REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté De **T**echnologie
Département Du **G**énie **E**lectrique

Mémoire de Fin d'Études

Présenté pour l'obtention du Diplôme
De Master en Génie Électrique
Options : Commandes électriques

THEME

Alimentation D'un Moteur à Courant Continu Par Une Source Photovoltaïque Utilisée Dans L'application Agricole

Proposés et Dirigés par :
Dr. MEDJBER Ahmed

Préparés et présentés par :
Chaouati Khadîdja
Benyounes Mahdjouba

Promotion 2023

Remerciements

Nous remercions «Allah » qu'il nous a donné du courage et de la Volonté d'avoir réussi dans notre étude.

Nous remercions chaleureusement nos entraîneurs **Dr. Ahmed Madjber** qui a proposé ce sujet de recherche, et qui nos encadré et surtout pour ses conseils, sa compréhension, sa gentillesse.
Nous exprimons également notre gratitude à nos parents et à notre famille pour leur aide et leur patience tout au long de ce voyage.

Nous remercier aussi toute personne qui a contribué de loin ou de près à la réalisation de ce mémoire, et nos professeurs du Département de génie électrique et tous les enseignants de l'université de **Yahia Fares De Médéa**.

En fin, mon respect aux membres de juré d'avoir accepté d'honorer ce jury pour examiner mon mémoire.

Dédicaces

A mon premier soutien dans la vie, dont je porte le nom avec fierté, qui m'a apporté tout le soutien matériel et moral, mon cher père

Mon modèle et mentor, dont les prières ont été la raison de mon succès, ma mère gentille et affectueuse

Les mots ne peuvent exprimer ce que tu m'as donné ni tes sacrifices pour moi

Qui m'a toujours encouragé mes frères

Youcef, Ibrahim, Mariam.

Merci à mes proches du cœur qui m'ont soutenu tout temps

Merci à tous mes amis et mes collègues.

Khadîdja

Dédicace

A qui dieu a confié avec crainte et révérence ……..à celui qui m'a appris à donner sans Attendre …à celui dont je porte le nom avec fierté …

Mon cher père (djabri)

Et à mon ange en la vie …au sens de l'amour et au sens de la tendresse

Ma chère mère (Malika)

Et ceux qui m'ont soutenu tout au long de mon académique

Mes frères

(Mohammed, faiza, Hayet, Ouhiba, Isshak, Amina, ania, manar, hossem)

Et à l'âme pure de la fille de ma tante

(Souad)

Et à ceux qui sont proches du cœur et supporters dans

Les bons et les mauvais moments,

(Amira, souhyela, chaima, khadidja)

Merci.

Mahdjouba

Résumé

L'énergie solaire est considérée comme l'une des énergies les plus importantes disponibles partout sur la surface de la terre parce qu'elle est libre et renouvelable. Son exploitation se situe dans des zones isolées loin du réseau de distribution d'électricité, et parmi les domaines de son utilisation dans ces zones est le domaine agricole.

Le but de l'achèvement de ce mémorandum est d'étudier un système composé de plusieurs générateurs solaires, un moteur à courant continu MCC portatif et une pompe d'eau qui partagent ces appareils les uns avec les autres pour assurer une réduction du prix de la conversion d'énergie et une augmentation de l'efficacité. Utiliser des algorithmes pour rechercher les points de puissance maximum MPPT.

Mots clés : PV, énergie photovoltaïque, MPPT, pompe d'eau, MCC.

ملخص:

تعتبر الطاقة الشمسية من أهم الطاقات المتوفرة في كل مكان على سطح الأرض لأنها مجانية ومتجددة بالكامل يمكن استغلالها في المناطق المعزولة البعيدة عن شبكة توزيع الكهرباء ومن بين مجالات استعمالها في هذه المناطق مجال الزراعي (ضخ المياه).

الغرض من انجاز هذه المذكرة دراسة نظام يتكون من عدة أجهزة: مولد الطاقة الشمسية، محول، محرك تيار مستمر ومضخة تتشارك هذه الاجهزة لضمان خفض سعر تحويل الطاقة وزيادة في الكفاءة. باستعمال خوارزميات البحث عن نقاط الطاقة القصوى.

Abstract

Solar energy is considered one of the most important energies available everywhere on the surface of the earth because it is free and renewable. Its exploitation lies in isolated areas far from the electricity distribution network, and among the fields of its use in these areas is the agricultural field.

The purpose of the completion of this memorandum is to study a system consisting of several solar generator devices, a portable direct current motor and a pump that share these devices with each other to ensure a reduction in the price of energy conversion and an increase in efficiency . Using maximum power point search algorithms MPPT.

Keywords: PV, photovoltaic energy, MPPT, water pump, MCC

Liste des symboles

E : L'énergie d'un photon

h : Constante de Planck [j. s^{-1}].

C : Vitesse de la lumière [m. s^{-1}].

λ : Longueur d'onde [m].

I_{ph} : Photo-courant (A).

I: Le courant de saturation(A)

R_s : La résistance série (Ω).

R_{sh}: La résistance parallèle shunt (A)

I_D : Courant de jonction (A)

I_{Rsh}: Courant dans la résistance parallèle Shunt (A).

I_d: Courant de diode (A).

I_0: Courant de saturation de la diode (A)

I_{ch}: Courant de la charge (A).

V_{pv}: Tension photovoltaïque (V).

I_{opt}: Courant Optimal.

V_{opt}: Tension Optimale.

V_d: Tension aux bornes de diode (V).

V_g: Tension de seuil de la diode (1.12 eV).

V_{ch}: Tension de la charge (V).

A : Facteur de qualité de la diode.

$I_{s1} et\ I_{s2}$: Courants de saturation des diodes D1, D2 (A).

$I_{d1} et\ I_{d2}$: Courants des diodes (A).

n : Le facteur de non idéalité de la jonction de la diode.

γ: Facteur de non idéalité de la jonction.

V_t : Tension thermique à la température T (V).

T : Température effective de la cellule (K). G : L'ensoleillement en (W /m²).

q : Charge de l'électron (1.602×10^{-19}C).

E_g : énergie de gap (pour le silicium cristallin est égale à 1.12 eV).

K : Constante de Boltzmann (1.381×10^{-23}J/k).

Icc : Courant de court-circuit (A).

Vco : Tension de circuit-ouvert (V).

P : Puissance fournie par la cellule (W).

V : Tension ou borne de la cellule (V).

I : Courant débitée par la cellule (A).

P_{max} : Puissance maximal fournie par la cellule (W).

V_{max} : Tension maximal fournie par la cellule (V).

I_{max} : Courant maximal fournie par la cellule (A).

P_{inc} : Puissance solaire incidente (W).

N_s : Nombre de cellule en série.

N_p : Nombre de cellule en parallèle.

I_{scc} : Courant de court-circuit du module PV série (A).

V_{sco} : Tension du circuit ouvert du module PV série (V).

I_{pcc} : Courant de court-circuit du module PV parallèle (A).

V_{pco} : Tension du circuit ouvert du module PV parallèle (V).

T_s : La période de commutation (s)

d : Rapport cyclique du commutateur

C : Capacité du condensateur (F).

L : L'inductance (H).

U_f : Tension d'excitation (V).

R_f : Résistance d'inducteur (Ω).

I_f : Courant d'inducteur (A).

L_f : Inductance de l'inducteur (H).

U_a : Tension de l'induit (V).

R_a : Résistance équivalente de l'induit (Ω).

I_a : Courant de l'induit (A).

L_a : Inductance de l'induit (H).

P : Le nombre de pair de pôles.

M_{fd} : Inductance mutuelle inducteur-induit (H).

Ω_r : Vitesse de rotation (rad /s).

E : Force contre électromotrice FEM (V).

C_{em} : Couple électromagnétique (Nm).

C_r : Couple résistant (Nm).

K_m : Constante du moteur (V/rad.s^{-1}).

J : Moment d'inertie (Kg.m²).

f : Coefficient de frottement (N.m/rad).

: Gain proportionnel du correcteur PI.

K_i : Gain intégral de correcteur PI.

ρ : C'est la densité du liquide (pour l'eau =1000 $Kg/m3$) ;

g : l'accélération de pesanteur.

η : rendement de la pompe.

Hg : auteur géométrique à l'aspiration

Np : nombre moyen des personnes pour chaque famille

N_f: Nombre de familles de la ferme

Q_p : Consommation moyenne d'eau quotidienne pour une personne

Qan : Quantité moyenne d'eau destinée pour La consommation les animaux de la ferme.

Q_{irr} : Quantité moyenne d'eau destinée pour l'irrigation de la ferme

Abréviation

GPV : Générateur photovoltaïque.

PV : Photovoltaïque.

PPM : Point de puissance maximal.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

P&O : Perturbation et observation.

DC : Courant Continu.

MCC : Moteur à courant continue

Flou : logique flou

IncCond : incrémentation de conductance

FF=facteur de forme

PI : Proportionnel et Intégral

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 Analyse spectrale du rayonnement solaire 6

Figure I.2 Rayonnement spectral extraterrestre, direct et diffus du soleil 7

Figure I.3 Rayonnement solaire globale sur un collecteur photovoltaïque 8

Figure I.4 Structure de cellule solaire 10

Figure I.5 Fonctionnement de la cellule photovoltaïque 11

Figure I.6 Schéma de constitution d'un moteur à courant continu 13

Figure I.7 stator 14

Figure I.8 Rotor 14

Figure I.9 Collecteur balais du MCC 15

Figure I .10 les schémas des différents types d'excitations 16

Chapitre II

Figure II.1 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque à une diode 19

Figure II.2 Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire à deux exponentielles 20

Figure II.3 Schéma électrique d'un générateur photovoltaïque, modèle à une diode 22

Figure II.4 Schéma électrique équivalent d'un générateur photovoltaïque 24

Figure II.5 Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ b) $P_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau PV 25

Figure II.6 Influence du branchement série parallèle sur la caractéristiques a) $Ipv(V_{pv})$ et b) P_{pv} (V_{pv}) 26

Figure II.7 Influence de l'éclairement sur les caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ et P_{pv} (V_{pv}) 26

Figure II.8 la caractéristique a)I_{PV} (V_{PV}) ;b) P_{PV} (V_{PV}) pour les différentes températures 27

Figure II.9 Circuit idéal d'un convertisseur Buck 28

Figure II.10 Schémas équivalents du hacheur dévolteur (a) : K fermé, (b) : K ouvert 28

Figure II.11 Circuit idéal d'un convertisseur Boost 30

Figure II.12 Schémas équivalents du hacheur survolteur (a) : K fermé ;(b) : ouvert Pour la première période αT_S 30

Figure II.13 Convertisseur Buck-Boost durant l'état on 31

Figure II.14 Convertisseur Buck-Boost durant L'état off 31

Figure II.15 Circuit idéal d'un convertisseur buck-boost 31

Figure II.16 Schéma électrique du moteur à excitation série 32

Figure II.17 Schéma électrique du moteur à excitation shunt 33

Figure II.18 Schéma électrique du moteur à excitation composée 33

Figure II.19 Schéma électrique du moteur à excitation séparée 33

Figure II.20 Schéma électrique du modèle de moteur choisi 34

Chapitre III

Figure III.1 Schéma synoptique du couplage photovoltaïque avec MPPT 38
Figure III.2 Caractéristique(Ppv, Vpv) d'un panneau solaire 39
Figure III.3 Principe de la première commande MPPT numérique 41
Figure III.4 Caractéristiques P=f(V) et I=f(V) 43
Figure III.5 Organigramme de l'algorithme P&O 45
Figure III.6 Organigramme de l'algorithme IncCond 46
Figure III.7 Réponse de l'Algorithme P&O lors de fonctionnement standard 47
Figure III.8 évolution du point de fonctionnement du GPV d'une augmentation de l'éclairement 47
Figure III.9 Réponse de l'Algorithme P&O lors de fonctionnement standard 48
Figure III.10 Réponse de l'Algorithme Incond lors de fonctionnement standard 49
Figure III.11 Réponse des trois contrôleurs dans les conditions standards 49
Figure III.12 Variation de l'éclairement en fonction de temps 50
Figure III.13 Réponse des trois contrôleurs lors d'une diminution de l'éclairement 51
Figure III.14 Variation de la température en fonction de temps 52
Figure III.15 Réponse des trois contrôleurs lors d'une augmentation de la température 52
Figure III.16 Réponse des trois contrôleurs lors d'une diminution de la température 53
Figure III.16 Evolution du point de fonctionnement du GPV respectivement lors d'une augmentation et diminution de la température 53

Chapitre IV

Figure IV.1 Schéma synoptique du système PV contrôlé par MPPT 56
Figure IV.2 Réservoir de stockage d'eau 62
Figure IV.3 système de commande en boucle ouvert 63
Figure IV.4 système de commande en boucle fermée 63
Figure IV.5 Schéma bloc de la boucle du courant 64
Figure IV.6 Schéma bloc de la boucle du couple 65
Figure IV.7 Schéma bloc de la boucle de vitesse 65
Figure IV.8 Schéma bloc de vitesse de rotation en fonction de la force Contre électromotrice 65
Figure IV.9 Schéma fonctionnel du moteur à excitation séparée 66
Figure IV.10 Schéma de commande utilisant la structure PI 66

Figure IV.11 : Schéma bloc du système global 67

Figure IV.12 Schéma bloc de simulation de la machine à courant continu 68

Figure IV.13 Vitesse mécanique de la MCC 68

Figure IV.14 Couple électromagnétique de la MCC 68

Figure IV.15 Courant de la MCC 69

Figure IV.16 Vitesse mécanique de la MCC 69

Figure IV.17 Courant de la MCC 69

Figure IV.18 Couple électromagnétique de la MCC 69

Figure IV.19 Vitesse mécanique de la MCC 70

Figure IV.20 Courant de la MCC 70

Figure IV.21 Couple électromagnétique de la MCC 70

Figure IV.22 Irradiation solaire 71

Figure IV.23 Vitesse de la machine MCC 71

Figure IV.24 Courant de la MCC 71

Figure IV.25 Couple électromagnétique de la MCC 71

Figure IV.26 Vitesse de la machine MCC 71

Figure IV.27 Couple électromagnétique de la MCC 71

Figure IV.28 Courant de la MCC 72

Figure IV.29 Débit d'eau de la pompe 72

Figure IV.30 Hauteur d'eau du réservoir 72

Figure IV.31 Vitesse de la machine MCC 73

Figure IV.32 Couple électromagnétique de la MCC 73

Figure IV.33 Courant de la MCC 73

Figure IV.34 Puissance hydraulique de la pompe 73

Figure IV.35 Hauteur d'eau 73

Figure IV.36 Débit d'eau de la pompe 73

Liste des tableaux

Tableau IV.1 Détermination des besoins en eau journaliers de l'installation de pompage 60

Tableau IV.2 Détermination de la hauteur manométrique totale (HMT) 60

Introduction générale……..……1

Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïque et Les machines à courant continu (MCC)

I.1.Introduction…….……..5

I.2. Généralités sur les systèmes solaires……5

I.2.1.Spectre solaire……6

I.2.2.Rayonnement solaire……..7

I.2.3.L'énergie solaire……8

I.3 Cellule photovoltaïque…….....9

I.3.1 Historique…….....9

I.3.2 Structure physique……..9

I.3.3.Rendement……..……..……...10

I.3.4.Fonctionnement……10

I.3.5. Technologie des cellules solaires…….……...11

I.4 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques…….12

I.4.1 Avantages……..……..12

I.4.2 Inconvénients……12

I.5. Généralités sur la machine à courant continu…….13

I.5.1.Costitution de la machine à courant continue……...13

I.5.2.1 Le stator (L'inducteur).....14

I.5.2.2 Le rotor (L'induit)……..14

I.5.2.3 Collecteur/ balais…….....15

I.5.2.principe de fonctionnement de la machine à courant continue……15

I.5.3 Les différents modes d'excitations…….....16

I.5.3.1 Moteur à excitation séparée (indépendante)……..……....16

I.5.3.2 Moteur à excitation shunt (dérivée) parallèle…….16

I.5.3.3 Moteur à excitation série…….....16

I.5.3.4 Moteur à excitation composée (compound)……..16

I.5.4 Choix du moteur à courant continu…….....16

I.5.5 Avantages et inconvénients des machines à courant continu……...17

I.6.Conclusion…….....17

Chapitre II : Modélisation d'une alimentation photovoltaïque

II.1 Introduction……19
II.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque……19
II.2.1 Modélisation d'une cellule photovoltaïque à une seule diode…….19
II.2.1.1 Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque à une diode……19
II.2.1.2 Modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque à une diode……..20
II.2.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque à deux diodes……...20
II.2.2.1 Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque à deux diodes…….20
II.2.2.2 Modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque à deux diode……...20
II.2.3 Modélisation d'un générateur photovoltaïque (GPV)……..21
II.2.3.1 Modélisation d'un générateur photovoltaïque à une seule diode.....21
II.2.4 Paramètres d'une cellule photovoltaïque…….23
II.2.4.1 Courant de court-circuit (I_{cc})……23
II.2.4.2 Tension de circuit-ouvert (V_{co})……..23
II.2.4. 3 Facteur de forme……..23
II.2.4. 4 Rendement énergétique……24
II.2.5 Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque à deux diodes (GPV).....24
II.2.5.1 Modèle électrique d'un champ photovoltaïque à deux diodes…..24
II.2.5.2 Modèle mathématique d'un champ photovoltaïque à deux diodes……...24
II.2.6 Caractéristique électrique d'un module PV à une seule diode…….25
II.2.6.1 Influence du branchement série parallèle sur les caractéristiques ….....25
II.2.6.2 Influence de l'éclairement……26
II.2.6.3 Influence de la température……...26
II.3 Modélisation d'un convertisseur continu-continu (hacheur DC-DC)……27
II.3.1 Convertisseur Buck (hacheur dévolteur)……...28
II.3.2 Convertisseur Boost (hacheur survolteur)……29
II.3.3 Convertisseur Buck-Boost (hacheur dévolteur-survolteur)……..31
II.4. Modélisation de la machine à courant continue……...32
II.4.1 Modèle électrique de Type d'excitation de machine à courant continu…..32
II.4.1.1.Excitation série……..32
II.4.1.2. Moteur à excitation shunt……33
II.4.1.3 Excitation composée……33
II.4.1.4 Moteur à excitation séparée……..33
II.4.2 Modèle électrique du moteur à courant continu……..……34

II.4.2.1 Equations électriques…….34
II.4.2.2 Expression du couple électromagnétique……...34
II.4.2.3. Equations mécanique…….……34
II.4.2.4 Moteur à courant continu à excitation constante……34
II.5 Modélisation de la pompe centrifuge…….35
II.6 Conclusion…….……...……..35

Chapitre III : Commande d'une alimentation photovoltaïque à base de la MCC

III.1 Introduction……...37
III.2 Optimisation de système photovoltaïque……..37
III.2.1 La commande de recherche du point de puissance maximale……..37
III.2.2 Principe de la Recherche du PPM…….38
III.2.3. Classification des commandes MPPT selon le type de recherche…...39
III.2.3.1 Méthode Indirect…….……..39
III.2.3.2 Méthode direct……..40
III.3. Différents types de commandes MPPT……...40
III.3.1. Premières commandes MPPT…….40
III.3.2 Les commandes MPPT basées sur des relations de proportionnalité.....41
III.3.3 Commande en régulation de tension…….41
III.3.4 Commande en régulation de courant……42
III.3.5 MPPT à base de logique floue……..42
III.3.6 MPPT à base de Réseaux de Neurones Artificiels (RNA)……...43
III.3.7 MPPT basé sur le balayage du courant (CurrentSweep)……..43
III.3.8 MPPT RCC (Ripple Corrélation Control)……44
III.3.9 Algorithme Perturbation et Observation (P&O)……...44
III.3.10 La méthode de l'algorithme "Incrémental Conductance" (InCond) simple...45
III.4 Simulation du panneau photovoltaïque avec MPPT…….47
III.5. Conclusion……...54

Chapitre IV : Simulation interprétation des résultats

IV.1. Introduction…….56
IV. 2. Modèle du système à contrôler……..56
IV.3. Dimensionnement d'un système PV avec moteur à courant continue……56

IV.3.1. Détermination du nombre de modules à installer……...57
IV.3.2. La tension totale fournie par Groupe PV……57
IV.4 Dimensionnement d'un système de pompage……..58
IV.4.1 Analyse des besoins et des conditions d'exploitation……..58
IV.4.2 Estimation des besoins en eau et dimensionnement de la pompe…..59
IV.4.2.1 Fiche de dimensionnement……..59
IV.4.2.2 Choix de la pompe centrifuge……..61
IV.4.3 Dimensionnement et modélisation du réservoir de stockage d'eau.....61
IV.4.3.1 Dimensionnement du réservoir……61
IV.4.3.2 Modélisation du réservoir……62
IV.5. Commande en vitesse de la machine……...62
IV.5.1. Système de commande……..……..62
IV.5.2 Système en boucle ouverte et en boucle fermée……..…63
IV.5.3 Dimensionnement des paramètres des régulateurs……..63
IV.5.3.1 Expression du régulateur PI……63
IV.5.3.2 Fonction de transfert de la machine……64
IV.5.4 Structure de la commande PI..……...…….…….66
IV.6. Simulation global et Résultats…….……67
IV.7 Conclusion……73

Conclusion générale……..…….....74

Introduction Générale

La production d'énergie est un fait de grande importance dans la vie de l'humanité. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrielles ne cessent pas d'augmenter. De nos jours, l'homme dispose de nombreuses sources d'énergie, qui sont utilisées le plus souvent sont les énergies dites fossiles (charbon, pétrole, gaz)…etc. mais Les ressources énergétiques fossiles commencent à diminuer et leur utilisation produit de grandes quantités de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone), qui participent fortement au réchauffement planétaire donc augmentation de pollution.

Donc ça peut De nombreuses sources d'énergie propres et renouvelables qui abondent sur toute la surface de la terre peuvent encore être utilisées par l'homme. Parmi celles-ci, on distingue l'énergie éolienne, l'énergie hydroélectrique et l'énergie solaire, qui est la plus intéressante car l'énergie solaire est disponible partout à la surface de la terre, est répartie en quantités égales sur la surface de la terre tout au long de l'année et est plus facile à utiliser. Cela semble être l'énergie la plus prometteuse pour l'avenir. . [1]

Aujourd'hui, l'industrie mondiale du photovoltaïque (PV) repose essentiellement sur les besoins des régions éloignées en alimentation électrique fiable et peu coûteuse. Dans un grand nombre d'applications, le photovoltaïque est tout simplement la solution la plus rentable. Parmi ces applications, on peut citer les systèmes isolés alimentant des chalets ou des résidences éloignées, des services publics et de l'armée, le pompage de l'eau dans des fermes et les postes d'appel d'urgence sur les campus ou les autoroutes. Le système devrait présenter une bonne exploitation des cellules PV. Donc, il faut extraire le maximum de puissance. Cependant que la conception des systèmes photovoltaïques optimisés est une tâche très difficile. En effet, la production de puissance varie fortement en fonction de l'éclairement et de la température. [2]

La poursuite du point maximal de la puissance (MPPT) est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïques. Plusieurs techniques sont développées depuis 1968 date de publication de la première loi de commande de ce type adaptées à une source d'énergie renouvelable (énergie solaire, énergie éolienne…) de type photovoltaïque. Ces techniques se différent entre eux par leurs complexités, nombre des capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d'application. [3]

L'une des applications de l'énergie solaire dans les sites isolées c'est Le pompage photovoltaïque. Cette technologie est en développement et caractérisée par un coût graduellement en baisse. L'utilise avec des moteurs à courant continu, surtout pour les applications à des basses et moyennes hauteurs, à cause de sa simplicité, sa robustesse et son faible prix. La chaine de pompage étudiée dans notre cas, dotée d'une commande MPPT, utilise un moteur à courant continu, entrainant une pompe centrifuge, qui est muni d'un

système de contrôle de la vitesse afin d'avoir la possibilité de régler le débit d'eau. [4]

L'objectif de ce travail étant de simuler un système photovoltaïque qui alimente un moteur à courant continue (MCC) et cela à travers un étage d'adaptation Hacheur survolteur commandé par un algorithme de recherche du point de puissance maximale (MPPT) entrainant une pompe centrifuge. De ce fait, le présent travail est décomposé en quatre parties séquentielles.

Le premier chapitre parle de systèmes photovoltaïques et de machines à courant continu. Nous fournissons un aperçu des systèmes solaires et des machines à courant continu comme leur principe de fonctionnement, leurs caractéristiques, avantages et inconvénients.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation de système photovoltaïque, du convertisseur qui sera contrôlé par la commande MPPT, de la machine MCC et de la pompe centrifuge.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude des différents types d'algorithmes de recherche du point de puissance maximale. Les algorithmes « Perturb and Observe » (P&O) et « Incrément de Conductance » (IncCond) et «logique floue» sont utilisés. Ensuite, nous avons fait une comparative entre les types. Et à la fin de cet chapitre nous consacrée à la simulation du système photovoltaïque pour des variations climatiques pour voir le comportement du système.

Le quatrième chapitre, quant à lui sera détaillera la simulation de l'ensemble système PV et machine à courant continu et commandé par une MPPT (Maximum Power Point Tracking) entrainant une pompe centrifuge, ainsi que les résultats principaux qui obtenus.

Chapitre I

Généralité sur les systèmes photovoltaïque et Les machines à courant continu (MCC)

I.1. Introduction

Le terme "photovoltaïque" est associé à la génération de tension à partir de la lumière ; il est souvent abrégé en PV. Le nom le plus courant pour la cellule photovoltaïque est cellule solaire, bien qu'elle fonctionne avec n'importe quelle source lumineuse, pas seulement le soleil. Une cellule solaire est un convertisseur qui convertit l'énergie lumineuse en électricité [5].

L'association de plusieurs cellules en série /parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale. De nos jours et selon le besoin, l'énergie électrique produite est disponible sous forme d'électricité directe (alimenté une charge) ou stockée en batteries [6].

Les machines à courant continu sont très utilisées dans les systèmes automatiques qui Nécessitent une variation précise de la vitesse de rotation. Les moteurs DC peuvent produire un couple de démarrage important et il est aussi possible d'obtenir le contrôle de la vitesse sur un intervalle étendu. Les méthodes de commande de la vitesse sont évidemment simples et moins coûteuses par rapport aux moteurs à courant alternatifs (AC) [7].

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons Aux généralités sur la machine à courant continu qui se traduit par la présentation de sa Constitution et son principe de fonctionnement. Il s'agit principalement d'établir les différents types De moteurs à courant continu, leurs domaines d'utilisation ainsi que leurs avantages et leurs Inconvénients nous avons rappelé dans ce chapitre quelques notions de base sur l'effet photovoltaïque, Le principe de la cellule photovoltaïque et leurs différentes modèles et les convertisseurs DC /DC et la charge [6].

I.2. Généralités sur les systèmes solaires

L'énergie solaire photovoltaïque convertit directement le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en électricité. Elle utilise pour ce » faire des modules photovoltaïques Composés de cellules solaires ou de photopiles qui réalisent cette transformation d'énergie [8].

L'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autres sources d'énergie, elle représente un potentiel considérable. En effet, la terre reçoit plus de 3000 h de lumière solaire par année avec un haut niveau d'éclairement. Avec une optimisation des angles de réception, la moyenne annuelle journalière est de 5 à 7 kWh /m²/jour.

L'Algérie dispose d'environ 3200 heures d'ensoleillement par an, bénéficiant d'une situation climatique favorable à l'application des techniques solaires [6].

