorisé leur utilisation en moteur dans les applications où cette caractéristique est importante, surtout depuis le développement des semi-conducteurs de puissance (transistors et thyristors l'emploi des moteurs à courant continu est sans équivalent dans le domaine des très faibles puissances. Il est en particulier presque obligatoire dans les équipements des automobiles (essuie-glaces, ventilateurs, lève-vitres, démarreurs,...). Dans le domaine industriel, on trouve des moteurs à courant continu de puissance moyenne dans les applications à vitesse variable. En ce qui concerne les fortes puissances, les limitations technologiques liées à l'alimentation en puissance électrique du rotor font qu'ils sont maintenant supplantés par les moteurs synchrones. [Cha 2], [Cha 4].

I.7) Les différents types de pompes :

Les pompes sont des appareils qui génèrent une différence de pression entre les tubulures d'entrée et de sortie. Suivant les conditions d'utilisation, ces machines communiquent au fluide, de l'énergie potentielle (par accroissement de la pression en aval), soit de l'énergie cinétique par la mise en mouvement du fluide. Ainsi, on peut vouloir augmenter le débit (accroissement d'énergie cinétique) ou/et augmenter la pression (accroissement d'énergie potentielle) pour des fluides gazeux, liquides, visqueux, très visqueux, C'est pourquoi la diversité des pompes est très grande.

Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement, soit de type volumétrique ou centrifuge, et aussi selon l'emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompée: la pompe à aspiration et la pompe à refoulement [Cha 5], [Roy 98].

Les pompes à aspiration doivent être amorcées, c'est-à-dire que la section en amont de la pompe doit être remplie d'eau pour amorcer l'aspiration d'eau. La pompe à refoulement est immergée dans l'eau et aussi son moteur (pompe monobloc), soit le moteur en surface. La transmission de puissance se fait alors par un long arbre reliant la pompe au moteur. Dans les deux cas, une conduite de refoulement après la pompe permet des élévations selon la puissance du moteur.

I.7.1) Les pompes centrifuges :

Les pompes centrifuges font partie de la famille des turbopompes, la principale caractéristique de la pompe centrifuge consiste à convertir l'énergie mécanique de moteur d'abord en énergie cinétique puis en énergie de pression [Meh 07], [Wat 12].

I.7.1.1) Principe de fonctionnement :

Une pompe centrifuge est constituée par [Ait 11]:

- une roue à aubes tournant autour de son axe
- un distributeur dans l'axe de la roue
- un collecteur de section croissante, en forme de spirale appelée volute.

Le liquide arrive dans l'axe de l'appareil par le distributeur et la force centrifuge le projette vers l'extérieur de la turbine. Il acquiert une grande énergie cinétique qui se transforme en énergie de pression dans le collecteur où la section est croissante. L'utilisation d'un diffuseur (roue à aubes fixe) à la périphérie de la roue mobile permet une diminution de la perte d'énergie.

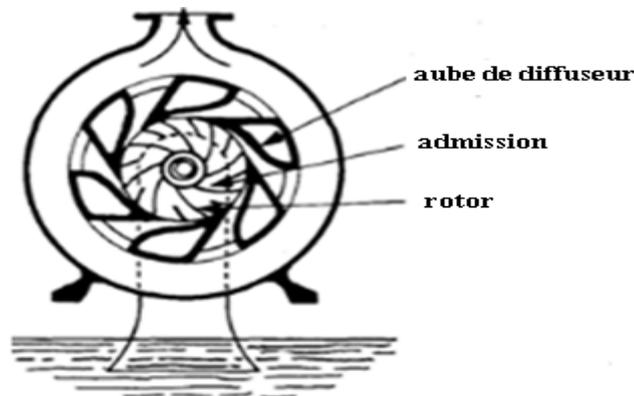


Figure I.14 : Illustration d'une centrifuge à turbine [Nia 12].

I.7.1 .2) Caractéristiques d'une pompe centrifuge [Mok 11] :

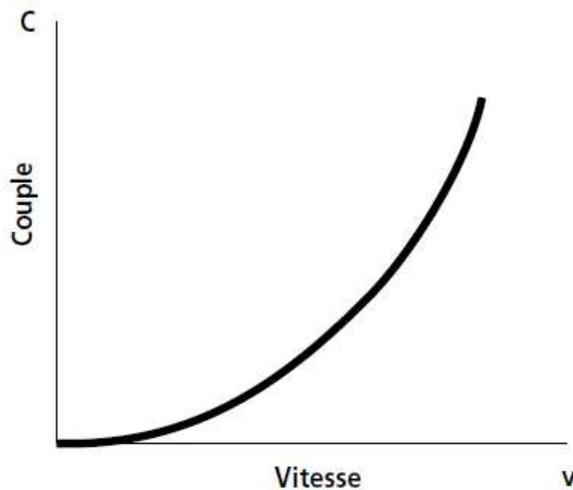


Figure I.15.a : Le couple augmente très rapidement en fonction de la vitesse.

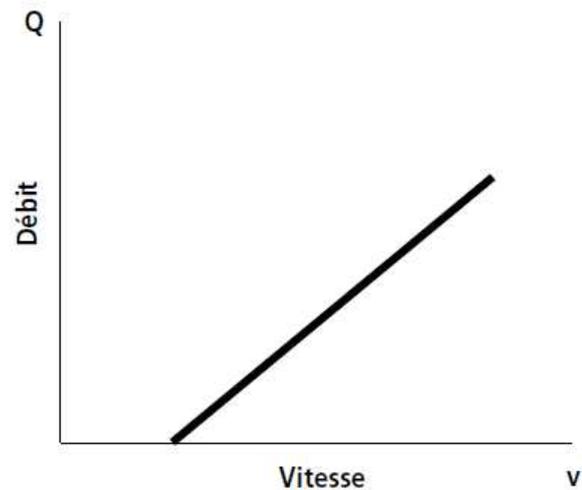


Figure I.15.b : Le débit est proportionnel à la vitesse, toutefois il faut une vitesse minimale à une HMT donnée pour obtenir le débit.

I.7.2) Les pompes volumétriques :

Ce sont les pompes à piston, à diaphragme, à noyau plongeur...et les pompes rotatives telles les pompes à vis, à engrenages, à palettes, péristaltiques. Elles transmettent l'énergie cinétique du moteur en mouvement de va-et-vient permettant au fluide de vaincre la gravité par variations successives d'un volume raccordé alternativement à l'orifice d'aspiration et à l'orifice de refoulement [Cha 5], [Nia 12].

I.7.2.1) Principe de fonctionnement :

Une pompe volumétrique se compose d'un corps de pompe parfaitement clos à l'intérieur duquel se déplace un élément mobile rigoureusement ajusté. Leur fonctionnement repose sur l'exécution d'un mouvement cyclique, un volume déterminé de liquide pénètre dans un compartiment avant d'être refoulé à la fin. Ce mouvement permet le déplacement du liquide entre l'orifice d'aspiration et l'orifice de refoulement. La particularité des pompes volumétriques c'est leur étanchéité est ça grâce à une séparation interne entre l'orifice d'admission et l'orifice de refoulement ce qui permet de prévoir le débit d'une pompe volumétrique avec exactitude [Ait 11], [Mec 12].

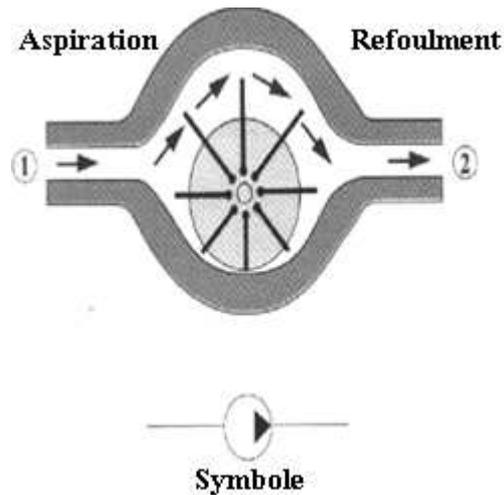


Figure I.16: Pompe volumétrique rotative à palette [Nia 12].

I.7.2.2) Caractéristiques d'une pompe volumétrique [Mok 11] :

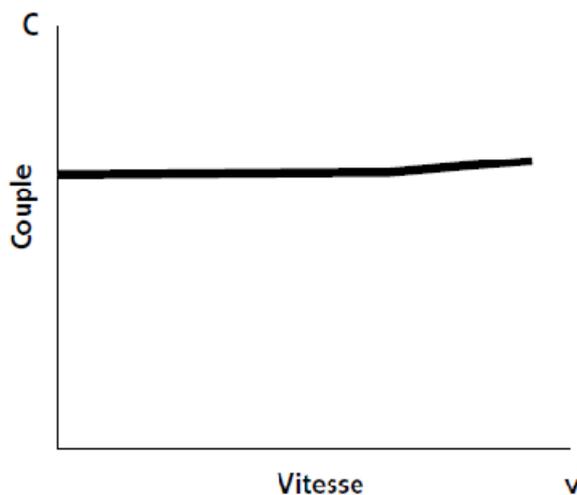


Figure I. 17.a : Le couple est pratiquement constant en fonction de la vitesse.

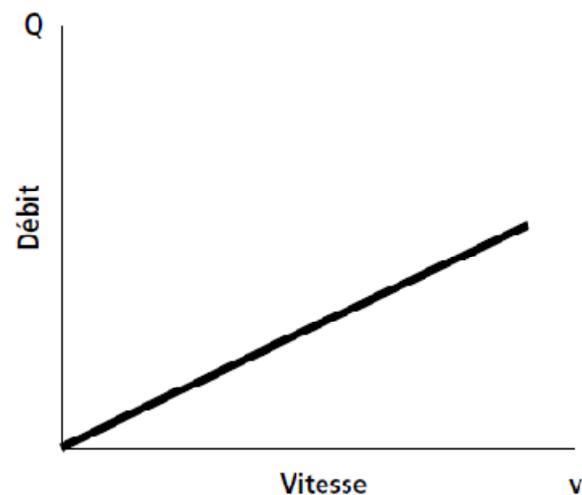


Figure I.17.b : Le débit est proportionnel à la vitesse.

I.8) Choix de la structure à étudié :

Compte tenu du coût additionnel du système avec batteries, des problèmes de maintenance des batteries et l'obligation de les remplacer après 3 à 5 ans d'usage, la solution au fil du soleil est présentement préférée.

Les systèmes alimentés par le photovoltaïque utilisent souvent plusieurs panneaux en série afin de disposer d'un niveau de tension suffisamment élevé. Un hacheur survolteur permet d'augmenter la tension fournie par les modules photovoltaïques et ainsi diminuer le nombre de modules photovoltaïques nécessaires pour atteindre le niveau de tension désiré.

Le système centrifuge présente d'innombrables avantages par rapport aux autres types de pompage : il a un volume moins encombrant, un service relativement silencieux et une mise en

œuvre facile avec tous les types de moteurs électriques disponibles sur le marché. Il s'adapte aussi aisément à tous les problèmes de traitement des liquides puisqu'en l'adaptant aux conditions d'utilisation particulières, il est capable de répondre aux exigences spécifiques des installations. Tous ces avantages nous emmènent à choisir comme pompe pour notre système de pompage, la pompe centrifuge. Pour les moteurs notre choix s'est porté sur le moteur asynchrone car il est mieux adapté pour le système de pompage photovoltaïque bien qu'il est standard, qu'il a un coût faible et ne demande pas assez d'entretien. Afin d'adapter la tension à la sortie du générateur photovoltaïque et la tension d'alimentation de la machine asynchrone on opte pour un hacheur survolteur.

Des travaux ont été réalisés sur le pompage photovoltaïque. Dans ce qui suit, on va présenter certains d'entre eux:

Analyse de la conception et simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque (PV) adapté par une commande analogique (commande MPPT) assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV [Kas 07].

Dimensionnement de systèmes de pompage photovoltaïque par une méthode analytique et une méthode graphique. Elles sont basées essentiellement sur l'évaluation des besoins d'eau, le calcul de l'énergie hydraulique nécessaire, la détermination de l'énergie solaire disponible et le choix des composants [Had 05].

Modélisation d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil qui comprend un générateur PV avec un convertisseur électronique de puissance permettant une poursuite du point de fonctionnement optimum, l'ensemble alimentant un moteur à courant continu accouplé à une pompe centrifuge [Che 07].

Etude des performances d'une structure de pompage constituée par un moteur asynchrone accouplé à une pompe centrifuge. Deux stratégies de commande sont mises en œuvre, la première est basée sur la régulation du courant photovoltaïque qui assure un fonctionnement du générateur photovoltaïque avec sa puissance maximale via la commande d'un hacheur survolteur. La deuxième stratégie utilise la commande vectorielle par orientation du flux rotorique pour piloter le fonctionnement du moteur asynchrone entraînant la pompe centrifuge [Man 08].

Etude de plusieurs méthodes pour la recherche du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque qui permet d'augmenter le rendement globale électrique d'un système photovoltaïque [Dje 09].

Comparaison entre le système de couplage, direct et avec MPPT. Une étude technico-économique a été faite pour prévoir le cout du système à installer [Bou 10].

Modélisation d'un système de pompage photovoltaïque et l'évolution des émissions du CO₂ le modèle présenté est basé sur une relation directe entre le débit (Q) et la puissance (P) [Oul 12].

I.9) Conclusion :

Cette recherche bibliographique fait l'objet d'une prélude, où nous avons présenté des généralités sur le système de pompage photovoltaïque, ainsi les différentes constituants de ce système, elle nous a permis aussi de faire le choix sur chacun des composants de notre système de pompage photovoltaïque. Cette partie s'avère nécessaire pour la suite de notre travail. La modélisation de chaque constituant du système de pompage photovoltaïque, ainsi la simulation du système global sous l'environnement Matlab /Simulink fera l'objet des chapitres suivants.

Chapitre II

Modélisation de la chaîne de
système de pompage
photovoltaïque

II.1) Introduction :

Après avoir défini les différents composants du système de pompage photovoltaïque, nous procédons à la modélisation de ces éléments dans ce présent chapitre. Cette modélisation consiste à établir les équations mathématiques qui régissent le fonctionnement des éléments de système afin de les simuler sous le logiciel (Matlab/simulink).

II.2) Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque :

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles du générateur photovoltaïque qui diffèrent entre eux par la procédure et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant du générateur photovoltaïque.

Parmi ces modèles [Ber 09] on recense :

- Le modèle idéalisé : C'est le modèle le plus simplifié, la valeur de la résistance R_{sh} étant généralement grande, elle est donc souvent supposée infinie (et donc négligée), la valeur de la résistance R_s étant généralement petite elle supposée être nulle ($R_s=0$).
- Le modèle à une diode : Pour tenir compte des chutes de tension dans les zones P et N, on doit ajouter dans le modèle idéalisé une résistance série (équivalente) R_s et pour le courant de fuite, une résistance parallèle (équivalente) R_{sh} .

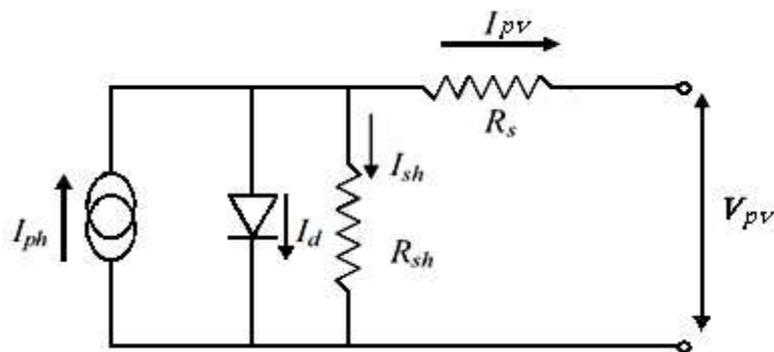


Figure II.1: Modèle d'un générateur photovoltaïque à une diode [Ben 09].

D'autre part, des modèles plus complexes voient aussi le jour :

- Le modèle à deux diodes: une diode supplémentaire mise en parallèle avec l'autre diode dans le schéma de la figure (II.1) permettant de reproduire les effets chimiques de recombinaison des électrons.
- Le modèle à trois diodes : la troisième diode incluant dans le modèle à deux diode fait reprendre les effets non pris en compte dans les autres modèles (ex : courant de fuite liés aux diodes).

Par manque de précision pour le modèle idéalisé et la complexité des autres modèles plus précisés, le modèle à une diode offre un bon compromis entre simplicité et précision [Ber 09], il apparaît très adapté pour notre étude.

Le modèle que nous avons choisi est utilisé dans [Nik 03], c'est un modèle à cinq paramètres (I_{cc} , I_m , V_{co} , V_m , R_s), qui tient compte de la variation du courant et de la tension du panneau photovoltaïque en fonction des conditions climatique.

D'après la figure (II.1), le courant (I_{pv}) de générateur photovoltaïque sous les conditions standards de fonctionnement en négligeant R_{sh} est donné par l'équation (II.1) :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \tag{II.1}$$

I_{ph} : Représente le photo-courant, il dépend de l'irradiation et de la température.

I_d : Courant de polarisation de la jonction PN.

L'expression (II.1) peut s'écrire de cette manière :

$$I_{pv} = I_{cc} \left[1 - K_1 \left(\exp(K_2 \cdot V_{pv}^m - 1) \right) \right] \tag{II.2}$$

Où K_1 , K_2 et m sont des coefficients donnés par [Nik 03] :

$$K_1 = 0.01175$$

$$K_2 = \frac{K_4}{V_{co}^m} \tag{II.3}$$

$$m = \frac{\ln\left[\frac{K_3}{K_4}\right]}{\ln\left[\frac{V_{mpp}}{V_{co}}\right]} \tag{II.4}$$

De même pour K_3 et K_4 :

$$K_3 = \ln \left[\frac{I_{cc} \cdot (1 + K_1) - I_{mpp}}{K_1 \cdot I_{cc}} \right] \tag{II.5}$$

$$K_4 = \ln \left[\frac{1 + K_1}{K_1} \right] \tag{II.6}$$

Tel que :

I_m : Courant ou point de puissance maximale appelé aussi courant optimum.

V_m : Tension ou point de puissance maximale appelé aussi tension optimal.

I_{cc} : Courant de court –circuit.

V_{co} : Tension en circuit ouvert.

Il est à noter que l'équation (II.1) n'est pas valable que pour un niveau standards de fonctionnement d'insolation G et de température T ($G = 1000 \text{ w/m}^2$, $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$). quand d'insolation et la température varient, les paramètres du module photovoltaïque de tableau dans l'annexe changent suivant ces équations :

$$\Delta T_c = T_c - T_{stc} \quad (\text{II.7})$$

$$\Delta I_{pv} = \alpha_{CC} \left(\frac{G}{G_{stc}} \right) \cdot \Delta T_c + \left(\frac{G}{G_{stc}} \right) \cdot I_{cc,stc} \quad (\text{II.8})$$

$$\Delta V_{pv} = -\beta_{co} \cdot \Delta T_c - R_s \cdot \Delta I_{pv} \quad (\text{II.9})$$

G_{stc} et G : Représentent respectivement, le niveau d'insolation dans les conditions standards de fonctionnement et dans les conditions quelconques.

T_{stc} et T_c : Représentent respectivement, la température dans les conditions standards de fonctionnement et dans les conditions quelconques.

ΔT_c : Représente la variation de la température.

ΔI_{pv} : Représente la variation de courant par apport à l'insolation et à la température.

ΔV_{pv} : Représente la variation de la tension par apport à l'insolation et à la température.

α_{CC} : Représente le coefficient d'incrémentation du courant I_{cc} quand la temperature de surface augmente de un degré Celsius ($A/^\circ\text{C}$) dans les conditions standards de fonctionnements.

β_{co} : Représente le coefficient d'incrémentation de la tension V_{oc} quand la température de surface augmente de un degré Celsius ($A/^\circ\text{C}$) dans les conditions standards de fonctionnements.

Les nouvelles valeurs de la tension et de courant photovoltaïque sont donnés par :

$$V_{pv/nouv} = V_{pv,stc} + \Delta V_{pv} \quad (\text{II.10})$$

$$I_{pv/nouv} = I_{ph,stc} + \Delta I_{pv} \quad (\text{II.11})$$

Les constructeurs des panneaux photovoltaïque fournissent les paramètres (I_{cc} , I_m , V_{co} , V_m) du module sous les conditions standards de fonctionnement, le tableau représenté dans l'annexe montre les donnée d'un panneau solaire de type SIEMENS SM 110-24.

II.3) Influence de la variation des conditions métrologiques sur les paramètres du panneau photovoltaïque :

A. Influence de l'irradiation(G) :

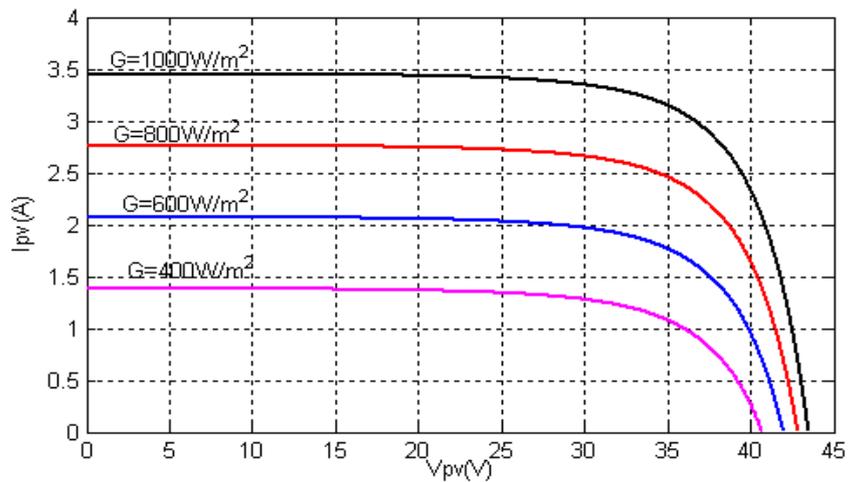


Figure II.2.a : Caractéristique courant-tension du module photovoltaïque pour différents niveaux d'irradiations ($G=400, 600, 800, 1000 \text{ W/m}^2$) et $T_c=25^\circ\text{C}$.

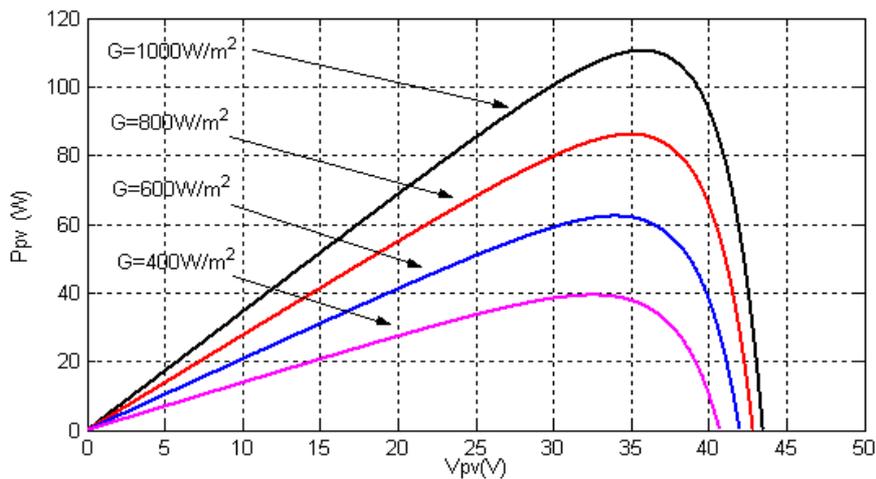


Figure II.2.b : Caractéristique puissance-tension du module photovoltaïque pour différents niveaux d'irradiations ($G=400, 600, 800, 1000 \text{ W/m}^2$) et $T_c=25^\circ\text{C}$.

Les figures (II.2) représentent les caractéristiques d'un panneau photovoltaïque vis-à-vis de des variations éclairément à une température constante. On remarque que la tension ne varie que très peu en fonction de l'éclairement, contrairement au courant et la puissance qui augmente fortement avec l'éclairement.

B. Influence de la température (T_c) :

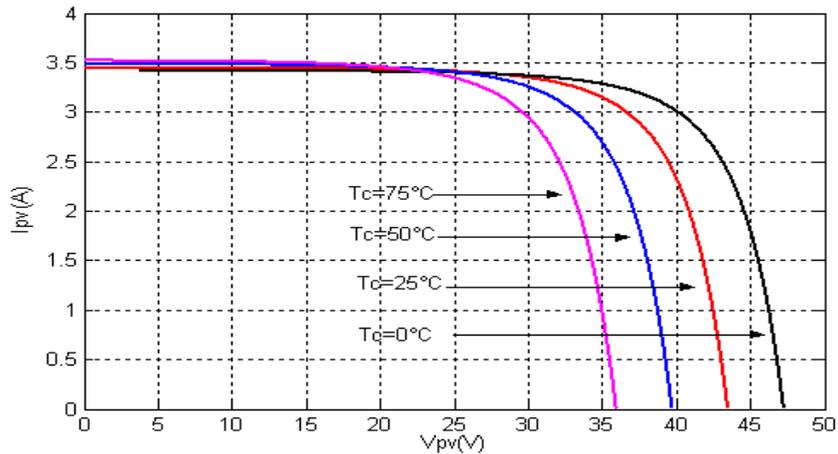


Figure II.3.a : Caractéristique courant-tension du module photovoltaïque pour une variation de température ($T_c=0, 25, 50,75^\circ\text{C}$) et $G=1000\text{W/m}^2$.

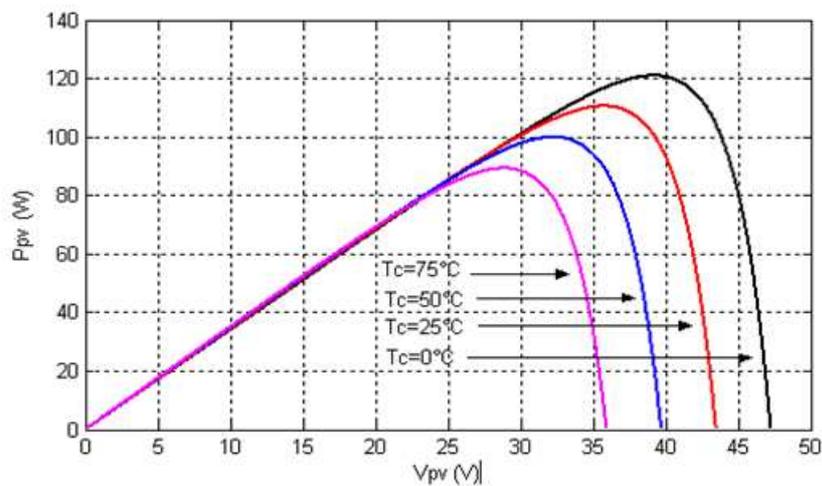


Figure II.3.b : Caractéristique puissance-tension du module photovoltaïque pour une variation de température ($T_c=0,25, 50,75^\circ\text{C}$) et $G=1000\text{W/m}^2$.

