

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique



Université Abderrahmane Mira

Faculté de la Technologie



Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et Informatique Industrielle, Automatique et système.

Thème

Optimisation par la logique floue d'un système photovoltaïque

Préparé par :

CHERIFI Faouzi

HADDADI Riad

Dirigé par :

Mr. A. BELKAID

Examiné par :

Mr. N. NAIT MOHAND

Mme S. IDJADARENE

Année universitaire : 2022/2023

REMERCIEMENTS

Avant tout nous remercions tout d'abord Allah de nous avoir donné le courage, la force, la santé, et la patience pour pouvoir accomplir ce travail.

Nous remercions notre encadreur A. BELKAID pour ses précieux conseils, son aide et ses orientations.

Nos remerciements vont aussi aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

Tous les mots de merci à toute et à tous les enseignants de Département ATE pour leurs disponibilité et conseils.

Enfin, nous remercions sincèrement tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

DÉDICACES

Nous dédions ce travail à :

Nos parents, et le dévouement dont ils font preuve. A nos familles et amis(es), et à tous qui nous sont chers.

Fawzi et Riad

Sommaire

SOMMAIRE	i
LISTE DES FIGURES	v
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE D'ABREVIATION	xi
INTRODUCTION GENERALE.....	1

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Introduction	4
I.1. L'énergie solaire	4
I.1.1. L'énergie solaire thermique	4
I.1.2. L'énergie solaire photovoltaïque	4
I.2. La cellule photovoltaïque.....	4
I.2.1. Définition d'une cellule photovoltaïque.....	4
I.2.2. Principe de fonctionnement.....	5
I.2.3. Technologies des cellules photovoltaïques	6
I.2.3.1. Les cellules en silicium monocristallines	6
I.2.3.2. Les cellules en silicium poly cristallines	6
I.2.3.3. Les cellules amorphes.....	7
I.2.4. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	7
I.2.5. Caractéristiques électrique d'une cellule photovoltaïque.....	8
I.2.5.1. Caractéristique courant tension (I_{pv} - V_{pv})	8
I.2.5.2. Caractéristique puissance tension (I_{pv} - V_{pv}).....	9
I.2.5.3. Zones de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	9
I.3. Générateur photovoltaïque GPV	10

I.4. Modules photovoltaïques	11
I.4.1. Association des cellules photovoltaïque	11
I.4.1.1. Association en série	11
I.4.1.2. Association en série	11
I.4.1.3. Association série-parallèle.....	12
I.5. Différents types de systèmes photovoltaïques	13
I.5.1. Système photovoltaïque autonome.....	13
I.5.2. Systèmes connectés au réseau	13
I.5.3. Systèmes hybrides	14
I.6. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	15
I.6.1. Avantages	15
I.6.2. Inconvénients	15
Conclusion.....	16

Chapitre II : Convertisseurs statiques DC-DC et techniques MPPT

Introduction	18
II.1 Connexion directe entre générateur photovoltaïque et la charge.....	18
II.2 Adaptation entre source et charge	19
II.3 Les convertisseurs DC-DC	20
III.3.1 Principe du MLI (PWM)	20
II.4 Différents types de convertisseurs DC-DC	20
II.4.1 Convertisseur BUCK	21
II.4.2 Convertisseur BUCK-BOOST	22
II.4.3 Convertisseur BOOST	23
II.4.3.1 Avantage du convertisseur BOOST	25

II.5 Commandes MPPT	25
II.6 Principe de la recherche du point de puissance maximale	26
II.7 Méthodes MPPT	26
II.8 Méthode Perturbation et observation (P&O).....	27
II.8.1 Principe de la commande P&O.....	27
II.9 Méthode à base de Logique floue (FLC).....	29
II.9.1 Ensemble flou	30
II.9.2 Fonction d'appartenance	30
II.9.3 Opérateurs de la logique floue	31
II.9.4 Variable linguistique.....	33
II.9.5 Structure d'une commande à logique floue	34
II.9.5.1 La fuzzification.....	34
II.9.5.2 Base de règles	34
II.9.5.3 Inférence floue.....	35
II.9.5.4 Défuzzification	36
Conclusion.....	36

Chapitre III : Description du système photovoltaïque adopté

Introduction	38
III.1 Présentation du panneau photovoltaïque étudié	38
III.1.1 Caractéristiques I(V) et P(V) du panneau étudié :.....	39
III.1.2 Effet de la température et de l'éclairement sur les courbes I(V) et P(V)	40
III.2 Choix du convertisseur.....	42
III.2.1 Simulation du convertisseur BOOST	43
III.3 Modélisation de la Commande MPPT	44
III.3.1 Programme de l'algorithme perturbation et observation	44