I.2.1.Spectre solaire

Le spectre du soleil c'est sa décomposition en longueurs d'onde ou « couleurs » La lumière solaire est en effet composée de toutes sortes de rayonnements de couleurs déférences, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde. Les photons, grains de lumière qui composent ce rayonnement électromagnétique, sont porteurs d'une énergie qui est reliée à leur longueur d'onde par la relation :

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda} \qquad \textbf{(I.1)}$$

Ou h est la constante de Planck, v la fréquence, C la vitesse de la lumière et le la longueur d'onde une courbe standard de la répartition spectrale du rayonnement solaire extraterrestre, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de AMO. Sa distribution en énergie est répartie comme suit :

Ultraviolet UV	0,20 < λ< 0,38 µm	6.4%
Visible	0,38 < λ< 0,78 µm	48%
Infrarouge IR	0,78 < λ < 10 µm	45.6%

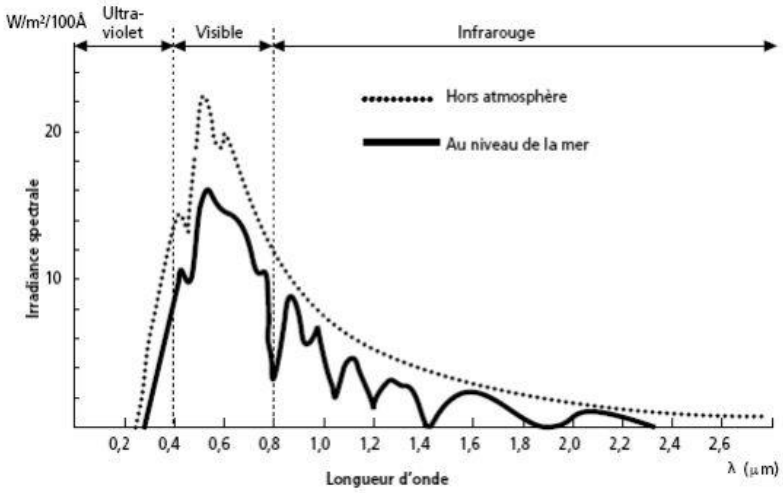


Figure I. 1: Analyse spectrale du rayonnement solaire [8]

I.2.2.Rayonnement solaire

Le soleil est une étoile de forme pseudo-sphérique dont le diamètre atteint 1 391 000 km, Il est situé à une distance moyenne de 49 598 000 km de la terre. Composé de matière gazeuse essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium, il est le siège de réactions de fusion nucléaire permanentes et sa température de cœur atteint 10^7 [8].

Ainsi, à chaque seconde le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement [6].

La longueur d'onde su rayonnement du soleil atteignant la terre va approximativement de 0,3 à 4 µm. Une partie est réfléchie ou absorbée par l'atmosphère, le reste est transmis à la surface de la terre (voir Figure I.2). Ainsi, les applications photovoltaïques pour l'espace utilisent un Spectre solaire différent de celui des applications photovoltaïques à la surface de la terre.

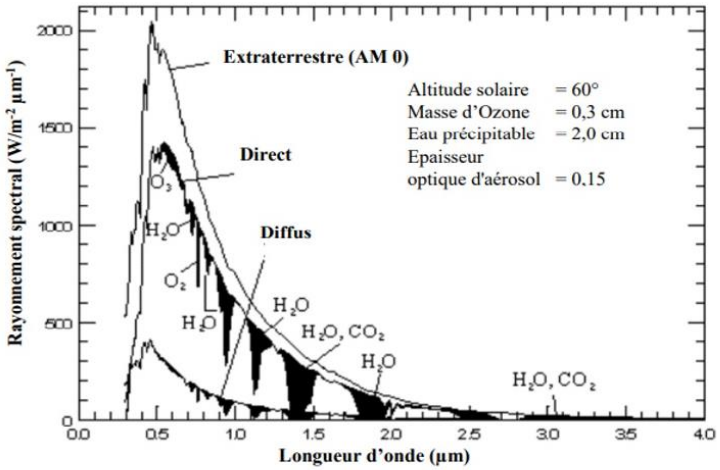


Figure I.2 Rayonnement spectral extraterrestre, direct et diffus du soleil

On distingue deux distributions spectrales différentes, appelé « nombre d'Air – masse » :

- AM0 (« Air Mass 0 ») : spectre en dehors de l'atmosphère.
- AM 1,5 : spectre au niveau de la mer, correspondant à un soleil à 48,19° sur l'horizon et à des conditions atmosphériques particulières.

Plusieurs grandeurs physiques peuvent être définies de la manière suivante :

1. Le rayonnement spectral Iλ, correspondant à la puissance reçue par unité de surface dans Une longueur d'onde différentielle $d\lambda$ Les unités sont W/m²µm.

2. Le rayonnement, correspondant à l'intégrale du rayonnement spectral étendu à toutes Les longueurs d'onde concernées. Les unités sont W/m².

Dans le rayonnement, il y a plusieurs composants :

a. Le rayonnement direct, qui atteint la terre sans diffraction

b. le rayonnement diffus, qui se forme par réfraction, réflexion et diffusion en Raison des nuages, de l'atmosphère, des poussières, de l'environnement, et qui atteint les Panneaux photovoltaïques sans orientation particulière :

c. le rayonnement global G, qui est la puissance rayonnante totale du soleil atteignant les panneaux photovoltaïques.

3. L'ensoleillement, correspondant à l'intégration temporelle du rayonnement, étendu à une période donnée. Les unités sont donc des unités d'énergie. Couramment le J/m² est utilisé [9].

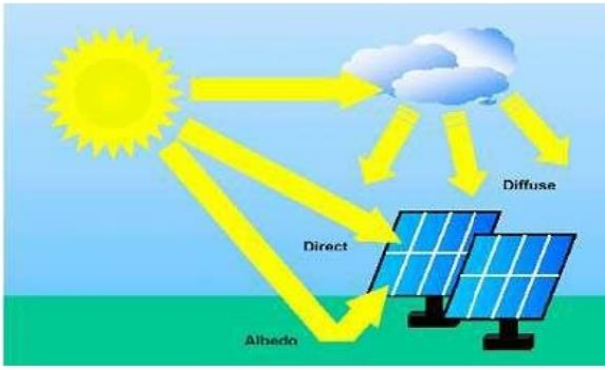


Figure I.3 Rayonnement solaire globale sur un collecteur photovoltaïque

I.2.3.L'énergie solaire

L'énergie solaire est la partie de l'énergie électromagnétique qui provient du soleil et atteint la surface de la terre après avoir été filtrée à travers l'atmosphère terrestre. Le soleil libère en permanence une grande quantité d'énergie rayonnante vers le système solaire, et la terre intercepte une très petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Le bord extérieur de l'atmosphère terrestre a une moyenne de 1367 watts par mètre carré (la distance moyenne entre la terre et le soleil est de 150 millions de kilomètres), qui s'appelle la constante solaire et est égale à 1367 watts par mètre carré.

La fraction d'énergie reçue par la surface de la Terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser, qui est caractérisée par le nombre de masses d'air AM. Le rayonnement atteignant le niveau de la mer à midi par ciel clair est de 1000 W/m2 et est décrit comme celui de la masse d'air "1" (ou AM1). Au fur et à mesure que le soleil se déplace de plus en plus bas dans le ciel, la lumière se déplace dans un air plus épais, perdant plus d'énergie. Comme le soleil n'est à son point culminant que pendant une courte période, la masse d'air est en permanence plus importante et donc l'énergie utilisable est inférieure à 1000 W/m². Les scientifiques ont donné au spectre standard de la surface du soleil un nom Terre : AM1.5G ou AM1.5D [10].

I.3 Cellule photovoltaïque

I.3.1 Historique

Quelques dates importantes dans l'énergie photovoltaïque.

1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque.

1875 : Werner Von Siemens publie un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.

1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Peason et Prince, créent la cellule photovoltaïque.

1958 : 9% cellules actives, les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont lancés dans l'espace.

1973 : L'Université du Delaware construit la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques.

1983 : La première voiture alimentée par l'énergie photovoltaïque parcourt 4000 km en Australie [11].

I.3.2 Structure physique

Les cellules photovoltaïques sont conçues sur la base d'un phénomène physique connu sous le nom d'effet photovoltaïque. Lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière, une force électromotrice se développe. La tension résultante peut varier entre 0,3 V et 0,7 V, selon les matériaux utilisés, la disposition, la température de la batterie et l'âge de la batterie.

Les cellules photovoltaïques sont constituées de deux couches de silicium, l'une est dopée P et l'autre est dopée N, formant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel comme le montre la (figure I.4) Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transfèrent leur énergie aux atomes de la jonction PN, libérant les électrons de ces atomes, créant des électrons (charges N) et des trous (charges P). Cela crée à son tour une différence de potentiel entre les deux couches cette différence de potentiel peut être mesurée entre le pôle positif et le pôle négatif de la cellule [12].

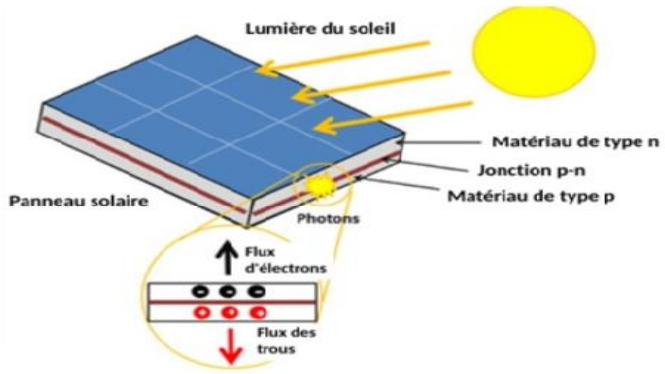


Figure I.4 Structure de cellule solaire

I.3.3.Rendement

L'efficacité de la cellule photovoltaïque est un des critères de qualité pour ce type de capteur. Par conséquent, cette mesure est effectuée selon des normes rigoureuses en déterminant le type de spectre lumineux, la pression et la température de fonctionnement. Nous parlons simplement de l'efficacité globale de conversion d'énergie photon en électron de la puissance électrique délivrée par les cellules PV par rapport à un éclairement AM1.5 de 1000 W/m² pour faire comparaisons objectives de l'efficacité de différentes cellules.

L'efficacité dépend du matériau utilisé et des pertes liées à la technologie utilisée pour fabriquer la cellule. Parmi les matériaux les plus couramment utilisés et en raison de son faible coût, on trouve le silicium (Si) sous diverses formes cristallines (monocristallin, poly cristallin ou amorphe). Les panneaux photovoltaïques monocristallins sont des cellules solaires de première génération. Ils sont constitués de cristaux de silicium très purs [6].

I.3.4.fonctionnement

Le principe de fonctionnement de cette cellule est basé sur le phénomène photovoltaïque, en effet la cellule est constituée de deux couches minces semi-conductrices, les deux couches étant dopées différemment :

- pour la couche N qui fournit les électrons périphériques.
- pour le déficit d'électrons de la couche P Ces deux couches représentent donc une différence de Potentiel, l'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N) leur permet de franchir la barrière de potentiel et de générer un courant électrique constant. Pour effectuer la collecte de ce courant, les électrodes sont sérigraphies sur deux couches de semi-conducteur [13].

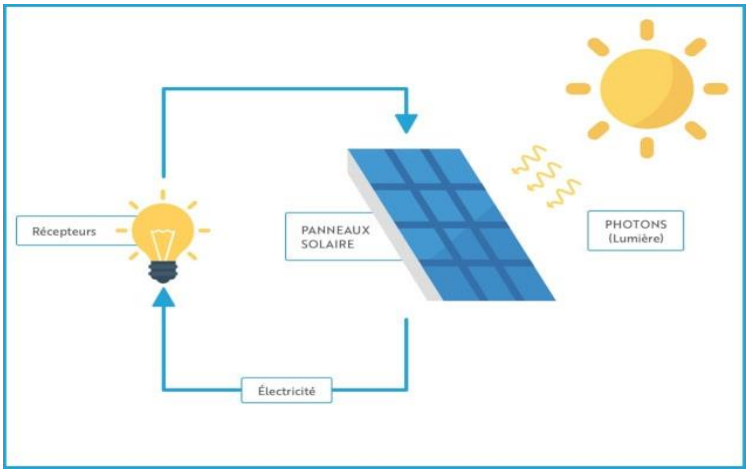


Figure I.5 Fonctionnement de la cellule photovoltaïque

I.3.5. Technologie des cellules solaires

Elles peuvent être classées comme suit

- ***Cellules mono-cristallines*** : constituées de :

Cellules solaires de première génération

Excellente efficacité (12-16 %) (23 % en laboratoire) ;

Méthode de production élaborée et difficile, donc très coûteuse ;

Il faut beaucoup d'énergie pour obtenir un cristal pur. ;

- ***Cellules poly cristallines*** **:** Elles se caractérisent par :

Des coûts de production réduits ;

Processus qui nécessite moins d'énergie ;

Rendement 11-13 % (18 % en laboratoire) ;

- ***Cellules amorphes :*** (par exemple, cellules informatiques) **:** elles ont :

Des coûts de production nettement inférieurs ;

Rendement inférieur : 8-10 % (13 % en laboratoire) ;

Durée de vie plus courte ;

Le est un silicium amorphe que l'on trouve le plus souvent dans les produits de consommation tels que les calculatrices, les montres, etc. Cependant, il réagit mieux aux températures élevées ou à la lumière diffuse. De plus, les cellules mono- et poly cristallines sont les types de cellules les plus courants sur le marché photovoltaïque (environ 60 % de la production).

- ***Cellules nanocristallines*** : caractérisées par :

Une cellule solaire de dernière génération ;

Ils fonctionnent sur le principe de différencier les fonctions d'absorption de la lumière et de séparation des charges électriques ;

Efficacité globale 10,4 %, confirmée par des mesures en laboratoire ;

Processus de production et même un coût inférieur. [14]

I.4 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques

I.4.1 Avantages

1. Le soleil est une source d'énergie propre et renouvelable, qui ne produit ni le gaz ni de déche toxique par son utilisation.
2. Le processus photovoltaïque est complètement à semi-conducteurs et d'un seul bloc. Il n'y a aucune pièce mobile et aucun matériau n'est consommé ou émis.
3. Pas de pollution, ni émissions ou odeurs discernables.
4. Ils peuvent être des systèmes autonomes qui actionnent sûrement sans surveillance pendant de longues périodes.
5. Grande fiabilité.
6. Ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergies pour augmenter la fiabilité du système.
7. Ils n'exigent aucun raccordement à une source d'énergie ou à un approvisionnement en carburant existant.

I.4.2 Inconvénients

1. La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
2. Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-17 %.
3. Tributaire des conditions météorologiques.
4. Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru. [15]

I.5. Généralités sur la machine à courant continu :

Un moteur à courant continu est une machine électrique tournante qui prend de la place très important dans le domaine de l'industrie.

C'est un convertisseur électromécanique qui permet la conversion énergie bidirectionnelle entre un système électrique traversé par un courant continu et dispositif mécanique utilisé pour convertir l'énergie électronique en énergie mécanique La rotation, qui est une énergie utile.

La structure des moteurs est identique à celle des générateurs, donc un La machine à courant continu Peut être utilisée comme moteur ou comme machine à courant continu Le générateur de moteur. Le moteur à courant continu est l'une des machines les plus utilisées dans Nombreuses succursales. Fondamentalement, cette machine est une machine à vitesse variable. [16]

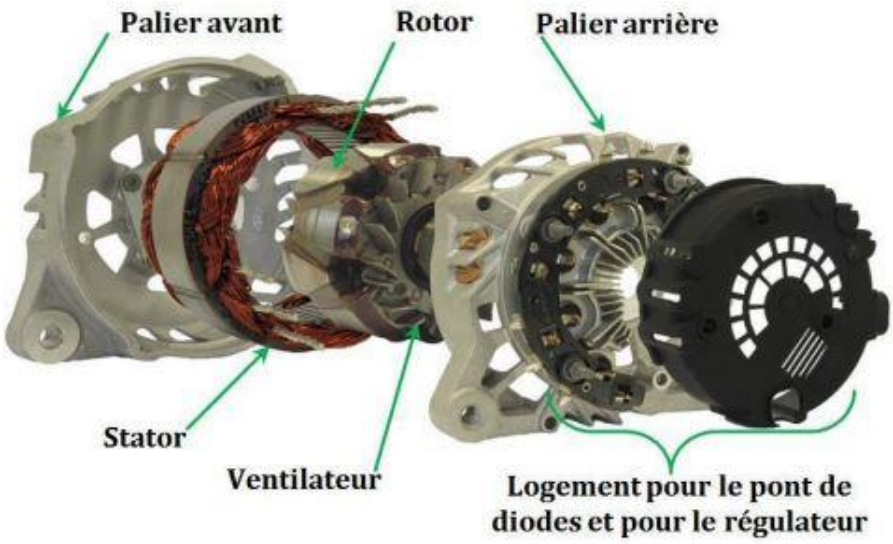


Figure I.6 Schéma de constitution d'un moteur à courant continu

I.5.1.Costitution de la machine à courant continue

Le moteur à courant continu se compose de trois parties principales :

- l'induit
- l'inducteur
- le dispositif collecteur

I.5.2.1 Le stator (L'inducteur)



Figure I.7 Stator

C'est la partie fixe du moteur, composé soit d'aimants permanents, soit de bobines placées autour des noyaux polaires (noyaux polaires constituées de tôles feuilletées pour réduire les pertes par courants Foucault). Lorsqu'un courant continu traverse les bobines, créer un champ magnétique dans le circuit magnétique de la machine, en particulier à l'intérieur entrefer, espace séparant la partie fixe de la partie mobile.

I.5.2.2 Le rotor (L'induit)

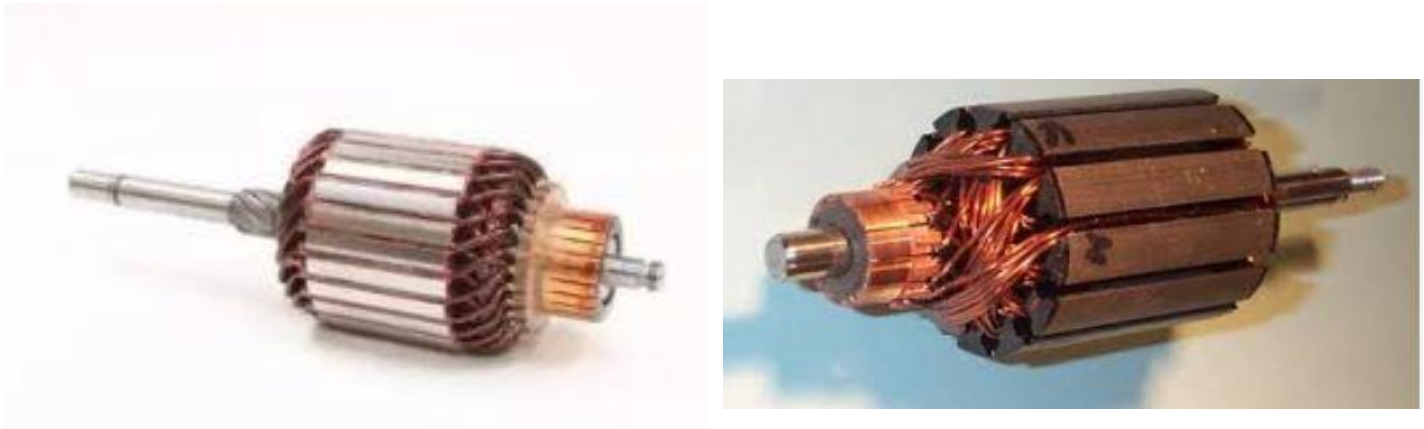


Figure I.8 Rotor

C'est la partie rotative (mobile) du moteur. Il porte des conducteurs parcourus par un courant continu (alimentation du moteur) ; ces spires, sont soumis aux forces dites de la place), fait tourner le rotor. Appelé induit en termes de performance généralice de la machine.

I.5.2.3 Collecteur/ balais

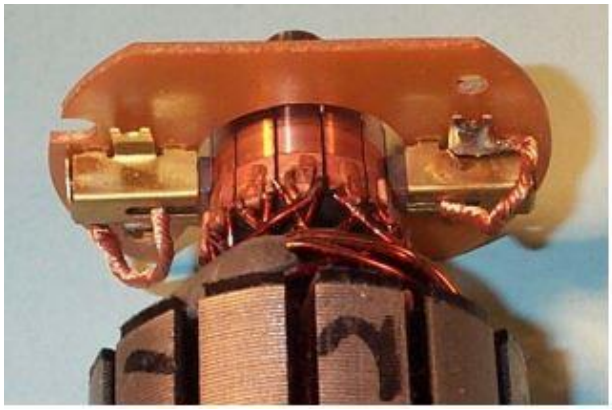


Figure I.9 Collecteur balais du MCC

- Le collecteur : est un ensemble cylindrique d'ailettes en cuivre isolées latéralement de côté. Ces lames sont reliées électriquement au bobinage de l'induit, c'est-à-dire convertit le courant alternatif dans l'enroulement en courant continu.

C'est un interrupteur mécanique qui inverse le sens du courant d'alimentation dans les conducteurs de l'induit qui traversent la ligne neutre.

- les Balais : fait en carbone pour sa bonne conductivité électrique et sa Le faible coefficient de frottement assure la liaison électrique (contact glissant) entre la partie fixe et la partie tournante, la mise en parallèle des balais sont donc nécessaire. [16]

I.5.2.principe de fonctionnement de la machine à courant continue

En fonctionnement moteur est basé sur la circulation d'un courant continu I dans un bobinage d'excitation, il produit un flux d'induction magnétique B dans l'entrefer. Si une différence de potentiel continu est appliquée entre les balais, les conducteurs d'induit situé sous un même pôle (d'un même coté des balais) sont parcourus par un courant de même sens ces derniers baignant dans un champ d'induction de l'inducteur, d'après la loi de Laplace ils sont donc soumis à une force électromagnétique.

$$d\vec{F} = Id\vec{l} \wedge \vec{B} \qquad \textbf{(I.2)}$$

L'ensemble des forces forment un couple dont l'action tend à faire tourner l'induit [7].

I.5.3 Les différents modes d'excitations

Les moteurs à courant continu diffèrent par la manière dont ils fournissent de l'énergie excitation. Les différents cas possibles sont :

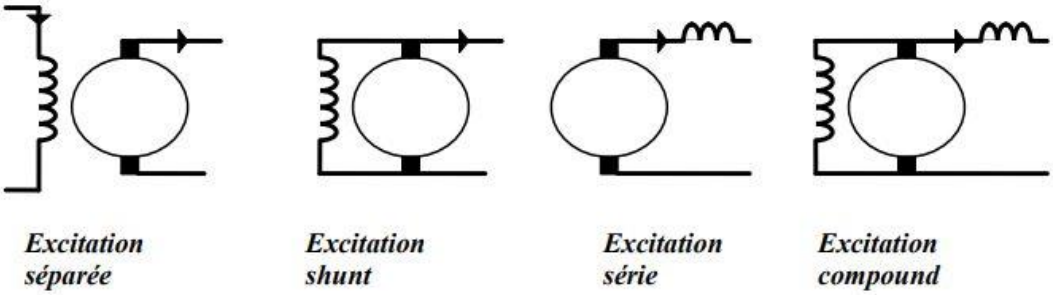


Figure I .10 les schémas des différents types d'excitations

I.5.3.1 Moteur à excitation séparée (indépendante)

Ce mode d'excitation nécessite deux sources d'alimentations distinctes. L'enroulement d'excitation est alimenté à partir d'une source indépendante de la source principale. On change le sens de rotation en permutant les bornes de l'induit ou de l'inducteur.

I.5.3.2 Moteur à excitation shunt (dérivée) PARALEL :

L'enroulement d'excitation est connecté en parallèle avec l'alimentation du moteur et a les mêmes caractéristiques que le moteur avec un circuit d'excitation, puisque dans les deux cas la bobine d'induction est un circuit externe au moteur.

I.5.3.3 Moteur à excitation série

La boucle de champ est placée avec l'armature du moteur. Sa particularité est qu'il possède une inductance parcourue par le même courant. Par conséquent, l'inducteur a une résistance inférieure à celle des autres types de machines. L'inductance est en série avec l'induit : une seule alimentation suffit. L'inversion des connexions d'induit et de champ modifie le sens de rotation.

I.5.3.4 Moteur à excitation composée (compound)

C'est une combinaison des deux cas précédents (shunt et série). La première inductance est connectée en série avec la plaque et la deuxième inductance est connectée en parallèle. [16]

I.5.4 Choix du moteur à courant continu

Le choix d'un moteur à courant continu doit permettre d'entraîner la machine ainsi que les prestations requises par le descriptif de prestation, à savoir :

- Le nombre de quadrants de fonctionnement ;
- Le couple sur toute la plage de vitesse : caractéristique $Cr = f(\Omega)$;
- vitesse maximale/minimale ;
- Accélération et décélération maximales

Et le respect des normes pour le réseau d'alimentation énergétique :

- consommation d'énergie réactive ;
- taux d'harmoniques imposé au réseau ;
- Compatibilité électromagnétique, [17]

I.5.5 Avantages et inconvénients des machines à courant continu

Les machines à courant continu présentent des avantages très importants, en particulier les moteurs. Ils sont moins polluants et silencieux, ils démarrent seuls et facilement, faciles à utiliser avec des démarrages fréquents, régularité du couple utilisable, possibilité de changer le sens de rotation sans l'intervention d'appareils mécaniques.

Les machines DC présentent des avantages, mais aussi des inconvénients. Ces inconvénients sont :

Vous avez une partie sensible (considérée comme le point faible des machines à courant continu), cette partie est le collecteur et les billes. Les boules doivent être remplacées de temps en temps pour assurer le meilleur contact. Le prix d'un moteur à courant continu est plus du double de celui d'un moteur asynchrone triphasé de même puissance [18]

I.6.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la générateur photovoltaïque qui fonctionner la machine à courant continu que nous commandé par la commande MPPT pour de meilleures performances, nous voyons cela dans le chapitre de simulation.

Nous avons également étudie la machine à courant continu et vu ses différent constituants, les différences de schéma excitation et les équations électriques, et mécanique appliquées à un type de excitation.

Chapitre II
Modélisation d'une alimentation photovoltaïque

II.1 Introduction

Après avoir étudié et cité les différents composants du système de pompage photovoltaïque, nous procédons à la modélisation de notre système.

La modélisation nécessite un ensemble d'équations caractérisant tous les éléments du système étudié, on doit connaitre alors les critères d'entrées (données de base) c'est-à-dire les données météorologiques du site, les données relatives aux utilisateurs, et les données relatives aux équipements.

II.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque idéale est présentée comme un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à une source de courant shuntée par une diode. La figure (II.1) présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque. Dans ce modèle à « une seule diode », la résistance série (R_s) est la résistance interne de la cellule qui est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts en face avant et arrière. La résistance shunt (R_{Sh}) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction ; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée. [19]

II.2.1 Modélisation d'une cellule photovoltaïque à une seule diode

Nous souhaitons obtenir les caractéristiques tension/courant et tension/puissance et déterminer la puissance maximale que peuvent fournir chacun des deux groups de panneaux, pour un ensoleillement et une température donnés. Un travail de comparaison, en terme de simplicité, de temps de calcul et de précision a été effectué en et sa nous a permis de choisir le model a une diode pour notre modélisation.

Il a également été constaté que, les modèles sont très bons pour des ensoleillements supérieurs à la centaine de Watts par mètre carré et que les erreurs n'excédant pas 6% pour des ensoleillements plus faibles.[19]

II.2.1.1 Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque à une diode

Un modèle électrique empirique simple, le plus proche du générateur photovoltaïque, est actuellement le plus utilisé en raison de la qualité des résultats obtenus, c'est le modèle à une diode.

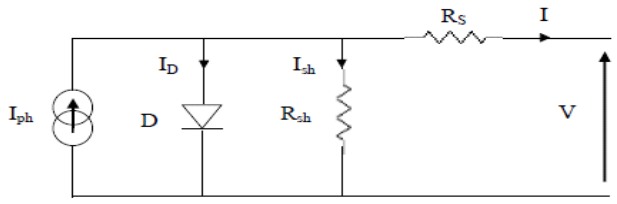


Figure.II.1 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque à une diode.

II.2.1.2 Modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque à une diode

Le modèle mathématique est donné par l'équation suivante

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad , \qquad I_d = I_s\left[e^{\frac{q(V+R_S.I)}{\gamma.K.T_C}} - 1\right] \tag{II.1}$$

$$I = I_{ph} - I_s\left[exp\left(\frac{q(V+R_sI)}{\gamma\,.k.T_C}\right) - 1\right] - \frac{V+R_s.I}{R_{sh}} \tag{II.2}$$

q=1,610^{-19}Cb. K=1, 3810^{-23}j/^{0}K.

$$I_{ph} =.\frac{G}{G_0}\left[I_{ph0} + muI_{sc}.(T - T_0)\right] \tag{II.3}$$

$$I_s = I_{0ref}.\left(\frac{T_C}{T_0}\right)^3.exp\left(\frac{q.E_g}{n.k} \times \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_C}\right)\right) \tag{II.4}$$

I_{0ref}: Courant de saturation de référence de la diode (A).

muI_{sc}: Coefficient de température sur (mA/^{0}K).

II.2.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque à deux diodes

II.2.2.1 Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque à deux diodes

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électrique équivalent ci-dessous figure (II.2). Il consiste en la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion parallèle de deux diodes ayant le courant de saturation et. Ces diodes symbolisent la recombinaison des porteurs minoritaires, d'une part en surface de matériau et d'autre part dans le volume du matériau

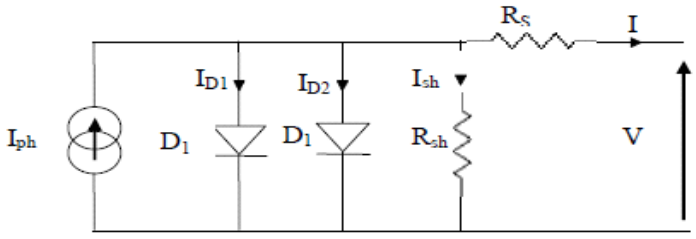


Figure II. 2 Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire à deux exponentielles.