Les figures (II.3) représentent les caractéristiques d'un panneau photovoltaïque vis-à-vis de la variation de la température pour une irradiation constante. Lorsque la température augmente, la tension et la puissance diminue contrairement au courant qui augmente très légèrement.

II.4) Modalisation du hacheur survolteur [Bel 10] :

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

D'après le schéma du hacheur survolteur figure (I.12) :

Lorsque S est fermé:

$$V_{pv} = L \frac{dI_{pv}}{dt} \quad (\text{II.12})$$

$$0 = C \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{ch} \quad (\text{II.13})$$

- Lorsque S est ouvert:

$$V_{pv} = L \frac{dI_{pv}}{dt} + V_{dc} \quad (\text{II.14})$$

$$I_{pv} = C \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{ch} \quad (\text{II.15})$$

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

$$V_{pv} = L \frac{dI_{pv}}{dt} + V_{dc}(1 - u) \quad (\text{II.16})$$

$$(1 - u)I_{pv} = C \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{ch} \quad (\text{II.17})$$

Ce modèle est directement utilisable pour réaliser une simulation du convertisseur, dans un environnement de type Matlab simulink.

Le modèle instantané fait apparaître un comportement non linéaire du convertisseur par l'existence de produits entre la commande u et les variables d'état V_{dc} et I_{pv} . Par ailleurs il convient de signaler qu'en remplaçant la variable u par sa valeur moyenne sur une période de

découpage $T_d = 1/f$, c'est-à-dire le rapport cyclique ($\alpha = T_{on} / T_d$) nous pouvons obtenir le modèle aux valeurs moyennes.

Soit :

$$\frac{dI_{pv}}{dt} = -(1 - \alpha) \frac{V_{dc}}{L} + \frac{V_{pv}}{L} \tag{II.18}$$

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = (1 - \alpha) \frac{I_{pv}}{C} - \frac{V_{dc}}{RC} \tag{II.19}$$

II.5) Modélisation de l'onduleur de tension [Bou 09] :

Pour modéliser l'onduleur de tension, Figure (II.4), on considère son alimentation comme une source parfaite, supposée être constituée de deux générateurs de f.é.m. égale à $U_0/2$ connectés entre eux par un point noté n_0 .

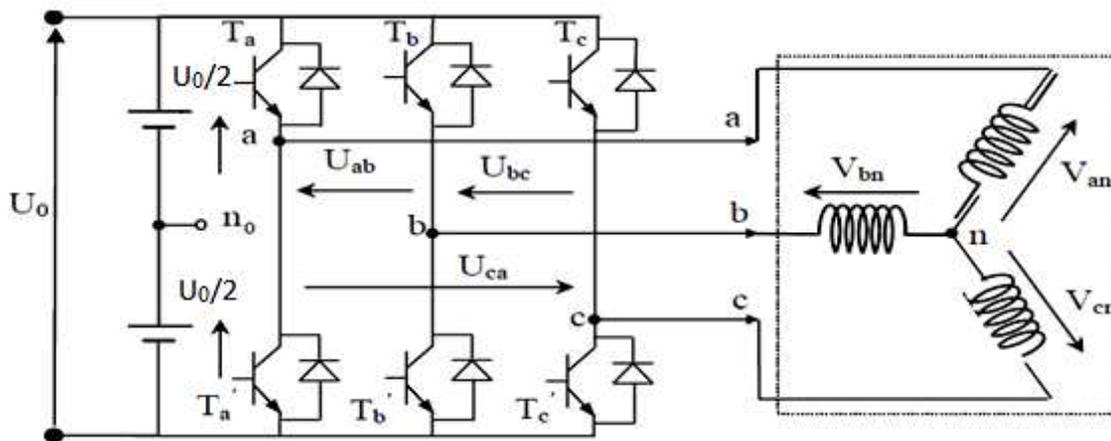


Figure II.4 : Schéma de l'onduleur triphasé à deux niveaux.

La machine a été modélisée à partir des tensions simples que nous notons V_{an} , V_{bn} et V_{cn} . L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques S_i . On appelle T_i et T_i' les transistors (supposés être des interrupteurs idéals) :

Si $S_i = 1$, alors T_i est passant et T_i' est ouvert,

Si $S_i = 0$, alors T_i est ouvert et T_i' est passant.

Les tensions composées sont obtenues à partir des sorties de l'onduleur et les tensions simples des phases de la charge issues des tensions composées ont une somme nulle, donc :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an0} - V_{bn0} \\ U_{bc} = V_{bn0} - V_{cn0} \\ U_{ca} = V_{cn0} - V_{an0} \end{cases} \tag{II.20}$$

$$\begin{cases} V_{an} = (1/3)[U_{ab} - U_{ca}] \\ V_{bn} = (1/3)[U_{bc} - U_{ab}] \\ V_{cn} = (1/3)[U_{ca} - U_{bc}] \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

Elles peuvent s'écrire à partir des tensions de sorties de l'onduleur en introduisant la tension du neutre de la charge par rapport au point de référence n_0 .

$$\begin{cases} V_{an} + V_{nn_0} = V_{an_0} \\ V_{bn} + V_{nn_0} = V_{bn_0} \\ V_{cn} + V_{nn_0} = V_{cn_0} \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

Donc, on peut déduire que :

$$V_{nn_0} = \frac{1}{3}[V_{an_0} + V_{bn_0} + V_{cn_0}] \quad (\text{II.23})$$

L'état des interrupteurs supposés parfaits S_i ($i=a, b, c$) on a donc :

$$\begin{cases} V_{an_0} = (S_a - 0,5)U_0 \\ V_{bn_0} = (S_b - 0,5)U_0 \\ V_{cn_0} = (S_c - 0,5)U_0 \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

En remplaçant (II.22) dans (II.24) on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{an_0} - \frac{1}{3}V_{bn_0} + \frac{1}{3}V_{cn_0} \\ V_{bn} = \frac{1}{3}V_{an_0} - \frac{2}{3}V_{bn_0} + \frac{1}{3}V_{cn_0} \\ V_{cn} = \frac{1}{3}V_{an_0} - \frac{1}{3}V_{bn_0} + \frac{2}{3}V_{cn_0} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

En remplaçant (II.24) dans (II.25), on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}U_0 \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

Il suffit d'appliquer la transformation de Park pour passer d'un système triphasé au système biphasé.

II.6) Modélisation de la machine asynchrone :

L'étude du fonctionnement de la machine asynchrone, en moteur comme en générateur, nécessite de disposer d'un modèle mathématique. Ce modèle mathématique est un mode de représentation de la machine réelle sous simulation, permettant de restituer une image de ce que l'on peut observer expérimentalement, elle apporte une aide appréciable dans la résolution des problèmes techniques [Bou 09] [Idj10].

La modélisation analytique classique de la machine asynchrone se fait sous les hypothèses simplificatrices résumées ci-dessous [Stu 00] [Bag 05].

II.6.1) Hypothèses de travail :

Le stator de moteur asynchrone comporte trois enroulement supposés couplés en étoile sans neutre. Pour le rotor lisse qu'il soit à cage ou bobiné peut être modalisé par trois enroulements identiques comme celui de stator et décalés dans l'espace de 120° . Les enroulements rotoriques sont en court-circuit, et la tension à leur bornes est nulle. Les indices s et r sont relatifs respectivement au stator et au rotor.

Pour la mise en équation, nous supposons aussi que le bobinage est réparti de manière à donner une f.é.m. sinusoïdale quand il est alimenté par des courants sinusoïdaux. Nous supposons également que nous travaillons en régime non saturé. Nous négligeons le phénomène d'hystérésis, les variations des caractéristiques dues à l'échauffement, les courants de Foucault et l'effet de peau. Enfin, le régime homopolaire est nul puisque le neutre n'est pas relié.

Ces choix signifient entre autres que :

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

Les équations matricielles pour les bobinages statoriques et rotoriques s'écrivent sous la forme suivante [Idj10] :

$$[v_{sabc}] = [R_s] \cdot [i_{sabc}] + \frac{d[\Phi_{sabc}]}{dt} \quad (\text{II.27})$$

$$[v_{rabc}] = [R_r] \cdot [i_{rabc}] + \frac{d[\Phi_{rabc}]}{dt} = 0 \quad (\text{II.28})$$

Où R est la résistance de bobinage, i, v et Φ représente respectivement le courant dans le bobinage, la tension à ses bornes et le flux le traversant.

Pour le couple électromagnétique il s'écrit :

$$T_{em} = \frac{1}{2} [i_{sabc}, i_{rabc}]^t \cdot \left(\frac{d}{d\theta} [\Phi_{sabc}, \Phi_{rabc}] \right) \quad (\text{II.29})$$

Les flux de la machine peuvent s'exprimer en fonction des inductances de la manière suivante :

$$[\Phi_{sabc}] = [L_s] \cdot [i_{sabc}] + [M_{sr}(\theta)] \cdot [i_{rabc}] \quad (\text{II.30})$$

$$[\Phi_{rabc}] = [L_r] \cdot [i_{rabc}] + [M_{sr}(\theta)] \cdot [i_{sabc}] \quad (II.31)$$

En notant que les dérivées de $[L_r]$ et de $[L_s]$ par rapport à la position rotorique θ sont nulles, il vient immédiatement :

$$T_{em} = [i_{sabc}]^t \cdot \left(\frac{d}{d\theta} \cdot [M_{sr}] \right) \cdot [i_{rabc}] \quad (II.32)$$

Afin de simplifier la formulation des équations différentielles régissant la machine il faut opérer à un changement de coordonnées des grandeurs triphasées. Pour rendre la mutuelle inductance constante il est usuel d'utiliser des transformations comme celle de Park.

Cette transformation permet donc de passer des valeurs des courants, des tensions et des flux des trois bobines du stator (repère a_s, b_s, c_s) ainsi que celle du rotor (repère a_r, b_r, c_r) dans un repère lié au champ tournant (repère dq) [Ret 08].

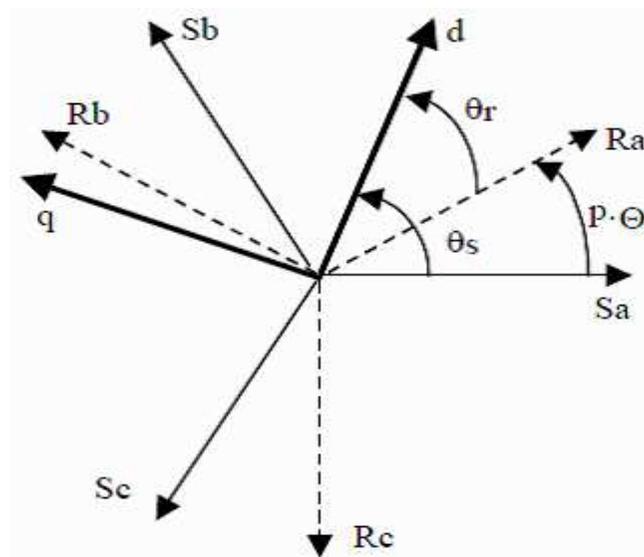


Figure II.5 : Les différents systèmes d'axes utilisés [Idj10].

En choisissant un repère dqo diphasé, l'axe d peut être repéré par :

θ_s : L'angle électrique par rapport à l'axe de la phase « a » du stator.

θ_r : L'angle électrique par rapport à l'axe de la phase « a » du rotor.

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s : \text{Pulsation des grandeurs statoriques}$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r : \text{Pulsation des grandeurs rotoriques}$$

A chaque instant, ces deux angles sont liés par la relation suivante :

$$\theta = p \cdot \Theta = \theta_s - \theta_r \quad (\text{II.33})$$

Où Θ est la position mécanique de l'axe rotorique par rapport à l'axe statorique,
 p : nombre de paires de pôles ;

θ : étant l'angle électrique entre l'axe rotorique et l'axe statorique.

On peut écrire aussi en régime permanent :

$$\omega_s - \omega_r = p \cdot \Omega = \omega \quad (\text{II.34})$$

Avec :

Ω : est la vitesse mécanique.

ω : La pulsation mécanique.

En appliquant alors la transformation de Park aux équations statoriques et rotoriques avec un angle de rotation θ_s et θ_r respectivement, si la composante homopolaire est nulle on aboutit aux expressions suivantes dans le repère dq:

$$V_{sd} = R_s \cdot i_{sd} - \frac{d\theta_s}{dt} \cdot \Phi_{sq} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} \quad (\text{II.35})$$

$$V_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\theta_s}{dt} \cdot \Phi_{sd} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} \quad (\text{II.36})$$

$$V_{rd} = R_r \cdot i_{rd} - \frac{d\theta_r}{dt} \cdot \Phi_{rq} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} = 0 \quad (\text{II.37})$$

$$V_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\theta_r}{dt} \cdot \Phi_{rd} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} = 0 \quad (\text{II.38})$$

Suite à l'hypothèse de linéarité des matériaux, les flux statoriques et rotoriques s'expriment dans le repère de PARK, en fonction des courants, par la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \\ \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.39})$$

Avec :

$L_s = l_s + M$: Inductance cyclique statorique.

$L_r = l_r + M$: Inductance cyclique rotorique.

l_s : Inductance de fuite statorique.

l_r : Inductance de fuite rotorique.

M : Mutuelle inductance.

Plusieurs solutions sont possibles pour orienter le repère « dq » par rapport au repère triphasé. Dans le cadre de notre travail, on se fixe les axes d et q solidaires au champ tournant de la machine.

Ainsi, en partant des équations (II.35), (II.36), (II.37) ,(II.38) et en utilisant la relation (II.39) qui lie les flux aux courants, on obtient l'équation matricielle suivante qui englobe les différentes équations électriques de la machine exprimées dans le repère dq:

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ v_{rd} \\ v_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s \cdot L_s & 0 & -\omega_s \cdot M \\ \omega_s \cdot L_s & R_s & \omega_s \cdot M & 0 \\ 0 & -\omega_r \cdot M & R_r & -\omega_r \cdot L_r \\ \omega_r & 0 & \omega_r \cdot L_r & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{di_{sd}}{dt} \\ \frac{di_{sq}}{dt} \\ \frac{di_{rd}}{dt} \\ \frac{di_{rq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (II.40)$$

La transformation de Park, appliquée à l'expression du couple électromagnétique, permet alors de réécrire ce dernier sous la forme suivante:

$$T_{em} = p \cdot \frac{M}{L_r} (\Phi_{rd} \cdot i_{sq} - \Phi_{rq} \cdot i_{sd}) \quad (II.41)$$

II.7) Modélisation de la pompe [Che 07] :

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge met en jeu trois (03) paramètres, la hauteur, le débit et la vitesse:

$$f(H, Q, \omega) = 0 \quad (II.42)$$

Pour résoudre ce système d'équation, on considère généralement la vitesse constante.

La hauteur totale de pompage est la somme de la hauteur statique et la hauteur dynamique.

$$HMT = H_g + P_c \quad (II.43)$$

H_g = hauteur géométrique entre la nappe d'eau pompée et le plan d'utilisation.

P_c = pertes de charge produites par le frottement de l'eau sur les parois des conduites. Elle s'exprime de cette façon :

$$P_c = \left(\lambda \frac{L}{D} + \varepsilon \right) \left(\frac{8Q^2}{\pi^2 D^4 g} \right) = K_p Q^2 \quad (\text{II.44})$$

λ : Coefficient des pertes de charge linéaires,

D : Diamètre de la tuyauterie (m).

L : Longueur de la tuyauterie (m).

g : Accélération de la pesanteur (m/s^2).

ε : Coefficient de pertes de charges locales.

K_p : Constante de la canalisation.

Q : le débit de la pompe.

Dans cette application, la pompe centrifuge est caractérisée par un modèle qui sert à déterminer la dépendance de la hauteur manométrique totale HMT en fonction du débit Q . En prenant comme paramètre la vitesse de rotation de moteur, le modèle utilisé est identifié par l'expression :

$$\text{HMT} = C_1 \omega^2 - C_2 \omega Q - C_3 Q^2 \quad (\text{II.45})$$

C_1 , C_2 et C_3 sont des constantes de la pompe données par le constructeur.

La pompe centrifuge oppose un couple résistant C_r .

$$C_r = K_r \Omega^2 \quad (\text{II.46})$$

Où :

Ω : Vitesse du moteur asynchrone (rad/s).

Avec k_r un coefficient de proportionnalité [$(\text{Nm/rad.s}^{-1})^2$] qui donné par l'équation suivante :

$$K_r = \frac{P_n}{\Omega_n^3} \quad (\text{II.47})$$

P_n : Puissance nominale du moteur asynchrone (W).

Ω_n : Vitesse nominale du moteur asynchrone (rad/s).

II. 8. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les modèles des différents éléments d'un système de pompage photovoltaïque. Pour le générateur photovoltaïque, nous avons présenté un modèle mathématique qui considère l'influence des différents paramètres météorologique. Nous avons décrit brièvement le modèle des convertisseurs statiques (onduleur et hacheur) tout en considérant que leurs composants sont parfaits et que la commutation de leurs bras se fait d'une manière instantanée, nous avons ensuite présenté un modèle mathématique pour le moteur asynchrone ainsi que la pompe centrifuge, ce qui va nous permettre d'étudier la commande du système de pompage photovoltaïque dans les chapitres qui suivent.

Chapitre III

Optimisation et simulation du
système photovoltaïque

III.1) Introduction :

Comme nous l'avons déjà vu la puissance délivrée par un générateur photovoltaïque varie fortement en fonction de l'éclairement, de la température. Pour que le générateur fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimal, la solution communément adoptée est d'introduire un convertisseur statique qui jouera le rôle d'adaptateur source-charge dans des conditions données. On utilise un hacheur dans la partie contrôle du système photovoltaïque et par l'action sur le rapport cyclique α de ce convertisseur via une commande MPPT, on peut adapter la tension de sortie du générateur pour extraire le point de puissance maximale [Zar10] [Bel 10].

Dans ce chapitre nous intéressons à deux méthodes pour la recherche de point de puissance maximale :

- La méthode perturbation et observation (P&O).
- La méthode par contrôleur logique flou.

Dans cette partie nous allons aussi faire une étude comparative pour tester les performances de chaque méthodes.

III.2) Méthode de perturbation et d'observation (P&O) :

La méthode de perturbation et d'observation est une approche itérative largement répandue dans la recherche du MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque V_{PV} et I_{PV} respectivement. Elle peut déduire le point de puissance maximale même lors des variations de l'éclairement et la température. Comme son nom l'indique, la méthode P&O fonctionne avec la perturbation [ici une augmentation ou une diminution] de la tension V_{PV} et l'observation de l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du générateur PV. La figure (III.1) représente l'algorithme de la méthode P&O. À chaque cycle, V_{PV} et I_{PV} sont mesurés afin de 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 augmentée, V_{PV} est ajustée dans la même direction que dans le cycle précédent. Si la puissance de sortie a diminué, V_{PV} est ajustée dans la direction opposée que dans le cycle précédent V_{PV} est ainsi perturbée à chaque cycle de MPPT quand le point de puissance maximale est atteint, V_{PV} oscille autour de la valeur optimale V_{PV-MPP} . Ceci cause une perte de puissance qui augmente avec le pas d'incrément de la perturbation. Le rendement de cette technique est d'environ 85% [Zar 10] [Meh 07].

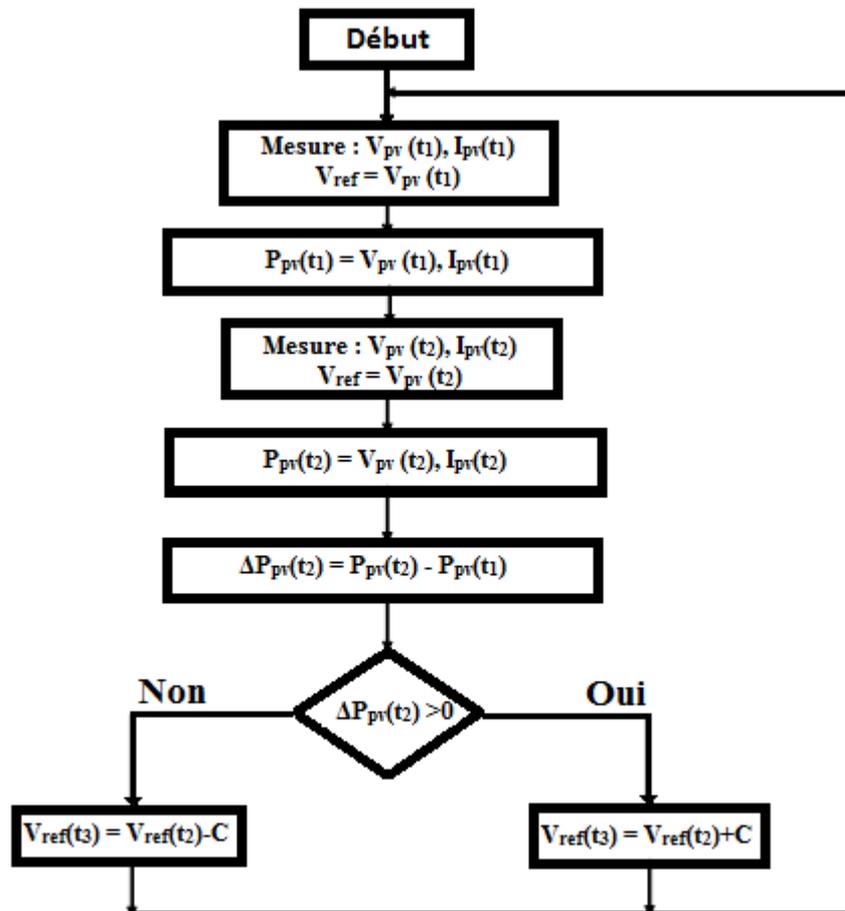


Figure III.1 : Organigramme de la méthode Perturbation et Observation.

Facile à utiliser et à implanter dans un système de contrôle d'un panneau photovoltaïque, la P&O présente toutefois des inconvénients. En effet, il arrive que l'algorithme de P&O diverge de point de puissance maximale en cas de fluctuation très rapide de l'ensoleillement. Même en cas de conditions d'exploitation constantes, on observe des variations de la tension et de courant ce qui engendre des oscillations au tour de point de puissance maximale [Ber 09] [Zar10].

III.3) Méthode à base de logique floue :

III.3.1) Introduction à la logique floue :

Les méthodes de réglage conventionnelles se basent sur une modélisation adéquate du système et un traitement analytique à l'aide de fonction de transfert ou d'équations d'état seulement, cette connaissance est souvent entachée d'erreurs et d'imprécisions qui accompagnent toute modélisation du processus. De plus, le couplage existant entre les variables du système rend la commande d'optimisation plus difficile. Il est possible de

résoudre ce problème en utilisant des méthodes dites robustes telle que la logique floue. Qui donne une approche plutôt programmatique, permettant d'inclure les expériences acquises par les opérateurs. Les bases théoriques de la logique floue ont été établies en 1965 par le professeur Lotfi Zadeh de l'université de Californie de Berkeley [Tou 10] [Zar10].

Dés 1974, la logique floue a connue des applications au niveau des systèmes de réglage et de contrôle ; la première implantation d'un contrôleur flou a été appliqué par l'équipe du professeur Madani sur une machine à vapeur au Queen Mary Collège de Londres [Bar].

III.3.2) Logique floue, principes et définitions :

La logique floue repose sur la théorie des ensembles flous qui mettent en évidence la notion d'appartenance partielle : chaque élément appartient partiellement ou graduellement aux ensembles flous qui ont été définis, ce qui n'est pas possible avec les théories mathématiques classiques.

III.3.2.1) Les ensembles flous :

Le concept de la théorie des sous-ensembles flous (et par extension, la logique floue) s'appuie sur la notion de degré d'appartenance d'un élément à un sous-ensemble flou.

Les sous-ensembles flous sont caractérisés par une fonction d'appartenance, notée μ , définie sur un intervalle $[0, 1]$. En d'autres termes, dans le langage ensembliste classique, un élément appartient ou n'appartient pas à un ensemble tandis qu'un élément appartient à un sous-ensemble flou avec un certain degré d'appartenance [Kan 07].

On définit un sous ensemble A de U comme suit :

$$A = \{(x/\mu_A(x)), x \in U\} \quad (\text{III.1})$$

$\mu_A(x)$ degré d'appartenance de l'élément x au sous-ensemble flou A.

μ_A : Est la fonction d'appartenance définie dans l'intervalle $[0,1]$.

$$\mu_A : U \longrightarrow [0, 1].$$

$$X \longrightarrow \mu_A(x)$$

III.3.2.2) Variable linguistique :

Une variable linguistique est une variable dont les valeurs associées sont linguistiques plutôt que numériques. Chaque variable linguistique est caractérisée par un ensemble tel que: $\{x, T(x), U, G, M\}$ Où:

- x est le nom de la variable,
- T(x) est l'ensemble des valeurs linguistiques que peut prendre x.
- U est l'univers du discours associé avec la valeur de base.

- G est la règle syntaxique pour générer les valeurs linguistiques de x.
- M est la règle sémantique pour associer un sens à chaque valeur linguistique.

III.3.2.3) Univers du discours :

Un des premiers pas dans la conception d'une application floue est de définir l'ensemble de référence ou univers de discours pour chaque variable linguistique. L'univers de discours est l'ensemble de référentiel qui contient tous les éléments qui sont en relation avec le contexte donné. L'univers de discours d'une variable couvre l'ensemble des valeurs prises par cette variable.

Afin de mieux saisir la différence qui existe entre les deux logiques et de mettre en évidence le principe fondamental de la logique floue, présentons un exemple simple [Tou 10]. On se propose de classer des vitesses en fonction de leurs valeurs, en définissant trois catégories comme il est illustré dans la figure ci-dessous:

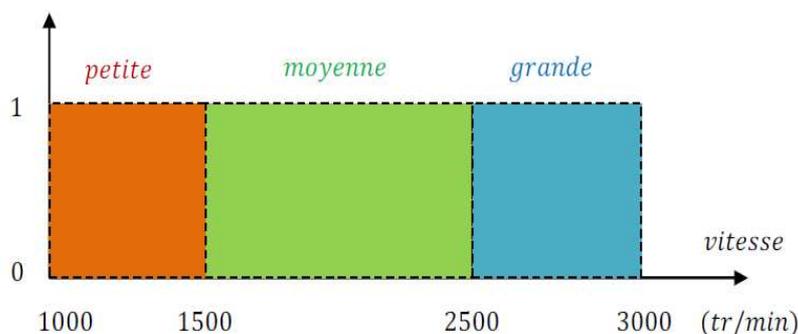


Figure III.2 : Représentation des variables binaires [Tou 10].

On constate que cette façon utilisée pour séparer les intervalles des vitesses est très éloigné de ce que fait l'être humain lorsqu'il analyse ce genre de situation, En effet l'homme ne fait pas une distinction franche entre ces intervalles, une vitesse 2500trm supposé moyenne ne peut pas être une grande à 2501trm car cela choc l'intuition humaine. Donc la logique classique présente bien l'avantage de la simplicité, mais elle est relativement éloignée de la logique utilisée par l'être humain [Tou 10].