III.3.2 Application de la commande par la logique floue	47
III.3.2.1 Le 1 ^{er} cas avec 3 sous-ensembles flous	47
III.3.2.2 Le 2 ^{ème} cas avec 5 sous-ensembles flous	50
III.3.3 Représentation du schéma bloc avec la logique floue	53
Conclusion.....	53

Chapitre IV : Interprétation des résultats de simulation

Introduction	55
IV.1 Description du système photovoltaïque global	55
IV.2 Résultats de simulation de la méthode P&O.....	56
IV.2.1 Simulation sous des conditions climatiques stables	56
IV.2.2 Fonctionnement sous un éclairage variable.....	58
IV.2.3 Fonctionnement sous une température variable	60
IV.3 Résultats de simulation de la méthode MPPT flou	62
IV.3.1 Comparaison entre le 1er cas et 2ème cas	62
IV.3.2 Simulation sous des conditions climatiques stables	63
IV.3.3 Fonctionnement sous un éclairage variable.....	64
IV.3.4 Fonctionnement sous une température variable	66
IV.4 Etude comparative entre MPPT P&O et MPPT flou	68
IV.4.1 Fonctionnement sous un éclairage variable.....	68
IV.4.2 Fonctionnement sous une température variable	70
Conclusion.....	72
Conclusion générale	73

Liste des figures

Figure I.1 : Structure basique d'une cellule solaire.....	5
Figure I.2 : Principe de fonctionnement d'une cellule PV	7
Figure I.3 : Types de cellules photovoltaïques en silicium	7
Figure I.4 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	7
Figure I.5 : Caractéristique courant-tension d'une photopile.....	9
Figure I.6 : Caractéristique puissance-tension d'une photopile.	9
Figure I.7 : Zones de fonctionnement d'une cellule PV.....	10
Figure I.8 : Constitution d'un générateur photovoltaïque.	10
Figure I.9 : la caractéristique résultante obtenue en association en série.....	11
Figure I.10 : la caractéristique résultante obtenue en association en parallèles	12
Figure I.11 : la caractéristique résultante obtenue en association en parallèles/série.	12
Figure I.12 : Système photovoltaïque autonome.....	13
Figure I.13 : Systèmes photovoltaïque connectés au réseau.	14
Figure I.14 : Système photovoltaïque hybride.	14
Figure II.1 : Couplage direct GPV-Charge.	18
Figure II.2 : Étage d'Adaptation entre un Générateur PV et une Charge	19
Figure II.3 : Signal PWM.....	20
Figure II.4 : Schéma du hacheur Buck.....	21
Figure II.5 : Caractéristique de la tension et de courant du convertisseur Buck.....	22
Figure II.6 : Schéma du hacheur Buck-Boost	22
Figure II.7 : Caractéristique de la tension et de courant du convertisseur Buck-Boost	23
Figure II.8 : Schéma du hacheur Boost.	23

Figure II.9 : Caractéristique de la tension et de courant du convertisseur Boost.....	24
Figure II.10 : Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est fermé.....	24
Figure II.11 : Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est ouvert.....	25
Figure II.12 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.....	26
Figure II.13 : Le fonctionnement de l'algorithme PO.....	27
Figure II.14 : Algorithme de perturbation et de l'observation (P et O).	28
Figure II.15 : Schéma bloc de l'algorithme à base de la logique floue.....	29
Figure II.16 : Différence entre ensemble classique et ensemble Flou.....	30
Figure II.17 : Formes usuelles des fonctions d'appartenance.	31
Figure II.18 : Intersection des sous-ensembles flous « petit » et « moyenne »	32
Figure II.19 : Union des sous-ensembles flous « petit » et « moyenne » pour la variable linguistique	32
Figure II.20 : Complémentation de sous-ensemble flou « petite ».	33
Figure II.21 : Exemple d'une variable linguistique 'vitesse'	34
Figure II.22 : La variation du point de puissance maximal.....	35
Figure II.23 : la technique MPPT basée sur le contrôleur flou.	36
Figure III.1 : Paramètre du panneau PV.....	38
Figure III.2 : caractéristique puissance-tension du panneau.	39
Figure III.3 : caractéristique puissance-tension du panneau	39
Figure III.4 : Influence de l'éclairement sur les Caractéristiques I(V)	40
Figure III.5 : Influence de l'éclairement sur les Caractéristiques P(V).....	41
Figure III.6 : Influence de la température sur les Caractéristiques I(V).....	41
Figure III.7 : Influence de la température sur les Caractéristiques P(V).....	42
Figure III.8 : schéma bloc de ce convertisseur sous MATLAB/Simulink.	43