II.2.2.2 Modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque à deux diodes

Le modèle mathématique est donné par l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{Rsh} \tag{II.5}$$

$$I = I_{ph} - I_{s1}\left[exp\left(\frac{q(V+R_sI)}{n_1.k.T_C}\right)-1\right] - I_{s2}\left[exp\left(\frac{q(V+R_sI)}{n_2.k.T_C}\right)-1\right] - \frac{V+R_s.I}{R_{sh}} \quad \text{(II.6)}$$

$$, \quad I_{d1} = I_{s1}\left[exp\left(\frac{q(V+R_sI)}{n_1.k.T_C}\right)-1\right], \quad I_{d2} = I_{s2}\left[exp\left(\frac{q(V+R_sI)}{n_2.k.T_C}\right)-1\right]$$

$$I_{s1} = K_1.(Tc)^3.exp\left(-\frac{E_g}{k.Tc}\right) \quad \text{(II.7)}$$

$$I_{s2} = K_2.(Tc)^{2.5}.exp\left(-\frac{E_g}{k.Tc}\right) \quad \text{(II.8)}$$

$K_1 = 1.2\ A/cm^2.K^3$ $;K_2 = 2{,}9.10^5\ A/cm^2.K^{\frac{5}{2}}$

Résistance de shunt (Parallèle) *:* $R_{sh} = R_{sh0}\left[1+(1-\alpha).e^{-5{,}5\frac{G}{G_0}}\right]$ *avec* R_{sh0}*:* Résistance parallèle de référence donnée par le constructeur.$\alpha = 4$ Pour une cellule au silicium cristalline. $\alpha = 12$ Pour une cellule au silicium amorphe.

II.2.3 Modélisation d'un générateur photovoltaïque (GPV)

Le modèle du générateur photovoltaïque doit répondre aux exigences suivantes :

- prise en compte de l'irradiation et de la température des cellules
- courbe I(V) se rapprochant au maximum du GPV réel utilisé

Après recherche de plusieurs solutions pour le modéliser, c'est la publication « Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays » qui a servi de base de travail.

Le modèle décrit est dit « une seule diode », et ne prend pas en compte tous les effets physiques, notamment la recombinaison des porteurs. Pour cela, il faut utiliser un modèle « deux diodes » plus sophistiqué.

II.2.3.1 Modélisation d'un générateur photovoltaïque à une seule diode

- ***Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque à une diode***

Chaque group de panneau est une association série/parallèle de $N_S.N_P$ panneau élémentaires. Si tous les panneaux sont identiques et fonctionnent dans les mêmes

Conditions, nous obtenons le GPV suivant :

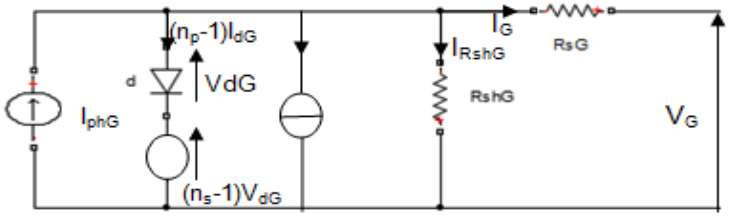


Figure II.3 Schéma électrique d'un générateur photovoltaïque, modèle à une diode.

➢ ***Modèle mathématique d'un champ photovoltaïque à une diode***

Nous adoptons dans ce qui suit, la notation suivante :

$$I_{ph,G} = n_p.I_{ph}, I_G = n_p.I, I_{d,G} = n_p.I_d, I_{s,G} = n_p.I_s, I_{Rsh,G} = n_p.I_{Rsh}, V_G = n_s.V, V_{d,G} = n_s.V_d \quad \text{(II.9)}$$

$$R_{sh,G} = \frac{n_s}{n_p}.R_{sh}, R_{S,G} = \frac{n_s}{n_p}.R_s \quad \text{(II.10)}$$

Le courant dans la diode est donné par l'expression :

$$I_{d,G} = I_{S,G}.\left[e^{\frac{q(V_G+R_{sh,G}.I)}{\gamma.n_S.K.T_j}} - 1\right] \quad , \quad I_{S,G} = P_4.T_j^3 e^{-\frac{E_g}{K.T_j}} \quad \text{(II.11)}$$

Energie de gap, P_4 : paramètre constant, K : Constante de Boltzmann 1,3810^{-23}J/^{0}K,

γ : Facteur d'idéalité de la jonction.

Nous obtenons alors le courant pour un groupe de panneaux déduit par le schéma de la figure (II.3) :

$$I_G = n_p.I_{ph} - n_p.I_s.\left[e^{\frac{q.(V+R_s.I)}{n_{cs}.\gamma.K.T_C}} - 1\right] - \frac{V+R_s.I}{R_{sh}} \quad \text{(II.12)}$$

$$I_G = n_p.I_{ph} - n_p.I_s.\left[e^{\frac{q\left(\frac{V}{n_s}+\frac{n_p}{n_s}.R_s.\frac{I}{n_p}\right)}{\gamma.K.T_C}} - 1\right] - n_p.\frac{\frac{V}{n_s}+\frac{n_p}{n_s}.R_s.\frac{I}{n_p}}{\frac{n_p}{n_s}.R_{sh}} \quad \text{(II.13)}$$

$$I_G = I_{ph,G} - I_{d,G} - \frac{V_G + R_{s,G}.I_G}{R_{sh,G}} \quad \text{(II.14)}$$

$$I_G = n_p.I_{ph} - n_p.I_s\left[exp\left(\frac{q\left(V_G + R_{s,G}.I_G\right)}{\gamma.n_{cs}.k.T_C}\right) - 1\right] - n_p.\frac{V_G + R_{s,G}.I_G}{R_{Sh,G}} \quad \text{(II.15)}$$

$$I_G = n_p.I_{ph} - n_p.I_s.\left[e^{\frac{q\left(\frac{V}{n_s}+\frac{n_p}{n_s}.R_s.\frac{I}{n_p}\right)}{\gamma.K.T_C}} - 1\right] - n_p.\frac{\frac{V}{n_s}+\frac{n_p}{n_s}.R_s.\frac{I}{n_p}}{\frac{n_p}{n_s}.R_{sh}} \quad \text{(II.16)}$$

$$I_G = n_p.I_{ph} - n_p.I_s.\left[e^{\frac{q.(V+R_s.I)}{n_{cs}.\gamma.K.T_C}} - 1\right] - \frac{V + R_s.I}{R_{sh}} \quad \text{(II.17)}$$

II.2.4 Paramètres d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivantes [19]:

II.2.4.1 Courant de court-circuit (I_{SC})

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (nulle et infinie), ce courant se confond avec la photo courant dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation **(II.9**)

Dans ce cas on peut écrire $I_{SC} \approx I_{PH}$ du fait que $R_S << R_{sh}$.

II.2.4.2 Tension de circuit-ouvert (V_{CO})

C'est la tension pour laquelle le courant débité par la cellule est nul (la tension maximale D'une cellule). Il est exprimé comme suit :

$$V_{CO} = V_t * ln\left({I_{Ph}}/{I_0} + 1\right) \quad \text{(II.18)}$$

Avec :

$V_t = \frac{\alpha.K.T}{e}$ qui représente la tension thermique et

I_0 : le courant de saturation de la diode D.

II.2.4. 3 Facteur de forme

On appelle facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (fill factor), c'est le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule $P_{max}(\ V_{opt}, V_{opt})$ et le produit du courant de court-circuit I_{SC} par la tension de circuit-ouvert V_{CO} (c'est-à-dire la puissance maximale d'une cellule idéale). Le facteur de forme indique.

La qualité de la cellule ; plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante, Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes ; il diminue avec la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites et$R_S$et R_{sh}. Il experiment comme suite:

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{SC} * V_{CO}} \quad \text{(II.19)}$$

II.2.4. 4 Rendement énergétique

C'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule $P_{max}(\ V_{opt}, V_{opt})$ et la puissance solaire incidente. Il est donné par:

$$\eta = \frac{P_{max}}{\text{Pinc}} \qquad \text{(II.20)}$$

Avec : Pince est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

Les principales pertes sont dues à :

- une absorption incomplète des photons,
- les photons très énergétiques voient la part d'énergie supérieure perdue en chaleur,

La collecte des paires d'électrons trous n'est pas optimum, certaines paires d'électrons trous se recombinent avant d'atteindre la jonction.

- la grille en face avant ne favorise pas la transmission optique maximale
- du rayonnement solaire. Sa forme géométrique est cependant très optimisée par les constructeurs. Chez certains la grille est faite par laser pour en diminuer la surface.
- pertes dues à la résistance série (résistance de contact des deux grilles). [19]

II.2.5 Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque à deux diodes (GPV) [19]

II.2.5.1 Modèle électrique d'un champ photovoltaïque à deux diodes

Les notations suivantes expliquent le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque :

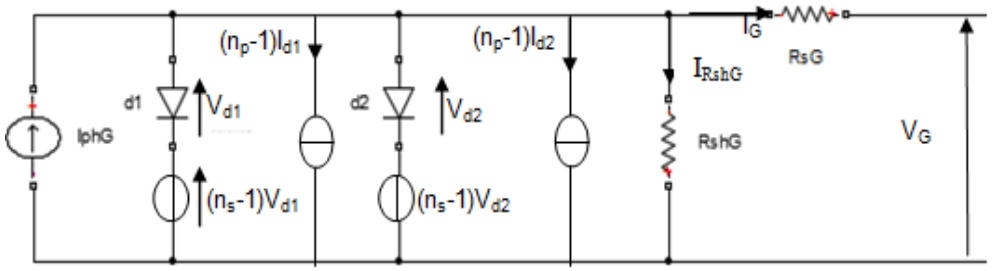


Figure II.4 Schéma électrique équivalent d'un générateur photovoltaïque.

II.2.5.2 Modèle mathématique d'un champ photovoltaïque à deux diodes

Nous adoptons dans ce qui suit, les notations suivantes

$$R_{sh,G} = \frac{n_s}{n_p} R_{sh} + \frac{n_s}{n_p} R_{sh}(\alpha - 1) e^{-5.5 * G/Gref} \qquad \text{(II.21)}$$

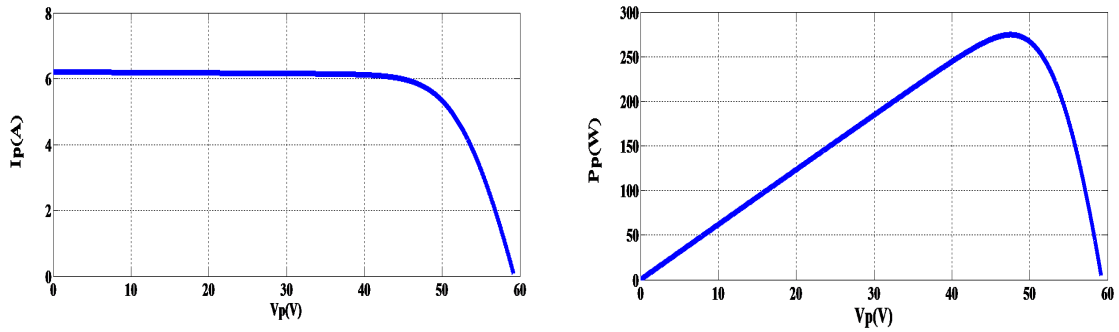
Alors on obtient, une fonction implicite de la forme :

$$I_G = I_{ph,G} - I_{s1}\left[exp\left(\frac{q\left(V_G + R_{s,G}.I_G\right)}{\gamma_1.n_s.k.T_C}\right) - 1\right] - I_{s2}\left[exp\left(\frac{q\left(V_G + R_{s,G}.I_G\right)}{\gamma_2.n_s.k.T_C}\right) - 1\right] - \frac{V_G + R_{s,G}.I_G}{R_{Sh,G}} \quad \text{(II.22)}$$

Le générateur photovoltaïque est une association série parallèle de nombreux panneaux (Module) photovoltaïque, La caractéristique électrique globale courant/tension du GPV se déduit donc théoriquement de la combinaison des caractéristiques des cellules élémentaires supposées identiques qui le composent par deux affinités de rapport n_s parallèlement à l'axe Des tensions et de rapport n_p parallèlement à l'axe des courants, n_s *et* n_p étant respectivement les nombres totaux de cellules en série et en parallèle [19].

II.2.6 Caractéristique électrique d'un module PV à une seule diode

L'étude basé sur un module photovoltaïque de type MSX-83. Le générateur est composé De 96 cellules séries, les résultats de simulation en MATLAB/Simulink en utilisant les



conditions standard (T=25°C et E=1000W/m2) pour R_s=0.69Ω et R_{sh}=650Ω.

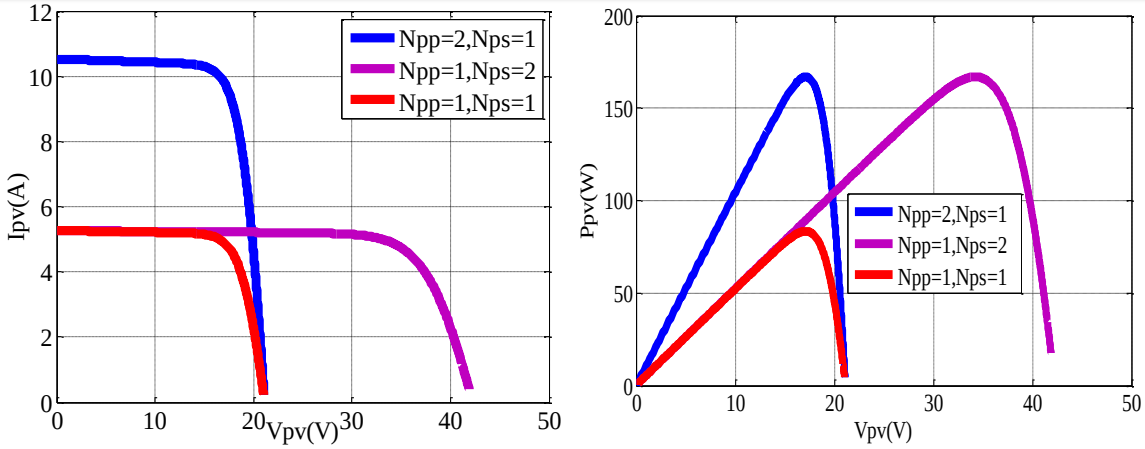
a) **b)**

Figure II.5 Caractéristique a) $I_{pv}(V_{pv})$ et b) $P_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau PV.

II.2.6.1 : Influence du branchement série parallèle sur les caractéristiques I(V) et P(V)

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné.

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée comme indique la figure suivante.

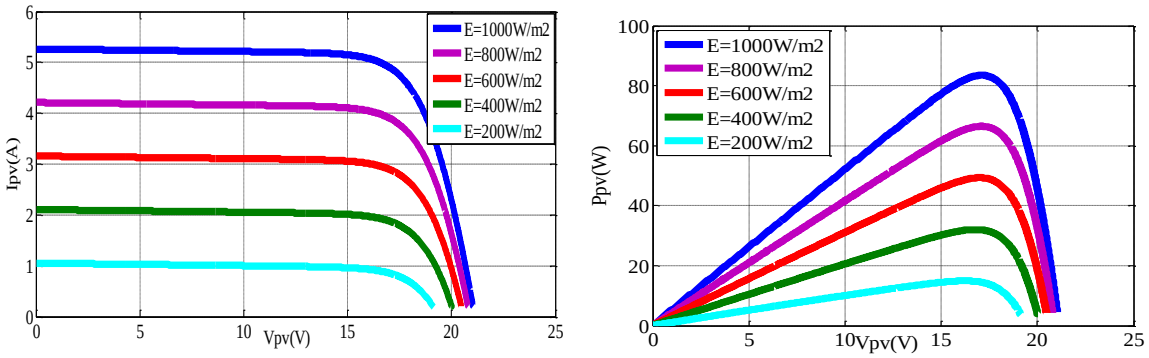


a) **b)**

Figure II.6 Influence du branchement série parallèle a) sur la caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ et b) sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$.

II.2.6.2 Influence de l'éclairement

On applique une température T=25°C maintenue constante et on varie l'ensoleillement (E) de 200 W/m2 jusqu'a 1000 W/m2, les résultats obtenues sont illustrés en figures (II.7).



a) **b)**

figures II.7 Influence de l'éclairement sur les caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$.

A chacune de ces valeurs de E, correspond une puissance électrique maximale que pourrait fournir le panneau. Notons aussi la légère diminution de la tension du circuit ouvert V_{CO}, suite à une chute du flux lumineux.

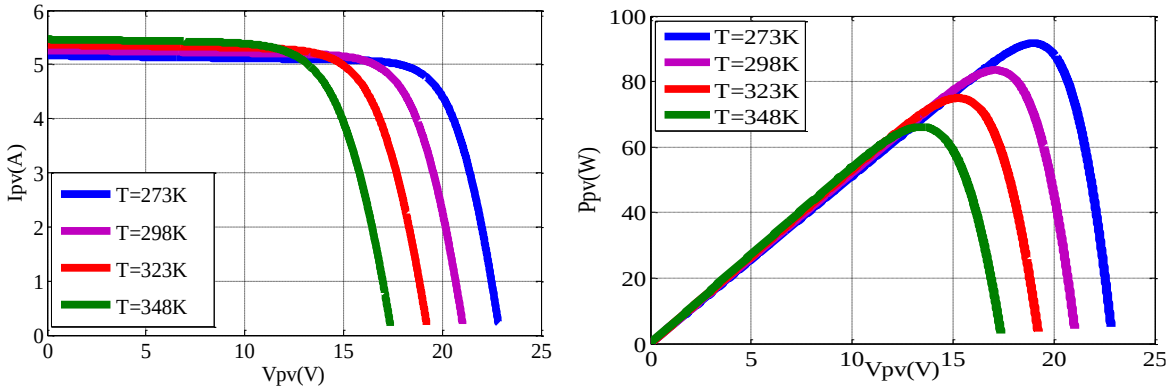
Illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$.

II.2.6.3 Influence de la température

Montre l'influence de la température sur la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$. Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'un panneau photovoltaïque sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$. Le courant dépend de la température puisque le courant augmente

légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouvre. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution

La figure (b) illustre la variation de la puissance délivrée par le panneau photovoltaïque en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température, ce qui nous permet de déduire l'influence de la température sur la caractéristique P_{pv}=f(Vpv).



a) **b)**

Figure II.8 la caractéristique a)I_{PV} (V_{PV}) ;b) P_{PV} (V_{PV}) pour les différentes températures.

En fixe l'ensoleillement à 1000 W/m^2 et on varie la température de 273°K jusqu'à 348°K, les allures obtenus sont présentées en dessous :

II.3 Modélisation d'un convertisseur continu-continu (hacheur DC-DC) [19]

Il y a un plusieurs topologies des convertisseurs DC-DC. Ils sont classés par catégorie selon que la topologie isolée ou non isolée. Les topologies isolées emploient un transformateur d'isolement fonctionnant à haute fréquence, elles sont très employées souvent dans les alimentations à découpage. Les topologies les plus connues dans la majorité des applications sont le Fly back, en demi-point et en pont complet. Dans les applications photovoltaïques (PV), les systèmes de couplage avec le réseau électrique emploient souvent ces types de topologies quand l'isolement électrique est préféré pour des raisons de sûreté

Les topologies non isolées ne comportent pas de transformateurs d'isolement. Elles sont généralement utilisées dans l'entrainement des moteurs à courant continu. Ces topologies sont encore classes en trios categories:

- Abaisseurs (Buck);
- Elévateurs (Boost);
- Elévateurs - Abaisseurs (Buck-Boost).

La topologie Buck est employée pour les faibles tensions. Dans les applications PV, le convertisseur Buck est habituellement employé comme chargeur de batteries et dans des systèmes de pompage de l'eau.

La topologie Boost est employée pour augmenter la tension. Les systèmes de production de l'énergie emploient un convertisseur Boost pour augmenter la tension de sortie au niveau du service avant l'étage de l'onduleur. Puis, il y a des topologies capables d'augmenter et de diminuer la tension telles que le Buck-Boost. Les convertisseurs DC-DC peuvent être vus comme des transformateurs DC-DC.

II.3.1 Convertisseur Buck (hacheur dévolteur)

Un convertisseur Buck, ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur. Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source-charge, lorsque le point de fonctionnement en couplage direct est à gauche du MPP.

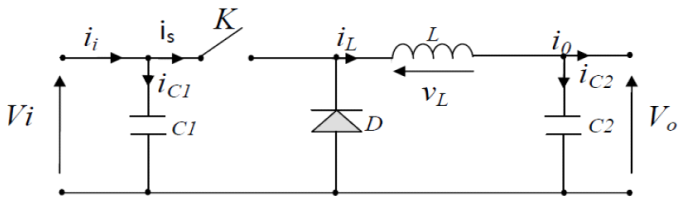


Figure II.9 Circuit idéal d'un convertisseur Buck

Savoir le comportement réel de ce convertisseur, nécessite de connaître en détail son modèle mathématique.

Pour cela nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La figure (II.10) montre les schémas des circuits équivalents d'un convertisseur dévolteur dans les deux cas : l'interrupteur K fermé pendant ***d***et ouvert pendant ***(1-d)***

Où:

- est la période de commutation.
- ***d*** le rapport cyclique du commutateur **(*d* ∈ [0, 1])**.

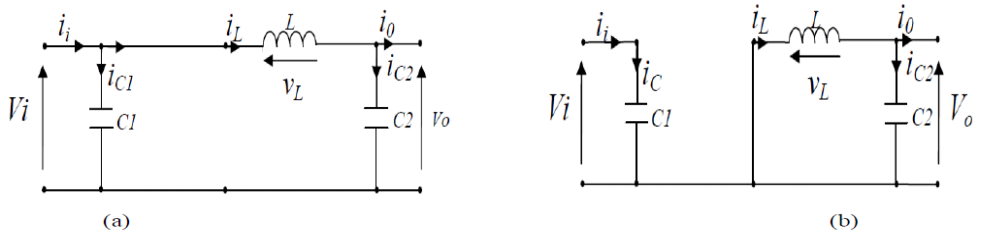


Figure II.10 Schémas équivalents du hacheur dévolteur (a) : K fermé, (b) : K ouvert

En appliquant la loi de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents du convertisseur dévolteur-survolteur des deux phases de fonctionnement, on obtient :

- Pour la première période dT$_S$.

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = C_1 \dfrac{dv_i(t)}{dt} = i(t) - i_l(t) \\ i_{c_2}(t) = C_2 . \dfrac{dV_0(t)}{dt} = i_1(t) - i_0(t) \\ v_l(t) = L . \dfrac{di_L}{dt} = v_i(t) - v_0(t) \end{cases} \quad \text{(II.23)}$$

- Pour la deuxième période (1-d)T_S:

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = C_1 \dfrac{dv_i(t)}{dt} = i(t) \\ i_{c_2}(t) = C_2 . \dfrac{dV_0(t)}{dt} = i_1(t) - i_0(t) \\ v_l(t) = L . \dfrac{di_L(t)}{dt} = -v_0(t) \end{cases} \quad \text{(II.24)}$$

Pour trouver une représentation dynamique valable pour tout la période , on utilise généralement l'expression suivante :

$$\langle \frac{dx}{dt} \rangle T_S = \frac{dx}{dt_{DT_s}} + \frac{dx}{dt_{(1-D)T_s}} (1 - D) T_s \quad \text{(II.25)}$$

En appliquant la relation (II.25) sur les systèmes d'équations (II.23) et (II.24), on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière :

$$\begin{cases} C_1 \dfrac{dv_i(t)}{dt} T_s = dT_s(i_i - i_l) + (1 - d) T_s i_i \\ C_2 \dfrac{dv_o(t)}{dt} T_s = dT_s(i_i - i_0) + (1 - d) T_s (i_l - i_0) \\ L \dfrac{di_l}{dt} = dT_s(v_i - v) + (1 - d) T_s(-v_0) \end{cases} \quad \text{(II.26)}$$

Après arrangement, on obtient:

$$\begin{cases} i_0(t) = i_1 - C_2 \dfrac{dv_0(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_l(t) = \dfrac{1}{d}(i_i(t) - C_1 . \dfrac{dV_0(t)}{dt}) \\ v_i(t) = \dfrac{1}{d}(L . \dfrac{di_L(t)}{dt} + v_0(t)) \end{cases} \quad \text{(II.27)}$$

II.3.2 Convertisseur Boost (hacheur survolteur*)*

Le convertisseur Boost est connu par le nom d'élévateur de tension. Le schéma de la figure(II.11), représente le circuit électrique du Boost. Au premier temps (αT), le transistor (S) est fermé, le courant dans l'inductance croit progressivement, et au fur et à mesure, elle

emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période. Ensuite, le transistor (S) s'ouvre et l'inductance (L) s'opposant à la diminution de courant (I_L), génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge (R) à travers la diode (D).

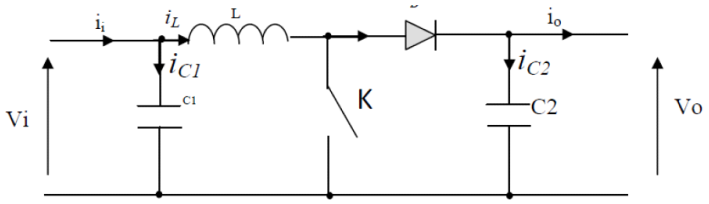


Figure II.11 Circuit idéal d'un convertisseur Boost

L'application des lois de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donne :

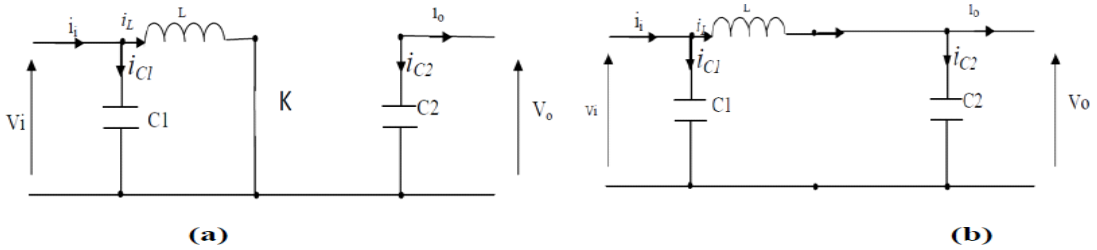


Figure II.12 Schémas équivalents du hacheur survolteur (a) : K fermé ;(b) : ouvert

Pour la première période αT_S :

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = C_1 \dfrac{dv_i(t)}{dt} = i(t) - i_l(t) \\ i_{c_2}(t) = C_2 . \dfrac{dV_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\ v_l(t) = L . \dfrac{di_L(t)}{dt} = -v_i(t) \end{cases} \quad \text{(II.28)}$$

Pour la deuxième période (1-α) TS *:*

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = C_1 \dfrac{dv_i(t)}{dt} = i(t) - i_1(t) \\ i_{c_2}(t) = C_2 . \dfrac{dV_0(t)}{dt} = i_l(t) - i_0(t) \\ v_l(t) = L . \dfrac{di_L(t)}{dt} = v_i(t) - v_0(t) \end{cases} \quad \text{(II.29)}$$

En appliquant la relation (II.25) sur les systèmes d'équations (II.28) et (II.29). Comme pour le convertisseur dévolteur, on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur.

$$\begin{cases} i_L(t) = i_i(t) - C_1 \frac{dv_i(t)}{dt}) \\ i_0(t) = (1-d) i_L(t) - C_2 \frac{dv_0(t)}{dt}) \\ V_i(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} + (1-d) V_0(t) \end{cases} \quad \text{(II.30)}$$

II.3.3 Convertisseur Buck-Boost (hacheur dévolteur-survolteur)

Un convertisseur Buck-Boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse. Durant l'état «**on**», l'énergie apportée par la source (générateur PV) est stockée dans l'inductance Le figure (II.13). L'énergie stockée dans l'inductance ***L*** est livrée ensuite à la charge pendant l'état «**off**» Figure (II.14). En raison de la présence de la diode ***D***, le courant circule à travers l'inductance L seulement dans une direction durant les deux états. Par conséquent, ***a*** une polarité opposée à. Pour cette raison, ce circuit est aussi appelé convertisseur inverseur. Les équations décrivant ce circuit peuvent être obtenues de la même manière qu'au paravent. Comme indiqué précédemment, le condensateur *C1* soutient la tension d'alimentation , *C2* lisse la tension de la charge. En conclusion, l'amplitude de peut être inférieure ou supérieure à suivant la valeur de tON et $tOFF$

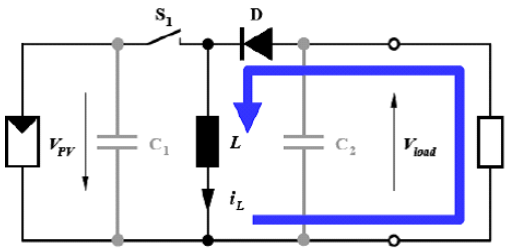


Figure II.13 Convertisseur Buck-Boost durant l'état on.