La variable (par exemple : vitesse) ainsi que les termes (par exemple : moyenne, grande, petite) définis par les fonctions d'appartenance portent respectivement les noms de variable linguistique et de termes linguistiques [Che 98].

Représentons la même situation à l'aide de la logique floue. Les variables ne sont plus de nature binaire mais peuvent prendre une infinité de valeurs possibles entre [0 1] et la figure (III.3) représente la classification considérée selon le principe de la logique floue.

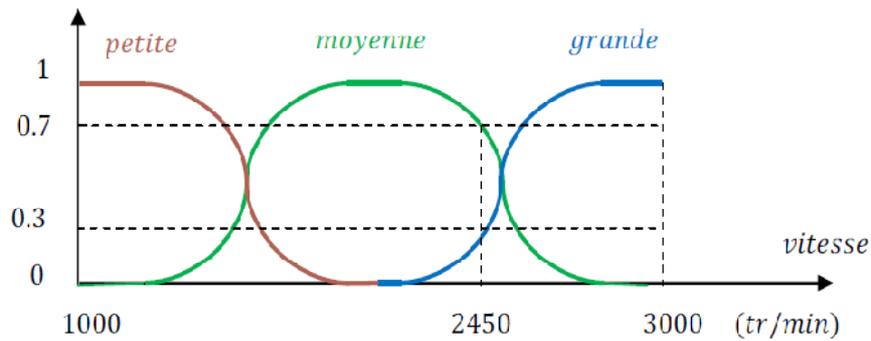
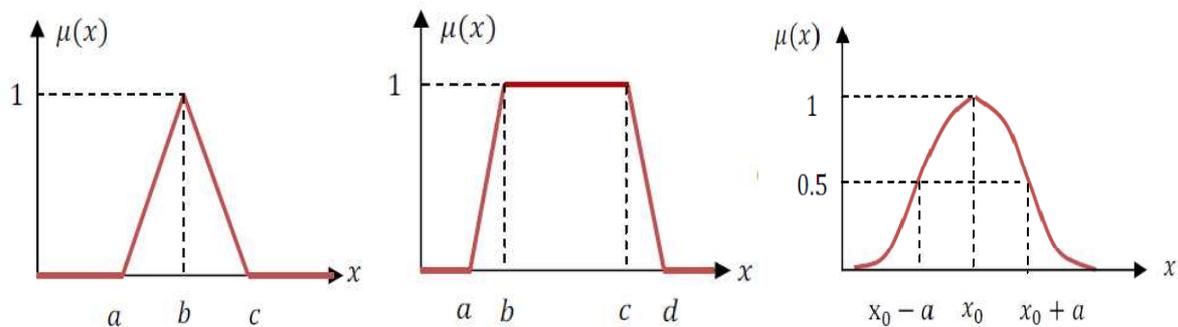


Figure III.3 : Représentation des variables floues [Tou 10].

Ce type de figure est appelé fonction d'appartenance, elle illustre la gradualité introduite par la logique floue. Par exemple une vitesse de 2450tr/mn appartient à l'ensemble « grande » avec un degré de 0.3 et à l'ensemble « moyenne » avec un degré de 0,7.

III.3.2.4) Fonction d'appartenance :

La fonction d'appartenance permet de décrire l'évolution du degré de vérité de la variable linguistique dans l'univers de discours U. Elle peut prendre plusieurs formes, les plus utilisées sont :



a) Forme triangulaire

b) Forme trapézoïdale

c) Forme cloche

Figure III.4 : Les différentes formes de la fonction d'appartenance [Tou 10].

Dans certains cas, les fonctions d'appartenance peuvent être égales à un pour une seule valeur de la variable et égales à zéro ailleurs, et prennent alors le nom de « fonctions d'appartenance singletons » [Tou 10], comme le montre la figure (III.5).

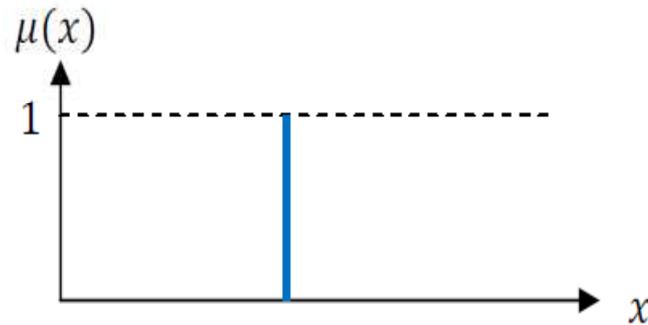


Figure III.5 : Fonction d'appartenance singleton [Tou 10].

III.3.2.5) Opérateurs logiques flous :

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

Il existe de nombreuses variantes dans ces opérateurs. Cependant, les plus répandus sont ceux dits « de Zadeh » décrits ci-dessous [Che 98] :

Intersection :

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

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

Union :

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

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

Complément :

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

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

III.3.3) Description d'un régulateur flou :

Le régulateur flou ne traite pas une relation mathématique bien définie, comme le font les régulateurs classiques, mais utilise des inférences de plusieurs règles floues se basant sur des variables linguistiques. Ces inférences sont alors traitées par des opérateurs de la logique floue.

Le schéma de Figure (III.6) illustre la structure interne d'un régulateur flou :

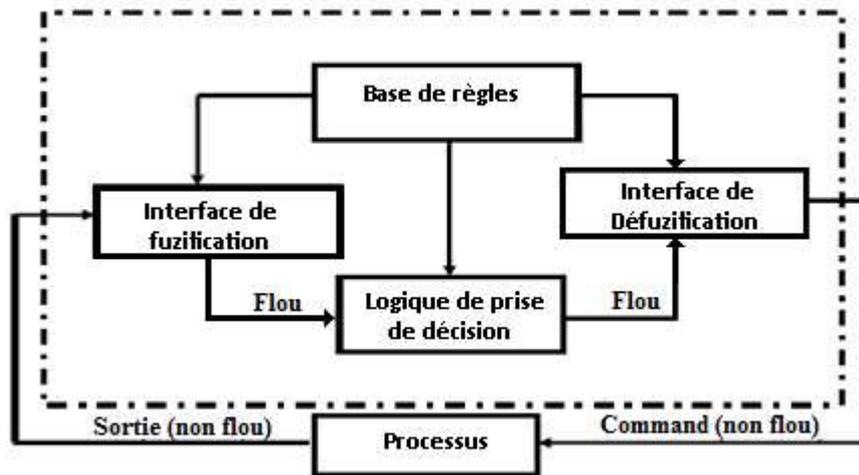


Figure III.6 : Le schéma synoptique d'un système flou [Zar10].

Ce schéma est composé de :

- Une interface de fuzzification à l'entrée.
- Une base de règles.
- Une logique de prise de décision.
- Une interface de défuzzification à la sortie.

III.3.3.1) Interface de fuzzification :

Dans les problèmes de contrôle, les grandeurs observées sont physiques (réelles), or le traitement de ces données est basé ici sur la théorie des ensembles flous. Pour cela une transformation de ces valeurs (numériques) en valeurs floues est nécessaire.

L'interface de fuzzification inclut les fonctions suivantes [Zar10]:

- Mesure des variables d'entrée.
- Représentation d'une cartographie d'échelle transférant la plage des variables d'entrée aux univers de discours correspondants.

- Transformation des variables d'entrée en variables linguistiques avec la définition des fonctions d'appartenance.

III.3.3.2) Bases Règles floues :

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

Une règle est du type :

Si « prédicat » ALORS « conclusion ». Tel que le prédicat est une combinaison de propositions par des opérateurs ET, OU, NON.

Les bases de règles floues, tout comme les systèmes experts classiques, fonctionnent en s'appuyant sur une base de connaissance issue de l'expertise humaine. Il y a néanmoins de grandes différences dans les caractéristiques et le traitement de cette connaissance [Che 98].

III.3.3.3) Logique de prise de décision :

La logique de prise de décision est le noyau du contrôleur flou, elle est capable de simuler la prise de décision de l'être humain en se basant sur les concepts flous et les règles d'inférence en logique floue [Zar10]. Le traitement numérique des règles d'inférence qui permet d'obtenir la sortie linguistique ou floue du régulateur se fait par différentes méthodes, on cite principalement [Tou 10] :

- la méthode d'inférence max-min ; l'opérateur ET est réalisé par la formation du minimum, l'opérateur OU est réalisé par la formation du maximum, et ALORS, (l'implication) est réalisée par la formation du minimum.
- la méthode d'inférence max-produit ; l'opérateur ET est réalisé par la formation du produit, l'opérateur OU est réalisé par la formation du maximum, et ALORS (l'implication) est réalisée par la formation du produit.
- la méthode d'inférence somme-produit. On réalise au niveau de la condition, l'opérateur ET par la formation de la somme (valeur moyenne), et l'opérateur OU par la formation du produit. Pour la conclusion, l'opérateur ALORS est réalisé par un produit.

III.3.3.4) Interface de défuzzification :

Pour pouvoir définir la loi de commande, le contrôleur flou doit être accompagné d'une procédure de défuzzification jouant le rôle de convertisseur de la commande floue en valeurs physiques nécessaires pour un tel état de processus. Une stratégie de défuzzification est alors nécessaire.

Plusieurs stratégies de défuzzification existent, les plus utilisées sont :

- Méthode par valeur maximum.
- méthode de centre de gravité
- Méthode des hauteurs pondérées

III.3.4) Application de la logique floue pour l'optimisation de la puissance de générateur photovoltaïque :

Après avoir énoncé et défini les conceptions de base et les termes linguistiques utilisés en logique floue, on s'intéresse dans cette partie une application d'optimisation par logique floue d'un système photovoltaïque [Zar10].

Dans ce travail, on présente une méthode de MPPT qui utilise la théorie de la logique floue, pour remédier au problème d'oscillation de la méthode perturbation et observation (P&O). Le contrôleur flou proposé optimise l'amplitude de la perturbation pour minimiser les oscillations et pour avoir une réponse rapide et sans oscillations [Lal 09].

Les différentes étapes de la conception de ce contrôleur sont présentées et ces performances ont été testées pour des variations des conditions de fonctionnement, tel que la variation de l'ensoleillement de la température et de la charge.

Le régulateur flou, proposé pour l'optimisation du système, est représenté par la figure (III.7). Il reçoit comme entrées la variation de la tension et de la puissance de générateur photovoltaïque ΔV_{pv} , ΔP_{pv} CE(k) du système ; pour la sortie le contrôleur flou détermine l'incrément optimal qui doit être ajouté à la tension de fonctionnement pour extraire le point de puissance maximal MPP [Zar10].

La structure du contrôleur par logique floue appliqué au système photovoltaïque est montrée sur la figure (III.7). La tension du générateur photovoltaïque V_{pv} est réglée de manière à ce qu'elle suit la tension photovoltaïque de référence ($V_{pv,ref}$) obtenue à la sortie du contrôleur floue (FLC) la sortie du régulateur de tension est utilisée pour calculer le rapport cyclique du convertisseur DC/DC. Le tableau (II.1) et les fonctions d'appartenance des variables d'entrées sont adaptés en remplaçant les entrées et les sorties du contrôleur MPPT flou respectivement par (ΔP_{pv} , ΔV_{pv} et $\Delta V_{pv,ref}$), K_1 , K_2 , K_3 sont des gains adaptatifs[Lal 09].

$$\Delta P_{pv} = P_{pv}[K] - P_{pv}[K - 1] \quad (III.2)$$

$$\Delta V_{pv} = V_{pv}[K] - V_{pv}[K - 1] \quad (III.3)$$

$$\Delta V_{pv,ref}[K] = V_{pv}[K - 1] - V_{pv,ref}[K - 1] \quad (III.4)$$

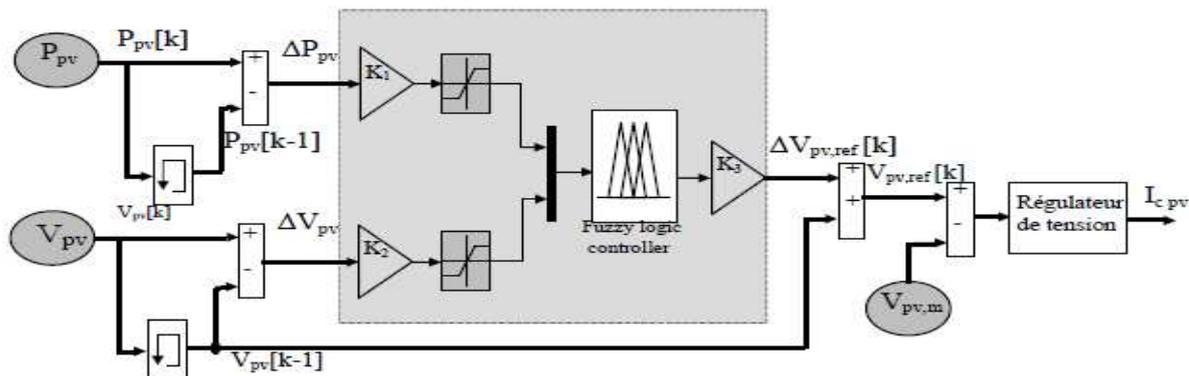


Figure III.7 : Structure du contrôleur MPPT flou appliqué au système photovoltaïque.

Comme nous l’avons déjà vu un régulateur flou comporte trois étapes essentielles pour la mise en oeuvre d’une commande : Fuzzification, inférence floue et defuzzification

III.3.4.1) Fuzzification :

Dans ce régulateur flou, l’intervalle d’intérêt de chaque variable d’entrée et de la variable de sortie est divisé en cinq classes, comme le montre la figure (III.8).

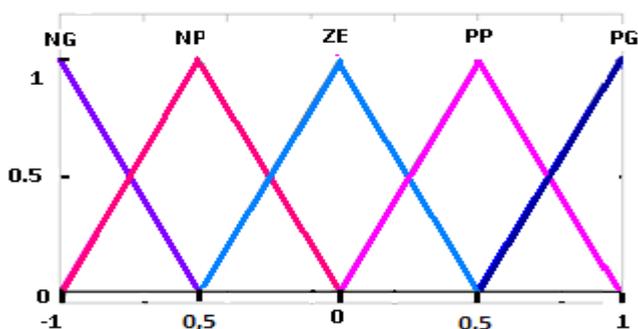


Figure.III.8 : Fonction d’appartenance des entrées et de la sortie du régulateur flou choisi.

Les classes sont notées comme suit :

NG pour négatif grand, NP pour négatif petit, ZE pour environ zéro, PP pour positif petit, et PG pour positif grand.

III.3.4.2) Inférence floue :

Les règles floues permettent de déterminer le signal de sortie du régulateur en fonction des signaux d’entrée. Elles relient le signal de sortie aux signaux d’entrée par des conditions linguistiques prenant en compte l’expérience ou le savoir-faire acquis par un opérateur humain, en traduisant simplement des remarques de bon sens.

D'après la caractéristique puissance tension ($P_{pv}(V_{pv})$) figure (III.9). Si une grande augmentation de la tension photovoltaïque (V_{pv}) entraîne une grande augmentation de la puissance photovoltaïque (P_{pv}), on continue d'augmenter fortement la tension de référence $V_{pv,ref}$ (point A à B ou point B à C). Si une grande augmentation de la tension (V_{pv}) entraîne une diminution de la puissance P_{pv} (point C à D), on diminue la tension de référence $V_{pv,ref}$ pour obtenir une augmentation rapide de la puissance. Si une augmentation ou une diminution quelconque entraîne une variation nulle de la puissance photovoltaïque, on ne fait pas varier la tension de référence $V_{pv,ref}$ (de telle sorte à pouvoir stabiliser le point de fonctionnement sur le sommet de la courbe). Si une variation nulle de la tension photovoltaïque entraîne une augmentation de la puissance, on en déduit que le niveau d'irradiation a augmenté, il faut donc augmenter la tension de référence $V_{pv,ref}$ pour se rapprocher de la nouvelle tension optimale. Si une variation nulle de la tension (V_{pv}) entraîne une diminution de la puissance (P_{pv}), on en déduit que le niveau d'irradiation a diminué, il faut donc diminuer la tension de référence $V_{pv,ref}$ pour se rapprocher de la nouvelle tension optimale [Zar 10] [Lal 09].

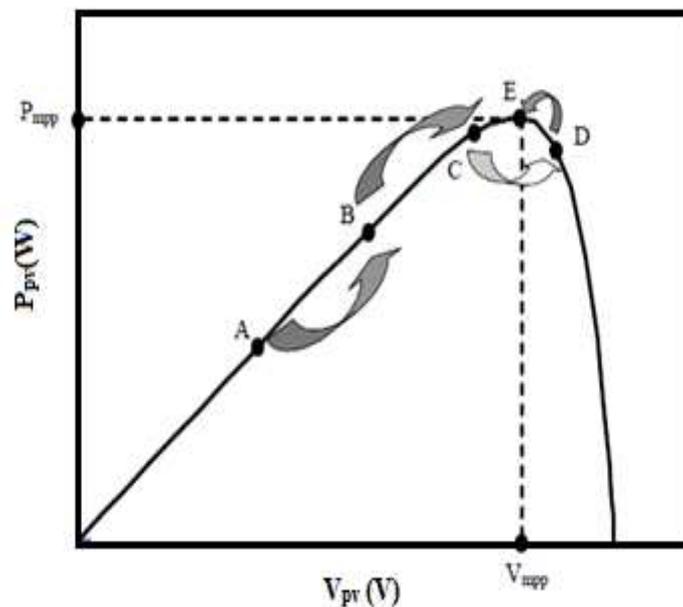


Figure III.9 : Principe de fonctionnement du contrôleur MPPT flou.

Ces considérations conduisent à adopter une table de décision figure (III.10), résumant les règles choisies.

ΔV_{pv}	ΔP_{pv}	NG	NP	ZE	PP	PG
NG	NG	ZE	ZE	PG	PG	PG
NP	NP	ZE	ZE	PP	PP	PP
ZE	ZE	PP	ZE	ZE	ZE	NP
PP	PP	NP	NP	NP	ZE	ZE
PG	PG	NG	NG	NG	ZE	ZE

figure.III.10 : Table de règles à cinq classes [Zar10].

III.3.4.3) Défuzzification :

Pour la défuzzification, on utilise la méthode du centre de gravité, Elle consiste à prendre comme décision à la sortie l'abscisse x_{Gr} du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante $\mu_{RES}(x_r)$. Cette abscisse est déterminée par la relation suivante [Bou 09] :

$$x_{Gr} = \frac{\int_{-1}^1 x_r \mu_R(x_r) dx_r}{\int_{-1}^1 \mu_R(x_r) dx_r} \tag{III.5}$$

Où μ_{Ri} est le degré d'activation de la règle Ri et x est l'abscisse du centre de gravité de l'ensemble flou de la variable de sortie associée à la règle Ri.

III. 4) Résultats de simulation :

Dans les simulations (sous Matlab/Simulink) qui suivent on va simuler les différentes méthodes de MPPT étudiées [perturbation et observation (P &O), contrôleur logique flou (CLF), nous analysons les résultats par une étude comparative.

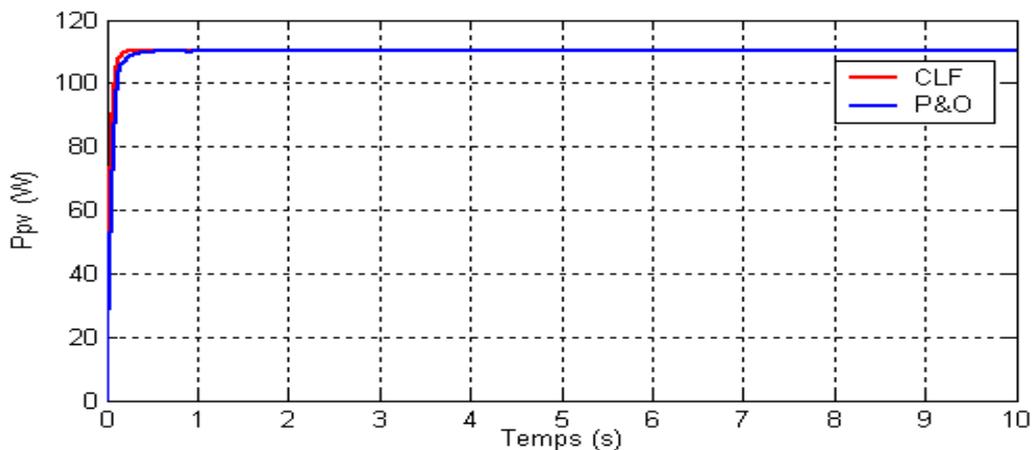


Figure III.11.a : Allure de la puissance photovoltaïque.

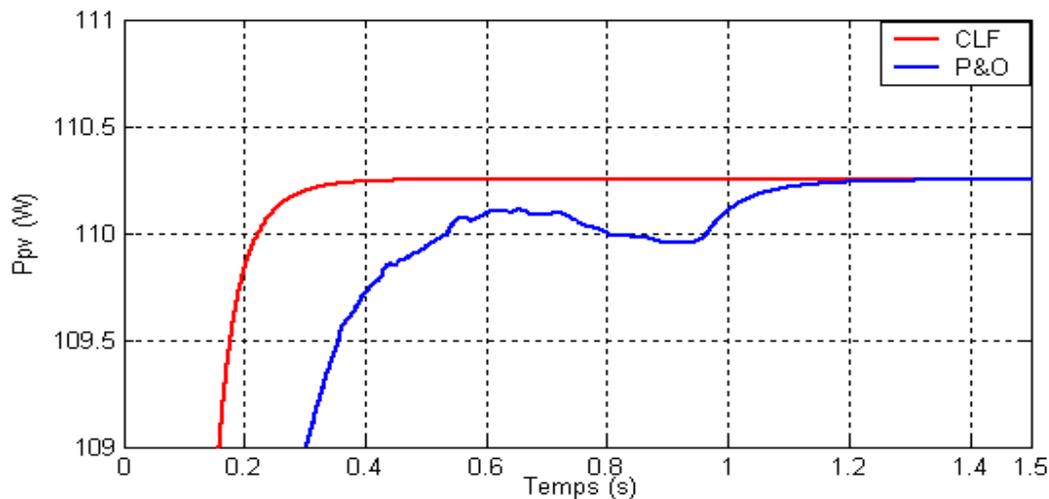


Figure III.11.b : Allure de la puissance photovoltaïque en régime transitoire.

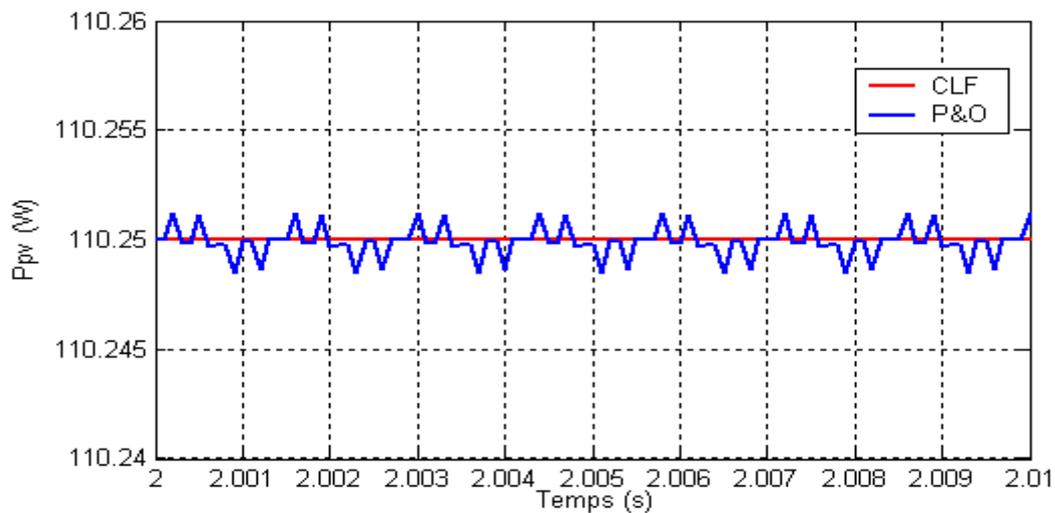


Figure III.11.c : Allure de la puissance photovoltaïque en régime permanent.

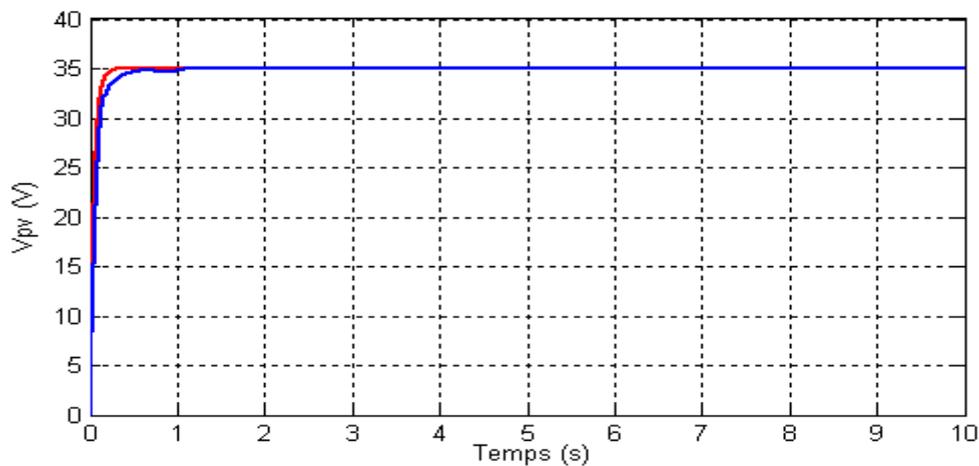
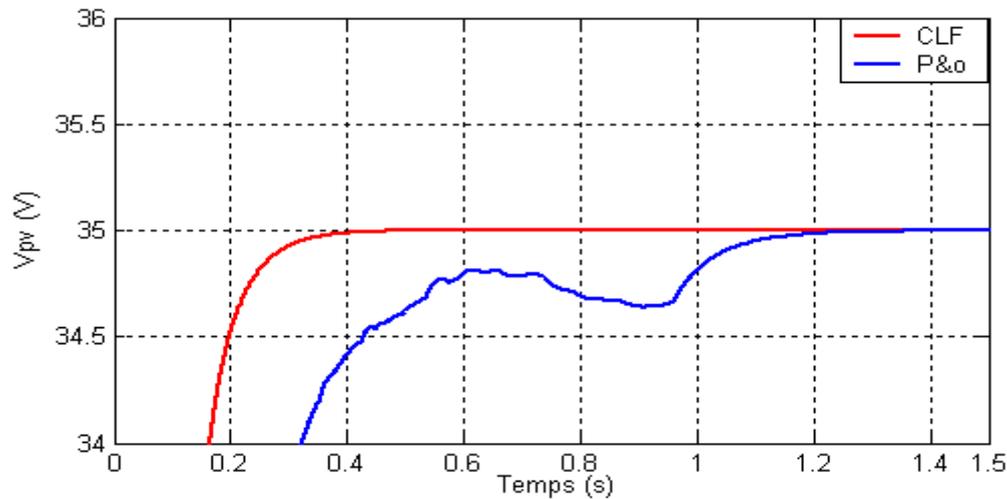
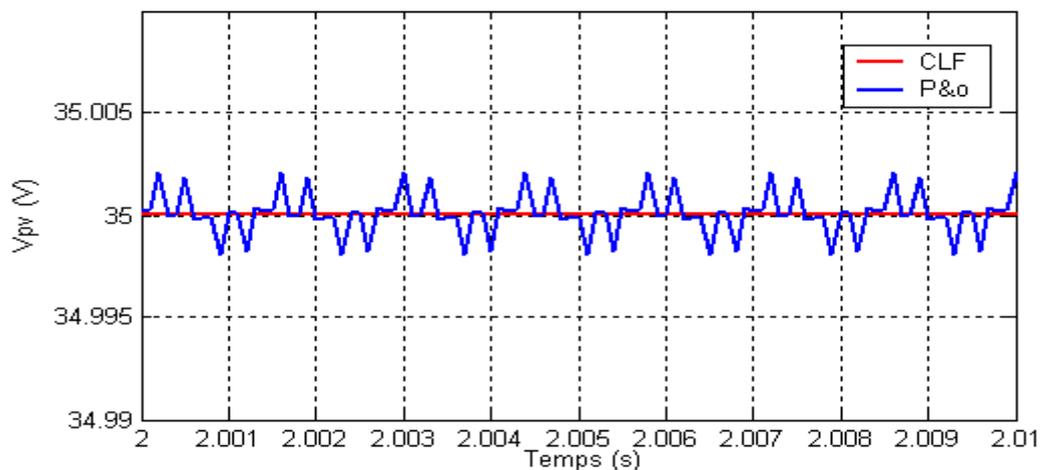


Figure III.11.d : Allure de la tension photovoltaïque.**Figure III.11.e :** Allure de la tension photovoltaïque en régime transitoire.**Figure III.11.f :** Allure de la tension photovoltaïque en régime permanent.