Figure III.9 : la tension d'entrée et de sortie du convertisseur BOOST.....	43
Figure III.10 : le programme P&O sous script MATLAB.....	45
Figure III.11 : les fonctions d'appartenance pour chaque changement de l'entrée et sortie.	48
Figure III.12 : Surface de la variation des fonctions d'appartenance.....	49
Figure III.13 : Fonctions d'appartenances de : L'entrée E, L'entrée CE et La sortie D.....	51
Figure III.14 : Principe de MPPT floue.....	52
Figure III.15 : Surface de la variation des fonctions d'appartenance	52
Figure III.16 : Modèle 'SIMULINK' du contrôleur MPPT flou.....	53
Figure IV.1 : Schéma bloc du système PV avec MPPT Floue et P&O.....	55
Résultats de simulation de la méthode P&O :	
Simulation sous des conditions climatiques stables :	
Figure IV.2 : Courbe de rapport cyclique D du GPV (P&O).....	56
Figure IV.3 : Puissance aux bornes du GPV (P&O).....	57
Figure IV.4 : Tension aux bornes du GPV (P&O).....	57
Figure IV.5 : Tension de sortie du système (P&O).....	57
Fonctionnement sous un éclairage variable :	
Figure IV.6 : Profile d'un éclairage injecté dans le générateur photovoltaïque	58
Figure IV.7 : Courbe de rapport cyclique D du GPV (P&O).....	58
Figure IV.8 : Puissance aux bornes du GPV (P&O).....	59
Figure IV.9 : Tension aux bornes du générateur photovoltaïque (P&O).....	59
Figure IV.10 : Tension de sorti du système (P&O).....	59
Fonctionnement sous une température variable :	
Figure IV.11 : Profile d'une température injectée dans le générateur photovoltaïque.	60
Figure IV.12 : Courbe de rapport cyclique D du GPV (P&O).....	60

Figure IV.13 : Puissance aux bornes du GPV (P&O).....	61
Figure IV.14 : Tension aux bornes du générateur photovoltaïque (P&O).....	61
Figure IV.15 : Tension de sorti du système (P&O).....	61
Résultats de simulation de la méthode MPPT flou	
Figure IV.16 : Puissance aux bornes du GPV (Comparaison entre le 1er cas et 2ème cas). ...	63
Figure IV.17 : Puissance aux bornes du GPV (FLC).....	63
Figure IV.18 : Tension aux bornes du générateur photovoltaïque (FLC).....	64
Figure IV.19 : Tension de sortie du système (FLC).....	64
Fonctionnement sous un éclairnement variable	
Figure IV.20 : Puissance aux bornes du GPV (FLC).....	65
Figure IV.21 : Tension aux bornes du générateur photovoltaïque (FLC).....	65
Figure IV.22 : Tension de sortie du système (FLC).....	65
Figure IV.23 : Courbe de rapport cyclique D du GPV (FLC).....	66
Fonctionnement sous une température variable	
Figure IV.24 : Puissance aux bornes du GPV (FLC).....	66
Figure IV.25 : Tension aux bornes du générateur photovoltaïque (FLC).....	67
Figure IV.26 : Tension de sortie du système (FLC).....	67
Figure IV.27 : Courbe de rapport cyclique D du GPV (FLC).....	67
Etude comparative entre MPPT P&O et MPPT flou	
Fonctionnement sous un éclairnement variable	
Figure IV.28 : Puissance aux bornes du GPV	69
Figure IV.29 : Tension aux bornes du générateur photovoltaïque	69
Figure IV.30 : Tension de sortie du système.....	70

Fonctionnement sous une température variable

Figure IV.31 : Puissance aux bornes du GPV..... 70

Figure IV.32 : Tension aux bornes du générateur photovoltaïque..... 71

Figure IV.33 : Tension de sortie du système..... 71

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Application des opérateurs dans les deux ensembles.....	31
Tableau II.2 : Les règles du contrôleur flou.....	35
Tableau III.1 : Tableau des règles d'inférence pour le 1 ^{er} cas	49
Tableau III.2 : Tableau des règles d'inférence pour le 2 ^{ème} cas.....	51

Liste des abréviations

CE	Deuxième entrée de la fonction d'appartenance
D	La sortie de la fonction d'appartenance
DC-DC	Convertisseur continu – continu
E	Première entrée de la fonction d'appartenance
FLC	Fuzzy Logic Control
G	Eclairement en W/m ²
GPV	Générateur photovoltaïque
ICC	Courant de court-circuit.
I_{ccNp}	La somme des tensions en circuit ouvert de Ns cellules en série.
INC	Incremental Conductance
Iopt	Courant optimum
Ippm	Courant optimale au point de puissance maximale (A).
MLI	Signale modulé de large impulsion (ou PWM, Pulse width modulation)
MPPT	Poursuit de point de puissance maximal (Maximum Power Point Tracking)
N	Négatif
NP	Négatif Petit
Np	Nombre de cellules en parallèle
Ns	Nombre de cellules en série.
P	Positif
Pe	Puissance fournie par le générateur PV
PG	Positif Grand