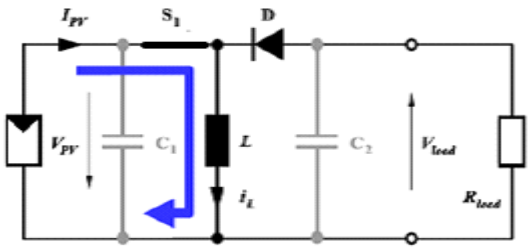


Figure II.14 Convertisseur Buck-Boost durant L'état off.

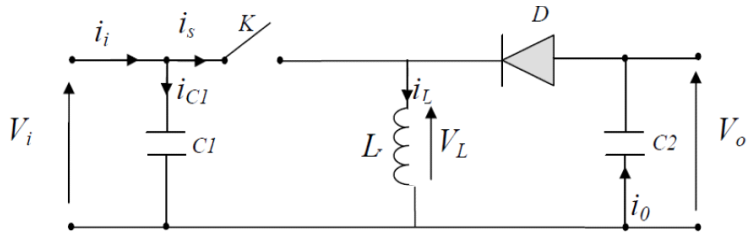


Figure II.15 Circuit idéal d'un convertisseur Buck-Boost.

En appliquant la loi de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents du convertisseur dévolteur-survolteur des deux phases de fonctionnement, on obtient :

- Pour la première période dT_S :

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = C_1 \dfrac{dv_i(t)}{dt} = i(t) - i_l(t) \\ i_{c_2}(t) = C_2 . \dfrac{dV_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\ v_l(t) = L . \dfrac{di_L(t)}{dt} = v_i(t) \end{cases} \quad \text{(II.31)}$$

- Pour la deuxième période (1-d)T_S:

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = C_1.\frac{dv_i(t)}{dt} = i(t) \\ i_{c_2}(t) = C_2.\frac{dV_0(t)}{dt} = i_l(t) - i_0(t) \\ v_l(t) = L.\frac{di_L(t)}{dt} = v_0(t) \end{cases} \quad \text{(II.32)}$$

En appliquant la relation (II.25) sur les systèmes d'équations (II.30) et (II.32), on trouve le modèle approximé du convertisseur dévolteur-survolteur :

$$\begin{cases} i_l(t) = \frac{1}{d}(i_i(t) - C_1.\frac{dv_i(t)}{dt}) \\ i_0(t) = -(1-d)i_l - C_2.\frac{dV_0(t)}{dt} \\ v_i(t) = v_i(t) = \frac{1}{d}(-(1-d)v_0 + L.\frac{di_L(t)}{dt} \end{cases} \quad \text{(II.32)}$$

II.4. Modélisation de la machine à courant continue

II.4.1 Modèle électrique de chaque Type d'excitation de machine à courant continu

Il existe quatre types l'excitation de moteur à courant continu, qui se distinguent par le branchement de leur enroulement d'excitation.

II.4.1.1.Excitation série

L'inducteur de ce moteur est en série avec l'induit : le courant d'induit est également le courant d'excitation comme le montre la figure suivante :

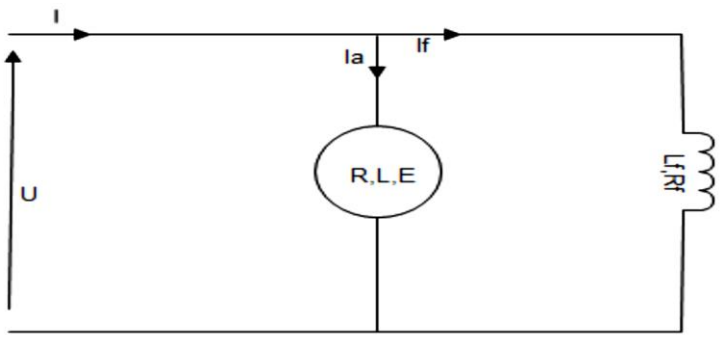


Figure II.16 Schéma électrique du moteur à excitation série [6]

Le bobinage inducteur comporte dans ce cas peu de spires, mais il est réalisé avec du fil de gros diamètre. Cette conception lui procure une très bonne robustesse face aux vibrations et lui a valu un succès inégalé en traction ferroviaire [20].

II.4.1.2. Moteur à excitation shunt

Dans un moteur à excitation shunte, l'inducteur et l'induit sont connectés en parallèle et alimentés par une seule source de tension continue. Le modèle câblé de ce moteur est Présenté sur la figure suivante [20] :

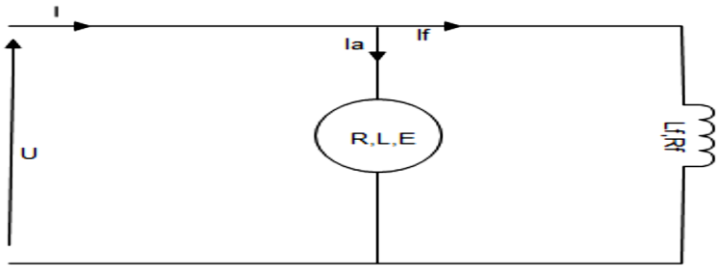


Figure II.17 Schéma électrique du moteur à excitation shunt [6]

II.4.1.3 Excitation composée

Dans le mode composé, l'inducteur est divisé en deux parties, l'une connectée en série Et l'autre en parallèle. Du cette composition on peut avoir deux types additionnel ou différentie.

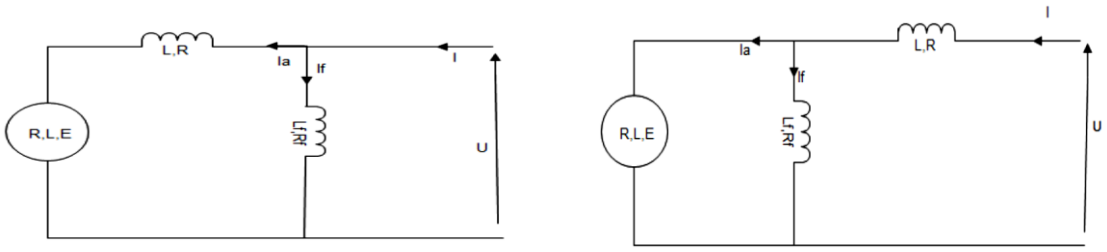


Figure II.18 Schéma électrique du moteur à excitation composée

II.4.1.4 Moteur à excitation séparée

Le moteur à excitation séparée est constitué de deux enroulements induit et inducteur qui sont alimentés séparément par deux sources distinctes. L'inducteur qui comporte une résistance «Rf», et une inductance «Lf» est excité par une source continue de tension «Uf», et de courant «If», et l'induit qui est constitué d'une résistance, d'une inductance et d'une force contre électromotrice respectivement (R, L, E), est excité par une source continue de tension (Ua) et de courant (Ia) [6].

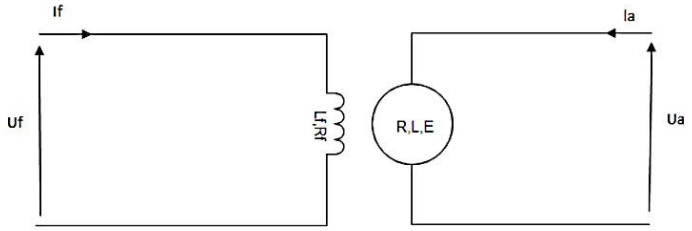


Figure II.19 Schéma électrique du moteur à excitation séparée.

II.4.2 Modèle électrique du moteur à courant continu

Le modèle du moteur au quelle nous allons nous intéresser et le moteur à excitation indépendante au quelle nous allons présenter ces expression mathématique, le schéma équivalent et représenté dans la (figure II.20) [6].

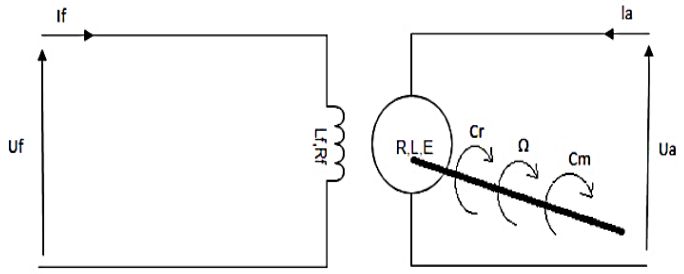


Figure II.20 Schéma électrique du modèle de moteur choisi

II.4.2.1 Equations électriques

Les équations électriques qui rigide de notre moteur à courant continue et :

$$\begin{cases} Ua = RaIa + La\frac{dIa}{dt} + E => \frac{dIa}{dt} = \frac{1}{La(Ua-E-Ra.Ia)} \\ Uf = RfIf + Lf\frac{dIf}{dt} => \frac{dIf}{dt} = \frac{1}{Lf(Uf-Rf.If)} \end{cases} \quad \text{(II.33)}$$

En sachant que la force contre électromotrice E est :

$$E = P.M_{fd}.\Omega_r.I_f \quad \text{(II.34)}$$

II.4.2.2 Expression du couple électromagnétique

Sur le principe de la loi de Laplace, le rotor de la machine possède un couple qui en nomme couple électromagnétique. L'expression du couple électromagnétique est donnée par

$$C_{em} = P.M_{fd}.I_f I_a \quad \text{(II.35)}$$

II.4.2.3. Equations mécanique

D'après le principe fondamental de la dynamique, l'équation mécanique du moteur entrainant une charge de couple résistant est donnée par

$$C_{em} - C_r = J\frac{d\Omega_r}{dt} + f\Omega_r \quad \Rightarrow \quad \frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{1}{J(C_{em}-C_r-f\Omega_r)} \quad \text{(II.36)}$$

II.4.2.4 Moteur à courant continu à excitation constante

Si on prend $I_f = C^{ste}$ $\Longrightarrow$ on pose $K_m = P.M_{fd}I_f$ le modèle du moteur s'écrit comme suite :

$$\begin{cases} \frac{dI_a}{dt} = \frac{1}{L_a(U_a-K_m.\Omega_r-R_a.I_a)} \\ \frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{1}{J(K_mI_a-C_r-f.\Omega_r)} \end{cases} \quad \text{(II.37)}$$

II.5 Modélisation de la pompe centrifuge

La pompe centrifuge applique un couple de charge proportionnel au carré de la vitesse de rotation du moteur.

$$C_r = K_{ch} \times \Omega^2 \quad \text{(II.38)}$$

Avec K_{ch} désigne la constante de proportionnalité. Connaissant les performances d'une pompe centrifuge (Q, H et P) pour la vitesse Ω , les lois de similitude permettent de déterminer les performances (Q_{ref}, H_{ref} et P_{ref}) pour une vitesse en utilisant les relations suivant...ext :

$$\frac{Q}{Q_{ref}} = \frac{\Omega}{\Omega_{ref}} \quad \text{(II.39)}$$

$$\frac{H}{H_{ref}} =. \left(\frac{\Omega}{\Omega_{ref}}\right)^2 \quad \text{(II.40)}$$

$$\frac{p}{p_{ref}} = \left(\frac{\Omega}{\Omega_{ref}}\right)^3 \quad \text{(II.41)}$$

Avec$Q$ et Q_{ref}, les débits correspondants respectivement à la vitesse Ω et Ω_{ref} ; H et H_{ref} les hauteurs manométriques totales correspondantes respectivement à la vitesse Ω et Ω_{ref} ; p et p_{ref} sont les puissances du moteur correspondant respectivement à la vitesse Ω et Ω_{ref} . Le modèle de l'ensemble motopompe a été conçu dans l'environnement MA-TLAB/Simulink à partir des équations (II.39) a (II.41). [19]

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on s'est consacré à la modélisation d'une alimentation photovoltaïque à base d'une machine à courant continu (MCC) destinée pour les application agricole appliquée agricole.

Cette dernière est composée d'un générateur PV, convertisseur statique (hacheur), machine MCC et une pompe centrifuge, ce modèle sera exploitée pour la simulation de chapitre IV.

Chapitre III
Commande d'une alimentation photovoltaïque à base de la MCC

III.1 Introduction :

Dans une chaine de conversion d'énergie solaire photovoltaïque (PV), le rendement le plus élevé des panneaux solaires PV disponibles sur le marché industriel est d'environ 10 à 19%. En outre, un module PV présente une relation non linéaire entre le courant et la tension de sortie, elle se traduit sur sa caractéristique (I-V). Sur cette dernière, on observe un point unique sur la caractéristique (I-V) sous une irradiation et température. [21]
Ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale A cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur et le récepteur un ou plusieurs convertisseurs statiques commandés permettant de poursuivre le point de puissance maximale. [6]

Ces commandes sont, connus sous le nom MPPT (Maximum Power Point Tracking) c'est-à-dire poursuite du point à puissance maximale, associées à la commande du hacheur, les quelles assurent le couplage entre le générateur PV et le récepteur en forçant le premier à délivrer sa puissance maximale.

D'exploiter un algorithme MPPT est de garantir dans toutes les conditions d'environnement climatique (en particulier le rayonnement solaire et la température) l'extraction de la puissance maximale des modules PV. Ceci est réalisé en faisant correspondre le point de puissance maximale (MPP) du PV avec la tension et le courant de fonctionnement du convertisseur de puissance. Lors de l'augmentation ou de la diminution de la température ou/et de l'irradiation, l'énergie solaire varie en fonction de ces changements atmosphériques, le point de puissance maximale évolue donc et correspond à une tension et un courant particulier [21].

Ce chapitre se focalise sur le développement d'un algorithme MPPT basées sur la poursuite du point de puissance maximale. Notre travail est basé sur le développement de la méthode perturbation et observation (P&O). Cette commande utilise directement la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour chercher le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale [6].

III.2 Optimisation de système photovoltaïque

III.2.1 La commande de recherche du point de puissance maximale

une commande MPPT (maximum power point Tracking), associé à un convertisseur DC/DC d'adaptation permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance ,quels que soit les conditions

météorologiques (irradiation, température).cette commande ainsi place de système au point de fonctionnement maximum (V_{opt} I_{opt}).le premier système de puissance MPPT a été introduit en 1968 pour un système spatial .Au cours des années .plusieurs algorithmes (MPPT) ont été développés et largement adaptés pour déterminer le point de puissance maximum .A savoir plusieurs méthodes d'optimisation [13]

Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau photovoltaïque [6].

La figure (II.1) montre le diagramme avec un module MPPT qui a pour entrées la tension et le courant de sortie du module.

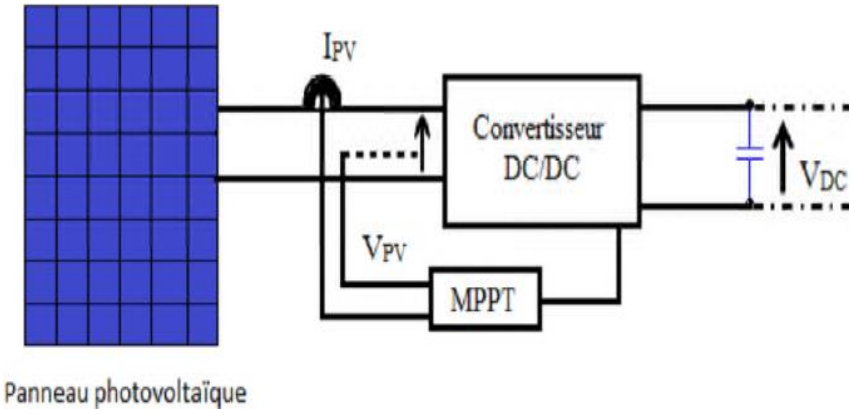


Figure (III.1) : Schéma synoptique du couplage photovoltaïque avec MPPT.

III.2.2 Principe de la Recherche du PPM

L'algorithme MPPT indique à l'appareil comment trouver la tension (V_{mpp}) , suivi des paramètres restants $(I_{mpp}, P_{mpp}, D_{mpp})$. Par conséquent, le rôle de la commande MPPT est de ramener la tension de sortie au niveau souhaité et de la maintenir à ce niveau grâce à la régulation. Il existe généralement plusieurs façons d'accomplir cette tâche, mais nous nous limiterons à deux méthodes de contrôle : le contrôle indirect avec un régulateur de maintien et le contrôle direct sans régulateur.

Optimiser la conception des systèmes photovoltaïques est assez difficile. En fait, du côté de la puissance du générateur photovoltaïque, la quantité de puissance générée variera considérablement en raison de la lumière du soleil et de la température. Afin de maintenir le fonctionnement optimal du générateur le plus souvent possible, la solution habituelle consiste à introduire un convertisseur statique qui réalisera l'adaptateur puissance-charge dans les conditions données (c'est-à-dire au point de puissance maximale de l'alimentation). La relation entre la fonction et les caractéristiques de tension indiquées sur la Figure II.2 à un éclairement de 1000w/m^2et une température de 25°C [22].

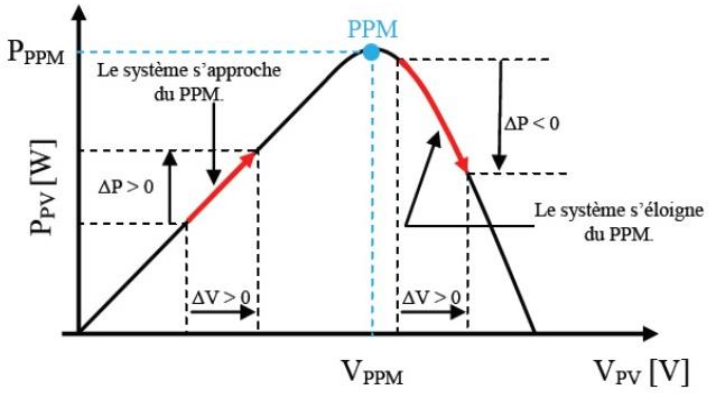


Figure III.2 : Caractéristique(Ppv, Vpv) d'un panneau solaire [23]

Si la dérivée est positive ($Pa<Pb$), cela signifie que nous nous rapprochons du PPM, et si la dérivée de la puissance est négative ($Pa>Pb$), cela veut dire que nous l'avons dépassé PPM.

Pour assurer le fonctionnement du générateur photovoltaïque au point de puissance maximale (PPM), des contrôleurs MPPT sont souvent utilisés. Ces régulateurs ont été conçus pour minimiser l'écart entre la puissance de fonctionnement et la puissance maximale de référence, qui varie en fonction des conditions climatiques.

La puissance de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque peut être facilement calculée à partir du produit de la tension et du courant. En revanche, la détermination de la puissance maximale de référence est plus délicate car elle dépend des conditions climatiques (lumière, température). Cette référence, donc instable et caractérisée par une fonction non linéaire, rend difficile l'atteinte des performances maximales. Pour surmonter ces difficultés, diverses méthodes telles que des méthodes analogiques et des méthodes numériques sont souvent utilisées pour améliorer l'efficacité du générateur photovoltaïque (PV), Pour maximiser la puissance fournie aux bornes de charge connectées du générateur, plusieurs critères doivent être appliqués pour optimiser les performances du système et appliquer des techniques pour obtenir une bonne adaptation du et un rendement élevé.

III.2.3. Classification des commandes MPPT selon le type de recherche

La classification des algorithmes de suivi peut être basée sur la fonction de la technique de contrôle ou de la stratégie utilisée. Ainsi, deux catégories peuvent être proposées : les méthodes directes et indirectes.

III.2.3.1 Méthode Indirect

De telles commandes MPPT utilisent un lien existant entre une grandeur mesurée facilement déterminée (Isc ouVoc) et la position approximative du MPP. Il compte également les commandes basées sur les estimations du point de fonctionnement GPV

générées à partir d'un modèle paramétrique prédéfini. Il existe également des commandes pour établir une continuité de tension optimale en ne prenant en compte que les variations de température de la batterie données par les capteurs. Ces commandes ont l'avantage d'être simples à exécuter. Au lieu de cela, ils conviennent aux systèmes à faible coût et à faible précision qui doivent fonctionner dans des régions géographiques avec peu de changements climatiques [14].

II.2.3.2 Méthode direct

Ce type de commande MPPT exploite la relation qui existe entre les grandeurs mesurées facilement déterminables (Isc ouVoc) et la position approximative du MPP. Il comprend également des instructions basées sur l'estimation du point de fonctionnement GPV, qui est effectuée sur la base d'un modèle paramétrique préalablement défini. Il existe également des commandes qui fixent la poursuite de la tension optimale, en ne prenant en compte que les variations de température des cellules fournies par le capteur. Ces commandes ont l'avantage d'être faciles à exécuter. Plutôt destinées à des systèmes à faible coût, elles nécessitent à tort de travailler dans des zones géographiques où il y a peu de convertisseurs de changement climatique pour contrôler les composantes AC et DC de la tension GPV, comparer et ainsi faire fonctionner un GPV. Point le plus près possible du MPP. L'avantage de ce type de contrôles est leur précision et leur réactivité [14].

III.3. Différents types de commandes MPPT

Plusieurs publications sur les commandes de la recherche du point de puissance maximale apparaissent dans la littérature, et ce depuis les années 1970. Ces commandes diffèrent par leur principe de fonctionnement, leur précision et leur rapidité de recherche. Dans ce qui suit, nous allons citer les principales commandes rencontrées dans la littérature [4].

III.3.1. Premières commandes MPPT

En Janvier 1968, A.F. Bohringer a publié la première loi de commande MPPT adaptée à une source d'énergie renouvelable de type photovoltaïque. La commande, basée sur un algorithme de contrôle adaptatif, permet de maintenir le fonctionnement du système à son point de puissance maximale. A partir des mesures du courant délivré par le panneau photovoltaïque I_{ph} et de la tensionV_{ph}, la méthode consiste à calculer la puissance à l'instant ti et la comparer à la valeur mémorisée à l'instant $Ti-1$. Par la suite, un nouveau rapport cyclique est calculé et est appliqué au convertisseur statique. La Figure III.3 illustre le principe de la première commande MPPT numérique [4].

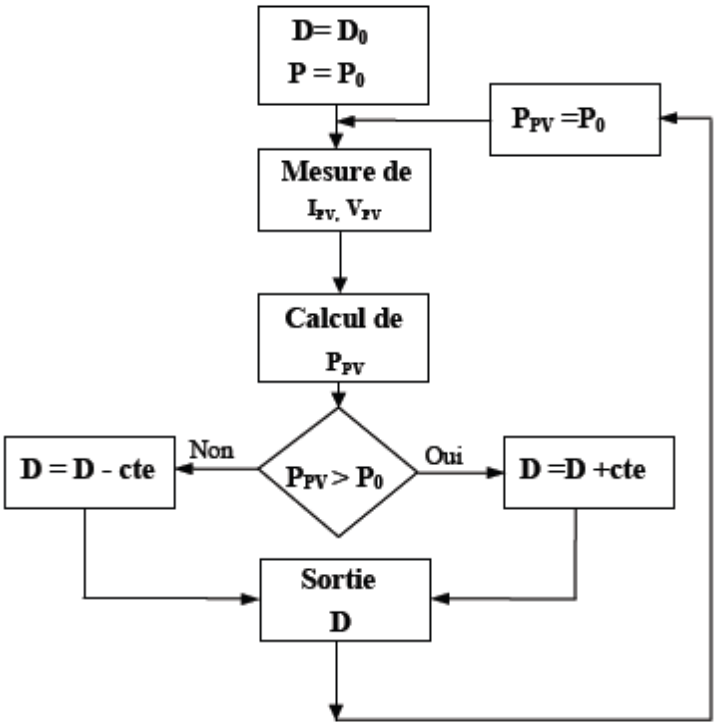


Figure III.3. Principe de la première commande MPPT numérique

Ce principe de commande est toujours valable, il est appliqué maintenant sur des algorithmes numériques plus performants, avec un temps de réaction et une précision de la recherche du PPM améliorés.

III.3.2 Les commandes MPPT basées sur des relations de proportionnalité.

Ces commandes sont basées sur des relations de proportionnalité entre les valeurs optimales du point de puissance maximale($VopT\ et\ IopT$) et les paramètres à vide et en court-circuit du module PV($Voc\ et\ Icc$). Suivant le paramètre contrôlé, on parle alors de commande en régulation de courant ou de tension [4].

III.3.3 Commande en régulation de tension.

Cette méthode consiste à comparer la tension délivrée par le panneau Vpv avec la tension optimale V_{OPT} considérée comme référence. L'erreur entre les deux tensions est alors utilisée pour ajuster le rapport cyclique du convertisseur statique dans le but d'avoir une tension égale à celle de référence.

La tension de référence est obtenue à partir de la relation linéaire entre $VopT$ et Voc du module PV :

$$V_{OPT} = K_V . V_{CO} \qquad \text{(III.1)}$$

Où K_V est un facteur de tension qui dépend du GPV utilisé et de la température de fonctionnement. Généralement, pour des GPV en Si, Kv est compris entre 0.71 et 0.78.

L'inconvénient de cette technique est qu'il est nécessaire d'effectuer la mesure de VOC de temps en temps. La charge doit être donc déconnectée pendant cette mesure, ce qui provoque une perte de puissance. Cette méthode est simple et robuste mais ne présente pas assez de précisions.

III.3.4 Commande en régulation de courant

Concernant cette méthode, le PPM peut être atteint en comparant le courant de court-circuit ICC mesuré à un courant de référence égal IOPT. Ce courant est calculé par la relation suivante :

$$I_{OPT} = K_I . I_{CC} \quad \text{(III.2)}$$

K_I Étant le facteur de courant qui dépend du GPV utilisé, généralement compris entre 0.78 et 0.92.

Pendant la mesure du courant Icc, il est nécessaire de court-circuiter le GPV, ce qui implique une perte de transfert de puissance.

Ces types de commandes nécessitent un seul capteur, ce qui les rend faciles à mettre en œuvre. Par contre, leur précision est faible à cause des procédés d'estimation des paramètres . I_{CC}etV_{CO}. De plus, à chaque mesure de courant ou de tension, un arrêt de transfert de puissance est obligatoire.

III.3.5 MPPT à base de logique floue

Les commandes basées sur la logique floue sont de plus en plus populaires grâce à l'évolution des microcontrôleurs L'avantage de ces techniques est qu'elles peuvent fonctionner avec des valeurs d'entrées peu précises et qu'elles n'ont pas besoin de modèle mathématique de grande précision. La logique floue est une des méthodes de contrôle les plus puissants. De plus, elles peuvent traiter des non linéarités.

Cette fonctionnalité du contrôleur flou démontre son efficacité et le rend parmi les meilleurs dispositifs de suivi PPM.

Le contrôleur de flou MPPT proposée comporte deux variables entrées et une sortie Les deux entrées sont l'erreur E, et la variation d'erreur CE et une variable de sortie ΔD (variation du rapport cyclique). La valeur de la variable de sortie, qui pilote le convertisseur statique pour rechercher le PPM, est déterminée à l'aide d'une table de vérité et de l'évolution des paramètres d'entrée [24].