Les figures (III.11) présentent la puissance du générateur photovoltaïque (P_{pv}) et la tension photovoltaïque (V_{pv}) pour les deux méthodes de control MPPT (perturbation et observation (P&O) et le contrôleur par logique flou (CLF). On peut voir que le (CLF) présente une réponse plus rapide, il atteint sa valeur optimale à 0.3s comparé à la méthode (P&O) qui nécessite plus de temps pour extraire le point de puissance maximale (1.25s) qui présente aussi des oscillations autour du point de fonctionnement en régime permanent. Le contrôleur flou permet une réduction non seulement du temps de convergence pour extraire le MPP, mais aussi des fluctuations de puissance en régime établi, comme il est clairement présenté dans les figures (III.11).

D'après les constatations on voit que la méthode de contrôleur par logique floue (CLF) présente des performances meilleures que celle de la méthode perturbation et observation. Représentant les caractéristiques du générateur photovoltaïque $P_{pv}(V_{pv})$ et $I_{pv}(V_{pv})$ en utilisant le contrôleur par logique floue (CLF) pour des variations du niveau d'irradiation ($T_c=25^\circ$) et de température ($G=1000\text{W/m}^2$) comme montrés sur les Figures (III.12) et (III.13).

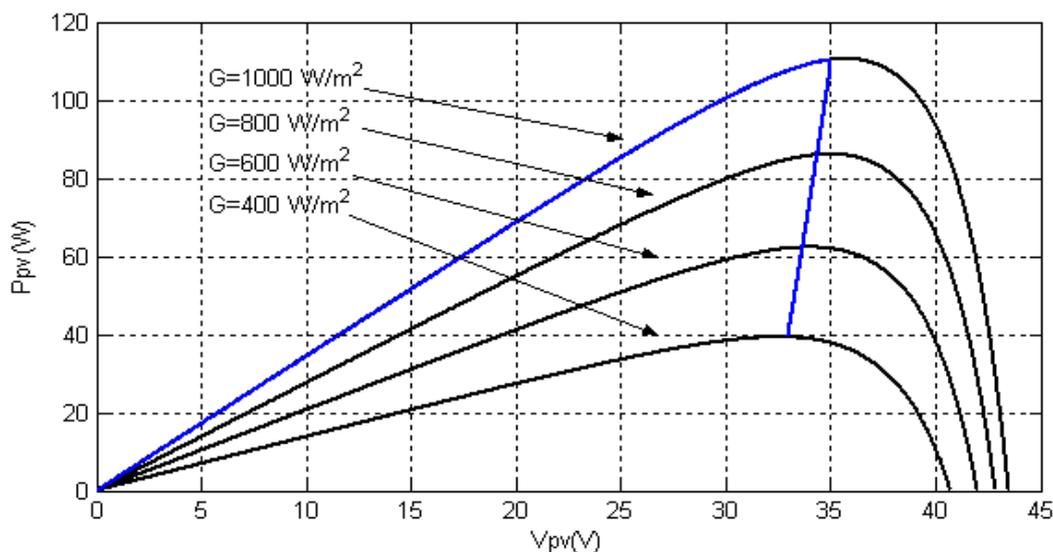


Figure III.12.a : Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ pour différentes irradiation.

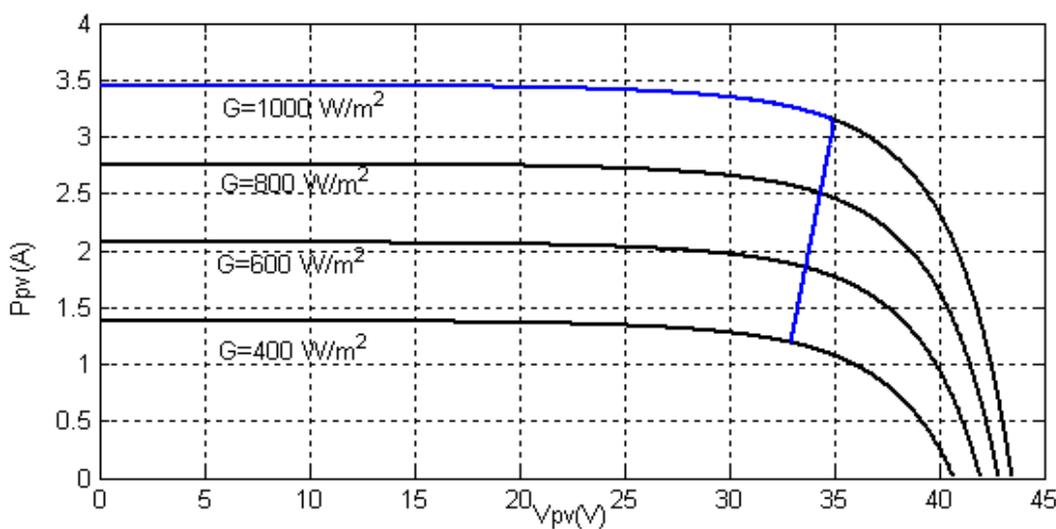


Figure III.12.b : Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ pour différentes irradiation.

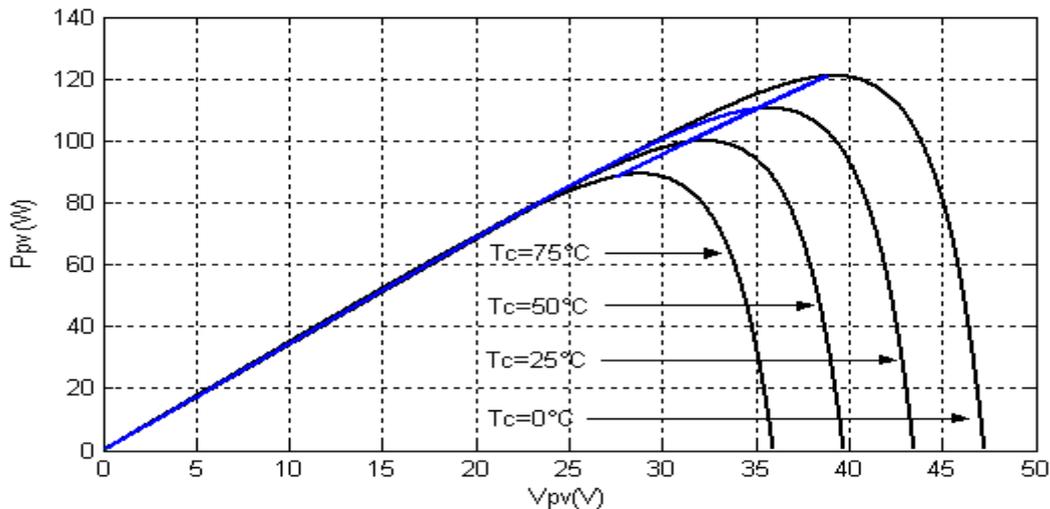


Figure III.13.a : Caractéristiques P_{pv} (V_{pv}) pour différentes température

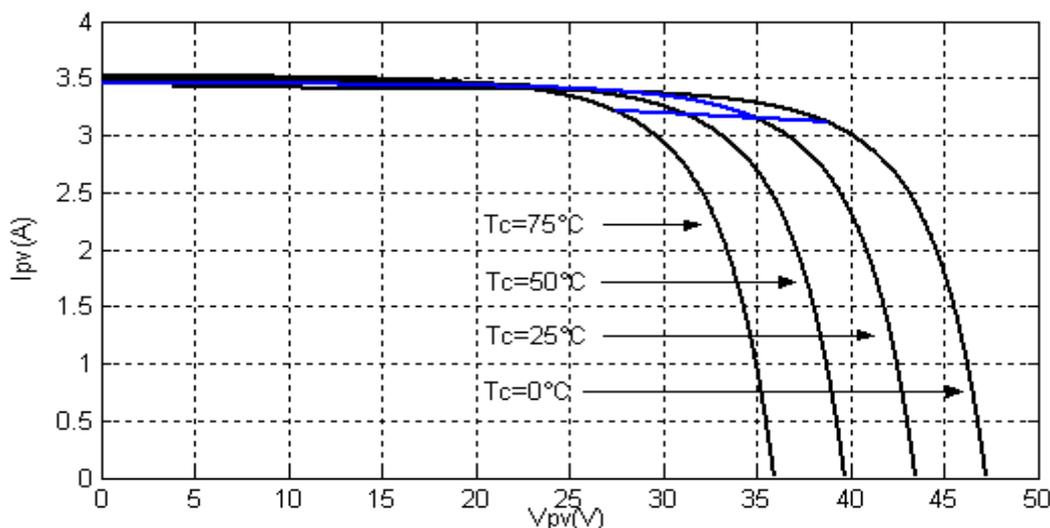


Figure III.13.b : Caractéristiques I_{pv} (V_{pv}) pour différentes température.

D'après les figures (III.12), la diminution de l'irradiation implique une diminution de la puissance photovoltaïque produite donc le point de puissance maximum se déplace pour rejoindre le nouveau point maximum correspondant à cette irradiation. Le CLF détermine continuellement la tension optimale qui donne le maximum de puissance correspondant à un certain niveau d'irradiation. De même pour les figures (III.13), on peut voir qu'il ya presque une poursuite de point de puissance pour des variations de la température. Le CLF peu entraîner rapidement le système au nouveau point de puissance maximale, quand une variation se produit.

A partir des résultats de simulation, il est clair que le point de fonctionnement du système s'opère tout près du point maximum de puissance pour des variations d'irradiation et de température.

III.5) conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté deux méthodes pour l'optimisation de système photovoltaïque en suite nous avons fait une étude comparative entre la P&O et le CLF. D'après les constatations on voit que la méthode de contrôleur logique flou présente des performances meilleures que celle de la méthode perturbation et observation c'est pour cela que le choix de la méthode d'optimisation de système globale se porte sur le contrôleur logique flou.

Chapitre IV

Commande et simulation du système de pompage photovoltaïque

IV.1) Introduction :

Pour la conception d'un système de pompage photovoltaïque une étude dimensionnelle est nécessaire ainsi que l'application d'une commande pour le bon fonctionnement du système de pompage photovoltaïque.

Dans ce chapitre nous allons en premier lieu présenter brièvement les différentes étapes du dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque, qui nous permettra de définir les éléments du système et de choisir la pompe centrifuge à utiliser et son moteur d'entraînement, ainsi que le nombre de panneaux nécessaires connectés en série et en parallèle, pour satisfaire les besoins quotidiens en eau demandés.

Nous allons aussi présenter la commande vectorielle de la machine asynchrone à cage d'écureuil (MAS) basée sur l'orientation du flux rotorique. Après le test des performances de plusieurs régulateurs pour la commande de vitesse de la MAS, nous opterons pour le régulateur qui représente de meilleures performances, qui sera appliqué dans le système global.

IV.2) Les étapes de dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque [Had05] :

- Evaluation de besoins en eau.
- Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire.
- Détermination de l'énergie solaire disponible.
- Choix des composants.

IV.2.1) Evaluation des besoins en eau :

La première étape à suivre lors d'un dimensionnement d'une installation de pompage photovoltaïque est l'estimation des besoins en eau. Dans le cas de l'irrigation elle dépend principalement [Had 05] de type de culture des facteurs météorologiques, la méthode d'irrigation et saison de l'année considérée pour cette application.

IV.2.2) Calcul de l'énergie quotidienne requise :

L'énergie nécessaire pour soulever une certaine quantité d'eau sur une certaine hauteur pendant une journée est calculée à partir des données de débit et de HMT requises, elle est exprimée en wattheures. Ce calcul est fonction d'une constante hydraulique (C_H) et est inversement proportionnel au rendement du groupe motopompe utilisé [Roy 98].

Énergie requise pour la pompe :

$$E_{\text{ele}} = \frac{C_H \cdot Q \cdot \text{HMT}}{R_p} \quad (\text{IV.1})$$

Où

E_{ele} : Habituellement exprimé en kWh.

Q : Débit journalier (m^3/jour).

HMT: Hauteur manométrique.

R_p : En général le rendement des groupes motopompes est de 30% à 45%, selon le type de pompe et de moteur.

$$C_H = \frac{g \cdot \vartheta}{3600} = 2,725.$$

g : Constante de la gravité ($9,81 \text{ m/s}^2$).

ϑ : La densité de l'eau (1000 kg/m^3).

IV.2.3) Détermination de l'énergie solaire disponible :

Connaître les ressources solaires disponibles est essentielles à la conception d'un Système de pompage photovoltaïque. Dans notre cas la détermination de l'énergie disponible est basée sur les calculs des valeurs moyennes journalières mensuelles de l'irradiation solaire [Che 07].

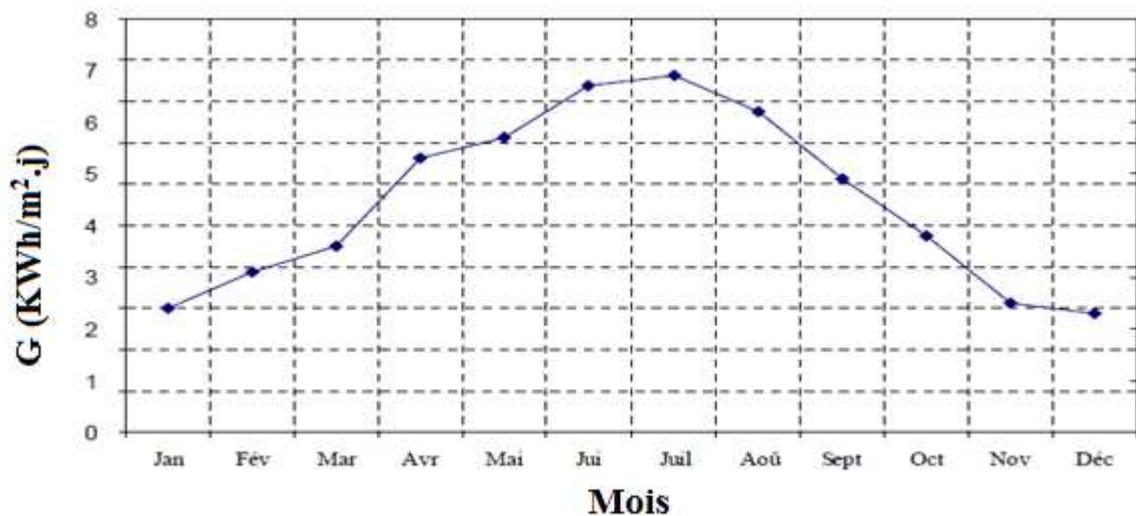


Figure IV.1: Irradiation globale moyenne mensuelle journalière sur plan horizontal du site de Bejaia de 1998 à 2007[Lal 09].

IV.2.3.1) Inclinaison et orientation optimales des capteurs photovoltaïques :

L'énergie fournie par les capteurs photovoltaïques est directement proportionnelle à l'ensoleillement. Afin d'optimiser au mieux l'installation solaire il faut donc tenir compte de ce facteur, qui dépend à son tour du lieu de l'installation, d'orientation et d'inclinaison de ces capteurs. Plus les rayons sont proches de la perpendiculaire au plan des panneaux plus la

quantité d'énergie disponible est importante, idéalement, les panneaux doivent constamment maintenir un angle droit avec les rayons du soleil, si non orientés en plein Sud dans l'hémisphère Nord et en plein Nord dans l'hémisphère Sud [Tra 11] [Had 05].

IV.2.3.2) Mois de dimensionnement :

Le mois de dimensionnement sera le mois le plus défavorable, son principe est de réaliser un bilan énergétique sous les conditions les plus défavorables pour le système. C'est-à-dire, si le système fonctionne durant ce mois, il fonctionnera les autres mois, donc il nous garantit un fonctionnement annuel. L'irradiation solaire et l'énergie hydraulique nécessaires correspondantes à ce mois, serviront pour le choix des composants du système [Tra 11], [Had 05].

IV.2.4) Choix des composants de système :

IV.2.4.1) Dimensionnement de la pompe centrifuge:

Dans notre cas le débit journalier sera de 25 m³/jour et la HMT est estimée à 10 m. La pompe choisie a un rendement de 55 %, et l'efficacité du moteur, d'environ 80 % au point de fonctionnement nominal. Le rendement totale du groupe motopompe (R_p) sera donc de 44%. D'après l'équation (IV.1) de l'énergie électrique requise par la pompe on aura :

$$E_{ele} = \frac{2,725.25.10}{0,44}$$

$$E_{ele} = 1548,29 \text{ (wh / Jour)}$$

IV.2.4.2) Dimensionnement du champ photovoltaïque :

D'après la figure (IV.1) le mois de Décembre est le mois où l'ensoleillement (E_{ns}) est défavorable pour une inclinaison de 36,43°, c'est-à-dire un maximum de 2,2 heures de soleil par jour. En supposant des pertes de 20 % attribuables à la température, à la poussière et au rendement de l'onduleur [Roy 98], dans ce cas la puissance crête (P_c) de champ photovoltaïque se calculera comme suite :

$$P_c = \frac{E_{ele}}{E_{ns} \cdot (1 - \text{pertes})} \quad (IV.2)$$

$$P_c = \frac{1548,29}{2,2 \cdot (1 - 0,2)} = 879,7 \text{ W}$$

Pour des panneaux de type SIEMENS 110W, $V_{opt}=35 \text{ V}$ et $I_{opt}=3,15 \text{ A}$.

Le nombre de panneaux utiliser peut se calculer de la manière suivante :

$$N_{pv} \geq \text{ENT} \left[\frac{P_c}{P_u} \right].$$

$$N_{pv} \geq \text{ENT} \left[\frac{879,7}{110} \right] = 8 \text{ Panneaux.}$$

Pour huit (8) panneaux la puissance photovoltaïque totale sera égale :

$$P_{pv_{tot}} = 8.110 = 880W$$

Vue que les caractéristique du moteur asynchrone utiliser ($p_n=746W$, $I_n= 3,4A$), les panneaux doivent être branchés en série.

La tension à la sortie de générateur photovoltaïque totale sera :

$$V_{pv_{tot}} = N_{pv} \cdot V_{opt}$$

$$V_{pv_{tot}} = 8.35 = 280V$$

Pour à la sortie de générateur photovoltaïque totale sera : $I_{pv_{tot}} = \frac{P_c}{V_{max}} = \frac{880}{280} = 3,14 A$.

IV. 3) Commande de l'onduleur :

L'objectif de la commande est de générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de sorte que la tension créée par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence. Pour cela on utilise la commande par hystérésis car c'est une technique robuste et simple à établir [Bou 09].

IV.3.1) Contrôle des courants par régulateurs à hystérésis :

C'est une commande qui s'intéresse directement au contrôle du courant pour chaque bras de l'onduleur, les interrupteurs T_i et T'_i ($i = 1, 2, 3$) sont reliés, l'un à la sortie d'un comparateur à hystérésis, l'autre à cette même sortie via un inverseur ; Où le changement de signe de la différence entre le courant de référence et le courant mesuré n'entraîne pas instantanément le basculement du comparateur à cause de l'effet de l'hystérésis, c'est-à-dire que le courant mesuré évolue en augmentant jusqu'à ce que ΔI soit égal à h (h est la largeur de la bande d'hystérésis). Le comparateur bascule où l'autre interrupteur rentre en conduction à son tour tant que $\Delta I < h$. Le contrôle des courants par régulateurs à hystérésis force le courant de phase à suivre le courant de référence. L'imposition des courants sinusoïdaux à la machine garantit un couple électromagnétique non fluctuant. L'approche la plus simple qui réalise la comparaison entre le courant de phase mesuré et le courant de référence est illustrée par la Figure (III.14). Les conditions de commutation des trois commutateurs statiques S_i ($i=1, 2, 3$) de l'onduleur sont définies en terme des états logiques S_i correspondants de la façon suivante [Bou 09].

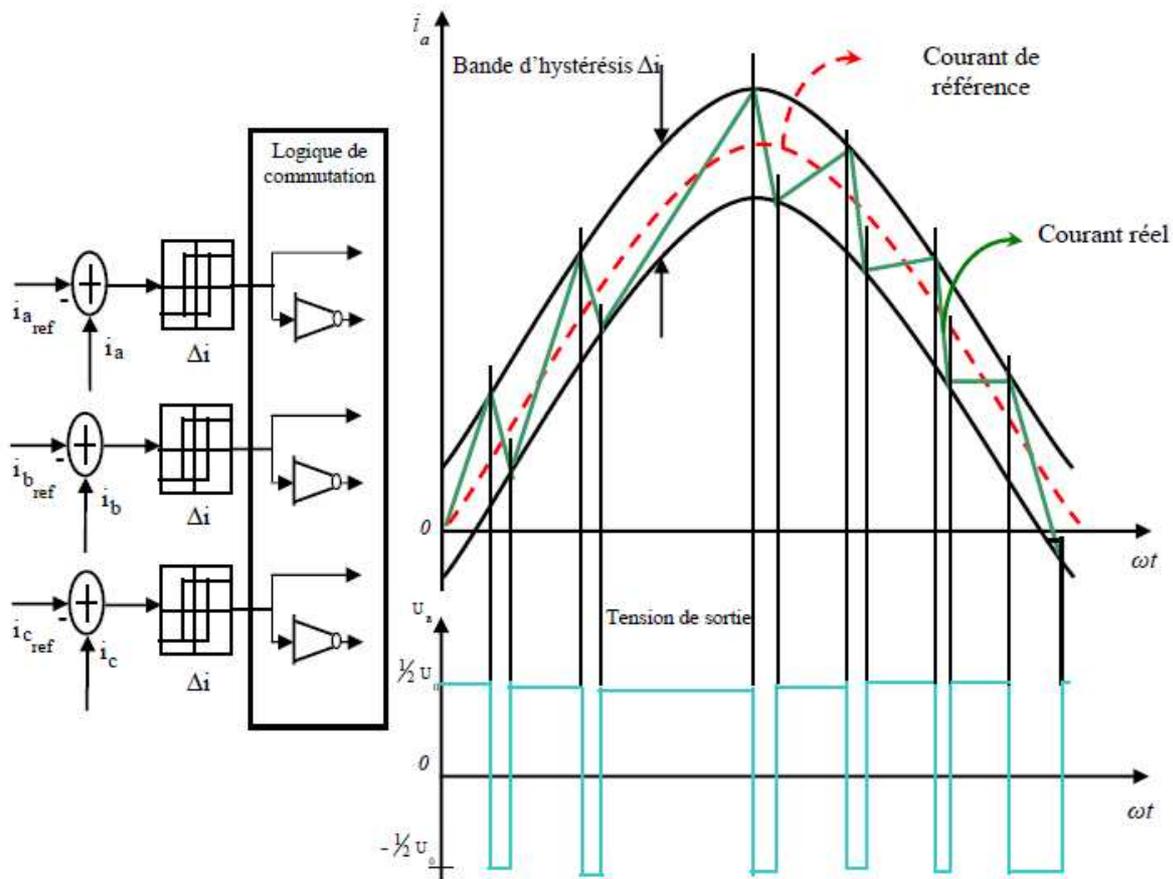


Figure IV.2: Illustration de la bande de courant à hystérésis [Bou 09].

$$S_i = -1 \quad \text{si } i_i \geq i_{ref} + \Delta i$$

$$S_i = 1 \quad \text{si } i_i \geq i_{ref} - \Delta i$$

$$S_i = S_{i-1} \quad \text{si } i_i = i_{ref}$$

Tel que :

$I_i = (i=1, 2, 3)$: représentent les courants des phases statoriques (i_a, i_b, i_c).

$I_{ref} = (i=1, 2, 3)$ Représentent les courant de référence issus des circuits de commandes des trois bras de l'onduleur.

IV.4) Commande de la machine asynchrone :

L'absence totale du découplage entre le flux et le couple dans la machine asynchrone et dont la seule entrée électrique liée au stator, posent des problèmes difficiles pour sa commande [Ben 05]. La communauté scientifique et industrielle a imaginé bien des méthodes de commande afin de pouvoir la contrôler en couple, en vitesse ou en position. Les méthodes

scalaires sont très prisées pour leur simplicité de mise en œuvre. Cependant, elles ne peuvent pas garantir du couple à l'arrêt ni d'obtenir la dynamique et la précision des méthodes dites vectorielles.

La commande vectorielle est apparue avec les travaux de Blaschke. Elle n'a cependant pas eu tout de suite un grand essor car les régulations, à l'époque, reposaient sur des composants analogiques, l'implantation de la commande était alors difficile. Avec l'avènement des microcontrôleurs et des dispositifs permettant le traitement du signal, il est devenu possible de réaliser une telle commande à un coût raisonnable [Bag 09].

IV.4.1) Principe de la commande vectorielle :

L'idée directrice de la commande vectorielle, notée FOC (Field Oriented Control) est d'assimiler la machine asynchrone à une machine à courant continu par le biais d'un découplage entre le couple et le flux [Ret 08].