PP	Positif petit
Ppv	Puissance de cellule PV
PV	Photovoltaïque
P&O	Perturbation et observation
Rs	Résistance série
Rsh	Résistance shunt (ou parallèle)
T	La température
Vco	La tension du circuit-ouvert
V_{coNs}	La somme des tensions en circuit ouvert de Ns cellules en série.
Ve	Tension fournie par le générateur PV
Vopt	Tension optimale
Vpv	Tension de cellule PV
Vppm	Tension optimale au point de puissance maximale (V)
Vs	Tension de sortie
Z	Zéro
ZE	Zéro

Introduction générale

L'énergie est considérée comme un sujet d'une grande importance et d'une grande préoccupation pour la société mondiale dans son ensemble. Les sources d'énergie traditionnelles, telles que le pétrole, le gaz et le charbon, sont non seulement limitées dans leur disponibilité, mais leur utilisation a également des conséquences néfastes pour l'environnement.

Face à ces défis, les énergies renouvelables offrent un grand potentiel pour répondre aux besoins énergétiques de l'humanité de manière durable et respectueuse de l'environnement. Le développement et l'adoption de technologies plus efficaces, combinés à des politiques énergétiques favorables, peuvent contribuer à accélérer la transition vers un avenir énergétique plus propre et plus durable.

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables la plus utilisées, elle consiste à convertir le rayonnement électromagnétique en électricité, cette conversion est à la fois accessible, rentable et non polluant, on parle alors d'énergie propre [1].

Dans ce contexte, nous sommes intéressés dans ce travail au développement d'une procédure d'optimisation pour la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un générateur photovoltaïque (GPV). L'optimisation du MPPT est essentielle pour assurer une exploitation efficace du système, indépendamment des conditions météorologiques telles que la température et l'éclairement. Nous avons appliqué deux techniques de poursuite du point de puissance maximale : la méthode perturbation et observation (P&O) et la logique floue.

Ce mémoire est composé de quatre chapitres comme suit :

Le premier chapitre sera consacré à la présentation des notions générales sur les systèmes photovoltaïques.

Dans le deuxième chapitre, nous abordons l'étape d'adaptation entre le GPV et la charge, aussi le principe de fonctionnement des différents types de convertisseurs DC-DC utilisés. Vers

la fin nous allons étudier le principe de la commande MPPT et nous intéresserons à l'étude de deux méthodes MPPT P&O et commande par la logique floue.

Dans le troisième chapitre, Nous allons simuler notre panneau PV pour observer ses caractéristiques et pour comprendre le comportement du panneau dans différentes conditions et d'analyser les performances du système. Ensuite, nous allons simuler le convertisseur DC-DC choisi avec une discussion des résultats obtenus, en fin nous allons voir les programmes de la commande MPPT (P&O et FLC) qui seront utilisés dans la simulation du système photovoltaïque.

Le quatrième chapitre sera consacré à la simulation d'un système photovoltaïque globale (GPV, convertisseur BOOST, commande MPPT), la présentation des résultats obtenus, les discussions et les comparaisons ont fait l'objet du dernier chapitre.

Nous terminerons ce modeste travail par une conclusion générale qui résume notre étude.

Chapitre I :

Généralités sur les systèmes

photovoltaïques

Introduction

La conversion du rayonnement solaire en électricité par le procédé photovoltaïque est l'un des moyens d'exploitation des gisements solaires. Dans un monde où l'environnement est menacé par la pollution et l'effet de serre, produire de l'électricité de manière propre est devenu une nécessité incontournable. Le photovoltaïque (PV) est une source d'énergie propre et inépuisable. C'est une composante essentielle des énergies renouvelables qui peut aider le monde à répondre à ses besoins énergétiques croissants tout en limitant l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre et en réduisant la pollution de l'environnement.

I.1 L'énergie solaire

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt carré par mètre carré (KWc/m²) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge.

Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année. L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés [2] :

I.1.1 L'énergie solaire thermique : qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux solaires. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.

I.1.2 L'énergie solaire photovoltaïque : qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon.