Les (figures III.4) représentent la caractéristique P=f(V) et I=f(V) en utilisent les conditions standard STC (25 C° ,1000 w/m²)

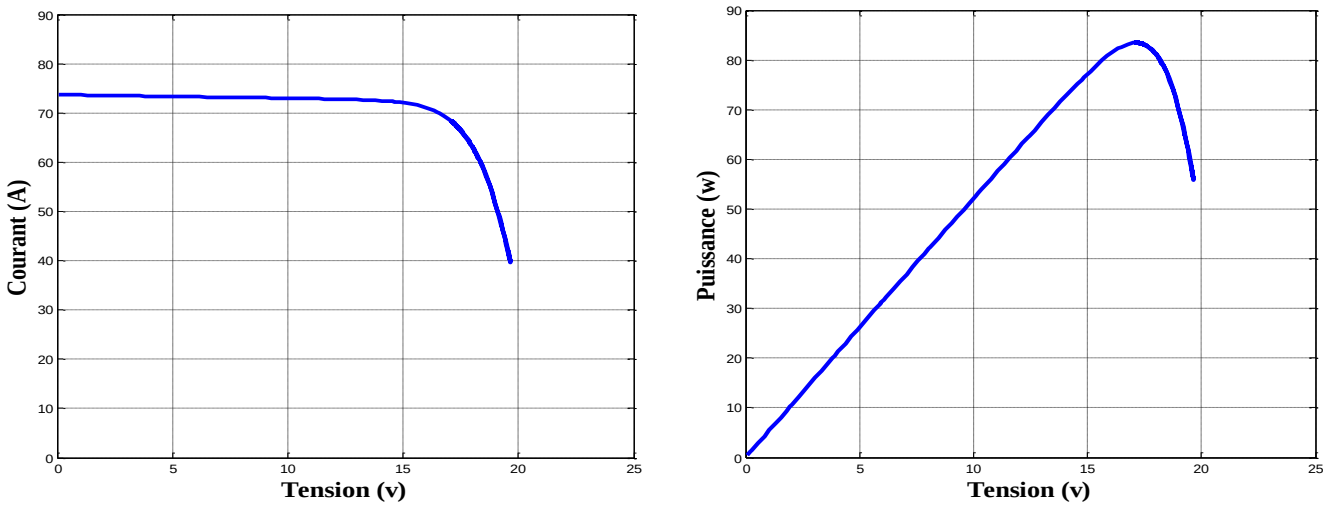


Figure III.4 : Caractéristiques P=f(V) et I=f(V).

III.3.6 MPPT à base de Réseaux de Neurones Artificiels (RNA)

La technique de réseaux de neurones est elle aussi, de plus en plus utilisée, car elle offre une grande alternative pour résoudre des problèmes complexes. Ces dernières années, l'utilisation de cette méthode dans divers domaines d'application ne cesse d'augmenter car elle fonctionne à partir d'une boite noire qui n'exige pas d'informations détaillées sur le fonctionnement du système. Elle établit des relations entre les variables d'entrée et de sortie en analysant les précédentes données mémorisées. Un autre avantage est qu'elle peut traiter des problèmes d'une grande complexité grâce à des paramètres interdépendants [24].

III.3.7 MPPT basé sur le balayage du courant (CurrentSweep)

Cette méthode utilise le balayage du courant IPV pour tracé la caractéristique (I, V) dans un intervalle fixe du temps, donc le $Vmpp$ sera calculé à travers le tracé de cette courbe La fonction de balayage est choisie de façon que :

$$f(t) = K\frac{df(t)}{dt} \tag{III.3}$$

La puissance du GPV est donnée par

$$p(t) = v(t).i(t) = v(t).f(t) \tag{III.4}$$

Au PPM, $\frac{dP}{dt} = 0$ et, en substituant (II.3) on obtient l'équation suivante :

$$\frac{dP}{dt} = [v(t) + k\frac{dv}{dt}]\frac{df}{dt} = 0 \tag{III.5}$$

Or la solution de l'équation différentielle (II.3) est :

$$f(t) = c.\exp(-\frac{T}{K}) \quad \text{(III.6)}$$

Pour avoir un exponentielle décroissant qui tend vers *Imax* on fait le choix (C=*Imax*), l'équation (II. 6) peut s'implanté facilement avec un circuit capacitif en décharge [6].

III.3.8 MPPT RCC (Ripple Corrélation Control)

C'est une technique qui utilise les ondulations engendrées par le convertisseur Statique dans les grandeurs mesurées du GPV (courant –tension et puissance).

Le principe est base sur la dérivé de puissance par apport au temps ($\frac{dP}{dt}$) au lieu de($\frac{dP}{dV}$). Le point maximum est obtenue directement par la relation analytique du rapport cyclique α(t) ; où :

$$\alpha(t)=K \int \dot{P}\dot{V}\, dt \quad \text{(III.7)}$$

Le rapport montre que cette technique est facile à mettre en œuvre de manière analogue, la constante K dépend du gain de la boucle de commande du convertisseur statique. La dynamique dépend également de la fréquence limite Seule la perturbation du point de fonctionnement due au courant ou à la tension l'ondulation est une erreur de ce MPPT [23].

III.3.9 Algorithme Perturbation et Observation (P&O)

La P&O est la méthode la plus utilisée par ce 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 dépister le point maximum de puissance même lors des variations de l'éclairement et la température. Comme son nom l'indique, l'algorithme Perturbation et Observation, est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de la tension V_{PV} ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie du panneau. Si la valeur de la puissance actuelle P_{PV}(n) du panneau est supérieure à la valeur précédenteP_{PV} (n-1*)* alors on garde la même direction de la perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent. La figure (III.5), Donne L'organigramme de cet algorithme.

Si la largeur du pas est grande, l'algorithme MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou lentement changeantes. Si la largeur du pas est très petite, les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation. [19]

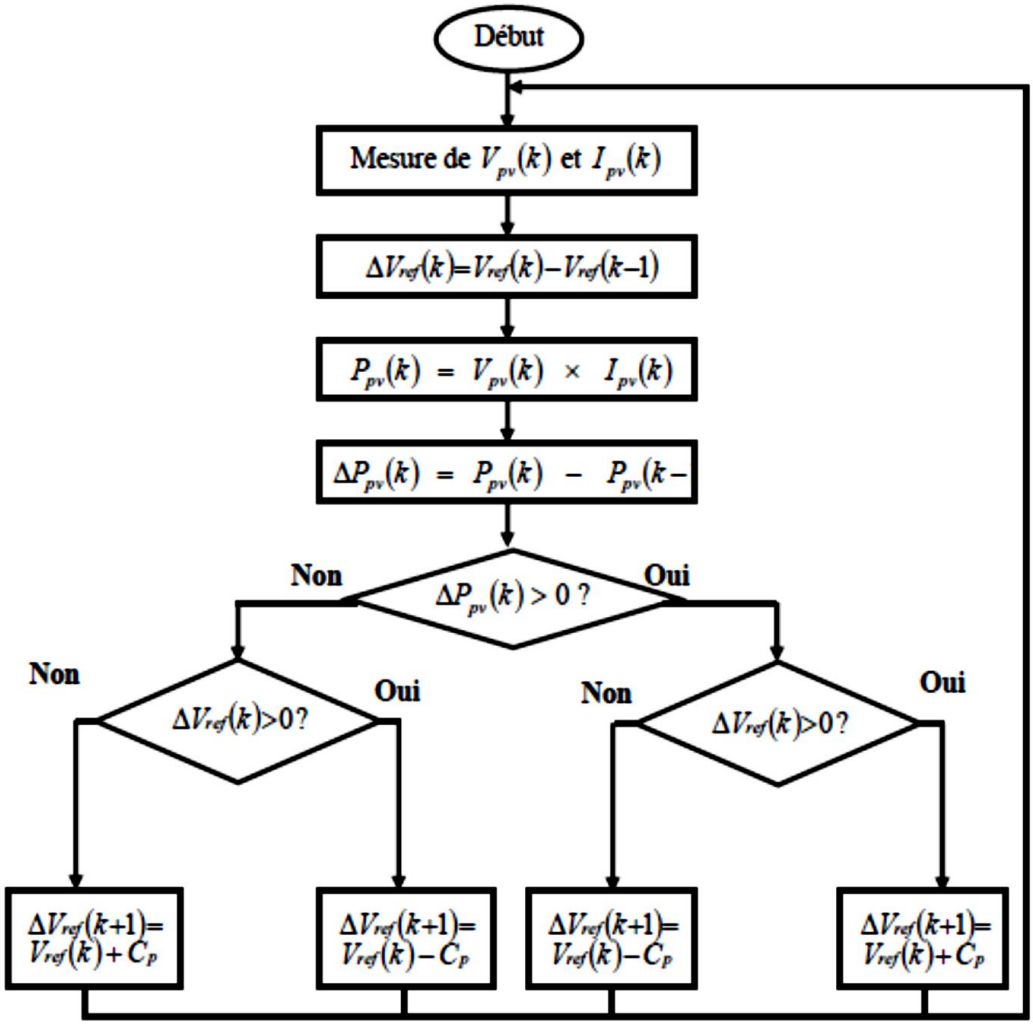


Figure III.5 : Organigramme de l'algorithme P&O.

III.3.10 La méthode de l'algorithme "Incrémental Conductance" (InCond) simple

La méthode d'incrémentation de la conductance a été proposée pour éviter les inconvénients de la méthode P&O de recherche du MPPT. Elle est basée sur la relation

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad Pour\ V = V_{mp} \tag{III.8}$$

$$\frac{dP}{dV} > 0 \quad Pour\ V < V_{mp} \tag{III.9}$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \quad Pour\ V > V_{mp} \tag{III.10}$$

On a : $P = V * I$, alors on développe le dérivé $\frac{\mathrm{dP}}{\mathrm{dV}}$

$$\frac{dP}{dV} = I\frac{dV}{dV} + V\frac{dI}{dV} = I + V\frac{dI}{dV} \tag{III.11}$$

Cette relation est égale à zéro au point de puissance maximale. Ceci mène à l'ensemble d'équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{dP}{dV} > 0 \; si \; \frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \\ \frac{dP}{dV} = 0 \; si \; \frac{I}{V} = -\frac{dI}{dV} \\ \frac{dP}{dV} < 0 \; si \; \frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \end{cases} \qquad \text{(III.12)}$$

$-\frac{1}{V}$:La conductance,

$\frac{dI}{dV}$: Conductance instantanée.

Les équations ci-dessus peuvent être employées dans un algorithme de commande pour le point de fonctionnement du convertisseur et ce, en mesurant l'accroissement de la conductance $\frac{dI}{dV}$ et la conductance instantanée du$\frac{I}{V}$ convertisseur respectivement.

L'organigramme de l'algorithme de commande est montré sur la figure (III.6).

Il peut être plus difficile de mettre en application cette méthode que les méthodes précédentes parce qu'elle implique des divisions dans lesquelles le dénominateur peut être égal à zéro. Alors il faut ajouter un pas (assez petit ≅ 0.01) au dénominateur pour éviter cet inconvénient. [19]

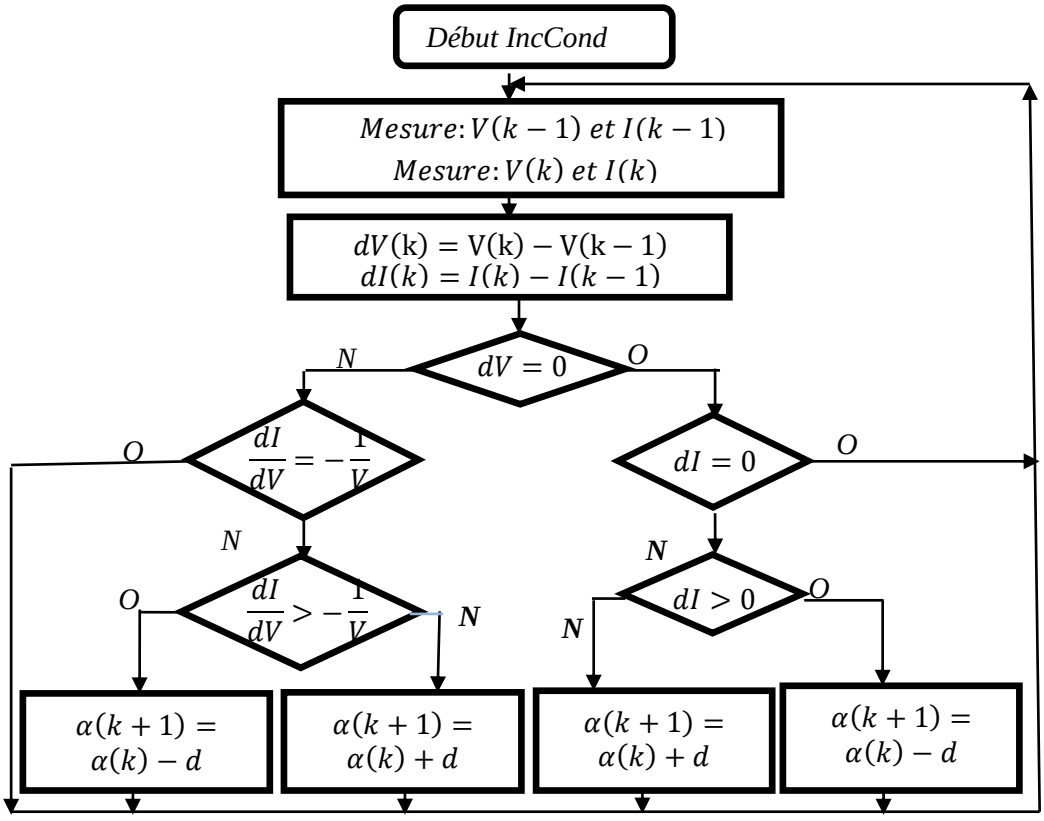


Figure III.6 : Organigramme de l'algorithme IncCond.

III.4 Simulation du panneau photovoltaïque avec MPPT

La figure suivante représente la réponse de l'algorithme P&O du fonctionnement dans des conditions standards (T=25°C, E=1000w/m)

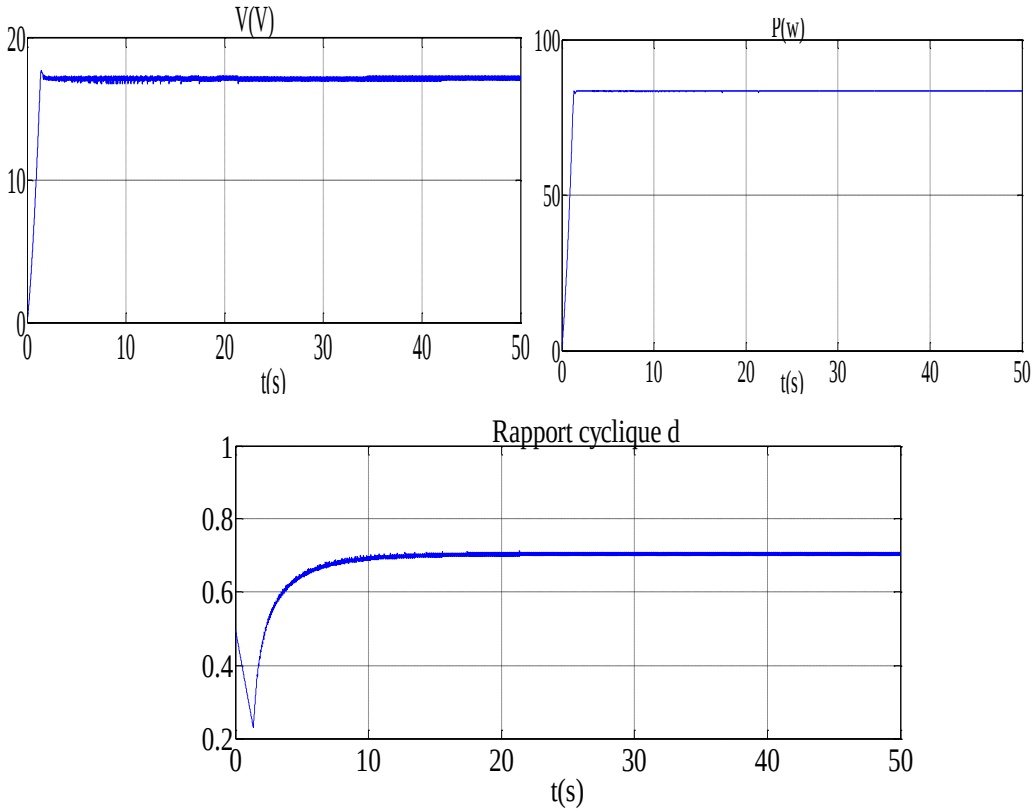


Figure III.7 : Réponse de l'Algorithme P&O lors de fonctionnement standard

Pour une température standard, on simule une augmentation de l'éclairement de 500 w/m^2 à 1000 w/m^2 pendant 50 s, on refait l'expérience,

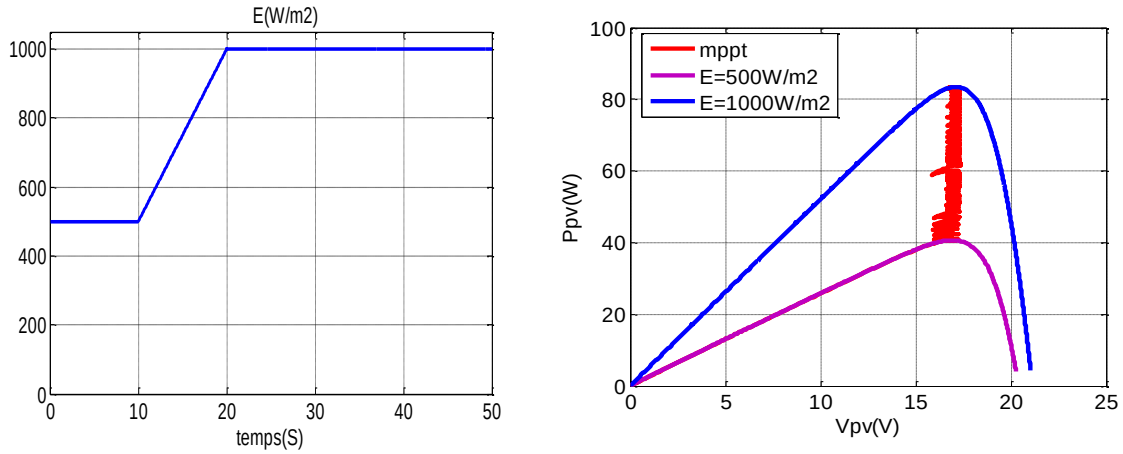


Figure III.8 évolution du point de fonctionnement du GPV d'une augmentation de l'éclairement

La figure suivante représente la réponse de l'algorithme P&O et InCond lors du fonctionnement dans des conditions standards (T=25°C, E=1000w/m^2)

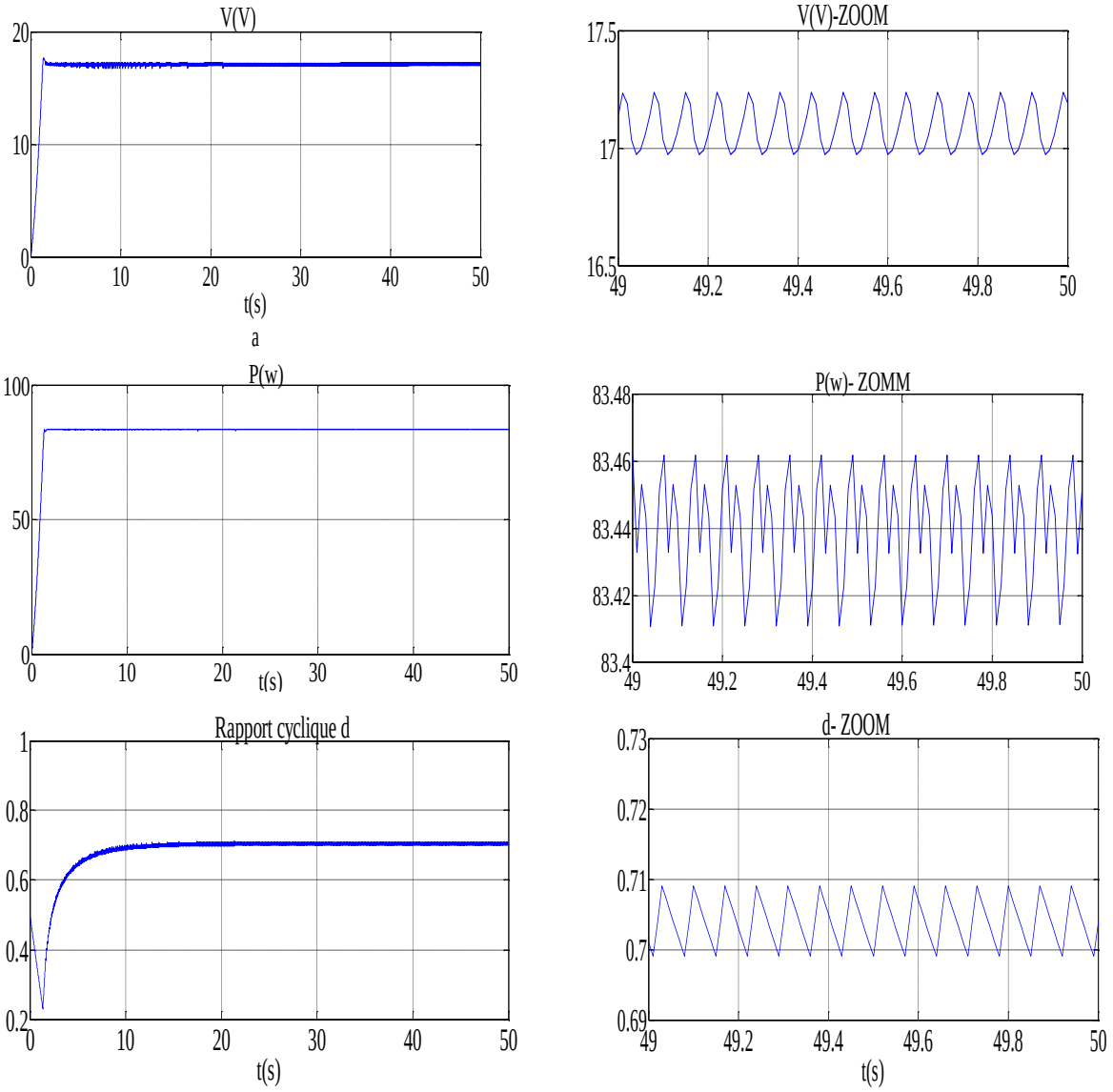
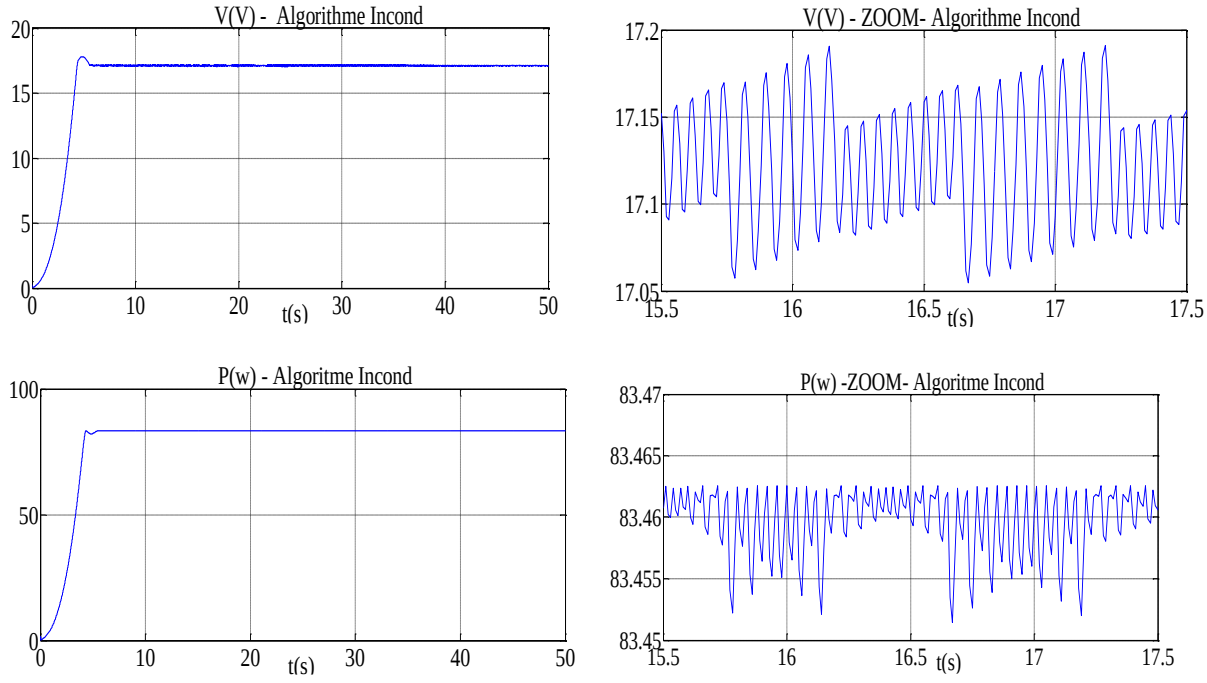


Figure III.9 Réponse de l'Algorithme P&O lors de fonctionnement standard.



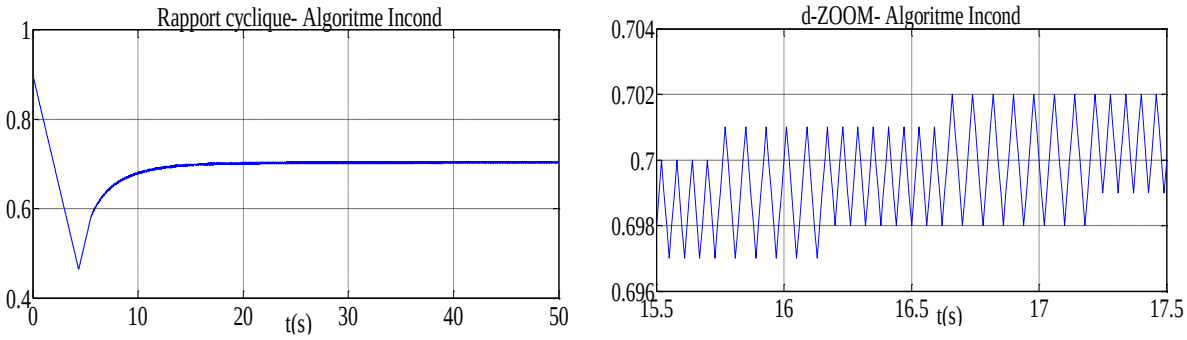


Figure III.10 Réponse de l'Algorithme Incond lors de fonctionnement standard.

On remarque que le contrôleur conductance incrémentale parvient à ajuster rapidement le rapport cyclique d par apport le contrôleur P&O de sorte que le point de puissance maximale soit atteint**.**

Les figures suivantes présentent les réponses de générateur photovoltaïque à l'aide des trois contrôleurs dans des conditions standards.

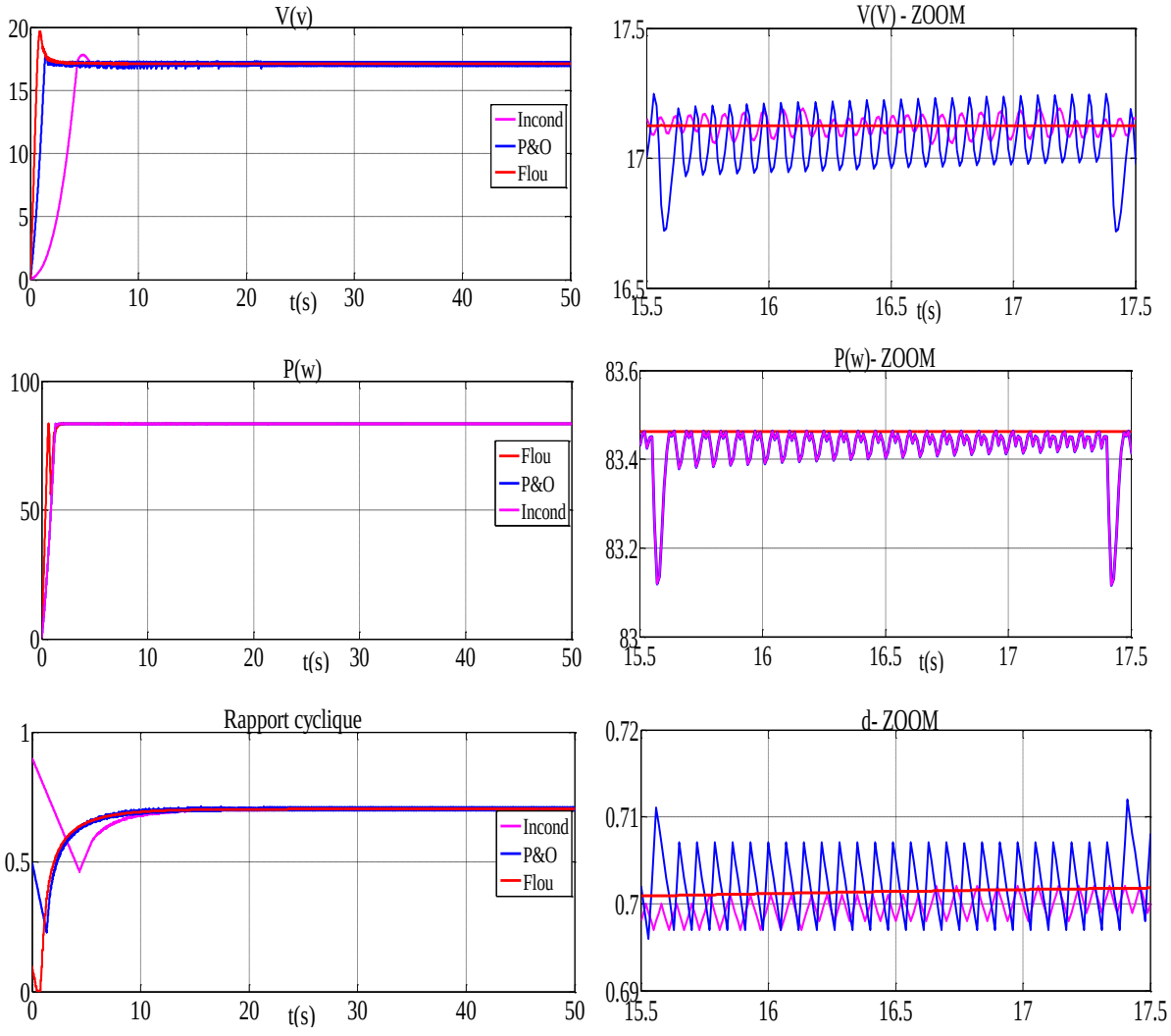


Figure III.11 : Réponse des trois contrôleurs dans les conditions standards.