Pour réaliser ce découplage entre le flux et le couple, il faut orienter le repère « dq », c'est à dire fixer en permanence une contrainte telle que l'une des grandeurs de sortie intervenant dans l'expression du couple (II.41) soit imposée. Dans le cas de la machine asynchrone, il est possible de réguler soit le flux rotorique, le flux statorique, ou le flux d'entrefer. [Idj 10]

Dans notre travail, nous nous limitons à la technique de commande par orientation du flux rotorique qui fournit des performances dynamiques plus élevées notamment sur la maîtrise de la dynamique du couple électromagnétique via la maîtrise de la dynamique du flux rotorique [Idj 10]. Dans ce cas, on choisit l'orientation du repère telle que : $\Phi_{rq} = 0$ et par conséquent $\Phi_{rd} = \Phi_r$. Cela signifie que le flux Φ_r est aligné en permanence avec l'axe « d ». Sa composante quadratique est donc nulle et la commande est telle que le flux soit maintenu constant. Cette dernière supposition amène à une simplification importante dans le système d'équations pour l'élaboration de la commande.

L'expression de couple électromagnétique (II.41) devient :

$$T_{em} = p \cdot \frac{M}{L_r} \Phi_r \cdot i_{sq} \quad (IV.3)$$

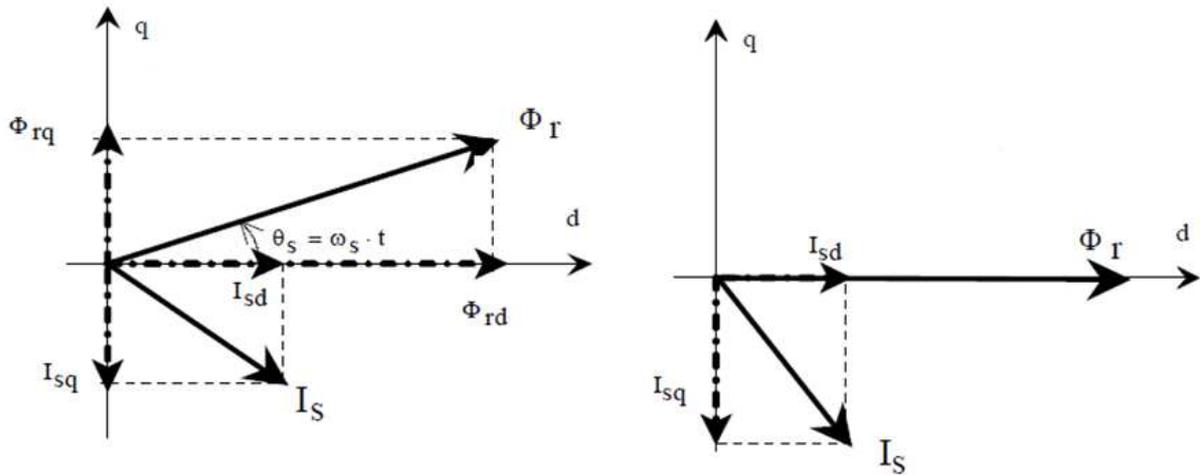


Figure IV.3.a: flux rotorique non orienté. [Ret08] **Figure IV.3.b :** flux rotorique orienté.

En supposant que la commande maintienne : $\Phi_{rd} = \Phi_r =$ à une constante et $\Phi_{rq}=0$,

alors les dérivées temporelles des flux sont nulles en régime permanent $\frac{d\Phi_r}{dt} = \frac{d\Phi_{rd}}{dt} = \frac{d\Phi_{rq}}{dt} = 0$.

A partir de l'équation matricielle (II.39) il convient d'écrire :

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \\ \Phi_{sq} = L_s i_{sq} + M i_{rq} \\ \Phi_{rd} = L_r i_{rd} + M i_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_r i_{rq} + M i_{sq} \end{cases} \quad (IV.4)$$

D'après l'équation matricielle (II.37) :

$$\frac{d\Phi_r}{dt} = -R_r \cdot i_{rd} \quad (IV.5)$$

Par ailleurs, l'équation (II.38) permet d'exprimer le flux en fonction du courant et de la pulsation rotoriques sous la forme suivante:

$$\Phi_r = -\frac{R_r \cdot i_{rq}}{\omega_r} \quad (IV.6)$$

La relation (IV.7) correspond en fait à la condition de calage du référentiel d'axes **d** et **q** dans le repère rotorique. Elle donne la valeur que doit avoir Φ_r en fonction de i_{rq} pour que le flux rotorique reste orienté.

On peut, à partir de la relation (IV.4), exprimer le courant i_{rd} comme suit :

$$i_{rd} = \frac{\Phi_r - M \cdot i_{sd}}{L_r} \quad (IV.7)$$

D'après la relation matricielle (II.39), on peut écrire pour $\Phi_{rq}=0$:

$$i_{rq} = -\frac{M \cdot i_{sq}}{L_r} \quad (IV.8)$$

Sachant que le coefficient de dispersion s'écrit : $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s \cdot L_r}$, les tensions statoriques peuvent s'écrire comme suite :

$$V_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \sigma L_s i_{sq} + \frac{M}{L_r} \cdot \frac{d\Phi_r}{dt} \quad (IV.9)$$

$$V_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} - \omega_s \cdot \sigma L_s i_{sd} + \omega_s \cdot \frac{M}{L_r} \cdot \Phi_r \quad (IV.10)$$

Dans ce travail, nous avons choisi d'utiliser des correcteurs de courants par hystérésis. De ce fait, il n'y a pas de consignes de tensions à déterminer et donc la connaissance du modèle interne de moteur n'est pas nécessaire et il n'y a pas besoin de prendre en considération les termes de compensation dans notre système de commande [Idj 10].

IV.4.1.1) Estimation de Φ_r , ω_r , θ_s :

Seules les grandeurs statoriques sont accessibles, les grandeurs rotoriques, elles, ne le sont pas. Il faut donc pouvoir les estimer à partir des grandeurs statoriques [Zar 10].

Donc à partir des équations (IV.5 et IV.7) et en utilisant la notation de Laplace On obtient:

$$\Phi_r = \frac{M \cdot i_{sd}}{1 + T_r s} \quad (IV.11)$$

$$\text{Tel que : } T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (IV.12)$$

On obtient aussi des équations (IV.6 et IV.8) la formule de la pulsation rotorique :

$$\omega_r = \frac{M \cdot i_{sq}}{T_r \cdot \Phi_r} \quad (IV.13)$$

En remplaçant la dernière relation dans l'équation $\omega_s - \omega_r = p \cdot \Omega = \omega$ on aura :

$$\omega_s = \frac{M \cdot i_{sq}}{T_r \cdot \Phi_r} + p \cdot \Omega \quad (IV.14)$$

IV.4.1.2) Calculs des régulateurs [Zar10] :

IV.4.1.2.1) Réglage de la boucle de vitesse :

Le schéma bloc de la régulation de la vitesse est représenté par la figure (IV.4):

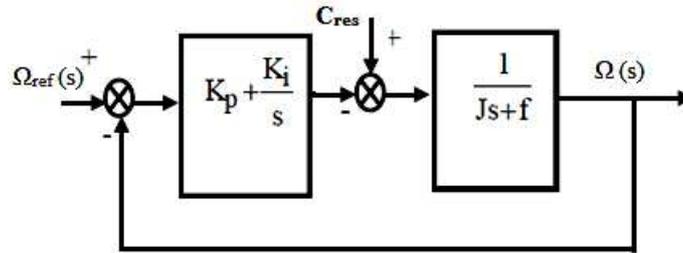


Figure IV.4: Schéma bloc de régulation de vitesse par un PI.

La fonction de transfert en boucle fermée avec un couple résistant nul s'écrit :

$$\frac{\omega(s)}{\omega_{ref}(s)} = \frac{K_p \cdot s + K_i}{J \cdot s^2 + (K_p + f) + K_i} \quad (IV.15)$$

Cette fonction de transfert possède une dynamique de 2^{ème} ordre, dont la forme canonique est de la forme suivante :

$$\frac{1}{\frac{1}{\omega_n^2} \cdot s^2 + \frac{2 \cdot \xi}{\omega_n} \cdot s + 1} \quad (IV.16)$$

Par comparaison et avec un coefficient d'amortissement $\xi = 0,7$ et une pulsation ω_n donnée, on obtient :

$$\begin{cases} K_i = J \cdot \omega_n^2 \\ K_p = 2 \cdot \xi \cdot \omega_n - f \end{cases} \quad (IV.17)$$

IV.4.1.2.2) Régulateur de flux :

Il prend en entrée le flux de référence et le flux estimé. Il convient de régler le flux en agissant sur la composante du courant statoriques I_{sd} .

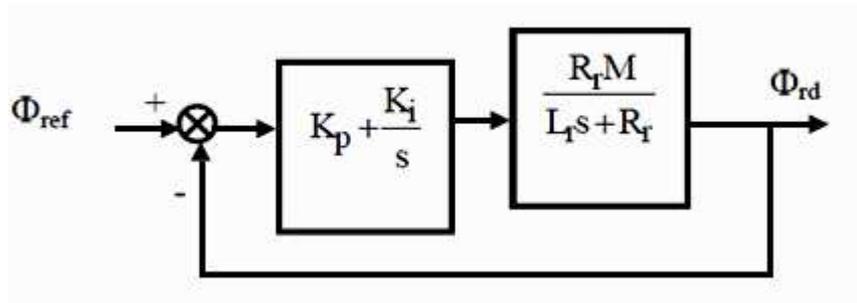


Figure IV.5: Schéma du réglage de flux par un régulateur PI.

La fonction de transfert en boucle fermée s'écrit:

$$\frac{\Phi_{rd}}{\Phi_{ref}} = \frac{(K_p \cdot s + K_i) \cdot R_r \cdot M}{L_r \cdot s^2 + (R_r \cdot M \cdot K_p + R_r) \cdot s + R_r \cdot M \cdot K_i} \quad (\text{IV.18})$$

Avec la même procédure vue précédemment, on trouve les éléments du régulateur de flux:

$$\begin{cases} K_i = \frac{L_r \cdot \omega_n^2}{R_r \cdot M} \\ K_p = \frac{2 \cdot \xi \cdot L_r \cdot \omega_n}{R_r \cdot M} - \frac{1}{M} \end{cases} \quad (\text{IV.19})$$

IV.4.2) Commande floue de la vitesse de la machine asynchrone (MAS) à flux rotorique orienté :

Cette partie est consacrée à l'application de la logique floue mais cette fois pour la commande de vitesse de la machine asynchrone à flux rotorique orienté. Il s'agit d'introduire au lieu de régulateur classique PI des régulateurs flous. Initialement un PI, en suit un PD. Les entrées des régulateurs flous PI et PD que nous avons utilisé sont l'erreur entre la valeur réelle et la valeur de la consigne et la dérivé de cette erreur qui sont notées respectivement (e) et (de). Quand à sa sortie elle représente l'incrément du signal de commande (dT_{emref}) à appliquer au processus à commander. Dans ce qui suit la configuration de régulateur flou est la même pour le PI et le PD sauf pour les matrices d'inférences des deux régulateurs qui sont différentes.

La configuration de la boucle de vitesse est illustrée par la figure (IV.6).

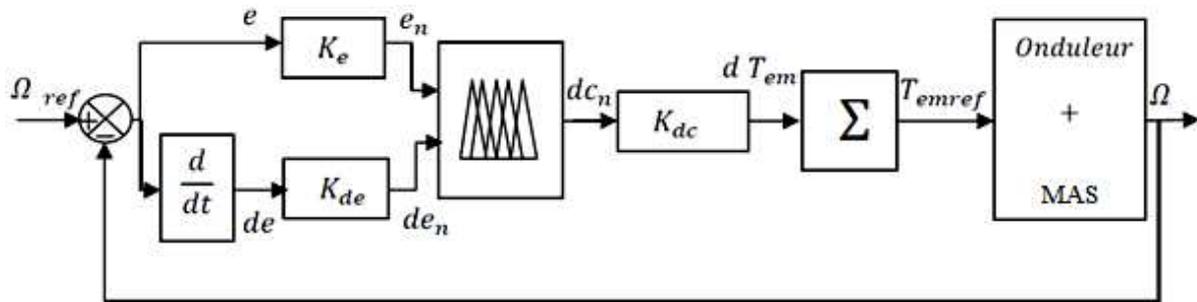


Figure IV.6: Schéma synoptique d'un régulateur flou de vitesse. [Tou 10].

Avec :

e : l'erreur, elle est définie par :

$$e(k) = \Omega_{ref}(k) - \Omega(k) \tag{IV.20}$$

de : la variation de l'erreur :

$$de(k) = e(k) - e(k-1) \tag{IV.21}$$

dT_{emref} : l'incrément de la commande à la sortie du régulateur ;

k_e, k_{de}, k_{dc} : des gains associés à (e), (de) et dT_{emref} respectivement. On les appelle "facteurs d'échelle", ils permettent de changer la sensibilité du régulateur flou sans en changer la structure. Les grandeurs indicées "n" sont donc les grandeurs normalisées à l'entrée et à la sortie du contrôleur flou [Tou 10].

IV.4.2.1) Fuzzification :

Dans notre travail, nous avons choisis sept ensembles flous pour les deux variables d'entrée (e et de) ainsi sept ensembles pour la variable de sortie. Pour les fonctions d'appartenance, on a choisi pour chaque variable les formes triangulaires pour le PI et le PD comme le montre la figure suivante :

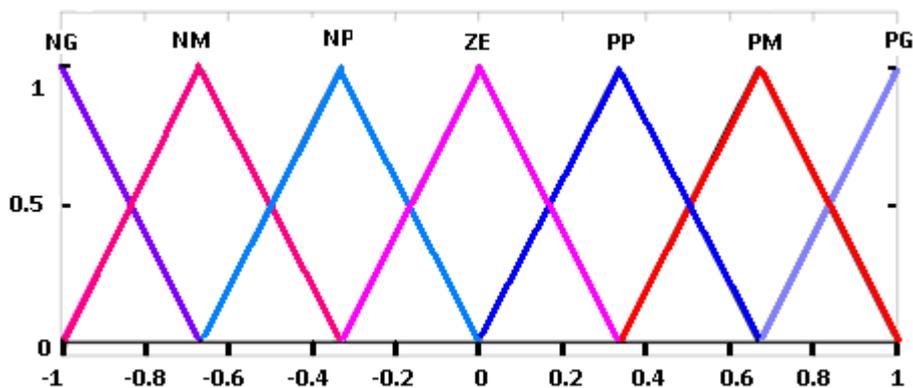


Figure IV.7: Fonction d'appartenance des entrées et de la sortie du régulateur flou choisi.

Explicitons maintenant les notations des sous-ensembles flous utilisés pour fuzzifier les trois variables précédentes :

NG : Négatif Grand.

NM : Négatif moyen.

NP : Négatif Petit.

ZE : Environ Zéro.

PP : Positif Petit.

PM : Négatif moyen.

PG : Positif Grand.

IV.4.2.2) Inférence :

Comme nous l’avons mentionné, chacune des deux entrées linguistiques du contrôleur flou possède sept ensembles flous, ce qui donne un ensemble de quarante-neuf règles pour chaque régulateur. Celles-ci peuvent se représentées pour le PI et PD comme suite :

de / e	NG	NM	NP	ZE	PP	PM	PG
NG	NG	NG	NG	NG	NM	NP	ZE
NM	NG	NG	NG	NM	NP	ZE	PP
NP	NG	NG	NM	NP	ZE	PP	PM
ZE	NG	NM	NP	ZE	PP	PM	PG
PP	NM	NP	ZE	PP	PM	PG	PG
PM	NP	ZE	PP	PM	PG	PG	PG
PG	ZE	PP	PM	PG	PG	PG	PG

Figure IV.8.a: Matrice d’inférence du régulateur flou. PI [Lal 05].

de / e	NG	NM	NP	ZE	PP	PM	PG
NG	NG	NG	NG	NP	PP	PP	PP
NM	NG	NG	NG	NP	PP	PP	PP
NP	NG	NG	NM	NP	PP	PP	PM
ZE	NG	NM	NP	ZE	PP	PM	PG
PP	NM	NP	NP	PP	PM	PG	PG
PM	NP	NP	NP	PP	PM	PG	PG
PG	NP	NP	NP	PP	PG	PG	PG

Figure IV.8.b: Matrice d’inférence du régulateur flou. PD [Lal 05].

Ces matrices d'inférence sont établies par une logique qui tient compte de la physique du système qui se base sur la méthode d'inférence « *MAX-MIN* ». En effet, il est tout à fait normal de générer une variation du couple de référence positive grande quand l'erreur sur la vitesse de sortie de la MAS par rapport à sa consigne et sa variation sont positives grandes.

Donc une parfaite connaissance du comportement du système à régler nous permet d'établir un ensemble de règles floues, contrairement aux méthodes classiques où il nous faut un modèle mathématique.

IV.4.2.3) Défuzzification :

Pour la défuzzification, on utilise la méthode du centre de gravité présentée précédemment.

IV.5) Résultats de simulation:

Les résultats de simulations sont effectués (sous Matlab/Simulink). La simulation se déroule en deux étapes :

- **Première étape :** La simulation du système de pompage photovoltaïque se fait sans connexion du générateur photovoltaïque.

En appliquant un échelon de vitesse de 150 rad/s relative à la vitesse nominale de la pompe et on va visualiser la réponse de système pour différents régulateurs à savoir un PI classique, un PI flou et un PD flou.

Les figures ci-dessous représentent les caractéristiques de système de pompage avec la régulation du flux et de la vitesse de la machine asynchrone.

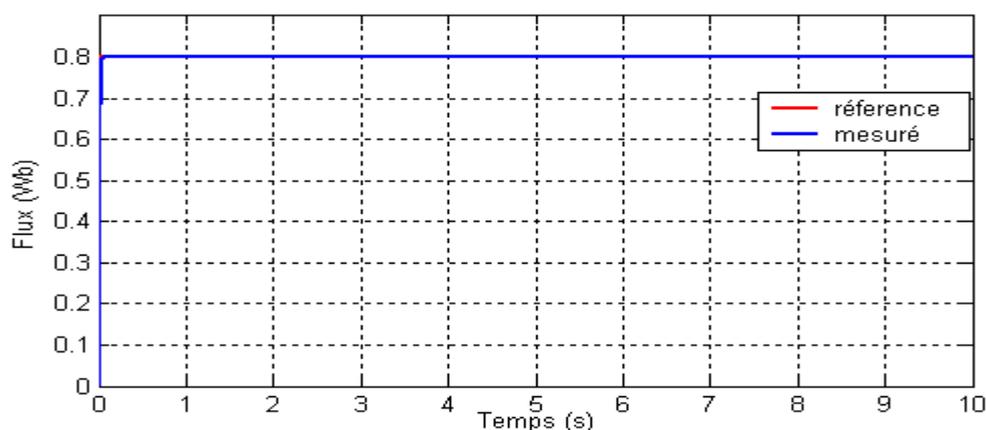


Figure IV.9.a: Allure de flux régulé par un PI classique.

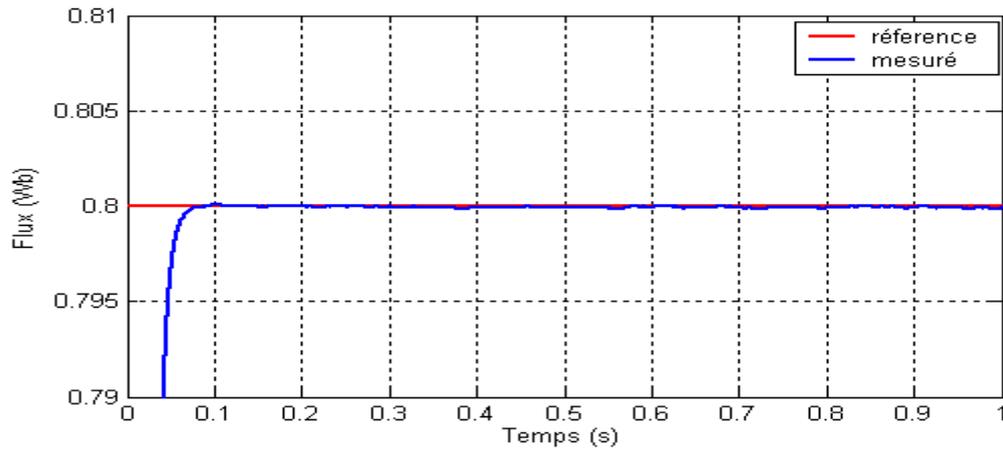


Figure IV.9.b: Zoom sur le régime transitoire (PI classique).

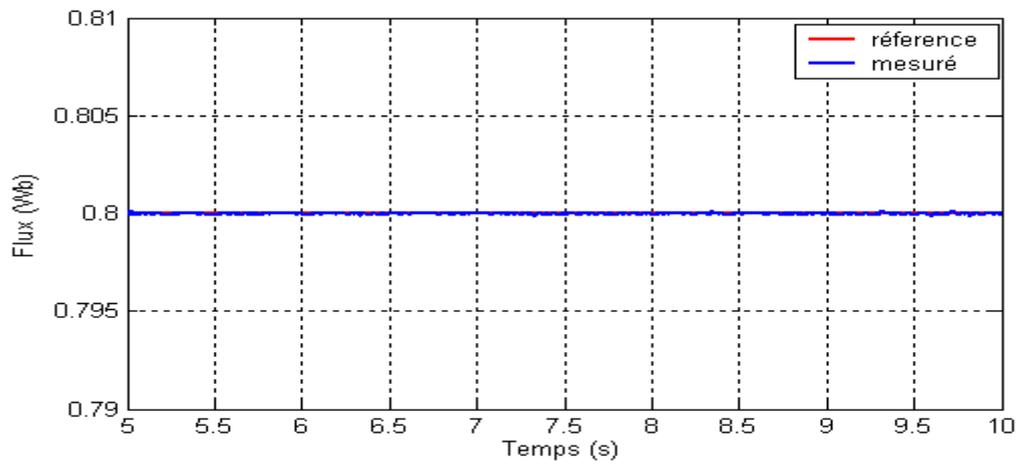


Figure IV.9.c: Zoom sur le régime permanent (PI classique).

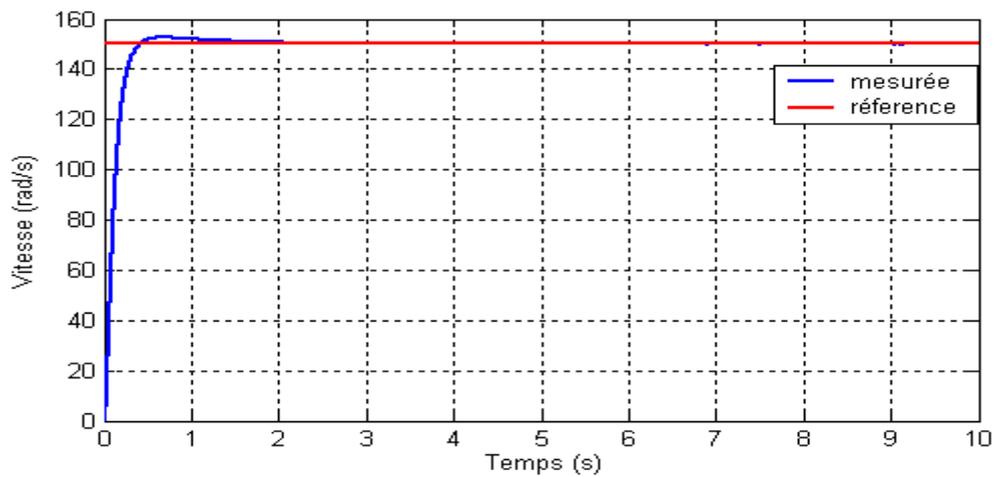


Figure IV.10.a: Allure de la vitesse régulée par un PI classique.

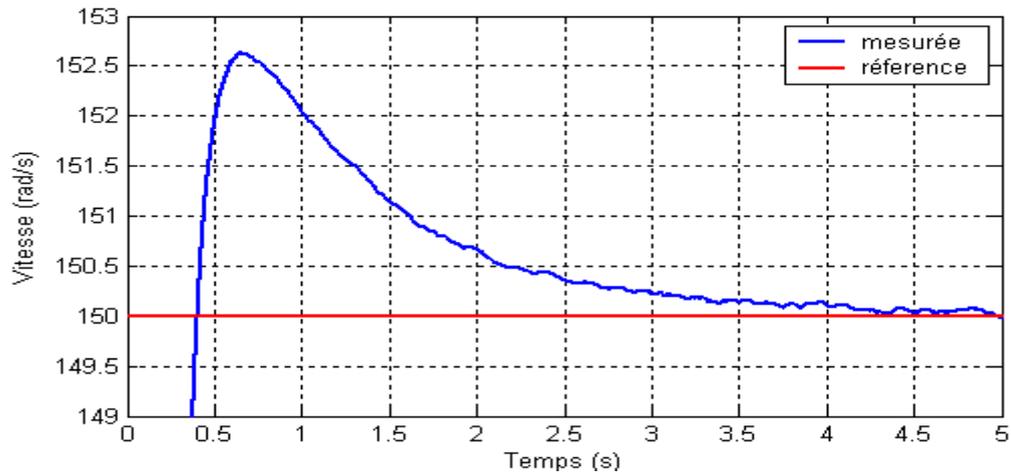


Figure IV.10.b: Zoom sur le régime transitoire du (PI classique).

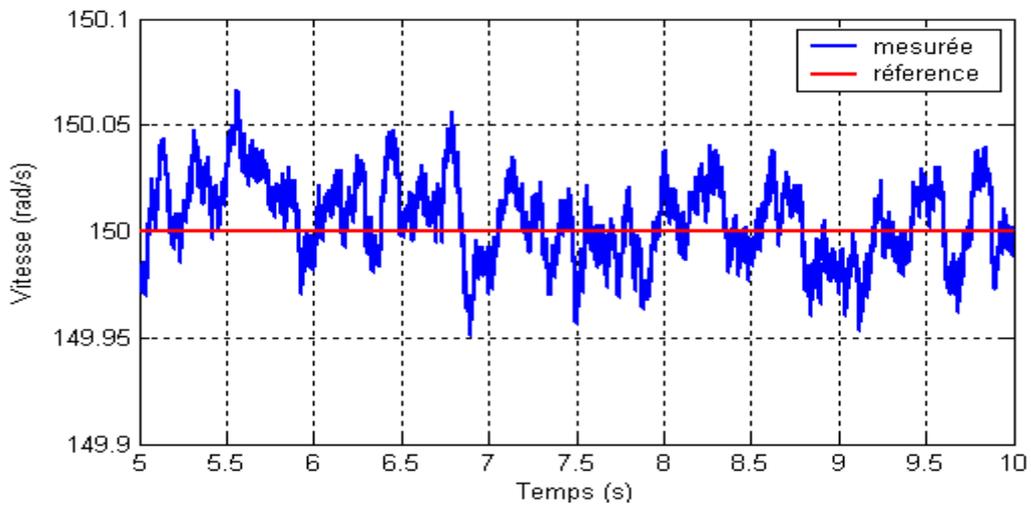


Figure IV.10.c: Zoom sur le régime permanent (PI classique).