I.2 La cellule photovoltaïque

I.2.1 Définition d'une cellule photovoltaïque

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées [3] :

- d'une fine couche semi-conductrice tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.
- d'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- d'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.
- les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

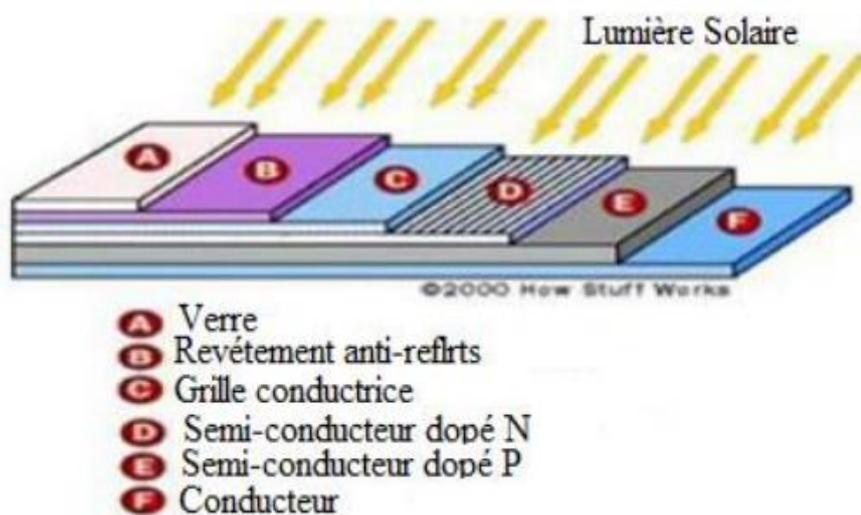


Figure I.1 : Structure basique d'une cellule solaire.

I.2.2 Principe de fonctionnement

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet la conversion directe de l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties séparées par la jonction PN, l'une est dite dopée N présentant un excès d'électrons et l'autre est dite dopée P présentant un déficit en électrons. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P. Une jonction (dite P-N) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones N et P, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à

la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de Conduction. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel : le courant électrique circule [4].

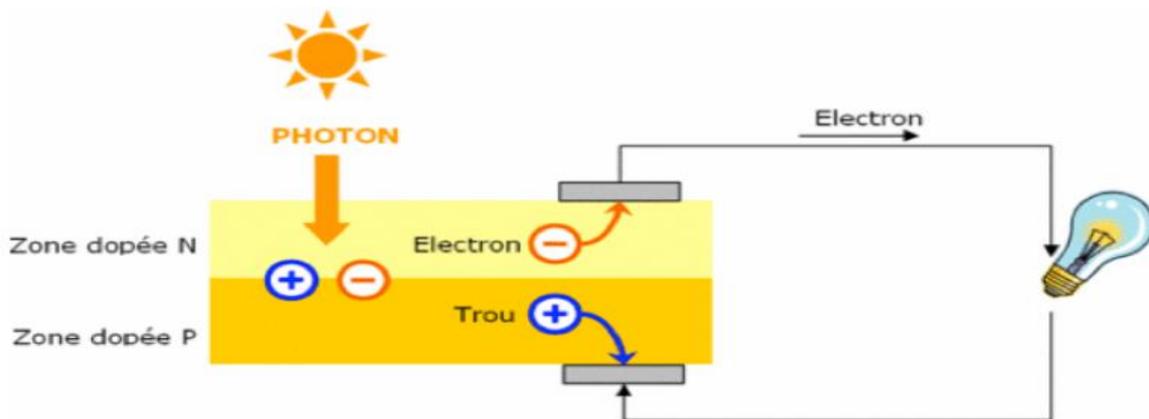


Figure I.2 : Principe de fonctionnement d'une cellule PV.

I.2.3. Technologies des cellules photovoltaïques

Le silicium est le semi-conducteur le plus couramment utilisé dans la fabrication des cellules, trois types de cellules photovoltaïques en silicium existent : monocristallin, polycristallin et amorphe [5].

I.2.3.1. Les cellules en silicium monocristallines

Elles sont les photopiles de la première génération, possédant un taux de rendement de 12 à 17%, mais la méthode de leurs productions est laborieuse et difficile, puisque il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur.

I.2.3.2. Les cellules en silicium polycristallines

Elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vues de près, on peut voir les différentes orientations des cristaux. Elles ont un rendement de 11 à 13%, mais leur coût de production est moins élevé que celui des cellules monocristallines.

I.2.3.3. Les cellules amorphes

Elles ont un coût de production moins chère, mais malheureusement leur rendement est faible (8 à 10%). La cellule est gris très foncé. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium, ou on peut appliquer de très fines couches de silicium amorphe sur des vitres, du plastique souple ou du métal. C'est le silicium amorphe qu'on trouve le plus souvent dans les petits produits de consommation comme les calculatrices et les montres, mais aussi plus récemment sur les grandes surfaces utilisées pour la couverture des toits [5].