On constate que le régime transitoire est plus long pour le système commandé par l'algorithme conductance incrémentale.

En régime permanent, le régulateur flou est parfaitement calé sur le point de puissance maximale, alors que les régulateurs P&O et conductance incrémentale oscilles autour de ce point.

- Robustesse vis-à-vis des variations de l'éclairement

Pour une température standard, on simule une augemntation de l'éclairement de 300 w/m^2 à 1000 w/m^2 pendant 50 s, on refait l'experience, dans l'autre sens on déminuant l'éclairement de 1000 w/m^2 à 300 w/m^2 durant le meme laps de temps.

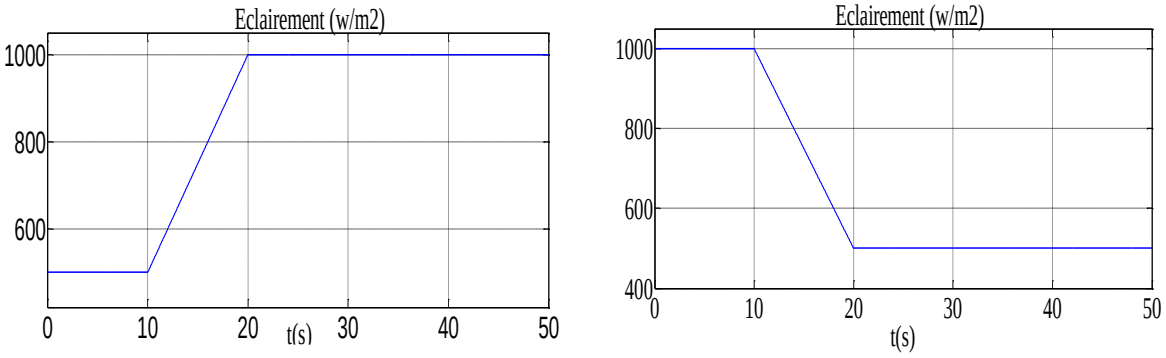
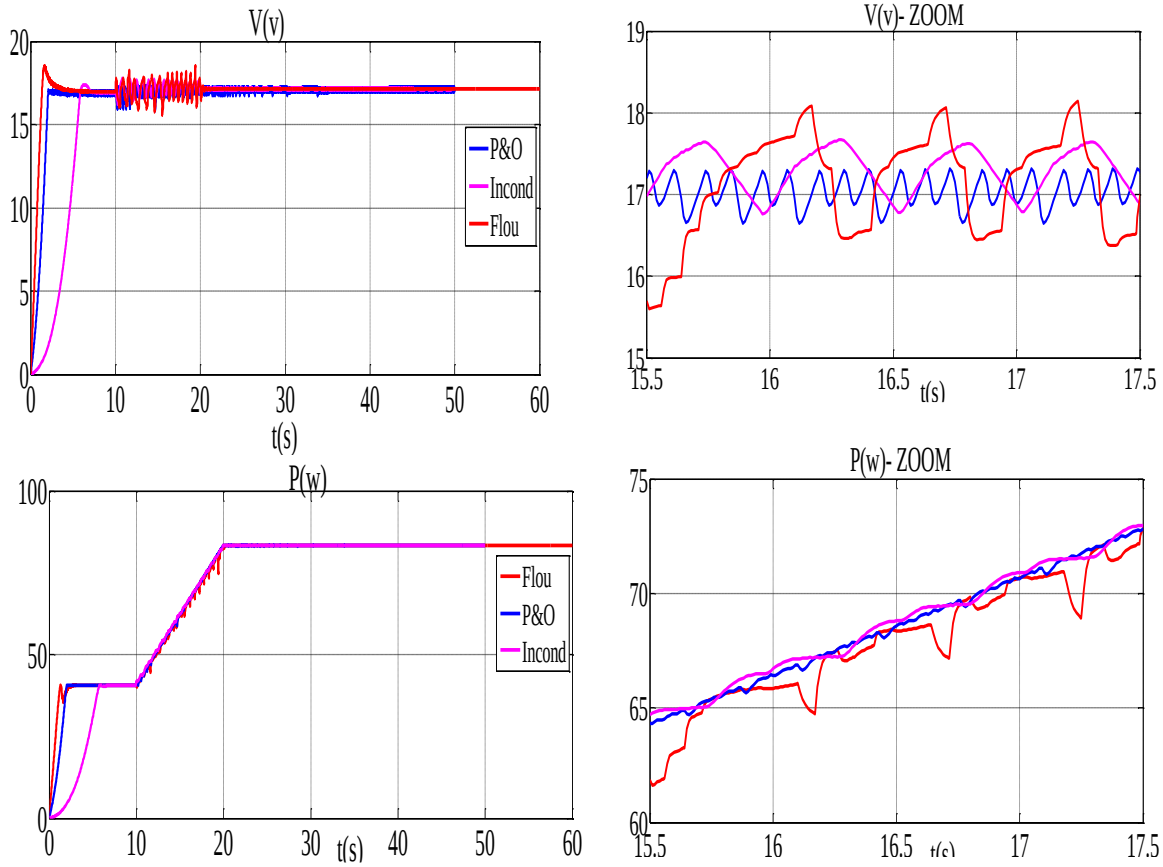


Figure III.12 Variation de l'éclairement en fonction de temps.



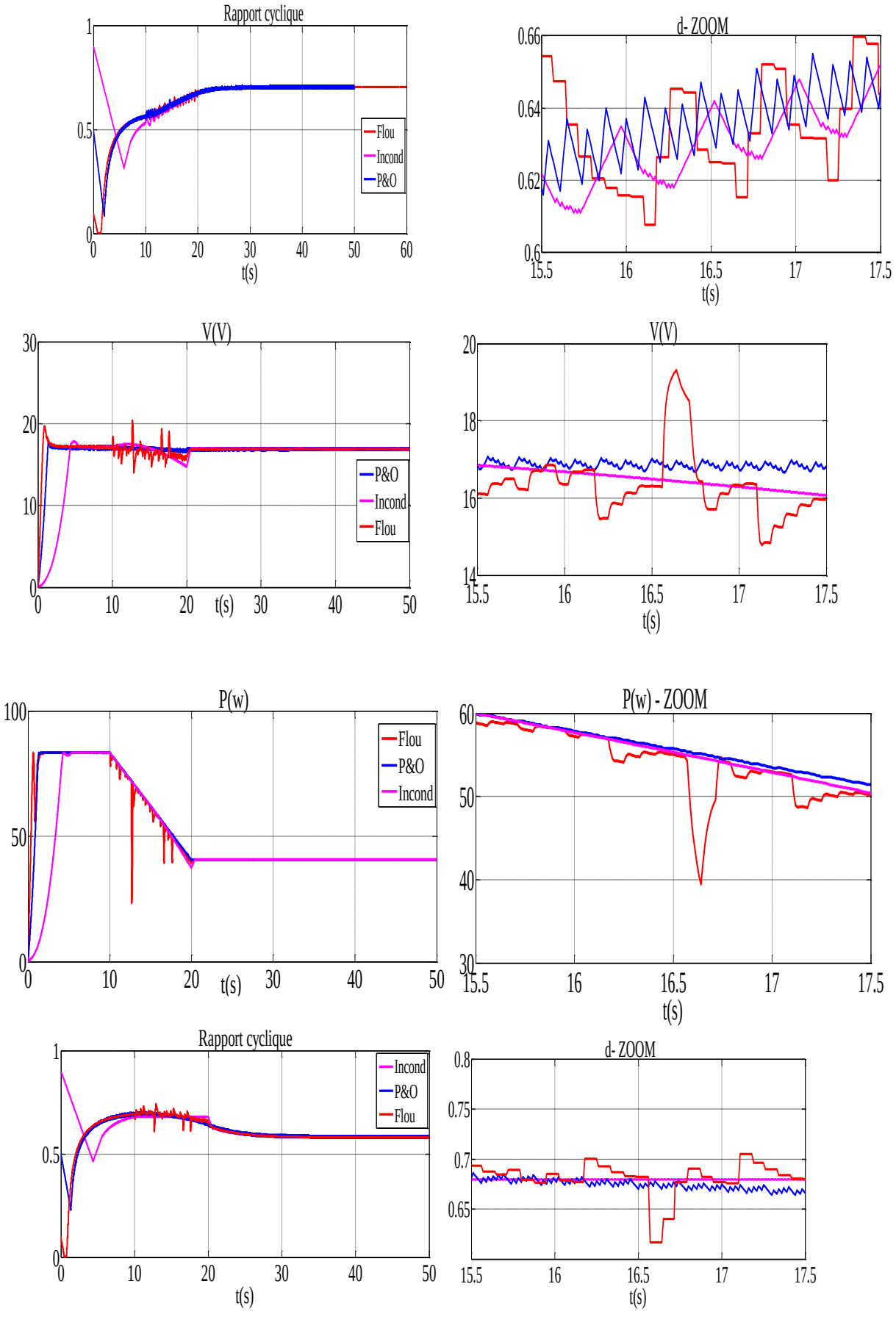


Figure III.13 Réponse des trois contrôleurs lors d'une diminution de l'éclairement.

Nous avons remarqué au changement de l'éclairement, le dispositif converge vers la puissance maximal, autour duquel il va osciller, c'est à dire le GPV est perturbé à ce point. Dans les trois cas les régulateurs, P&O Conductance Incrémentale et flou, convergent vers le point PPM, mais le système contrôlé par logique floue évolue avec le PPM d'une manière plus harmonieuse comparé aux deux autres régulateurs.

- Robustesse vis-à-vis des variations de la température

Pour un éclairement fixé à 1000 W/m^2, on simule une augemntation de la température de 298 °K à 348 °K pendant 50 s, on refait l'experience, dans l'autre sens on déminuant la température de 348 °K à 298 °K durant le meme laps de temps.

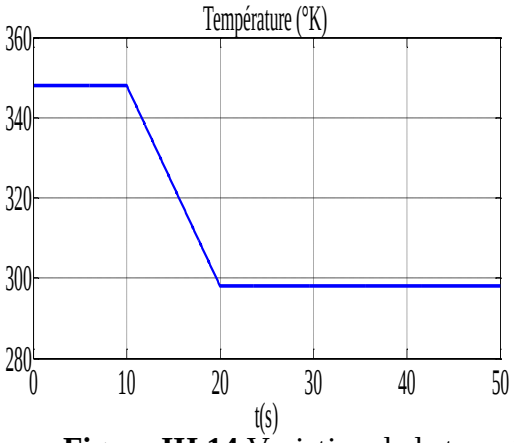


Figure III.14 Variation de la température en fonction de temps.

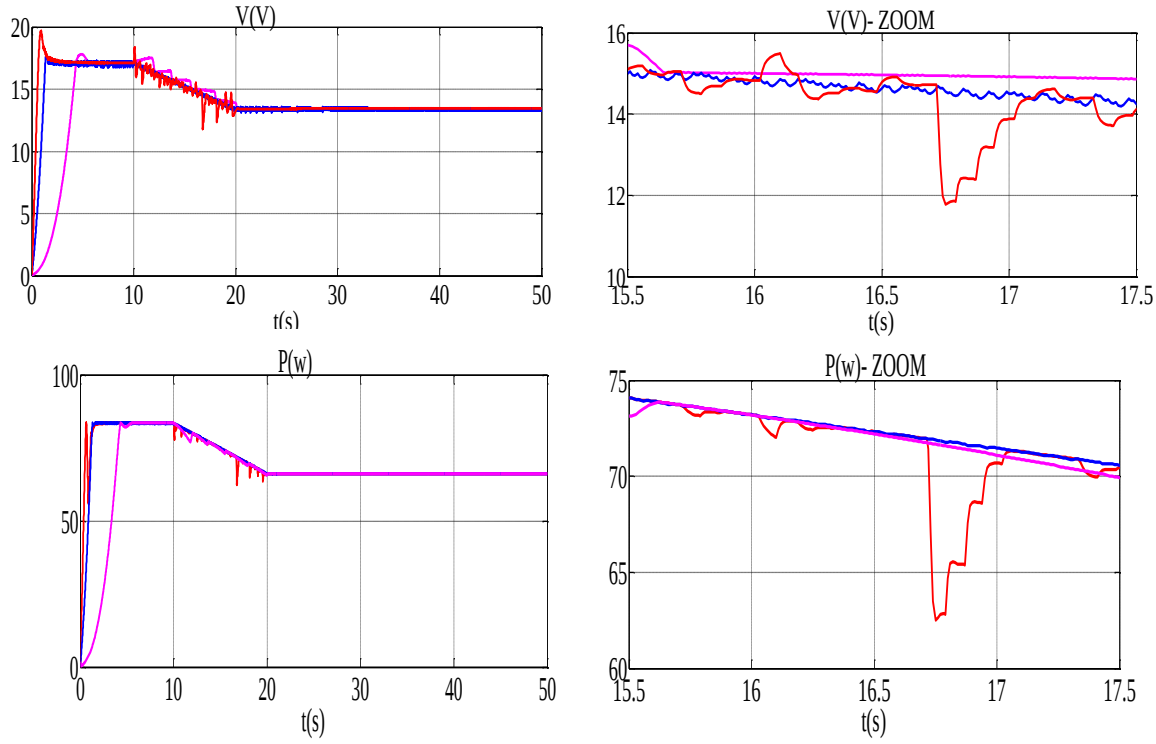


Figure III.15 Réponse des trois contrôleurs lors d'une augmentation de la température.

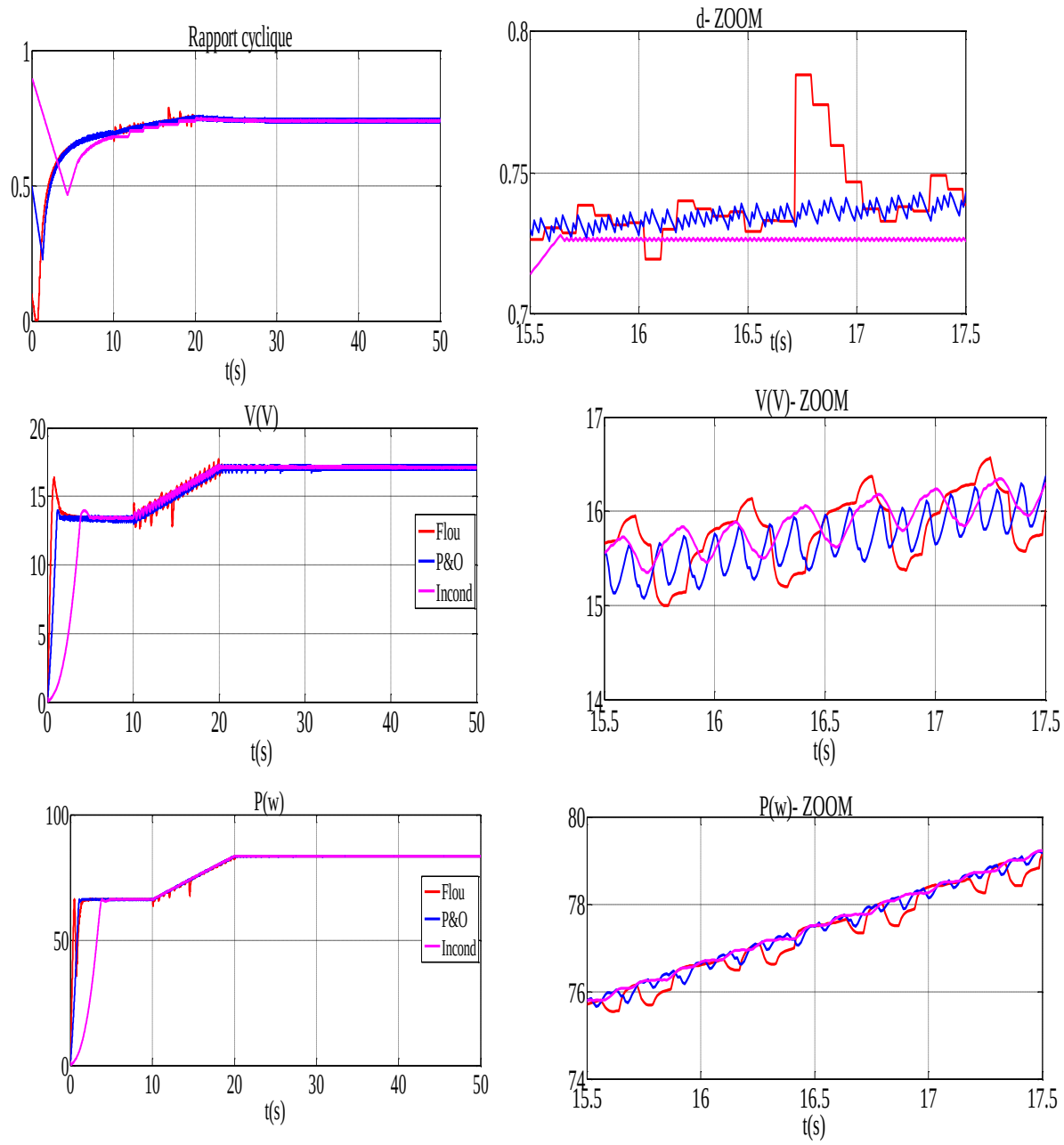


Figure III.16 Réponse des trois contrôleurs lors d'une diminution de la température.

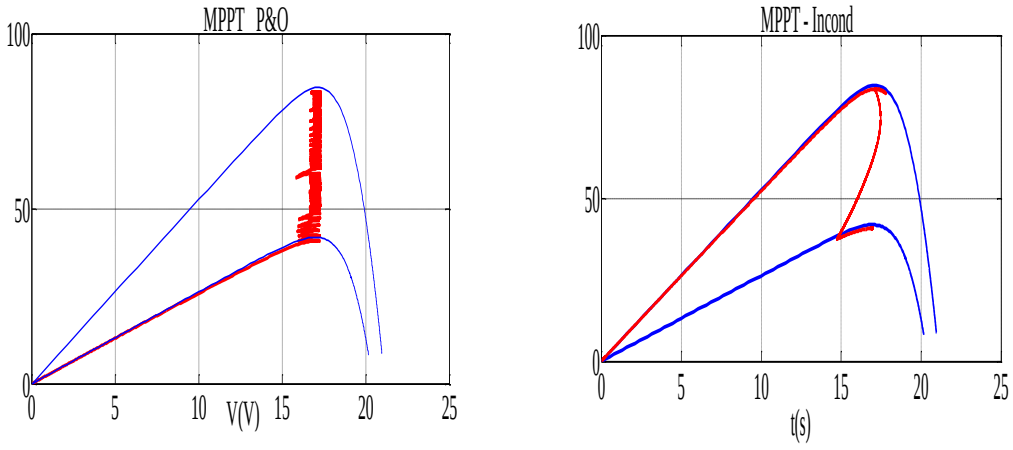


Figure III.17 Evolution du point de fonctionnement du GPV respectivement lors d'une augmentation et diminution de la température.

Les trois contrôleurs donnent des bons résultats avec un net avantage pour le contrôleur flou qui est caractérisée par un meilleur temps de réponse pour la poursuite du PPM et un régime transitoire plus harmonieux que celui obtenu en utilisant les deux autres régulateurs.

III.5. Conclusion

Nous avons vus dans ce chapitre, la modélisation d'un générateur photovoltaïque en utilisant le modèle à une et à deux exponentielles. Ce dernier est le modèle le plus adapté pour une bonne compréhension des phénomènes physiques intervenant dans chaque région du dispositif, ainsi que pour une simulation adéquate du fonctionnement des cellules solaires. La simulation effectuée nous a permis d'obtenir des caractéristiques très proches de celles du générateur photovoltaïque réel, ce qui nous a permis de valider notre modélisation. Comme les caractéristiques du générateur photovoltaïque dépendent des paramètres internes de ce dernier et des paramètres météorologiques, il nous a parut nécessaire d'étudier l'influence de ces paramètres sur les caractéristiques de sortie du générateurs photovoltaïque. Par ailleurs, nous avons constaté que l'influence de la variation des paramètres internes de la cellule sur les caractéristiques du GPV est moins importante que celle des paramètres météorologiques. Ainsi, dans la suite de notre travail on s'intéressera uniquement à l'étude de l'influence des paramètres météorologique sur les caractéristiques du générateur photovoltaïque, Dans le prochain chapitre.

Chapitre IV : Simulation interprétation des résultats

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous montrons différentes simulations de modèles appliquées au système PV, pour simuler le contrôle du MPPT, c'est une technique que nous utilisons pour améliorer l'efficacité du système photovoltaïque, ces simulations peuvent nous permettre d'agir dans le système photovoltaïque dans différentes condition charge.

Il existe plusieurs méthodes de simuler les commandes MPPT notamment (P&O, logique flou, incrémentation de conductance) pour améliorer les performances du système dans les conditions de température et luminosité changeantes.

Afin de surveiller la puissance de pointe, ainsi que la modélisation et la simulation ont été effectués sous le logiciel MATLAB/SIMULINK.

IV. 2. Modèle du système à contrôler

Le système étudié est constitué par le générateur PV, convertisseur DC-DC (hacheur de type survolteur) et un moteur à courant continue de puissance nominale Pn(w). Le convertisseur DC-DC est commandé suivant une stratégie qui a pour but la recherche permanente du point de puissance maximum (MPPT). La figure IV.1 illustre une disposition synoptique de l'ensemble du système.

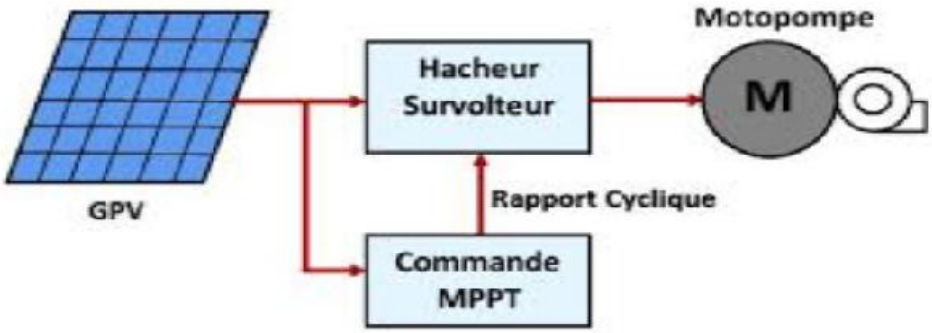


Figure IV.1 Schéma synoptique du système PV contrôlé par MPPT

IV.3. Dimensionnement d'un système PV avec moteur à courant continue

Le dimensionnement a pour but de déterminer d'une part le nombre de modules solaires à utiliser dans l'installation qui est déduit d'un calcul effectué sur la puissance crête des générateurs solaires, et d'autre part la puissance absorbé par le moteur (MCC), toute cette panoplie de paramètres est déduite à partir des données d'ensoleillement du site concerné, ainsi des besoins électriques de l'utilisateur. Le choix des composantes du système solaire doit permettre à l'usager d'utiliser les équipements requis durant la période demandée (c'est à-dire période annuelle ou déterminée), et ce avec une disponibilité prédéterminée.[19]

IV.3.1. Détermination du nombre de modules à installer

Le nombre de modules photovoltaïques total est calculé en fonction des caractéristiques du module choisi et de la puissance crête du générateur, il est donné par l'équation suivante

$$N = \frac{P_{Pv}}{P_m}$$

Le nombre de module connectés connecté en série N_S

$$N_s = \frac{V_{Pv}}{V_m}$$

Le nombre de module connectés connecté en parallèle N_p

$$N_p = \frac{N}{N_s}$$

Avec :

- V_{Pv}: la tension crête de module choisi.
- P_{Pv}: puissance crête de module.
- N: nombre total de modules PV.

IV.3.2. La tension totale fournie par Groupe PV

Les expressions de la tension aux bornes du Groupe PV sont données par les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_{cotot} = N_s . V_{co} \\ V_{pmtot} = N_s . V_{pm} \end{cases}$$

Avec :

- V_{cotot} : Tension totale en circuit ouvert.
- V_{pmtot} : Tension totale au point de puissance Max.
- V_{co}: Tension en circuit ouvert du module.
- V_{pm}: Tension au point de puissance max du module.
- Ns : Nombre de modules connectés en série.[19]

IV.4 Dimensionnement d'un système de pompage [19]

Les différentes étapes pour le dimensionnement d'un système de pompage Il est donc important de bien faire le dimensionnement de la pompe selon les conditions du terrain. En d'autres mots, une pompe doit être choisie selon les caractéristiques réelles de l'installation dans laquelle on doit l'installer. Les données suivantes seront nécessaires pour dimensionner la pompe : débit d'eau *(Q)* et hauteur manométrique totale *(HMT)*.

Le débit *(Q)* est la quantité de liquide que la pompe peut fournir durant un intervalle de temps donné, normalement exprimé en m^3/h. En pompage, le débit est habituellement Donné en litres par heure (l/h) ou gallons par heure (g/h).

La hauteur manométrique totale *(HMT)* d'une pompe est la différence de pression en mètres de colonne d'eau entre les orifices d'aspiration et de refoulement. Autrement dit, c'est la somme de la hauteur géométrique dans les niveaux du liquide et les pertes de charges causées par de frottements intérieurs qui se forment au passage du liquide dans les tuyaux, dans la pompe et dans les accessoires hydrauliques. Cette hauteur peut être calculée comme suit : $HMT = H_g + \Delta H$

H_g= Hauteur géométrique à l'aspiration (H_{ga}) + Hauteur géométrique au refoulement (H_{gr})

ΔH= Somme des pertes de charge dans l'installation (pertes linéaires et singulières) calculée selon les éléments suivants :

• Diamètre, longueur et matériel composant les tuyaux d'aspiration et de refoulement

• Quantité et type des coudes dans la tuyauterie et accessoires hydrauliques comme clapet de pied avec crépine, vannes, clapet anti-retour, filtres éventuels. (Tableau n°1 dans l'annexe)

• Nature du liquide (si différent de l'eau), température, viscosité et densité.

Le diamètre des conduites doit être calculé afin que ces pertes de charge correspondent au plus à 10 % de la hauteur géométrique totale (H_g) (Tableau n°2 dans l'annexe)

IV.4.1 Analyse des besoins et des conditions d'exploitation

L'analyse des besoins et des conditions d'exploitation doit permettre de déterminer la puissance et le type de pompe choisie pour la situation donnée

Il y'a trois paramètres techniques qui délimitent l'évaluation d'une pompe. Afin d'obtenir l'évaluation la plus exacte possible, il est essentiel que ces trois paramètres soient estimés le plus précisément possible. Ces trois paramètres sont :

- La quantité d'eau requise par jour.
- La disponibilité de l'eau.
- Les ressources solaires.

L'évaluation de la quantité d'eau requise et la disponibilité de l'eau sont parfois difficiles à estimer et varient souvent de saison en saison et d'année en année. Les facteurs comme l'accroissement d'une population dans une ferme et un niveau dynamique variable du puits ou du forage, selon le débit et les saisons, compliquent ce qui au premier abord peut paraître simple.

IV.4.2 Estimation des besoins en eau et dimensionnement de la pompe

La boisson, la cuisine, la lessive et la toilette constituent les principaux usages de l'eau Pour les besoins humains. Les animaux aussi ont besoin d'eau pour leur survie. La demande en eau est également primordiale dans les domaines de l'agriculture et de l'industrie, quelle qu'en soit leur ampleur.

L'estimation des besoins en eau et le dimensionnement du système de pompage sont détaillés ci-dessous.

IV.4.2.1 Fiche de dimensionnement

Estimation de la charge Choisir ou définir la charge, c'est-à-dire déterminer le débit requis et la HMT.