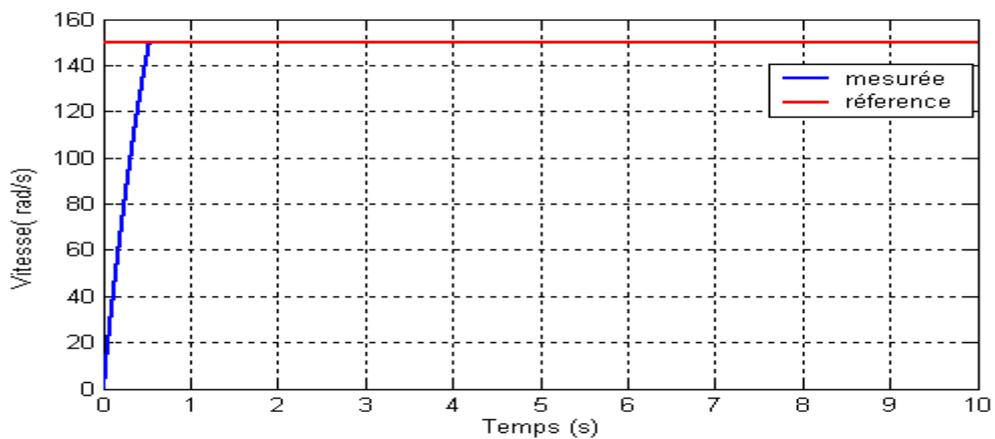


Figure IV.11.a: Allure de la vitesse régulée par un PI flou.

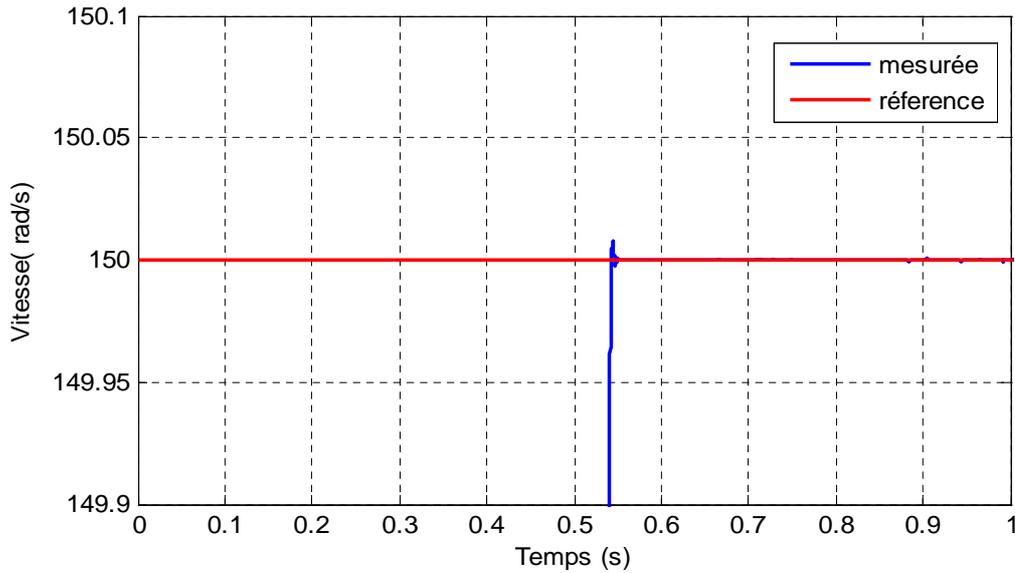


Figure IV.11.b: Zoom sur le régime transitoire du (PI flu).

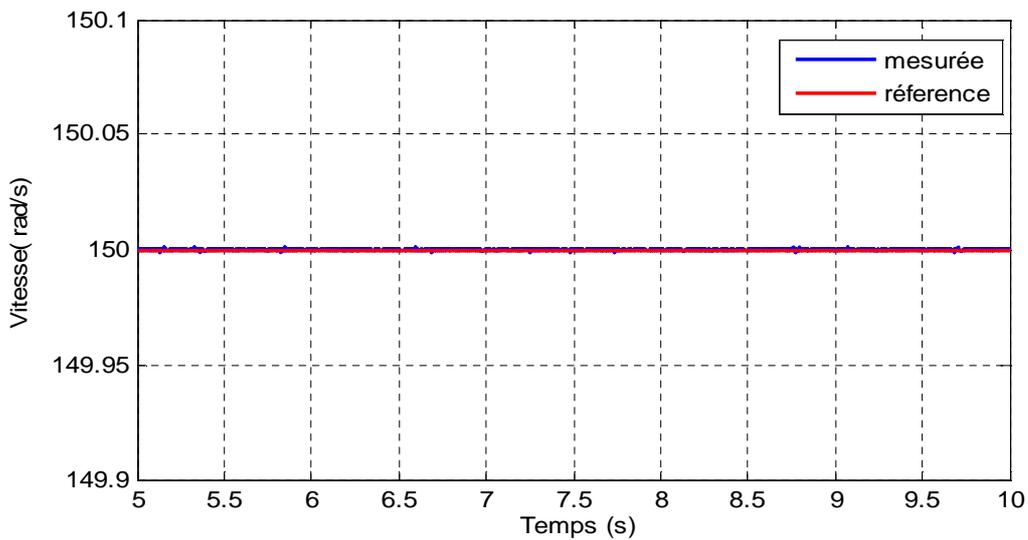


Figure IV.11.c: Zoom sur le régime permanent (PI flu).

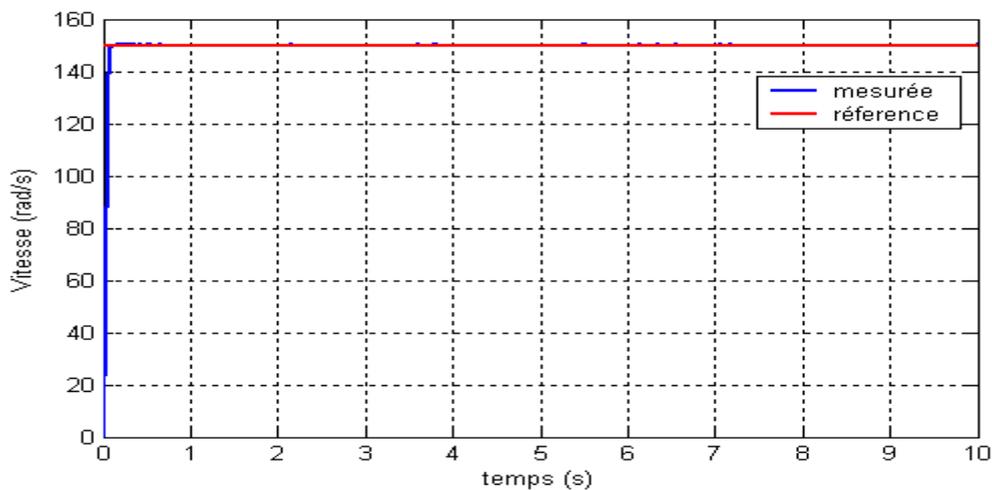


Figure IV.12.a: Allure de la vitesse réglée par un PD flu.

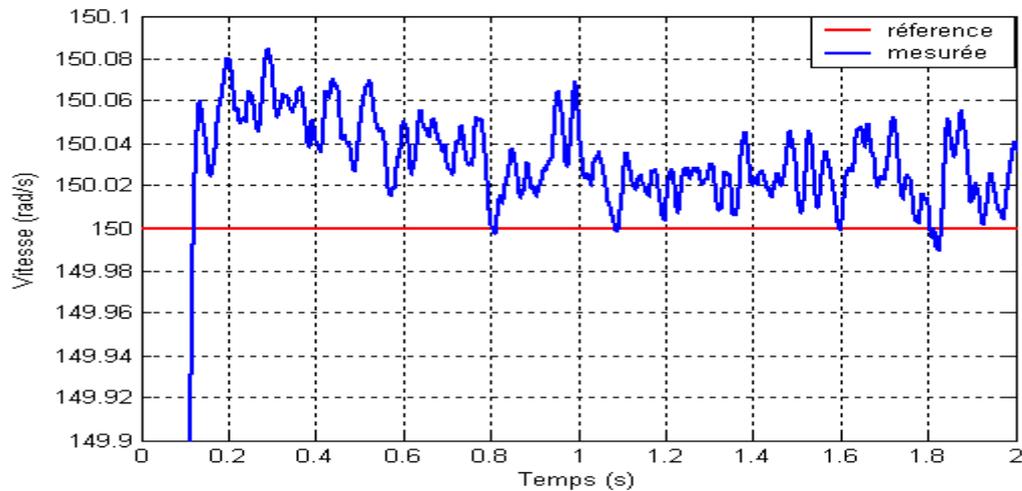


Figure IV.12.b: Zoom sur le régime transitoire du (PD flu).

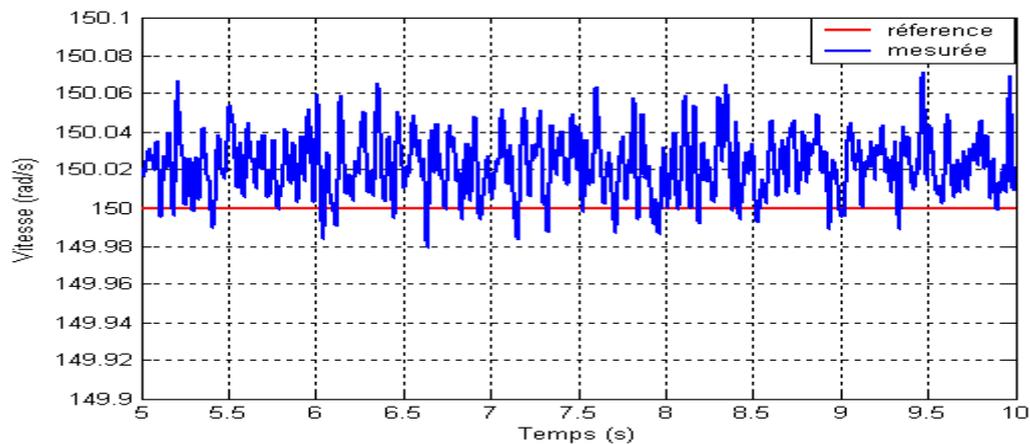


Figure IV.12.c: Zoom sur le régime permanent (PD flu).

D'après les figures ci-dessus, on constate que la vitesse et le flux suivent les valeurs de référence.

On constate aussi que le réglage conventionnel à base de régulateur proportionnel intégrateur (PI) donne des performances inférieures, par rapport au régulateur PI flu vis-à-vis de la stabilité, néanmoins le PI flu a une mauvaise performance pendant le régime transitoire traduite par un temps de montée grand par rapport à celui du proportionnel dérivateur (PD) flu dont l'erreur en régime permanent est difficile à éliminer.

L'association entre les deux régulateurs flous ce qui donne un PID flu, nous apparaît une solution efficace pour remédier à l'inconvénient des deux régulateurs flous.

Les figures ci-dessous présentent la régulation de la vitesse avec un régulateur PID flu :

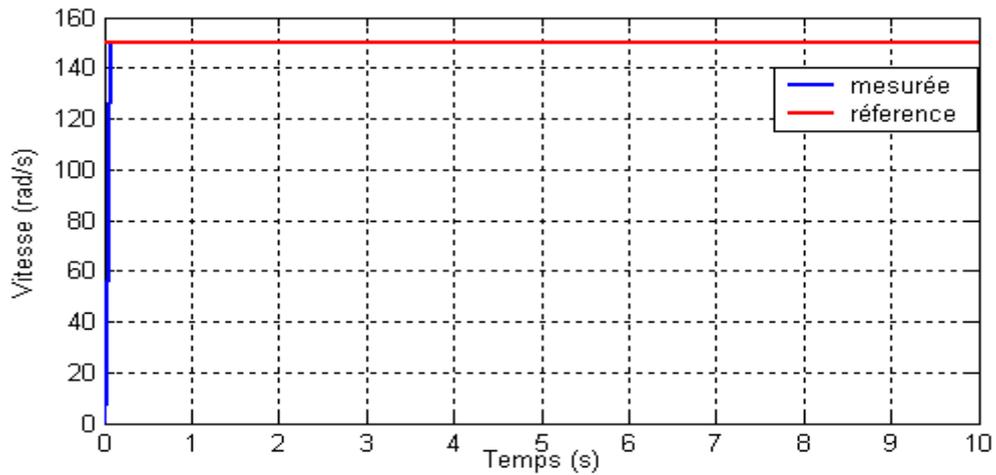


Figure IV.13.a: Allure de la vitesse réglée par un PID fluo.

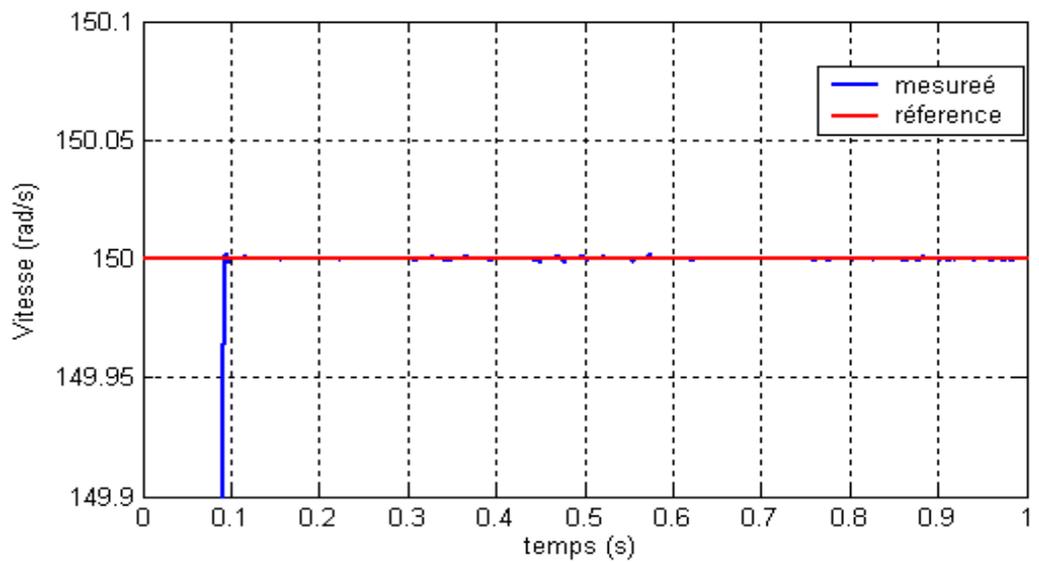


Figure IV.13.b : Zoom sur le régime transitoire du (PID fluo).

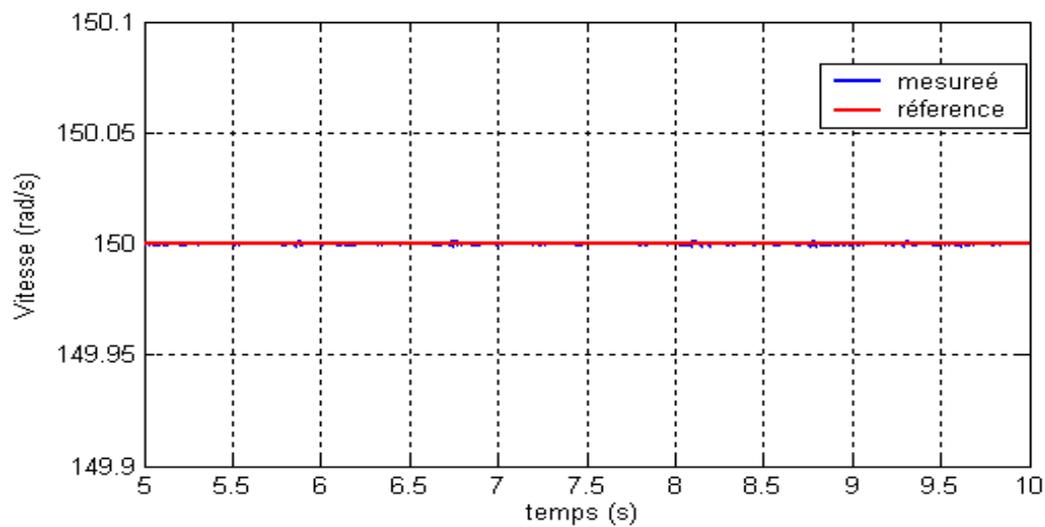


Figure IV.13.c : Zoom sur le régime permanent (PID fluo).

Les figures (IV.1 3) confirment bien, que le régulateur PID est plus performant par rapport aux autres (PI classique, PI flou et PD flou). Le tableau suivant présente une comparaison entre les différents régulateurs.

Tableau IV.1 : Les caractéristiques des différents régulateurs.

Régulateurs	PI classique	PI flou	PD flou	PID flou
Temps de montée(s)	0,25	0 ,432	0.057	0 ,052
L'erreur statique ε (%)	0%	0%	0 ,013%	0%

D'après les résultats obtenus le choix du régulateur de vitesse pour la commande de système de pompage globale, se porte sur le PID flou. Concernant la régulation de flux nous nous limitons à un régulateur PI classique car il présente des bonnes performances statiques et dynamiques.

- **Deuxième étape :** dans cette étape, le système de pompage est connecté au générateur photovoltaïque.

La figure (IV.14) montre le schéma global du système de pompage photovoltaïque. Il comporte : un générateur photovoltaïque optimisé par un contrôleur flou, deux convertisseurs (DC/DC) et (DC/AC), un bloc de commande vectorielle de la MAS munie d'un régulateur PI classique pour la commande du flux et un PID flou pour la commande de vitesse, et un groupe motopompe.

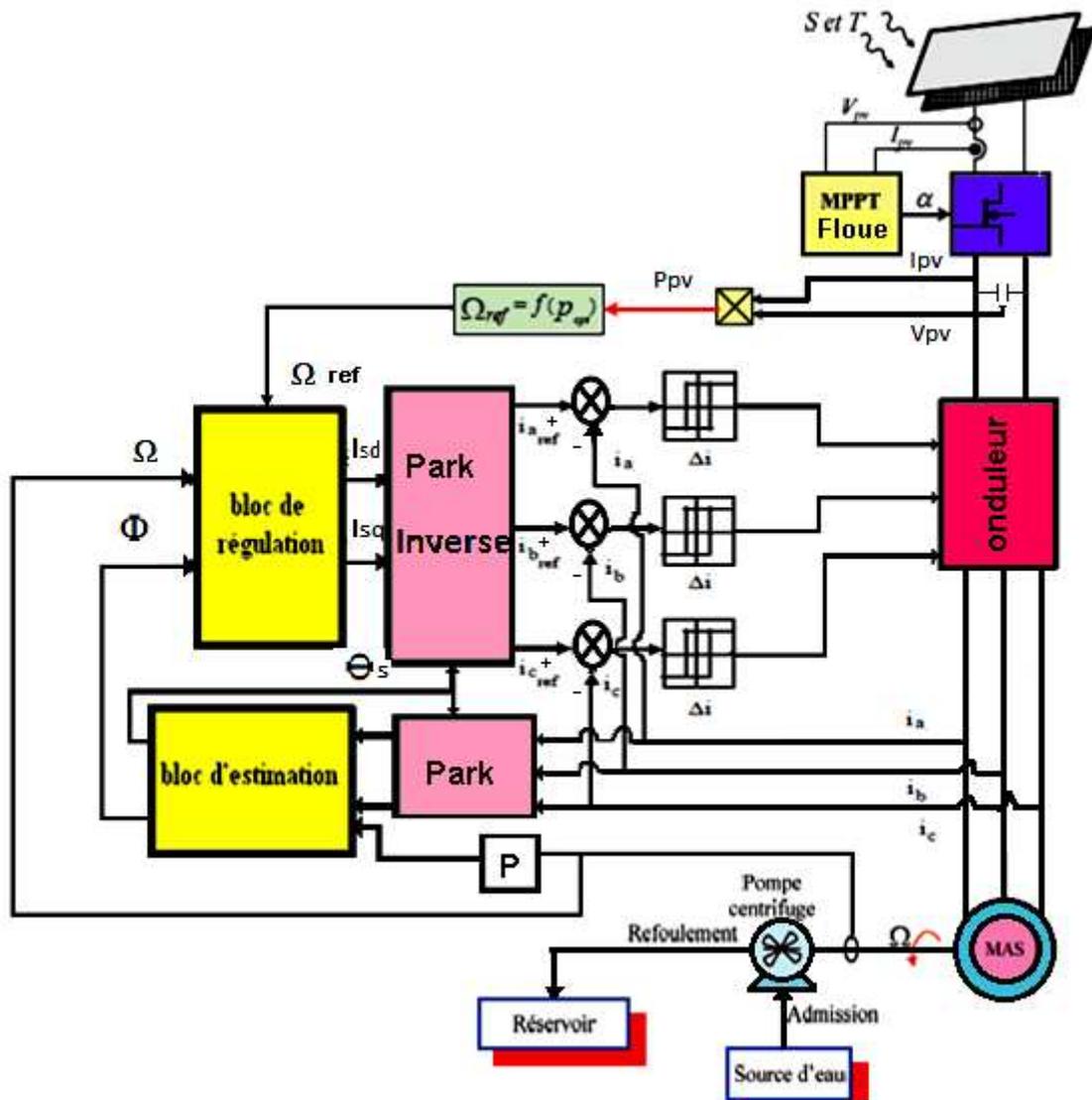


Figure IV.14: Schéma global du système de pompage photovoltaïque.

La simulation de ce système global se fait sous Matlab/Simulink.

Pour un flux de référence $\Phi_{ref} = 0,8 \text{ Web}$, la vitesse (Ω_{ref}) est obtenue en fonction de la puissance photovoltaïque optimisée par l’algorithme MPPT flou. Elle se calcule d’après l’équation (IV.3) de la manière suivante :

$$\Omega_{ref} = \frac{P_{pv_{tot}}}{p \cdot \frac{M}{L} \Phi_r \cdot i_{sq}} \tag{IV.22}$$

Les figures de simulation sont réparties en quatre (4) parties :

- **Première partie :**

En appliquant un échelon d’irradiation $G = 1000 \text{ w/m}^2$ et $T_c = 25^\circ\text{C}$ et à l’instant ($t = 5 \text{ s}$) on fait varier l’irradiation à 800 w/m^2 et $T_c = 25^\circ\text{C}$.

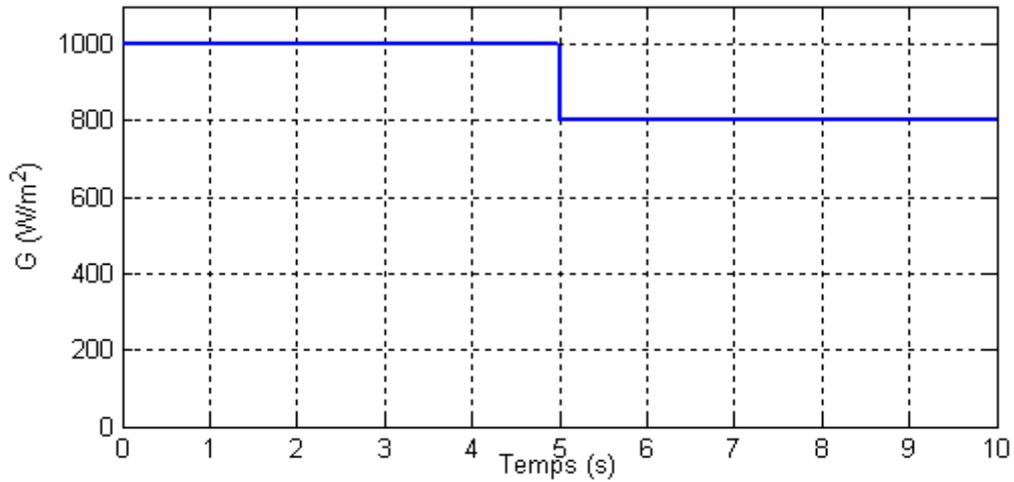


Figure IV.15 : L'évolution de l'irradiation ($G=1000$ et $800 W/m^2$).

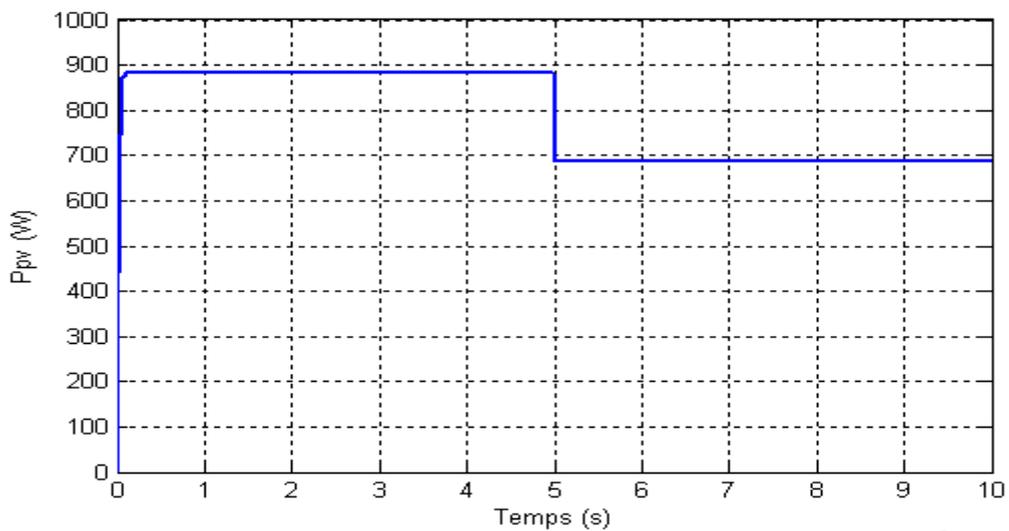


Figure IV.16 : L'évolution de la puissance ($G=1000$ et $800 W/m^2$).

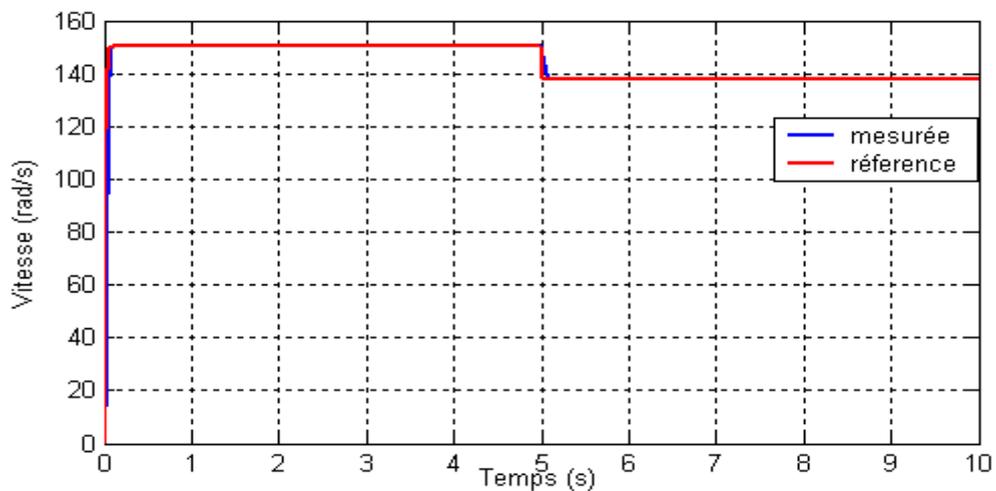


Figure IV.17 : L'évolution de la vitesse ($G=1000$ et $800 W/m^2$).