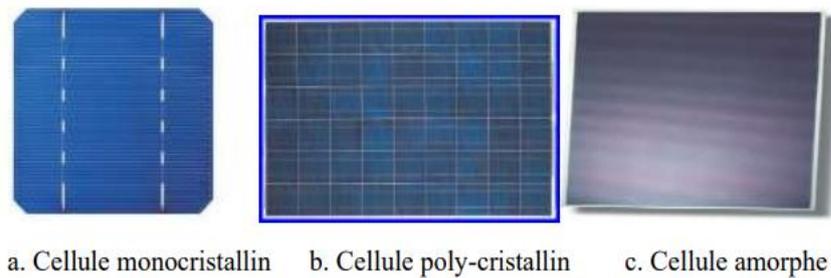


Figure I.3 : types de cellules photovoltaïques en silicium (a : cellule monocristallin, b : cellule poly-cristallin, c : cellule amorphe)

I.2.4. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque a un comportement équivalent à une source de courant shuntée par une diode. Le modèle est complété par une résistance série R_s due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière et une résistance parallèle ou shunt R_{sh} qui provient des contacts métalliques et des résistances de fuite sur la périphérie de la cellule [6].

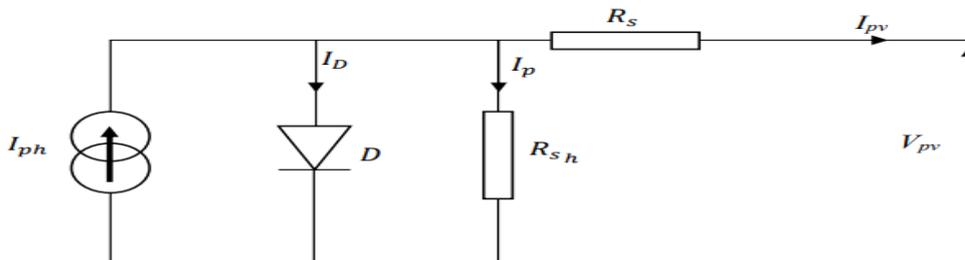


Figure I.4 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

L'expression du courant peut avoir la forme suivante [14] :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - \frac{I_{pv}}{R_p} = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{q(V_{pv} + R_s \cdot I_{pv})}{aK_b T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p} \quad (I.1)$$

Où :

I_s est le courant de saturation de la diode,

a est le facteur d'idéalité de la jonction,

K_b est la constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J),

T est la température de jonction des cellules,

q est la charge élémentaire de l'électron ($1,6 \times 10^{-19}$ C).

I.2.5. Caractéristiques électrique d'une cellule photovoltaïque

Sous un éclairement donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension (I_{pv} - V_{pv}) et par une courbe tension-puissance (P_{pv} - V_{pv}). Trois grandeurs physiques définissent ces caractéristiques [7] :

- La tension à vide : V_{co} (tension en circuit ouvert). Cette valeur représente la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.
- Le courant de court-circuit : I_{cc} . Cette valeur représente le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.
- Le Point de Puissance Maximal : PPM obtenu pour une tension et un courant optimaux : V_{opt} , I_{opt} (parfois appelés aussi V_{ppm} , I_{ppm}).

I.2.5.1 Caractéristique courant tension (I_{pv} - V_{pv})

La courbe caractéristique d'une cellule photovoltaïque représente la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension aux bornes de la cellule photovoltaïque depuis le court-circuit (tension nulle correspondant au courant maximum produit) jusqu'au circuit ouvert (courant nul pour une tension maximale aux bornes de la cellule).

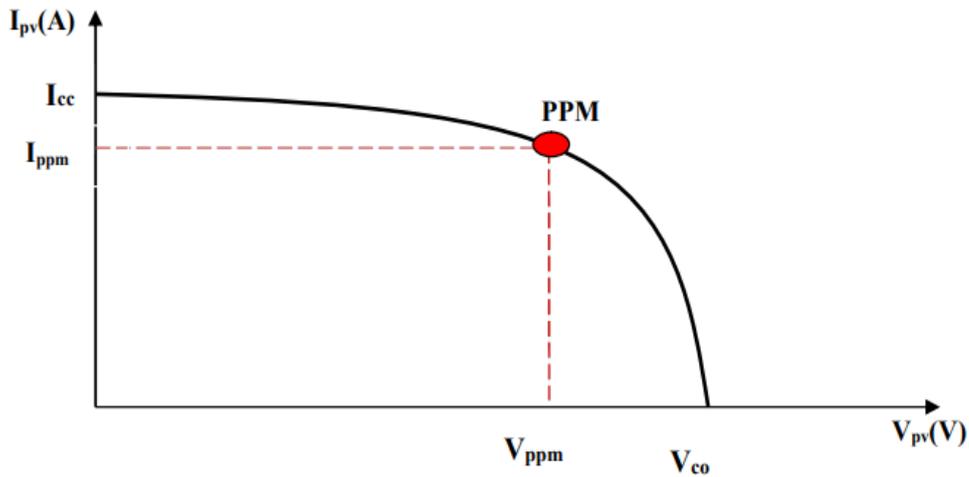


Figure I.5 : Caractéristique courant-tension d'une photopile.