- Pour obtenir le débit, il faut déterminer les besoins journaliers en eau durant la période de besoin maximal.
- Pour obtenir la HMT il faut mesurer le niveau statique, le rabattement maximal, la hauteur du réservoir et les pertes de charge dues à la tuyauterie.

Les besoins en eau pour l'irrigation dépendent du type de cultures, des facteurs météorologiques et de la méthode d'irrigation. Cependant, il est important de se baser sur la pratique et l'expérience locale.

N_P: Nombre moyen des personnes.

N_F: Nombre de familles.

Q_P: Consommation moyenne d'eau quotidienne pour une personne.

Q_{an}: quantité moyenne d'eau destinée pour la consommation les animaux.

Q_{irr}: quantité moyenne d'eau destinée pour l'irrigation.

Mais la taille maximale du réservoir est calculée comme suit :

$$N_{total} = N_P * N_F = 56 \implies$$

$N_{total} = N_P * N_F = 56$ personne $\implies$ $Q_F = Q_P * N_{total} = 2.8 m^3/J$

$Q_{(besoin)} = Q_F + Q_{an} + Q_{irr}$

$$Q = 192.8 m^3/J \approx 200 m^3/J$$

Les tableaux (IV.1) et (IV.2) suivants présentent respectivement les besoins en eau journaliers de l'installation de pompage et la hauteur manométrique totale.

Débit			
Irrigation			
Type cultures à l'échelle d'un ferm	Surface (hectare) 3	m^3/jours/hectare 60	Totale 180m^3/jours
Eau domestique			
N_P 7	N_F 8	Q_P litres/personne 50litres/jours/personne	Totale 2.8m^3/jours
Eau animaux			10m^3/jours
Totale			192.8m^3/jours

Tableau (IV.1) : Détermination des besoins en eau joumaliers de l'installation de pompage

HMT			
Hauteur géométrique à l'aspiration	Hauteur géométrique au refoulement	Pertes tuyauterie	HMT
H_{ga} 7	H_{gr} 7	PC% 10	$(H_{ga}+H_{gr})(1+PC)$ 15.4

Tableau (IV.2) : Détermination de la hauteur manométrique totale (HMT)

D'après les tableaux IV.1 et IV.2, pour 3 hectares de terre agricole et 56 personnes, les besoins en eau de l'installation considérée sont estimés à 200 m^3/jours, et la HMT est estimée à 15.4 mètres.

Pour déterminer la quantité d'eau nécessaire au système de pompage, il est important de connaitre l'efficacité du système d'irrigation.

Il y a trois modes de distribution de l'eau :

- une distribution gravitaire ou de surface : L'objectif est de pouvoir inonder rapidement toute la surface sur une même hauteur.
- une distribution par aspersion : ce système arrose les plantes grâce à une pluie artificielle. L'eau sous pression est amenée à la parcelle par des canalisations.

L'aspersion est réalisée grâce à des asperseurs rotatifs.

- une distribution localisée ou goutte à goutte : l'irrigation localisée ou goutte à goutte n'arrose qu'une fraction du sol à partir de goutteurs ou de perforations dans une conduite sous pression.

IV.4.2.2 Choix de la pompe centrifuge

Après avoir établi les valeurs de débit Q et de la hauteur manométrique totale HMT de l'installation, Pour déterminer la puissance hydraulique requise de la pompe, il faut appliquer l'équation suivant :

$$P_H = \rho\, g\, H\, Q \qquad \text{(IV.1)}$$

Les données de la pompe sont comme suit :

En supposant que le système de pompage fonctionne 3 heures par jour, on aura un débit de $200 m^3/J$ .donc Q = 66.67 m^3/h = $0.0185 m^3/s$

La hauteur manométrique totale H de la pompe doit atteindre est donc : H=15.4m

ρ : C'est la densité du liquide (pour l'eau = 1000 K_g/m^3) ;

g : l'accélération de pesanteur (g = 9.81m/s^2) ;

Considérant ces paramètres à évaluant l'équation (IV.4), on obtient :

$$P_H = 1000 * 9.81 * 15.4 * 0.0185 = 2.8 \text{ KW}$$

Le rendement η de la pompe est 78% (pompe NM4 125/250 CALPEDA) ; n = 1450tr/min

$$\eta = \frac{P_H}{P_{méc}} \qquad \text{(IV.2)}$$

$$P_{méc} = \frac{P_H}{\eta} = \frac{2.8}{0.78} = 3.6 \text{ KW}$$

IV.4.3 Dimensionnement et modélisation du réservoir de stockage d'eau

IV.4.3.1 Dimensionnement du réservoir

Le concepteur devra déterminer la dimension optimale du réservoir d'eau non seulement selon la durée anticipée de stockage pour pallier les variations journalières, mais aussi et surtout selon les besoins des utilisateurs et, bien sûr, selon le coût du système de stockage. Le dimensionnement du réservoir repose donc sur un certain nombre de facteurs qu'il faudra avoir évalués au préalable :

- Lorsque la pompe est au fil du soleil, le réservoir doit pouvoir stocker l'eau nécessaire pour la journée, ou au moins pouvoir stocker l'eau fournie par la pompe.
- le réservoir peut permettre de tirer l'eau de façon constante afin de maximiser le débit du forage ou du puits, surtout en période sèche.
- le réservoir doit permettre une certaine autonomie durant les journées peu ensoleillées.

La taille du réservoir solaire dépend du nombre de personnes et de la consommation d'eau par personne et par jour. Le débit journalier requis pour ce système de pompage est de 200 m^3 par jour. En supposant qu'on a l'autonomie d'un jour

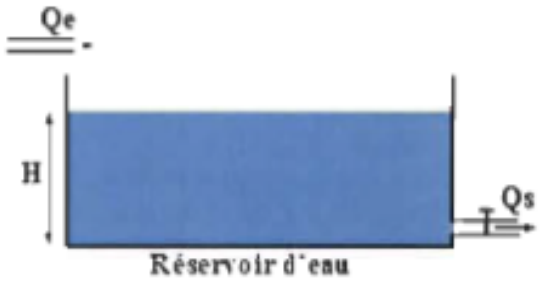


Figure IV.2 Réservoir de stockage d'eau.

IV.4.3.2 Modélisation du réservoir

Sur la figure(IV.2), on constate que l'eau entre dans le réservoir par le haut avec un débit Q_e fourni par la pompe et elle sorte par le bas à travers une valve avec un débit Q_s.

Le débit Q_s à la sortie du réservoir est considéré comme une perturbation et dépend essentiellement de la consommation d'eau. L'équation différentielle permettant de trouver

La hauteur h du liquide dans le réservoir est donnée par :

$$\frac{dV}{dt} = S\frac{dH}{dt} = Q_e - Q_s \qquad \text{(IV.3)}$$

Où :

V : est le volume de liquide dans le réservoir ;

S : est la surface du réservoir ;

Q_e et Q_s sont respectivement le débit à l'entrée et à la sortie du réservoir.

À partir de l'équation, nous avons modélisé le réservoir d'eau dans l'environnement MA TLAB/Simulink.

IV.5. Commande en vitesse de la machine

IV.5.1. Système de commande

Est 'un processus consiste à déterminer la commande convenable à l'aide d'un organe de commande au but s'assurer que les variables d'état ou de sortie comportent comme spécifié par cahier de charge [5].

La régulation est la partie intelligente d'un système asservi, il comporte un correcteur dont le rôle est d'améliorer le comportement du processus en garantissant d'abord une bonne stabilité ensuite la rapidité de réaction [7].

IV.5.2 Système en boucle ouverte et en boucle fermée [5]

- ***Système en boucle ouverte***

Un système est en boucle ouverte lorsqu'on n'a aucune information sur la sortie (il n'y a pas de feedback).

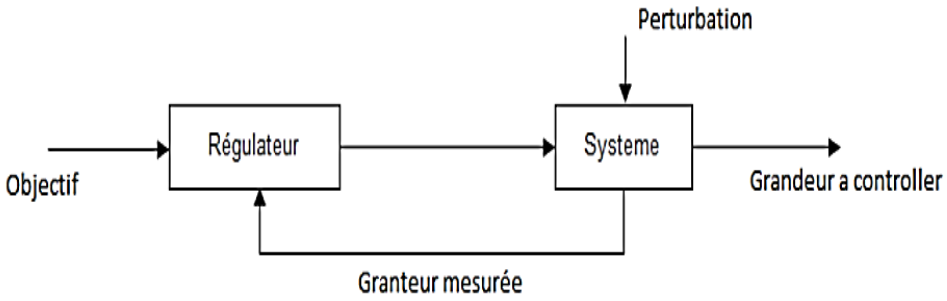


Figure IV.3 : système de commande en boucle ouvert.

- ***Système de commande en boucle fermée***

Le système est dit en boucle fermée, si on s'intéresse au régulateur de la sortie, par l'intermédiaire d'une boucle de contre réaction. On introduit généralement un régulateur.
La boucle fermée (contre réaction) est capable de :

- Stabiliser un système instable en BO.
- Compenser les perturbations externes.
- Compenser les incertitudes internes au processus lui-même.

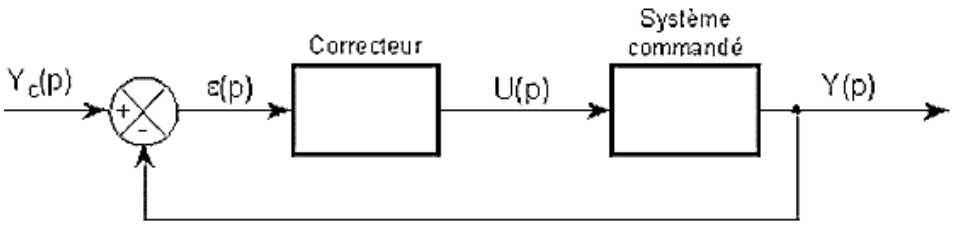


Figure IV.4 Système de commande en boucle fermée.

IV.5.3 Dimensionnement des paramètres des régulateurs

Afin de réguler la vitesse de notre moteur on a choisi deux régulateurs PI (proportionnel Intégral) ; un pour la boucle de vitesse et un autre pour la boucle de courant.

IV.5.3.1 Expression du régulateur PI

Le régulateur PI appelé aussi (correcteur, régulateur, contrôleur), se compose de deux fonctions : Proportionnelle (P), Intégrale (I) qui définit une simple implémentation de retour d'information (feedback).

En général, le régulateur ne fonctionne pas en mode intégral pur (trop instable). Il fonctionne comme un correcteur proportionnel-intégral (PI) [5].

Fonction de transfert est donnée par :

$$C(p) = Kp + \frac{Ki}{p} \quad \text{(IV.4)}$$

Avec : $\tau i = \frac{Kp}{Ki}$

Avantages

- Annuler l'erreur statique.
- Améliore la rapidité du système.
- Améliore la stabilité du système.

IV.5.3.2 Fonction de transfert de la machine

En écrivant les équations du moteur dans le domaine opérationnel, et en supposant que les conditions initiales sont nulles.

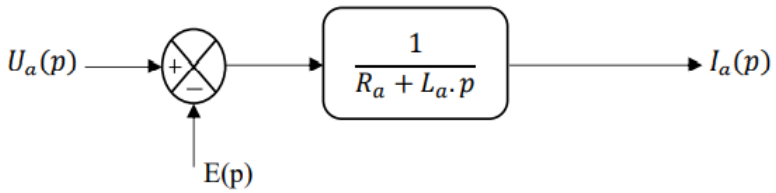


Figure IV.5 Schéma bloc de la boucle du courant.

$$U_a(p) = R_a I_a + pL_a(p) + E(p) \quad \text{(IV.5)}$$

$$C_{em}(p) - C_r(p) = J.p.\Omega_r(p) + f\Omega_r(p) \quad \text{(IV.6)}$$

$$E(p) = K_m \Omega_r(p) \quad \text{(IV.7)}$$

$$C_{em}(p) = K_m I_a(p) \quad \text{(IV.8)}$$

De l'équation (IV.5) en peux déduire la relation entre la tension d'alimentation « (p) » et la force contre électromotrice «E(p) » qui est donnée par :

$$\mathrm{U_a(p) - E(p) = (R_a + L_a.\,p)I_a(p)} \quad \text{(IV.9)}$$

De l'équation (IV.8) on déduit la relation entre le courant d'induit « $Ia\ (p)$ » et le couple électromagnétique « Cem » Figure IV.6

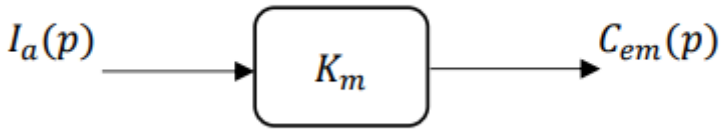


Figure IV.6 Schéma bloc de la boucle du couple

De l'équation (IV.6), on déduit la relation entre la vitesse de rotation Ωr(p) et le couple utile $\ll C_{em} - C_r \gg$Qui est donnée comme suit :

$$C_{em}(p) - C_r(p) = (J.p + f).\Omega_r(p) \qquad \text{(IV.10)}$$

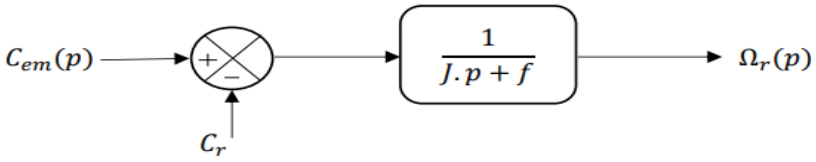


Figure IV.7 Schéma bloc de la boucle de vitesse.

De l'équation (IV.7) on déduit la relation entre la vitesse de rotation et la force contre électromotrice (Figure IV.8) :

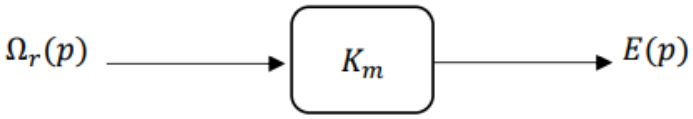


Figure IV.8 : Schéma bloc de vitesse de rotation en fonction de la force Contre électromotrice

A partir des relations (IV.5), (IV.6, 7,8), on obtient la fonction de transfert globale Du moteur qui est comme suit :

$$T(p) = \frac{\Omega_r}{U_a} = \frac{\frac{k_m}{R_a.f+k_m}}{(L_a.J)p^2+\left(\frac{L_a.f+R_a.J}{R_a.f+k_m\ 2}\right)p+1} \qquad \text{(IV.11)}$$

En reliant les différents blocs (Figure IV.5), (Figure IV.6), (Figure IV.7, 8), on Obtient le schéma bloc global du moteur (Figure IV.9) :

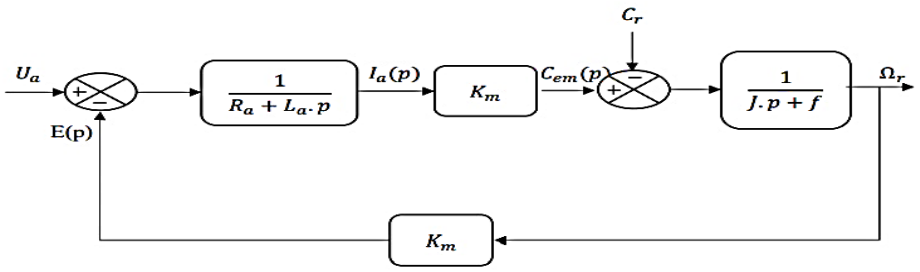


Figure IV.9 Schéma fonctionnel du moteur à excitation séparée.

IV.5.4 Structure de la commande PI

Régulateur proportionnel intégral PI classique présenté sur la figure IV.10

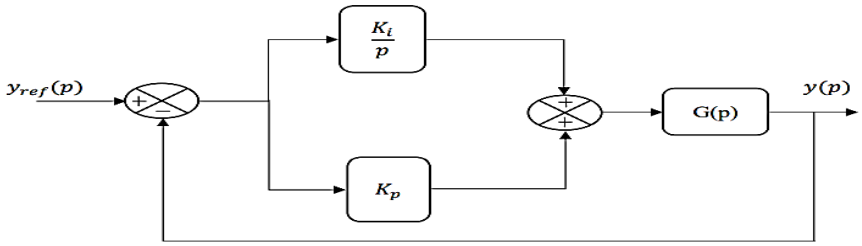


Figure IV.10 : Schéma de commande utilisant la structure PI.

Soit G(p) la fonction de transfert d'un système de premier ordre donnée par :

$$G(p) = \frac{G_0}{(1+\tau.p)} \qquad \text{(IV.12)}$$

La fonction de transfert en boucle fermée est :

$$FT_{bf}(p) = \frac{G_0 K_i(\frac{k_p}{k_i}p+1)}{(\tau p+1)(p+(k_p p+k_i)\frac{G_0}{\tau p+1})} \qquad \text{(IV.13)}$$

Qui montre que le régulateur PI ajoute un zéro à la fonction de transfert en boucle fermée. Celui-ci peut éventuellement être utilisé pour compenser un pôle de la fonction de transfert du système à commander, simplifiant ainsi l'ordre du transfert en boucle fermée. La méthode la plus utilisée c'est la méthode de compensation des pôles [6]

$$\begin{cases} \frac{k_p}{k_i}p + 1 = (\tau p + 1) \Longrightarrow \tau = \frac{k_p}{k_i} \\ FT_{bf} = \frac{G_0 k_p}{p+G_0 k_i} \Longrightarrow \tau_{bf} = \frac{1}{G_0 k_i} \end{cases} \qquad \text{(IV.14)}$$

Les paramètres du régulateur sont alors donnés par :

$$\begin{cases} k_i = \dfrac{1}{G_0 \tau_{bf}} \\ k_p = \dfrac{\tau}{G_0 \tau_{bf}} \end{cases} \qquad \text{(IV.15)}$$

IV.6. Simulation globale et Résultats

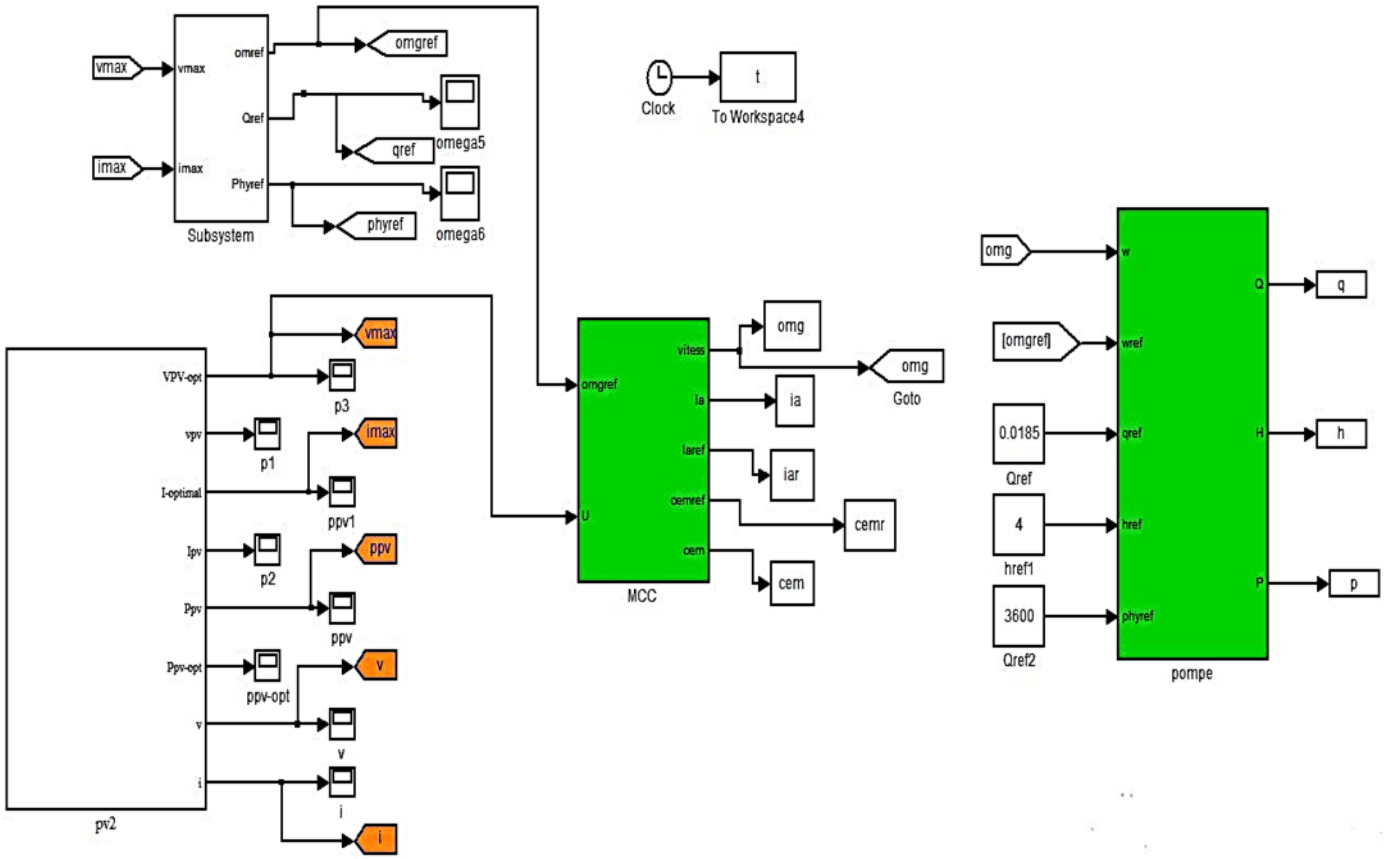


Figure IV.11 : Schéma bloc du système global

IV.6.1 Simulation d'une machine à courant continu à excitation constante

Pour simuler la machine à courant continu à excitation constante, nous avons simulé le modèle mathématique présenté au chapitre II.

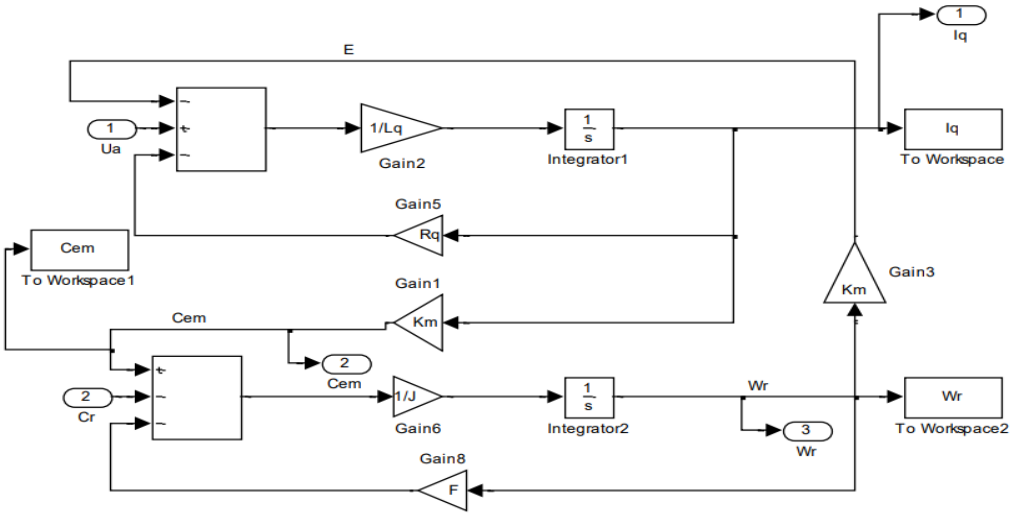


Figure IV.12 Schéma bloc de simulation de la machine à courant continu.

IV.6.2 Résultats de la simulation de la MCC seule et sans couple résistant

Dans cette partie, nous avons validée notre machine (MCC) avec la vitesse de rotation mécanique constante et sans couple résistant.

- $\Omega_{ref} = 150\, rd/s$, Cr=0

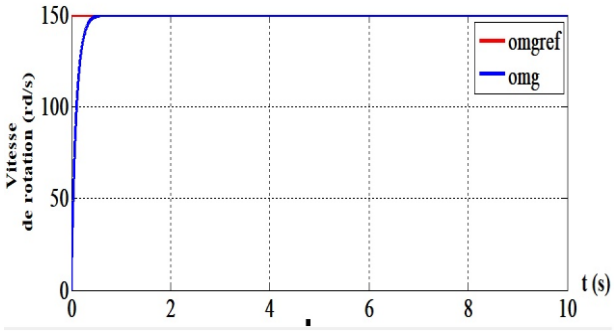


Figure IV.13 Vitesse mécanique de la MCC

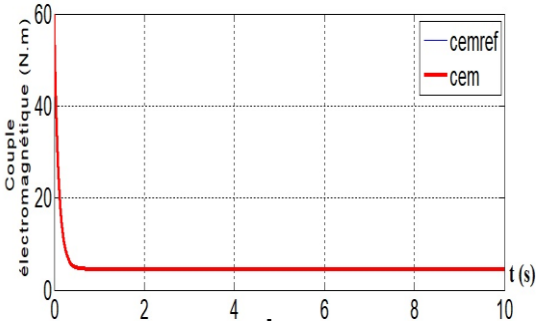


Figure IV.14 Couple électromagnétique De la MCC

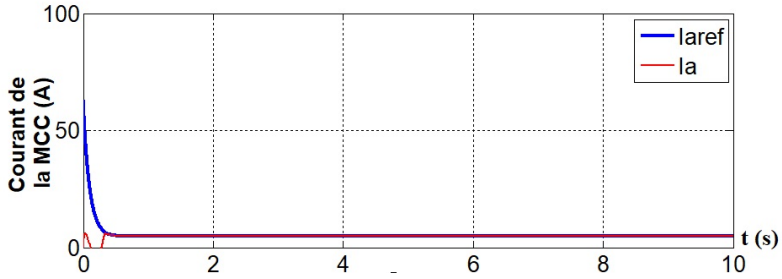


Figure IV.15 Courant de la MCC

Le moteur fait appel d'un courant important au démarrage pour amener sa vitesse à une vitesse nominale, par la suit il se stabilise en régime permanent, le moteur tourne à une vitesse constante(le moteur fonctionne à vide). La vitesse augmente en fonction du temps puis il se stabilise à une valeur constante, Le couple résistant est négligeable

- $\Omega_{ref} = 100 - 150\, rd/s$, Cr=0

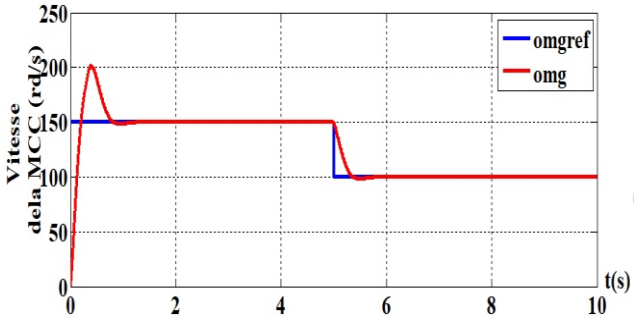


Figure IV.16 Vitesse mécanique de la MCC

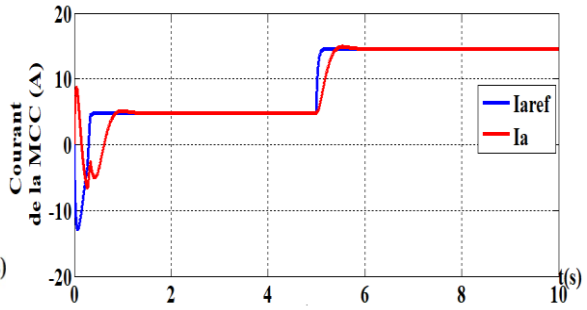


Figure IV.17 Courant de la MCC

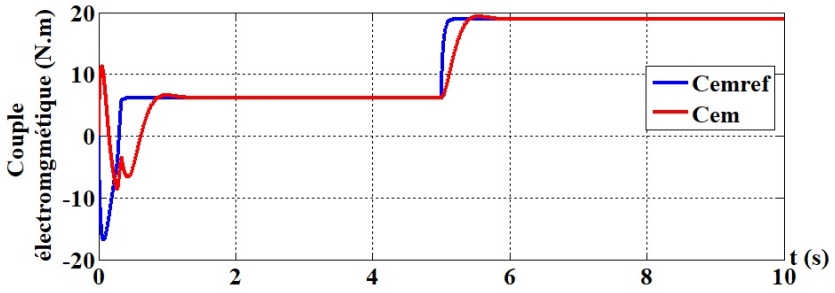


Figure IV.18 Couple électromagnétique de la MCC

D'après les figures ci-dessus, montrent l'efficacité du contrôleur PI appliquée à la régulation de vitesse de la machine (MCC) tous les grandeurs électriques et magnétique mesurées suivent très bien la consigne.