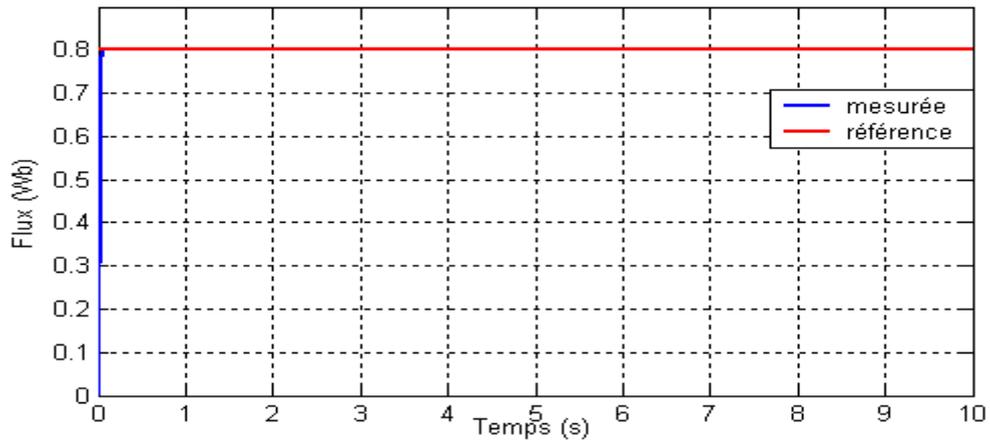


Figure IV.18 : L'évolution de flux ($G=1000$ et 800 W/m^2).

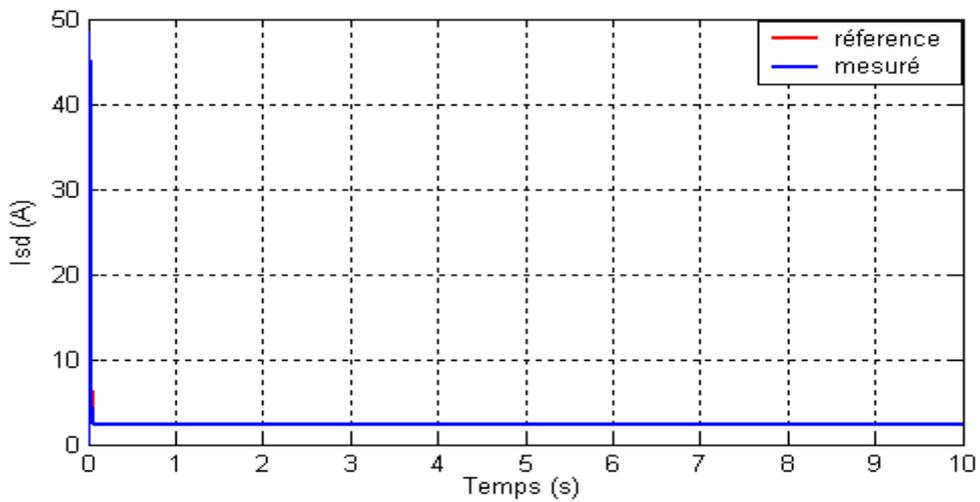


Figure IV.19.a : L'évolution de courant I_{sd} ($G=1000$ et 800 W/m^2).

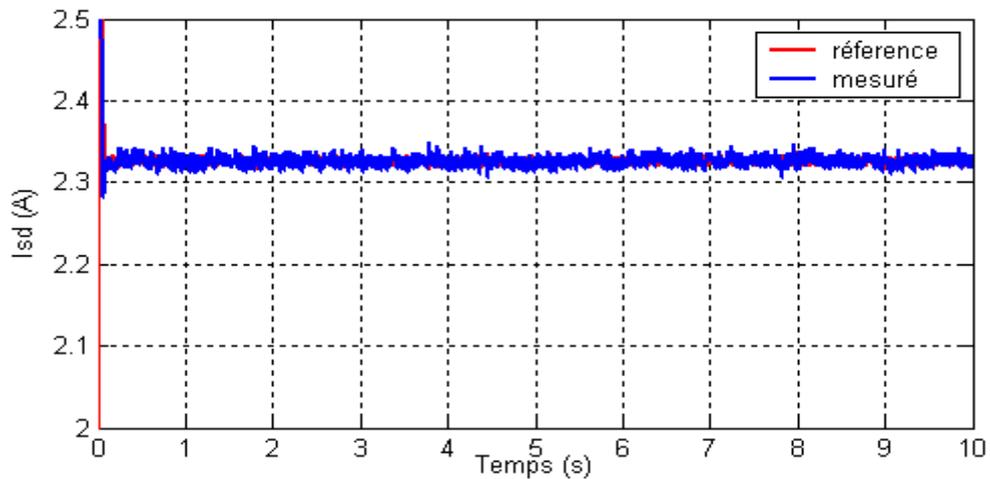


Figure IV.19.b : Zoom sur le courant I_{sd} ($G=1000$ et 800 W/m^2).

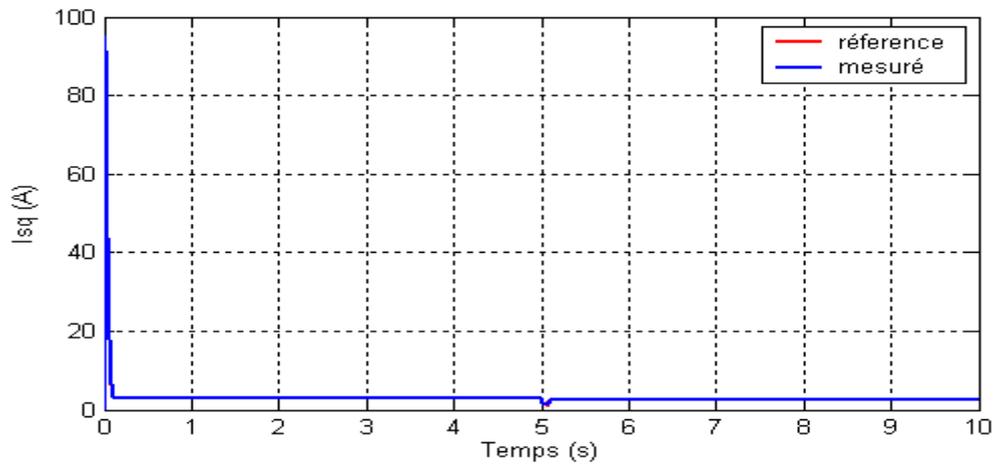


Figure IV.20.a : L'évolution de courant I_{sq} ($G=1000$ et 800 W/m^2).

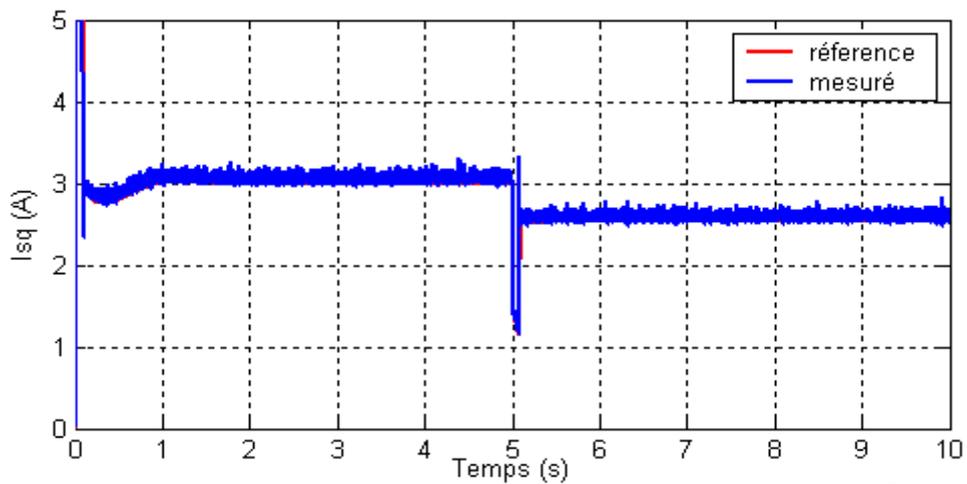


Figure IV.20.b : Zoom sur le courant I_{sq} ($G=1000$ et 800 W/m^2).

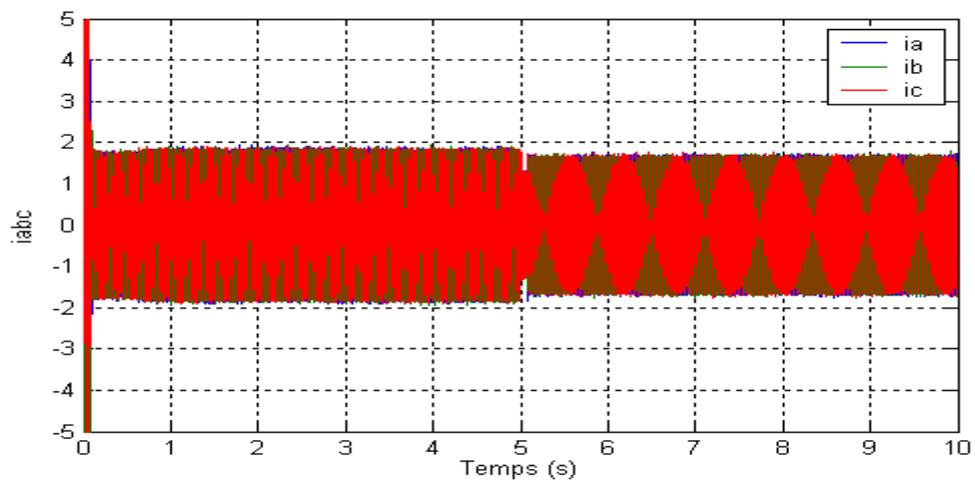


Figure IV.21.a : L'évolution des courants statorique ($G=1000$ et 800 W/m^2).

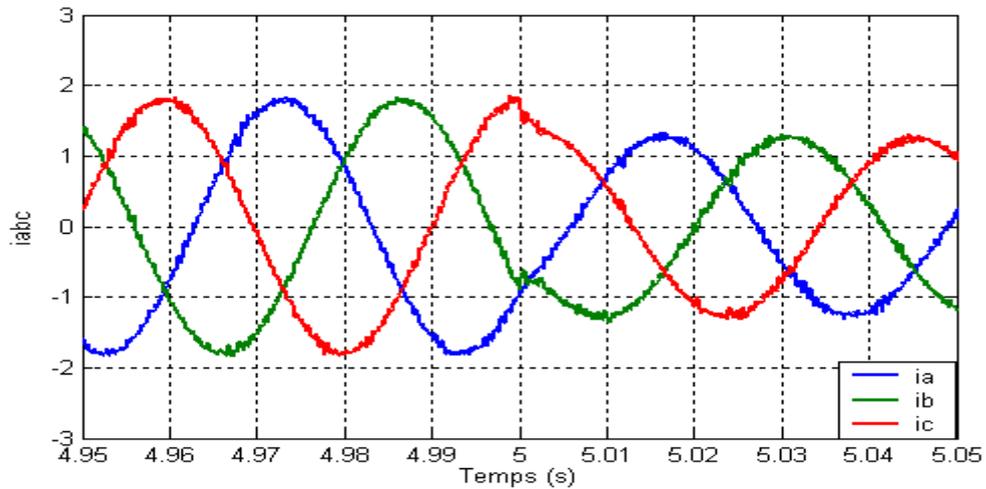


Figure IV.21.b : Zoom sur les courants statoriques ($G=1000$ et 800 W/m^2).

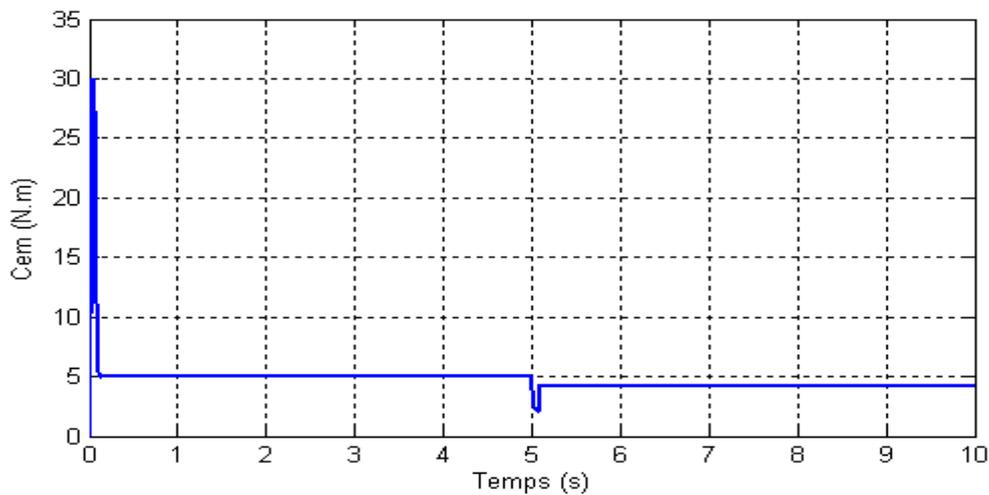


Figure IV.22.a : L'évolution de couple électromagnétique ($G=1000$ et 800 W/m^2).

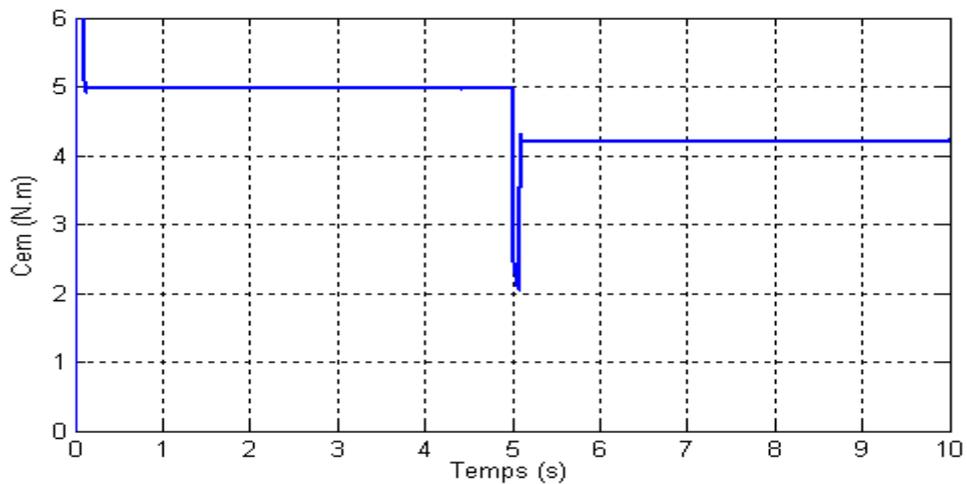


Figure IV.22.b : Zoom sur le couple électromagnétique ($G=1000$ et 800 W/m^2).

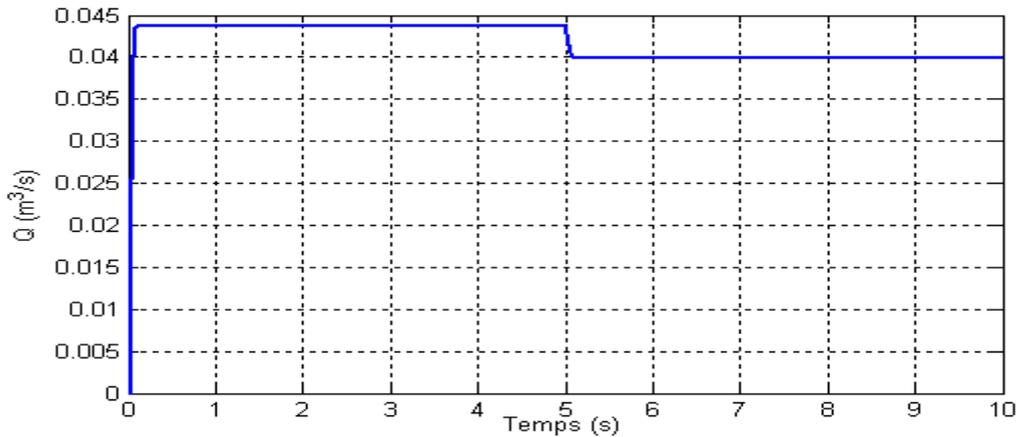


Figure IV.23 : L'évolution de débit ($G=1000$ et 800 W/m^2)

- Deuxième partie :

Dans cette partie nous avons simulé le système de pompage pour une variation de l'éclairement et de la température d'une journée d'été enregistrée à l'université de Bejaia [Lal 09].

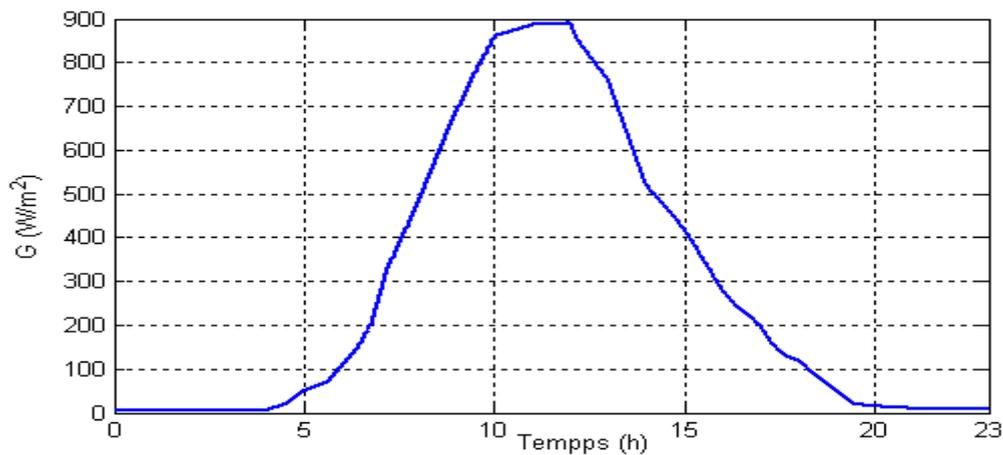


Figure IV.24 : variation de l'éclairement le long d'une journée d'été.

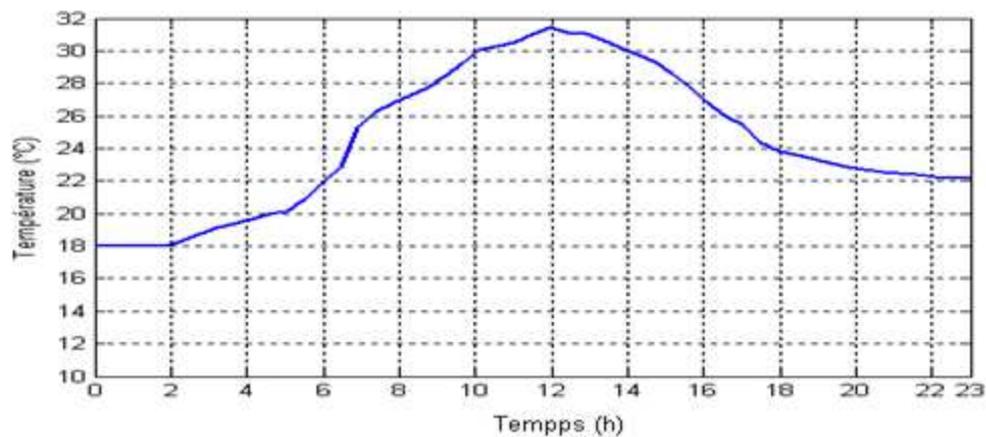


Figure IV.25 : variation de la température le long d'une journée d'été.

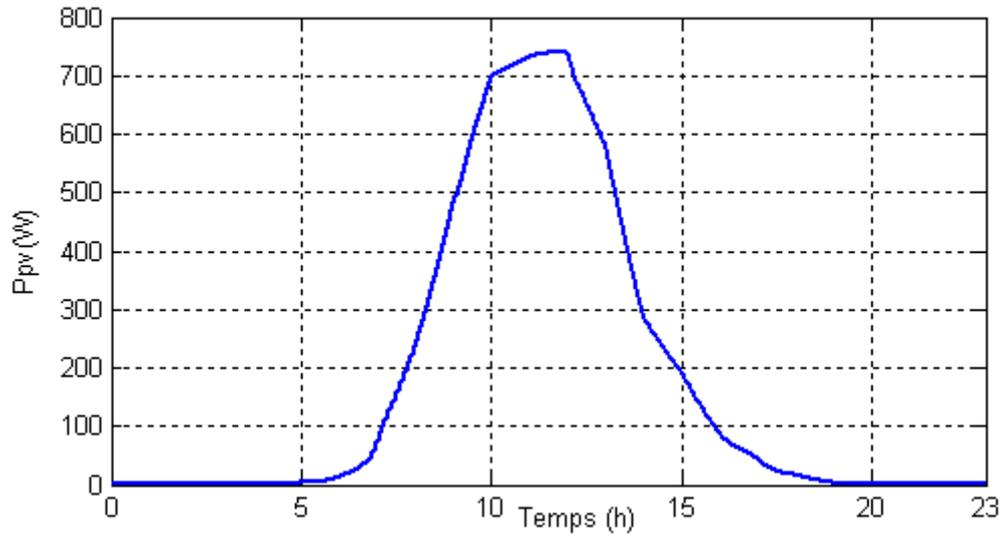


Figure IV.26 : variation de la puissance le long d'une journée d'été.

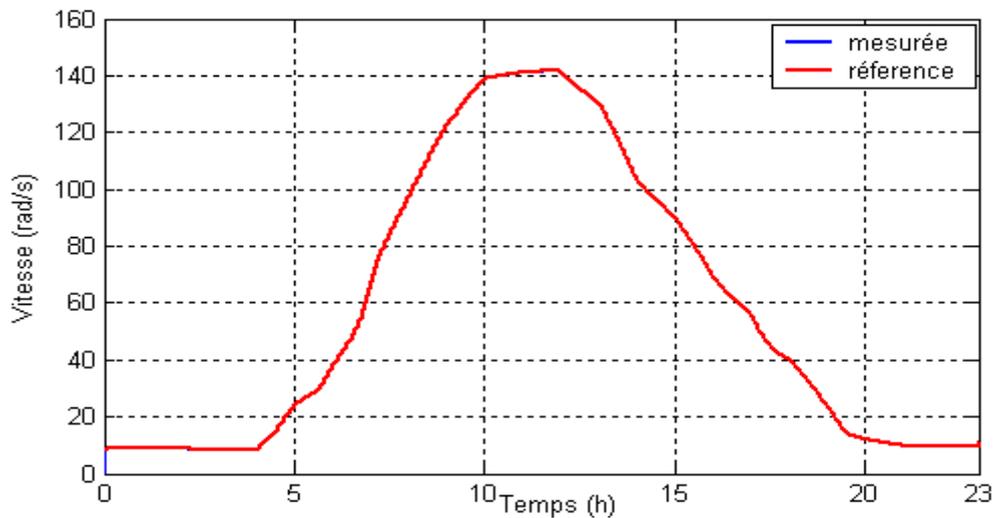


Figure IV.27 : variation de la vitesse le long d'une journée d'été.

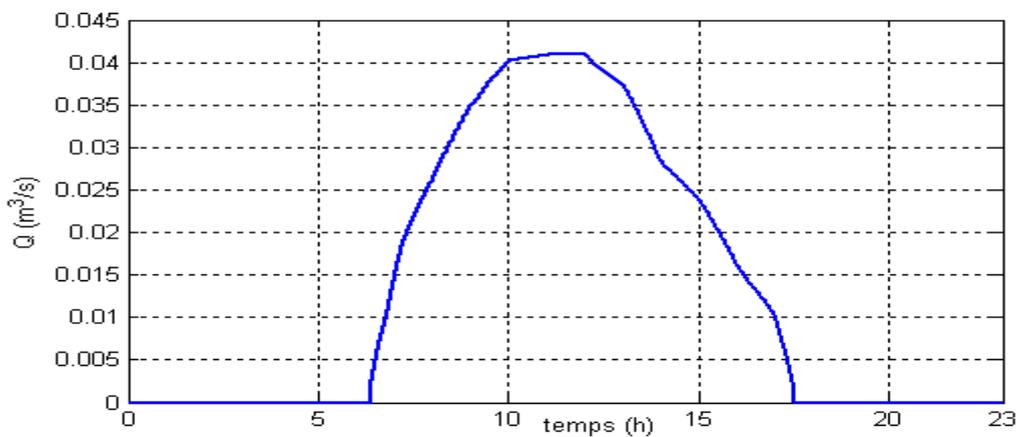


Figure IV.28 : variation de débit le long d'une journée d'été.

- **Troisième partie :**

Les figures ci-dessous sont obtenues en appliquant au système de pompage photovoltaïque une rampe d'éclairement de 0 à 1000W/m^2 .

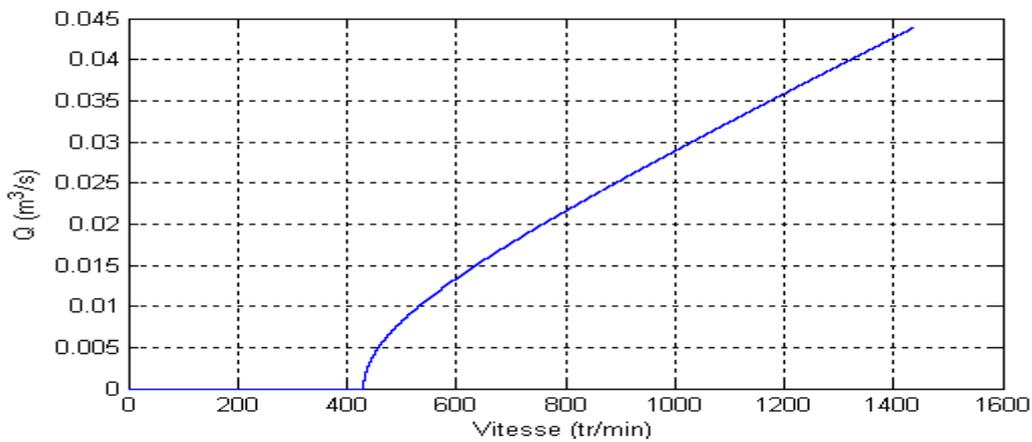


Figure IV.29.a : variation de débit en fonction de la vitesse.

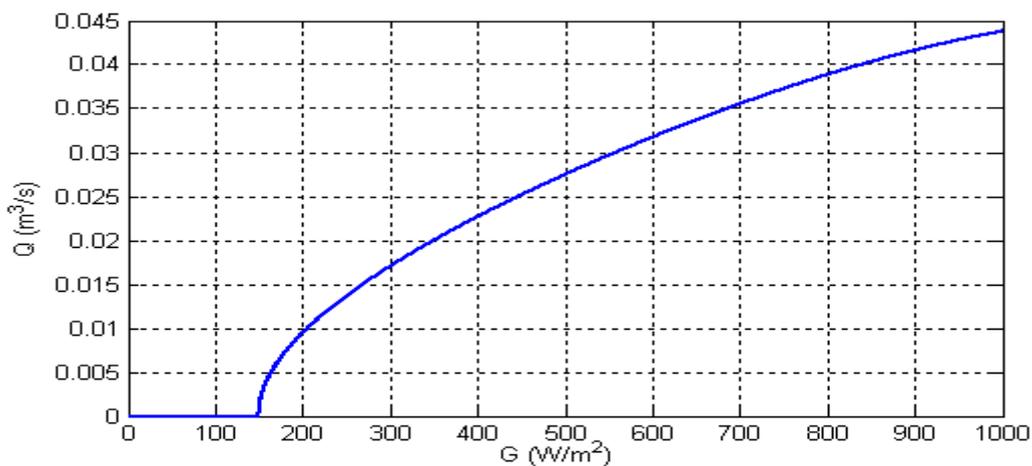


Figure IV.29.b : variation de débit en fonction de l'irradiation.