I.2.5.2 Caractéristique puissance tension (I_{pv} - V_{pv})

Nous pouvons aussi représenter la caractéristique puissance-tension qui nous permet de bien voir l'emplacement de la puissance maximale du panneau solaire. Cette dernière ne pourra être qu'un seul point de fonctionnement.

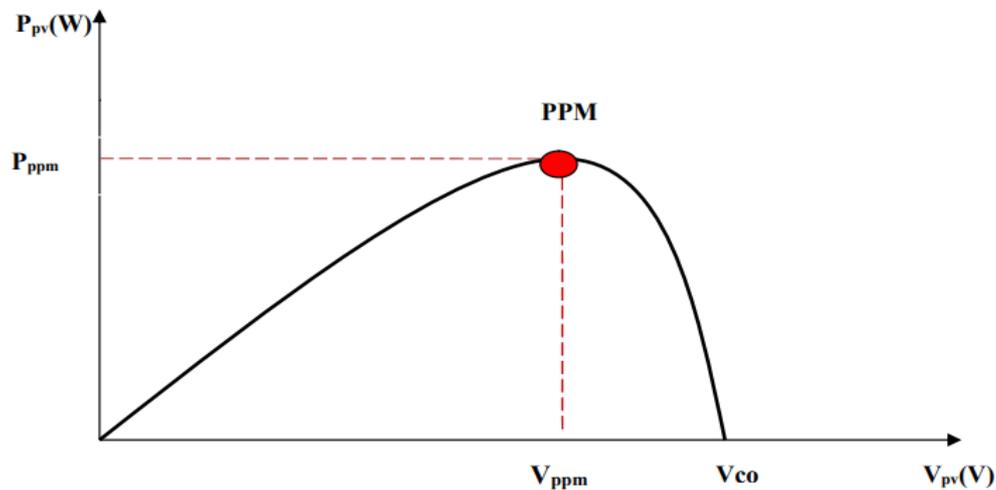


Figure I.6 : Caractéristique puissance-tension d'une photopile.

I.2.5.3 Zones de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La figure(I.7) montre les différentes zones de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque sur la caractéristique (I_{pv} - V_{pv}) [7].

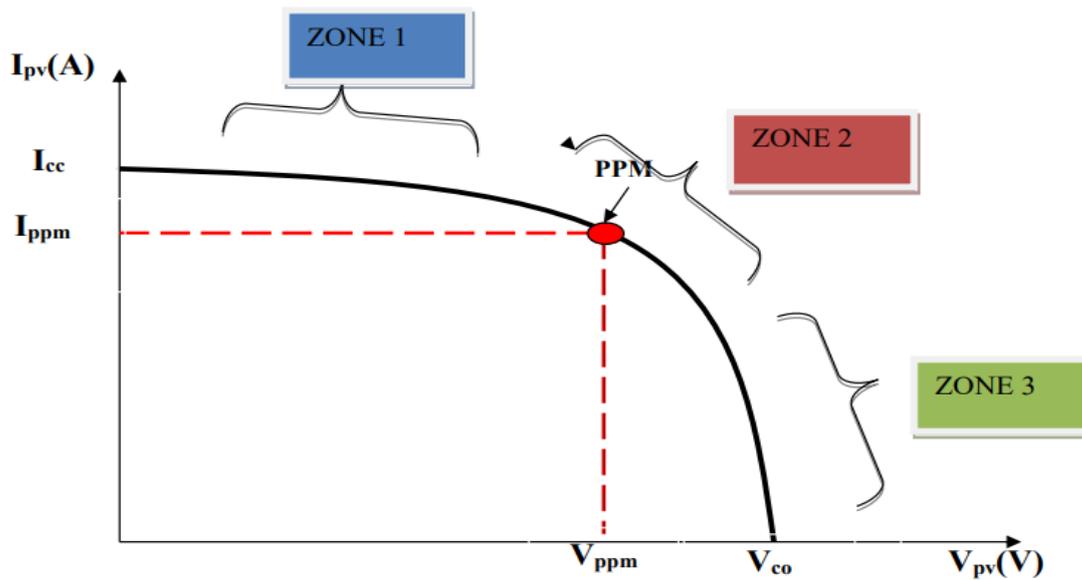


Figure I.7 : Zones de fonctionnement d'une cellule PV.