IV.6.3 Résultats de la simulation de la MCC avec le couple résistant non nul

- $\Omega_{ref} = 150 - 100\, rd/s$, à t=7s Cr= 0-15 Nm.

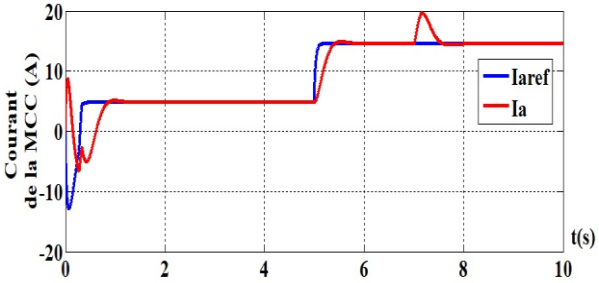


Figure IV.19 Vitesse mécanique de la MCC

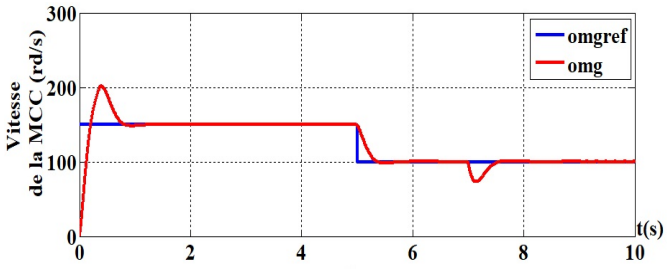


Figure IV.20 Courant de la MCC

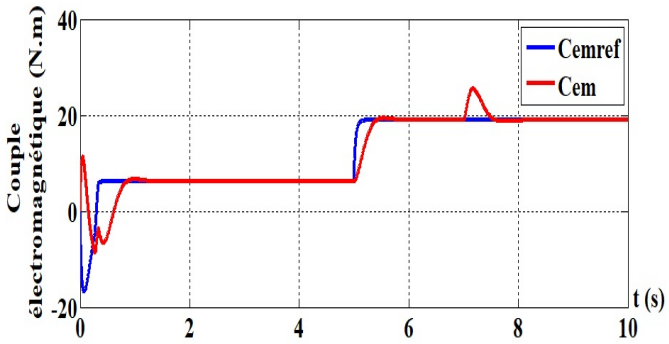


Figure IV.21 Couple électromagnétique de la MCC

D'après la (figure IV.20) qui représente la réponse de la vitesse avec une régulation, on remarque que la vitesse à chute après l'application du couple puis elle retourner vers la vitesse de référence, on conclut que le régulateur PI (proportionnel intégral) joue un rôle très important sur le système à commander (MCC) et aussi améliore les performances de notre machine (précision et stabilité).

IV.6.4 Simulation de la MCC alimentée par le générateur photovoltaïque

Maintenant on va simuler notre système global, pour assurer une alimentation continue de notre charge quel que soit les conditions météorologique, un bon dimensionnement s'avère important pour un bon fonctionnement et une bonne exploitation de la machine, car l'efficacité de toute installation électrique dépond essentiellement de la rigueur de son dimensionnement et influe directement sur le cout et les performances de l'installation.

Notre système est composé d'un générateur PV, Hacheur boost avec un bloc de la commande MPPT et une charge continue (Moteur à courant continu).

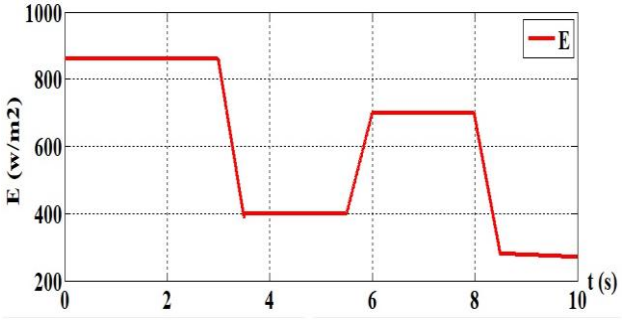


Figure IV.22 Irradiation solaire

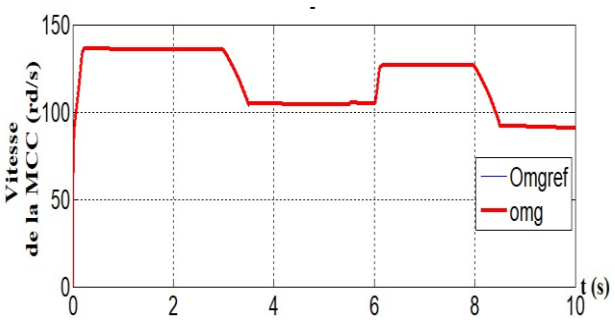


Figure IV.23 Vitesse de la machine MCC.

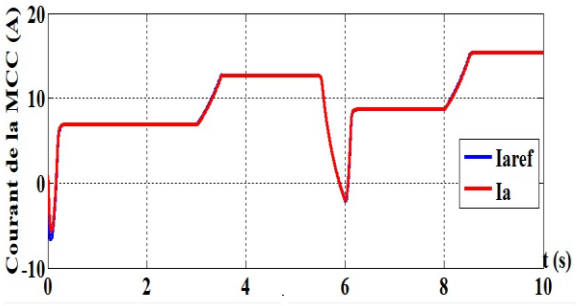


Figure IV.24 Courant de la MCC.

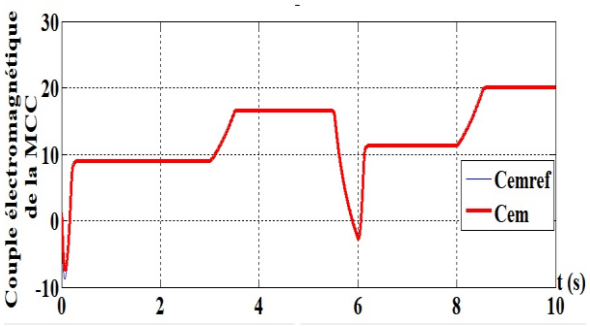


Figure IV.25 Couple électromagnétique De la MCC.

IV. 6.5 Application du système sur la pompe centrifuge avec la vitesse de rotation variable

Dans cette partie, nous avons simulé notre système global appliqué sur le système de pompage d'eau de type centrifuge, pour satisfait les besoins d'eau d'un cite isolé étudié dans le chapitre II, il faut 200 m^3 /jour dans ce cas nécessite une puissance hydraulique $P_{Hy} = 3.6\ Kw$, le débit d'eau Q= 0.0185 m^3 /s et la hauteur du réservoir H=4 m, les résultats suivante obtenus avec la vitesse mécanique de la MCC est variable avec le temps.

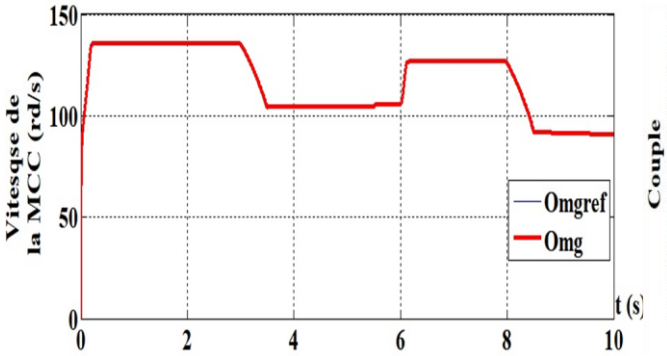


Figure IV.26 Vitesse de la machine MCC.

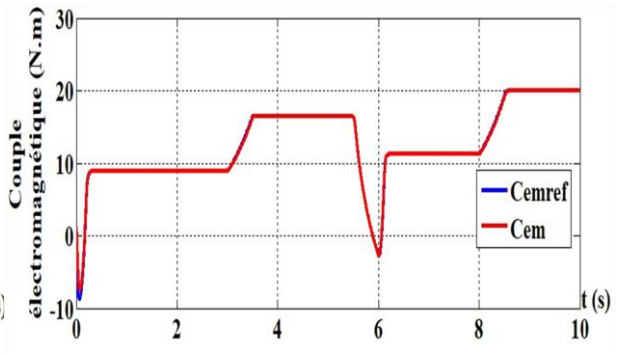


Figure IV.27 Couple électromagnétique de la MCC.

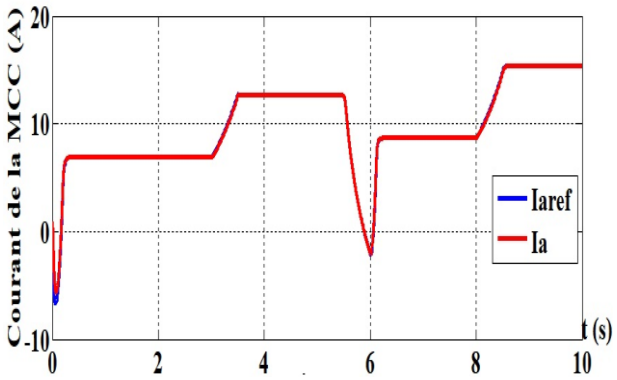


Figure IV.28 Courant de la MCC.

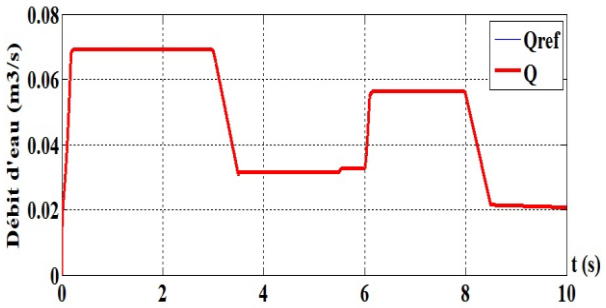


Figure IV.29 Débit d'eau de la pompe.

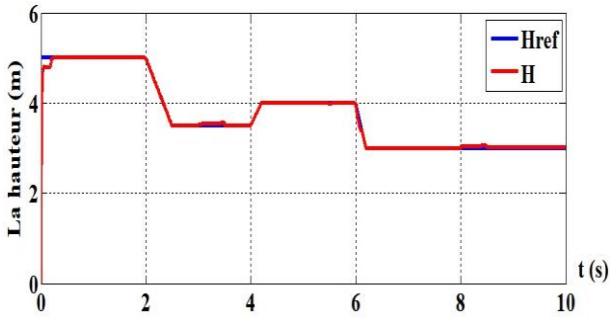


Figure IV.30 Hauteur d'eau du réservoir.

✓ ***Interprétation des résultats***

D'après les résultats de la simulation ci- dessus, on remarque que la variation des paramètres des blocs motopompe (MCC-pompe) est proportionnelle à celles des blocs de commande. Les figures précédentes montrent l'évolution de l'éclairement c'est l'image de la vitesse mécanique de la MCC ainsi que le couple et le courant de la MCC suivent sa valeur de référence.

Les résultats de simulation montrent l'efficacité de l'adaptateur MPPT dans l'extraction de la puissance maximale, afin d'exploiter la vitesse optimale en vue d'obtenir le débit maximal disponible. On remarque le niveau d'eau de réservoir, le débit d'eau ainsi que la puissance de pompe suivent leurs valeurs de consigne.

IV. 6.6 Application du système sur la pompe centrifuge avec la vitesse de rotation demandée par le cite étudié

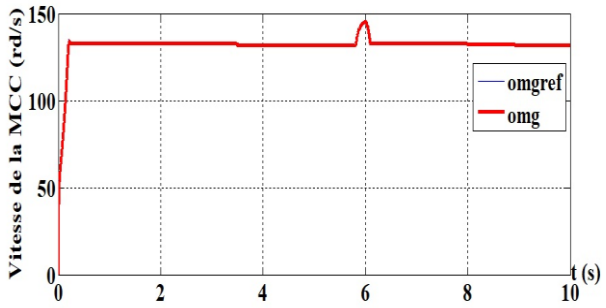


Figure IV.31 Vitesse de la machine MCC.

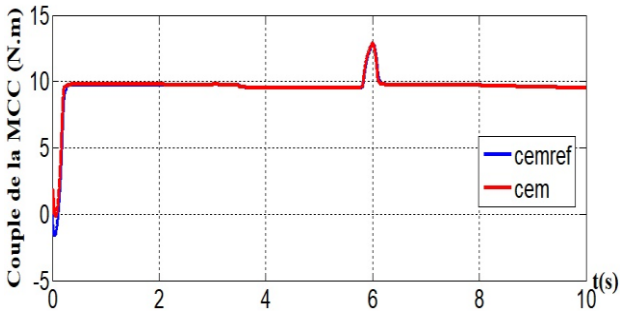


Figure IV.32 Couple électromagnétique de la MCC.

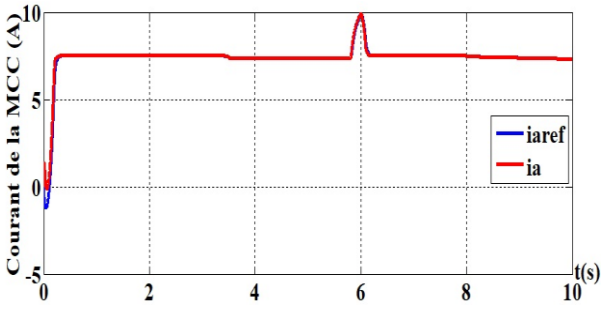


Figure IV.33 Courant de la MCC.

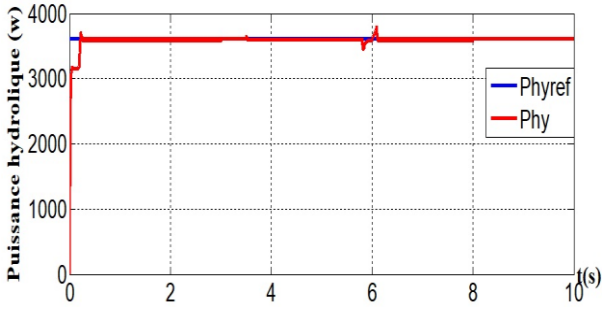


Figure IV.34 Puissance hydraulique de la pompe.

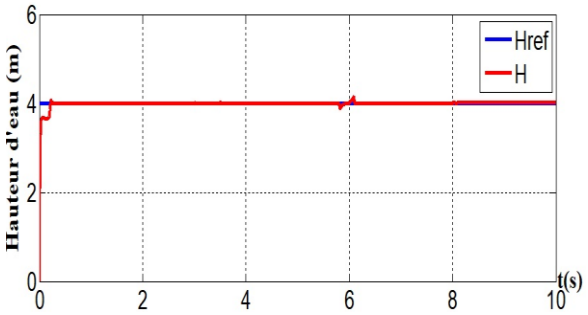


Figure. IV.35 Hauteur d'eau

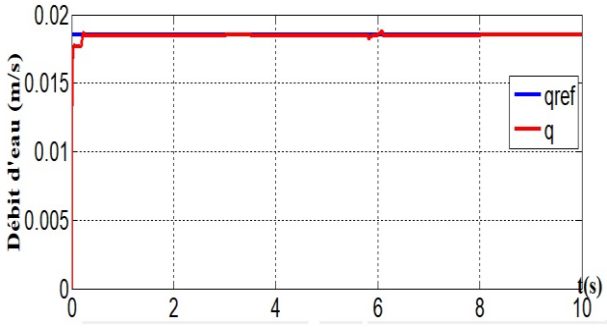


Figure IV.36 Débit d'eau de la pompe.

IV. Interprétation :

Nous avons appliqué quatre niveaux d'irradiation différentes tout en gardant une température constante égale à 25°C, les résultats de simulation obtenus sont présentés par les figures ci-dessus, on remarque clairement que la variation des paramètres des blocs moto-pompe (MCC et pompe centrifuge) est proportionnelle à celles des blocs de commande (GPV et le Hacheur), donc lorsque l'éclairement augmente plus le courant augmente aussi

figure IV.21 , et comme la puissance est proportionnelle au courant, il est évident que l'énergie électrique nécessaire est lié avec l'énergie hydraulique fournie par la pompe.

Le changement de l'éclairement influe sur les caractéristiques de la machine MCC et par la suite sur les performances de la pompe. Les paramètres électriques du GPV convergent vers leurs valeurs optimales montrant ainsi l'efficacité de l'adaptateur MPPT. A chaque fois que l'ensoleillement change, la vitesse de consigne suit sa valeur optimale figure IV.30 Qui vaut$\Omega = 132.76 rd/s$. La vitesse de la machine suit sa consigne sans dépassement, ceci montre l'efficacité de la boucle de régulation de vitesse. Ce qui permet par la suite d'atteindre le débit et la hauteur manométrique totale désirés$Q_{ref} = 0.0185\, m^3/s$, $H_{ref} = 4m$ respectivement comme indique les figures IV.33, 34,35, l'allure du couple électromagnétique, c'est l'image du courant de la MCC figure IV.31, 32.

Les résultats de simulation montrent ainsi l'efficacité de l'adaptateur MPPT dans l'extraction de la puissance maximale, afin d'exploiter la vitesse optimale en vue d'obtenir la puissance hydraulique, le débit et la hauteur manométrique imposés.

IV.7 Conclusion :

Dans ce dernier chapitre nous avons présentés une simulation d'une alimentation photovoltaïque à base d'une machine à courant continu appliquée au système de pompage Nous avons utilisé le régulateur PI avec l'étage de maximisation de point puissance (MPPT), servi ici comme une solution pour contrôler la puissance le débit et la hauteur manométrique totale.

L'optimisation du système proposé utilise la méthode MPPT. Cet algorithme ne tient pas compte de la variation des paramètres influençant le modèle du système de pompage, tels que la température et les paramètres de la MCC. Ce qui limite sa robustesse.

Conclusion générale

Conclusion générale

Nous avons vu dans notre travail présenté le concept de la photovoltaïque et machine à courant continu avec des modèles et des simulations appliquées à elle une pompe à usage agricole qui contribue à l'optimisation de la consistant en réflecteur, moteur de machine à courant continu et pompe centrifuge.

Grâce à cette étude, nous avons conclu que la lumière et la température ont une propriété d'impact sur l'énergie produite et le comportement du système, c'est-à-dire, augmenter la puissance de la lumière contribue à améliorer le système et l'augmentation de la température réduit le comportement de performance.

Dont nous concluons que le moteur (DC) entraine la pompe en fonction des conditions climatiques (température, lumière) de la cellule solaire.

Après avoir étudié la modélisation sur tous les éléments utilisés dans le système et étudié condition (température lumière) du site.

Nous avons vu que module solaire évolue en technologie pour améliorer les performances et adopter ce travail en simulant la puissance photovoltaïque associée a un convertisseur (hacheur)que nous contrôlons par la technologie MPPT qui donne un débit plus élevé à la pompe appliquée au système.

La meilleure technologie appliquée algorithme logique flou surveille le point de puissance maximale donner les meilleures performances à la pompe et MCC.

Nous concluons au chapitre IV qui nous représente les résultats de la programmation de simulation de modélisation pour améliorer le système photovoltaïque, qui à son tour gère la machine à courant continu appliquée au système de pompage en utilisant la technologie MPPT qui nous extrait la vitesse maximale à utiliser en la contrôlant avec le régulateur PI qui a amélioré la vitesse suivie par la référence, qui à son tour a augmenté le débit de puissance requis.

Comme perspectives notre travail de recherche n'est jamais fini…En effet, les perspectives de ce travail sont tellement nombreuses, qu'on va se limiter au niveau de celles qui ont un impact direct avec notre projet.

Nous expirons à améliorer les résultats de ce travail ainsi que son application sur le terrain en utilisant de nouvelles techniques telles que l'intelligence artificielle afin que le système soit plus robuste.

Annexe

Annexe A

- **Les paramètres du module photovoltaïque de type**

Eclairement standard : G	1000 W /m²
Température standard : T	25°C
Puissance maximal (Pmax)	83.43 W
Tension maximal (Vmax)	17V
Courant maximal (Imax	4.90
Tension de circuit-ouverte (Vco)	21V
Courant de court-circuit (Icc)	5.27
Nombre de cellule en séries	96

- **Paramètres de la machine à courant continu utilisée**

Paramètre d'une machine à courant continue à excitation constante	
Tension d'induit	Va=220 V
Résistance de l'induit	Ra=6.67 Ω
Inductance de l'induit	La=0.198 H
Coefficient du couple	Km=1.303
Coefficient de frottement	F=0.03 Nm.s /rad
Moment d'inertie	J=0.0398 Kg.m²
Couple résistant	Cr=0 N.m

- **Paramètres de correcteur PI**

Gain proportionnel	4
Gain intégrale	3

- **Paramètre de la pompe centrifuge**

Q_{ref}	0.0185 m3/s
H_{ref}	4 m
$P_{mécref}$	3600
Ren	78%
g	9.81m/s²
H	15.4 m
ρ	1000 kg/m3

Annexe B

Table n.1

Pertes de charge dans les tuyaux d'acier (calcul des pertes dans la tuyauterie)

Tuyau		Q m³/h	1	3	6	9	12	18	24	30	36	42	48	60	90	120	180	240	300	360	420
G	fi mm	Q l/min	16	50	100	150	200	300	400	500	600	700	800	1000	1500	2000	3000	4000	5000	6000	7000
G 1	DN 25		2,7 0,6	21 1,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G 1 1/4	DN 32		0,7 0,35	5,5 1	22 2,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G 1 1/2	DN 40		-	1,8 0,7	7 1,35	14 1,9	23 2,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G 2	DN 50		-	0,5 0,4	2,2 0,8	4 1,25	8 1,5	17 2,5	28 3,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G 2 1/2	DN 65		-		0,6 0,5	1,2 0,75	2,1 1	4,2 1,4	8 2	12 2,5	17 3	22 3,4	28 4	-	-	-	-	-	-	-	-
	DN 80	HL V	-	-	-	-	0,8 0,7	1,6 0,95	2,8 1,25	4,2 1,6	6,5 2	7,5 2,1	10,5 2,6	15 3,3	-	-	-	-	-	-	-
	DN 100	m/100m m/s	-	-	-	-	-	0,55 0,6	0,9 0,8	1,4 1,1	2 1,25	2,4 1,4	3,5 1,6	5 2	11 3,2	20 4	-	-	-	-	-
	DN 125		-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,9 0,95	1,2 1,1	1,8 1,4	4 2	6,5 2,7	15 4	-	-	-	-
	DN 150		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,6 0,9	1,5 1,4	2,5 1,7	5 2,7	8 3,5	14 4,8	-	-
	DN 200		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,4 0,8	0,6 1	1,3 1,6	2 2	3,5 2,6	4,6 3	6,5 3,5
	DN 250		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,4 1	0,7 1,3	1,1 1,6	1,6 2	2 2,3
	DN 300		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,3 0,9	0,45 1,25	0,7 1,4	0,9 1,6

Table n. 2

Pertes de charge en cm pour les courbes, vannes, clapet de pied et clapet de non-retour

Vitesse de l'eau	Courbes à angle vif α					α = 90° Courbes à angle arrandi					Vannes standard	Clapet de pie	Clapet de non-retour
	α = 30°	α = 40°	α = 60°	α = 80°	α = 90°	d/R = 0,4	d/R = 0,6	d/R = 0,8	d/R = 1	d/R = 1,5			
m/sec.													
0,4	0,43	0,52	0,71	1,0	1,2	0,11	0,13	0,16	0,23	0,43	0,23	32	31
0,5	0,67	0,81	1,1	1,6	1,9	0,18	0,21	0,26	0,37	0,67	0,37	33	32
0,6	0,97	1,2	1,6	2,3	2,8	0,25	0,29	0,36	0,52	0,97	0,52	34	32
0,7	1,35	1,65	2,2	3,2	3,9	0,34	0,40	0,48	0,70	1,35	0,70	35	32
0,8	1,7	2,1	2,8	4,0	4,8	0,45	0,53	0,64	0,93	1,7	0,95	36	33
0,9	2,2	2,7	3,6	5,2	6,2	0,57	0,67	0,82	1,18	2,2	1,20	37	34
1,0	2,7	3,3	4,5	6,4	7,6	0,7	0,82	1,0	1,45	2,7	1,45	38	35
1,5	6,0	7,3	10	14	17	1,6	1,9	2,3	3,3	6	3,3	47	40
2,0	11	14	18	26	31	2,8	3,3	4,0	5,8	11	5,8	61	48
2,5	17	21	28	40	48	4,4	5,2	6,3	9,1	17	9,1	78	58
3,0	25	30	41	60	70	6,3	7,4	9	13	25	13	100	71
3,5	33	40	55	78	93	8,5	10	12	18	33	18	123	85
4,0	43	52	70	100	120	11	13	16	23	42	23	150	100
4,5	55	67	90	130	160	14	21	26	37	55	37	190	120
5,0	67	82	110	160	190	18	29	36	52	67	52	220	140

Bibliographie

Bibliographie

[1] F.SLAMA « *Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique. Scientifique*». Thèse Doctorat, Université Setif.201.

[2] D.KHiar. «*Modélisation et commande d'un moteur thermique à allumage commandé»*, Thèse Doctorat, Université de Tizi-Ouzou, 2007.

[3] I.Boukerroum «*Modélisation et commande robuste des systèmes photovoltaïques*» Mémoire De Master. Université de Jijel.2018.

[4] S.Abouda. «*Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques : application aux systèmes de pompage*» Thèse Doctorat. Université de Reims champagne-ardenne.2015.

[5] M.Rezgui A. Zelghi « *Commande adaptative d'un moteur à courant continu*». Mémoire de Master. Université Biskra. 2022.

[6] M.Bouzegane F.Gaouaoui *« Alimentation d'un moteur à courant continu par une source photovoltaïque*» Mémoire De Master. Université de Tizi-Ouzou.2018.

[7] H.BEN AMRANE F.BEN MOUSSA *«Modélisation et simulation d'une régulation de la machine à courant continu»*. Mémoire De Master. Université de Tizi-Ouzou.2018.

[8] Anne Labouret • Michel Villoz. « *énergie solaire photovoltaïque* » livre 2eme édition Paris, 2003, 2005.

[9] Cédric Abbezzot. « *Système inertiel de stockage d'énergie couplé au générateur photovoltaïque et piloté par un simulateur temps réel*» Thèse de Doctorat. Université Pascal Paoli. Français.2014.

[10] Bessem Abdelhamid. «*Modélisation et simulation d'un pompage photovoltaïque.* »Mémoire de Master .Université Annaba.2018.

[11] Boukhers djamil. «*Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage*» Mémoire de Magister. Université Constantine.2007.

[12] M.Degla B.Ben Ahmed. « *Dimensionnement d'un Système de Pompage Photovoltaïque*». Mémoire Master Professionnel. Université Ouargla.2017.

[13] M.Mezzai S.Mouloudji «*Contribution à l'étude d'un système de pompage photovoltaïque*». Mémoire De Master. Université Bejaia.2014

[14] F.BENADEL*« Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour Système PV*». Mémoire de Master. Université M'silla.2016.

[15] K.Ouabdelkader. H.Mersel. « *Modélisation et Contrôle d'un Système Photovoltaïque Connecté au Réseau*». Mémoire de Master Université de Bejaia.2015.

[16] S.Mameri. M.Leghima. «*Asservicement de vitesse d'un moteur à courant continu*». Mémoire de Master. Université Tizi-Ouzou .2018.

[17] B.Equer, «*Le Pompage Photovoltaïque Manuel de cours* », énergie solaire photovoltaïque ellipses 1993.

[18] K.Benlarbi « *Optimisation Floue, Neuronale et Neuro-Floue d'un système de Pompage Photovoltaïque Entraînées par différents machines électriques* »Thèse de Magister, Université de Batna 2003.

[19] M.Nouar N.Mouaisi «*Modélisation et command de système de pompage photovoltaïque*». Mémoire de master. Université Médéa .2018.

[20] H.Kouini. M.Chellali « *Régulation du courant et de la vitesse du machine à courant continu basée sur la théorie de Lyapunov*» Mémoire de Master. Université Médéa.2014.

[21] B.Boukezata. «*Etude et commande d'une chaine de conversion d'énergie d'un système solaire photovoltaïque*». Thèse de Doctorat 3ème cycle (LMD). Université .Setif 2017.

[22] H.Sahraoui. «*Modélisation Et Commande Des Convertisseurs DC-DC Utilisés Dans Les Systèmes Photovoltaïques (Théorie et Expérimentation)* »Thèse de Doctorat. Université de Batna 2.2016

[23] I.Bendjamâa *«Modélisation et commande d'un système De stockage photovoltaïque»*. Mémoire de Magister. Université de Tlemcen.2012.

[24] M.Louazene. «*Contribution à l'optimisation des systèmes photovoltaïques utilisés pour l'irrigation dans les zones sahariennes – Application zone de Ouargla»* Thèse de Doctorat. Université Batna.2015.