- **Quatrième partie :**

Cette fois ci nous avons simulé le système de pompage pour une variation de l'éclairement et de la température pour un mois d'été enregistrée à l'université de Bejaia [Lal 09].

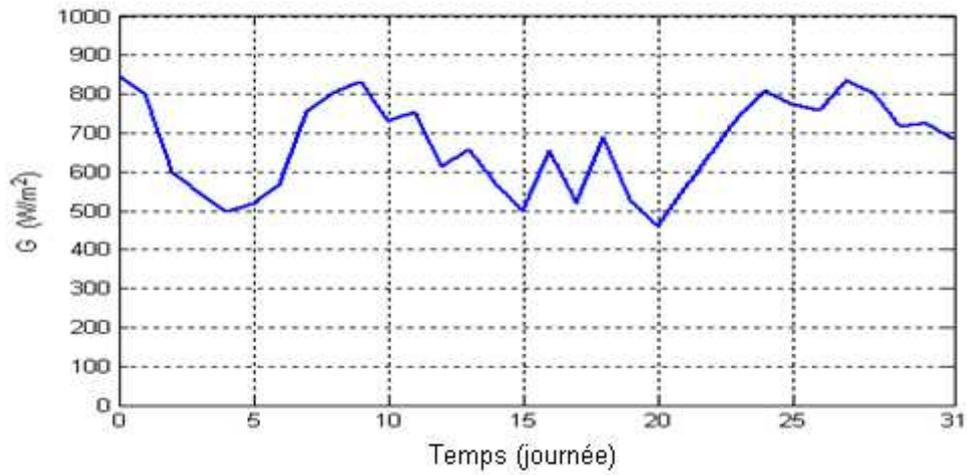


Figure IV.30: variation de l'éclairement le long d'un mois d'été.

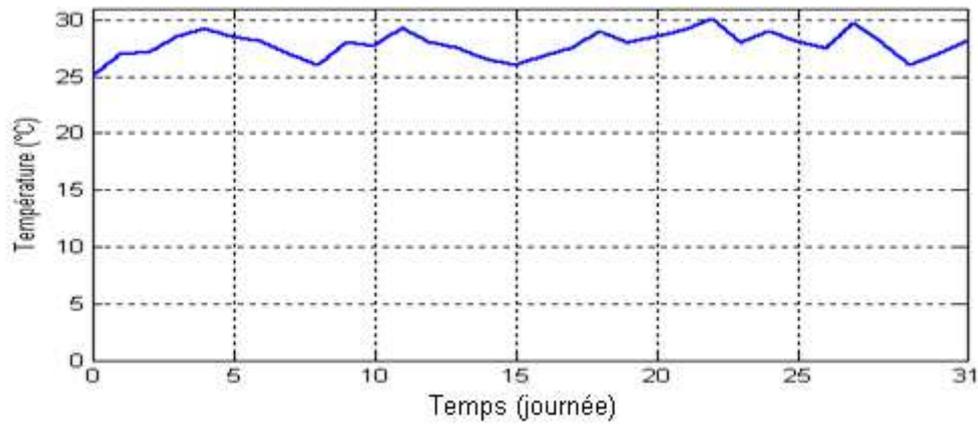


Figure IV.31 : variation de la température le long d'un mois d'été.

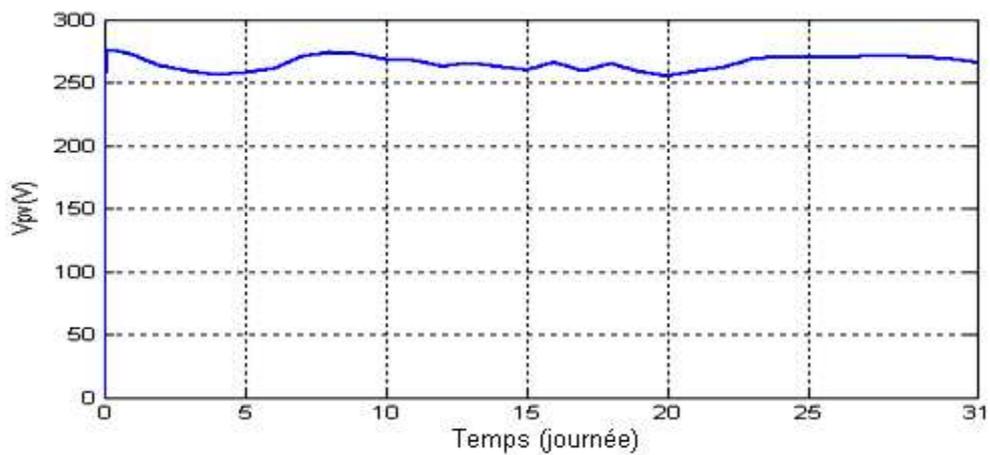


Figure IV.32 : variation de la tension V_{pv} le long d'un mois d'été.

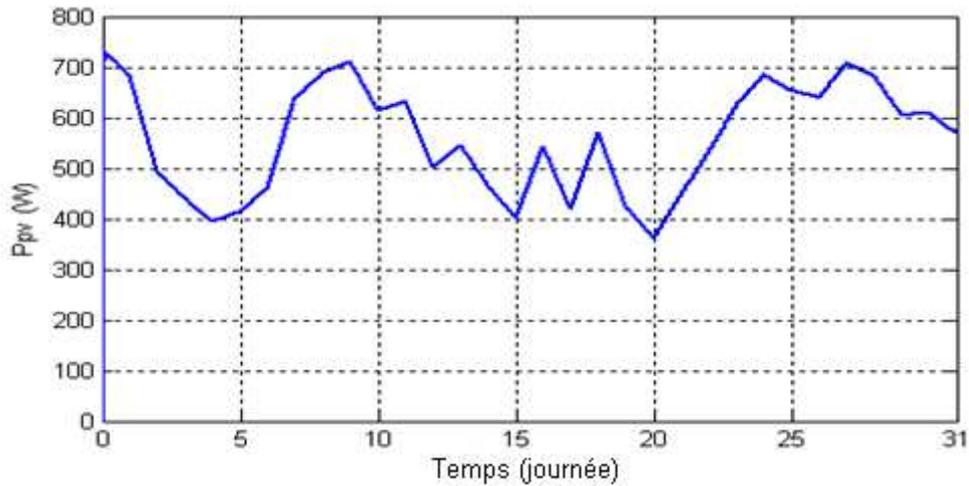


Figure IV.33 : variation de la puissance P_{pv} le long d'un mois d'été.

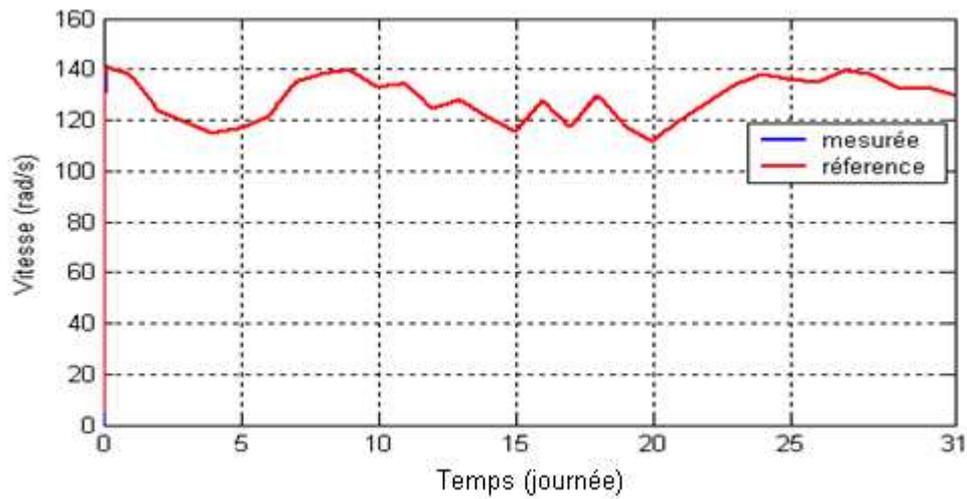


Figure IV.34 : variation de la vitesse le long d'un mois d'été.

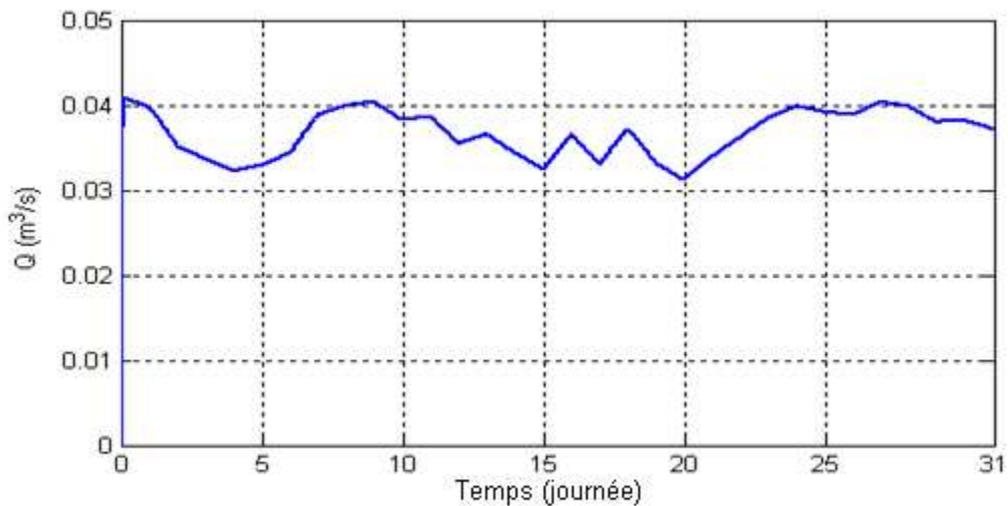


Figure IV.35 : variation de débit le long d'un mois d'été.

IV.6) Interprétation des résultats :

D'après les figures de la première partie, on voit bien que pour une perturbation sur l'éclairement, la vitesse et le flux suit les valeurs de références. On constate aussi qu'à l'instant de la perturbation ($t=5s$), les caractéristiques de $P_{pv}(t)$, $C_{em}(t)$, $I_{sq}(t)$, $I_{abc}(t)$ et $Q(t)$ subissent une variation instantanée. Cependant les allures du flux et du courant I_{sd} ne variaient pas du tout à cause de découplage entre le flux et le couple qui imposé par la commande vectorielle.

Les figures de la deuxième partie sont obtenues pour une variation de l'éclairement et de la température d'une journée d'été. Elles montrent clairement que les allures de la puissance photovoltaïque optimisée par le contrôleur flou, de la vitesse et du débit suivent le profil de l'éclairement et de la température imposés. On peut avoir du pompage à partir de environ de 7 h.

Dans la troisième partie, les figures présentées correspondent aux allures du débit en fonction de la vitesse de rotation et de l'éclairement. On constate que la pompe centrifuge utilisée requière une vitesse de seuil pour l'amorçage au début du pompage qui dépend aussi d'un seuil d'éclairement, correspondant dans notre cas à un éclairement de 150 W/m^2 et une vitesse de 430 tr/m.

Dans la dernière partie, les figures sont obtenues pour une variation moyenne de l'éclairement et de la température pendant un mois d'été. Elles montrent que les allures tension, puissance, vitesse et débit suivent les variations de l'éclairement et de la température sur une durée de temps assez grande.

IV.6) Conclusion :

Après le choix du contrôleur flou pour l'optimisation de l'énergie photovoltaïque appliqué au système de pompage dans le chapitre précédent. Nous avons présenté dans ce chapitre un dimensionnement du système de pompage, ensuite nous avons appliqué la commande vectorielle à flux rotorique orienté. Après avoir testé plusieurs régulateurs, nous avons opté pour un régulateur PID flou car il présente les meilleures performances.

Les performances du système de pompage photovoltaïque ont été testées et représentées pour différent profil d'ensoleillement et de températures.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons appliqué une commande non linéaire à base de logique floue à un système de pompage photovoltaïque, deux contrôleurs floue ont été utilisés, l'un pour l'optimisation de l'énergie photovoltaïque et l'autre pour la commande de la vitesse de la machine asynchrone à cage d'écureuil.

Dans le premier chapitre de ce travail, nous avons présenté des généralités sur l'énergie photovoltaïque et sur les systèmes de pompage utilisant cette dernière comme source d'énergie. A la fin de ce chapitre, nous avons choisi les différents éléments du système étudié.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation des différentes composantes du système de pompes photovoltaïques. Ensuite, on a simulé un panneau (module) photovoltaïque pour différentes ensoleillements et températures afin de tracer les différentes caractéristiques.

L'optimisation du système photovoltaïque a été présentée au troisième chapitre. Nous avons effectué une étude comparative entre deux méthodes MPPT à savoir la méthode P&O et la méthode à base de logique floue, en comparant leurs performances statique et dynamique. Les résultats obtenus ont montré la robustesse du contrôleur floue vis à vis des variations des conditions climatiques. Le contrôleur flou détermine à chaque instant l'incrément optimal nécessaire pour un fonctionnement au point de puissance maximale.

L'objectif du quatrième chapitre est la commande du système de pompage photovoltaïque, en appliquant comme MPPT un contrôleur flou pour l'optimisation de la puissance photovoltaïque. Une commande vectorielle est appliquée sur la machine asynchrone afin de contrôler sa vitesse de rotation. Une comparaison de trois régulateurs (PI classique, PI flou et PD flou) de vitesse a été faite. Pour associer les performances des deux régulateurs flous PI flou et PD flou, à savoir une erreur statique nulle pour le premier et des temps de montée et de réponse meilleurs pour le deuxième, l'idée est d'utiliser un PID flou. Les résultats obtenus confirment les performances souhaitées. Nous avons présentés des résultats de simulation pour différents ensoleillement et températures.

Comme perspective, il serait intéressant de faire l'optimisation de l'énergie photovoltaïque en utilisant d'autres techniques, comme la méthode du gradient, les réseaux de neurones, les algorithmes génétiques,...etc. Une validation par moyens expérimentaux du système de pompage photovoltaïque étudié est souhaitable.

Références bibliographiques

Références bibliographique

- [Ait 11] N. Ait Khelifa « Modélisation d'un système de pompage photovoltaïque utilisant un moteur synchrone à commutation naturelle », Mémoire de Master, Université de Bejaia 2011.
- [Bag 05] L. Baghli « Cours sur la modélisation et commande de la machine asynchrone », Université de Nancy, France, 2005.
- [Bag 99] L. Baghli « Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques », Thèse de Doctorat, Université de Nancy, France, 1999.
- [Bel 10] S. Belakehal « Conception et commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables », Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2010.
- [Bel 08] M. Belhadj « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque », Mémoire de Magister, Université de Bechar, 2008.
- [Ben 05] N. Benyahia, K. Srairi, S. M. Mimoune « Commande de la machine asynchrone par orientation du flux rotorique », Revue, courrier du savoir vol. N°06, pp.147-150, Université Mohamed Biskra, 2005.
- [Ben 09] Z. Bendjellouli « La contribution a la modélisation d'une cellule solaire », Mémoire de Magister, Université de Bechar, 2009.
- [Ber 09] C. Bernard, C. Sebrao – oliveira, B. Laval, C. Vaudouer « Panneau photovoltaïque et algorithme MPPT à base de logique floue », Rapport rédigé dans le cadre l'UV BA04-Energie renouvelables, Université de technologie Compiègne, 2009.
- [Bes 00] P. Bessemoulin, J. Olivieri « Rayonnement solaire et sa composante ultraviolette » la Météorologie série 8 - N° 31, page 42-59, septembre 2000.
- [Bou 09] F. Boumaraf « Commande intelligente d'une association convertisseur statique machine asynchrone à double alimentation », Thèse de Doctorat, Université de Batna, 2009.
- [Bou 10] A. Boussekine, N. Guermouche « Contribution à l'étude des systèmes de pompage photovoltaïque », Mémoire de Master, Université de Bejaïa 2010.
- [Cel 12] Site : www.cellulephotovoltaïque.net, « Généralité sur la cellule photovoltaïque », Consulté en 2012.
- [Cha 2] Site : beams.ulb.ac.be/beams/teaching/elec-h.../CHAP2-ELEC-H-300.pdf, « Chap. 2 : Les Machines électriques – Généralités », Consulté en 2012.
- [Cha 4] Site : beams.ulb.ac.be/beams/teaching/elec-h.../CHAP4-ELEC-H-300.pdf, « Chap. 4: La machine à courant continu », Consulté en 2012.

- [Cha 5] Site : www.wontu.fr/COURS/CHAP-5_POMPES.pdf, « MECA-FLU V : LES POMPES cours CIRA 1ère année », Consulté en 2012.
- [Che 98] F. Chevie, F. Guély « La logique floue » Cahier Technique de Schneider N° 191 éditions mars 1998.
- [Che 07] R. Chenni, L. Zarour, E. Matagne et T. Kerbache « Optimisation d'un système de pompage photovoltaïque », Sciences et Technologie, Vol. N°26, page 49-54, décembre 2007.
- [Che 07] R. Chenni « Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque dans un village solaire », Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2007.
- [Deb 09] L. Debou, D. Maghribi « Commande d'un système hybride (photovoltaïque-éolienne) de production d'énergie », Mémoire de Master, Université de Bejaïa 2009.
- [Dje09] K. Djermouni « Etude d'algorithmes MPPT appliqués aux systèmes de pompage photovoltaïque », Mémoire de Master, Université de Bejaïa 2009.
- [Eco 12] Site : <http://www.economiedenergie.fr/Schema-d-un-module-photovoltaïque-pop-up-.htm>, consulté en 2012.
- [Flé 07] B. Flèche, D. Delagnes « Production D'énergie Electrique : Energie Solaire Photovoltaïque » Energie solaire photovoltaïque.doc / juin 2007.
- [Hac] « Hacheurs », Cours sur l'énergie et convertisseurs d'énergie, Licence EEA Module U6 Université de Savoie, France.
- [Had05] H. Arab, M. Benghanem Et A. Gharbi « Dimensionnement de systèmes de pompage photovoltaïque », Revue des énergies renouvelables. Vol. 8, pages 19 – 26, 2005.
- [Idj 10] K. Idjdarene « Contribution à l'étude et la commande de génératrices asynchrones à cage dédiées à des centrales électriques éoliennes autonomes », Thèse de doctorat en cotutelle entre l'Université Béjaia (Algérie) et l'Université Lille 1 (France), 2010.
- [Jmr 12] Site : www.larmand.fr/MROUSSEL © Copyright 1998 « Eléments constitutifs et synthèse des convertisseurs statiques », page 1-15 consulté en 2012.
- [Kan 07] A. Kanta « Développement d'un système expert basé sur l'intelligence artificielle de pour la prédiction et le contrôle du procédé de rojection plasma », Thèse de Doctorat, Université de Franche –Comté et, Université de technologie de Belfort-Montbiard, 2007.
- [Kas 07] K. Kassmi, M. Hamdaoui et F. Olivie « Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique », Revue des énergies renouvelables, Vol. 10, N°4, page 451 – 462, 2007.
- [Lal 09] S. Lalouni « Etude, commande et simulation d'une chaine hybride (photovoltaïque-éolienne) de production d'énergie électrique », Thèse de Doctorat, Université de Bejaia, 2009.

- [Lal 05] S. Lalouni « Optimisation de la qualité de l'énergie électrique dans le cas d'un chargeur de batterie », Mémoire de Magister, Université de Bejaia, 2005.
- [Man 08] M.N. Mansouri, N. Ghanmi et M.F. Mimouni « Commande et analyse des performances d'une station de pompage photovoltaïque fonctionnant en régime optimal » Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°1 page 1-17, 2008.
- [Mec 12] Site : www.mecaniqueindustrielle.com/html/body_volumetrique.html , « pompe volumétrique », Consulté en 2012.
- [Meh 07] B. Mehimmedetsi « l'application du formalisme Bond Graph à une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque », Mémoire de Magister, Université de Mentourie de Constantine 2007.
- [Mer 10] La, Merad. L. Merad. T, Boussoukaia. B, Bouyoucefa « Automatisation d'une installation solaire à base d'un microprocesseur » Article, laboratoire de matériaux et des énergies renouvelables, Université Abou Baker Belkaid Tlemcen, 2010.
- [Moh 10] A. Mohammed « étude d'un système de pompage photovoltaïque », Mémoire de Master, Université de Bejaïa, 2010.
- [Mok 11] R. Mokni, N. Amaimia « FNEBTP / CSNER installation et maintenance des Systèmes de Pompage Photovoltaïques », Formation sur les systèmes de pompage photovoltaïques, 2011.
- [Mou 02] A. Moussi, A. Saadi « Etude Comparative Entre Les Techniques D'optimisation Des Systèmes De Pompage Photovoltaïque » LARHYSS Journal, N°.01, page 158-168 Mai 2002.
- [Mul 00] B. Multon, H. Ben Ahmed, N. Bernard, P. Cavarec « Les moteurs électriques pour applications de grande série », Revue 3EI page1-10, École Normale Supérieure de Cachan, France, 2000.
- [Nab 06] K. Nabti « Contribution à la commande de la machine asynchrone par DTC et logique floue », Mémoire de Magister, Université Mentouri de Constantine, 2006.
- [Nia 12] Site : webmaster@memoireonline.com « La pompe solaire : Dimensionnement d'une station de pompage en zone maraîcher », Consulté en 2012.
- [Nik 03] M. Nikoz, H. Dehbonei, C. Naher, «A dsp-controlled photovoltaic system with maximum power point tracking», Revue Electrical Engineering and Information Technology ITEE, pp:1-6,Australie 2003.
- [Oul 10] S. Ould-Amrouche, D. Rekioua, A. Hamidat « Modelling photovoltaic water pumping systems and evaluation of their CO₂ emissions mitigation potential» Applied Energy Elsevier Science, Vol 87, pp. 3451–3459, Elsevier Science2010.

- [Ret 08]** J. Retif « Cours sur la commande vectorielle des machine asynchrones et synchrones », Institut National des Sciences Appliquées de Lyon 2008.
- [Ric 11]** A. Ricaud « Les convertisseurs photovoltaïques » Revue des énergies Renouvelables, Valbonne page1-82, f 2011.
- [Rod 06]** J. Rodriguez « Déshydratation par effet de serre d'un produit emballé dans un film polymère perméable aux molécules d'eau : approche expérimentale et de modélisation » Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Centre de Bordeaux, France, 2006.
- [Roy 98]** J. Royer, J. Djiako, E. Schiller Et B. Sada « Le Pompage Photovoltaïque » Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens IEPF/Université d'Ottawa/ EIER/ CREPA, 1998.
- [Stu 00]** G. Sturtzer, E. Smigiel «Modélisation et commande des moteurs triphasés» Edition Ellipse, 2000.
- [Tou 10]** B. Toual « Modélisation et commande floue optimisée d'une génératrice à double alimentation, application à un système éolien à vitesse variable », Mémoire de Magister Université de Batna, 2010.
- [Tra 11]** F. Trahi « Application pour le dimensionnement d'une installation photovoltaïque pour l'alimentation du laboratoire de recherche LAMPA. », Mémoire de Magister, Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2011.
- [Wat 12]** Site : [www.watersanitationhygiene.org/.../EH.../Pumps%20\(ACF\)](http://www.watersanitationhygiene.org/.../EH.../Pumps%20(ACF)), « Le pompage » Consulté en 2012.
- [Zar 10]** B. Zarour « Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien hors réseau », Thèse de Doctorat, Université de Mentouri de Constantine, 2010.
- [Che 06]** R.Chenni, L.Zarour, A.Bouزيد and T.Kerbache comparative study of photovoltaic pumping systeme using a permanent magnet synchronous motor and an asynchronous motor ,Rev.Energ.Ren.Vol.9,2007.

Annexe

Annexe

- **Caractéristiques des panneaux photovoltaïques de type SIEMENS SM 110-24 .110Wc [Lal 05]:**

Paramètres	valeurs
Puissance maximale du panneau P_{mpp}	110W
Courant au point de puissance maximale I_{mpp}	3,15A
Tension au point de puissance maximale V_{mpp}	35V
Courant de court-circuit I_{cc}	3,45A
Tension en circuit-ouvert V_{co}	43,5
Coefficient d'incrémentement du courant (α_{cc})	1,4mA/°C
Coefficient d'incrémentement de la tension (β_{co})	-152mV/°C

- **Paramètres de la machine asynchrone [Che 06] :**
- La machine utilisée est une machine asynchrone à cage d'écureuil standard. Ses caractéristiques principales sont présentées dans le tableau suivant :

Paramètres	valeurs
Puissance nominale P	746 W
Vitesse de rotation nominale N	14 33tr/mn
Fréquence f	60 Hz
Courant I	3.4 A
Couple électromagnétique C_{em}	5 N.m
Nombre de paire de pôles P	P = 2
Inertie J	$3 \cdot 10^2$ kg /m2
Inductance mutuelle M	0.3439 H
Inductance cyclique statorique L_s	0.3676 H
Inductance cyclique rotorique L_r	0.3676 H
Résistance statorique R_s	4 Ω
Résistance statorique R_r	1.143 Ω
Coefficient de frottement visqueux	0

➤ Paramètres de la pompe centrifuge [Dje 09]:

Vitesse nominale ω_n	150 rad/sec
Constante C1	$4.9234 \cdot 10^{-3} \text{ m}/(\text{rad}/\text{sec})^2$
Constante C2	$1.5826 \cdot 10^{-5} \text{ m} / (\text{rad}/\text{sec})^2$
Constante C3	$-18144 \text{ m} / (\text{rad}/\text{sec})^2$
Hauteur manométrique H	10 m
coefficient des pertes de charge dans la canalisation λ	0.036m
coefficient de pertes de charge locales ou singulière ζ	6.3m
diamètre de la canalisation d	0.06m
Longueur de la canalisation l	7.4m
La gravitation g	9.81 (m/s ²).

Résumé :

Ce travail a pour but de tester la robustesse de la commande par logique floue appliquée à un système de pompage photovoltaïque. Deux stratégies de commande sont mises en œuvre, la première est basée sur l'optimisation de l'énergie photovoltaïque, qui assure un fonctionnement du générateur photovoltaïque à sa puissance maximale. La deuxième stratégie utilise la commande vectorielle par orientation du flux rotorique pour piloter la vitesse du moteur asynchrone entraînant la pompe centrifuge.