- **Zone 1 :** Le courant est quasiment constant quel que soit la variation de la tension. (La cellule se comporte comme un générateur de courant)
- **Zone 2 :** C'est la zone où la cellule délivre son maximum de puissance.
- **Zones 3 :** La tension est presque constante, et le courant varie. (la cellule se comporte comme un générateur de tension)

I.3 Générateur photovoltaïque GPV

Selon l'application choisie, le terme générateur photovoltaïque GPV est utilisé pour désigner soit un module ou un panneau PV.

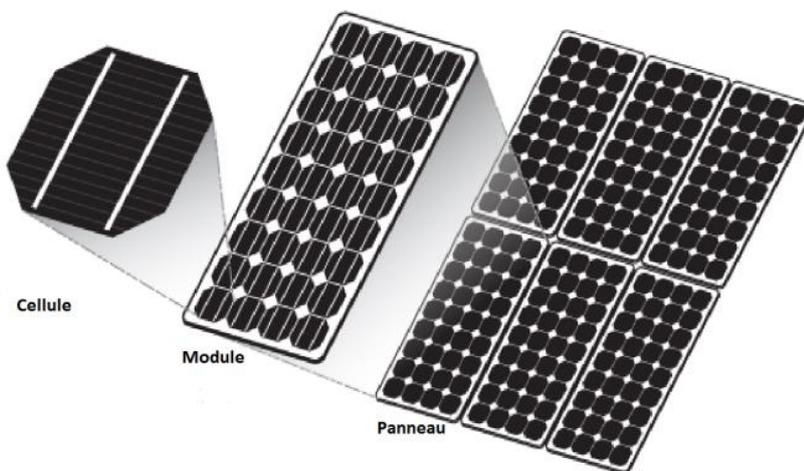


Figure I.8 : Constitution d'un générateur photovoltaïque.

I.4 Modules photovoltaïques

Le module photovoltaïque est donc un ensemble de cellules connectées en série, en parallèle ou en série parallèle. Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension.

I.4.1 Association des cellules photovoltaïques

I.4.1.1 Association en série

Dans un groupement de N_s cellules en série, la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, alors que le courant traversant des cellules reste le même. La figure 1.7 montre la caractéristique résultante [8].

$$\text{Avec : } V_{coN_s} = n_s * V_{co} \quad (I.2)$$

V_{coN_s} : La somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série.

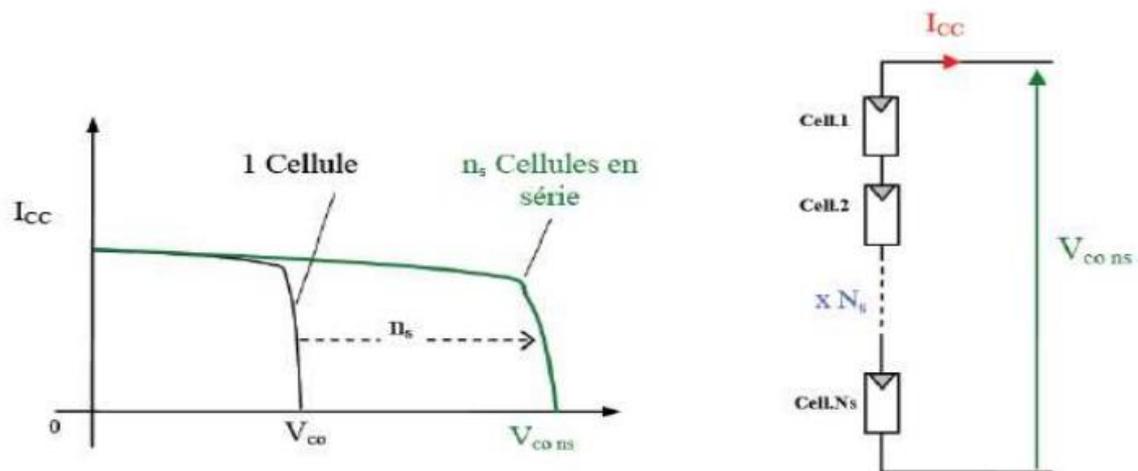


Figure I.9 : la caractéristique résultante obtenue en association en série.

I.4.1.2 Association en parallèle

Dans un groupement de N_p cellules en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par l'addition des courants. La (figure 1.8) montre la caractéristique résultante [7].

Avec : $I_{ccNp} = n_p \cdot I_{cc}$ (I.3)

I_{ccNp} : Somme des courants de court-circuit des cellules en parallèle.

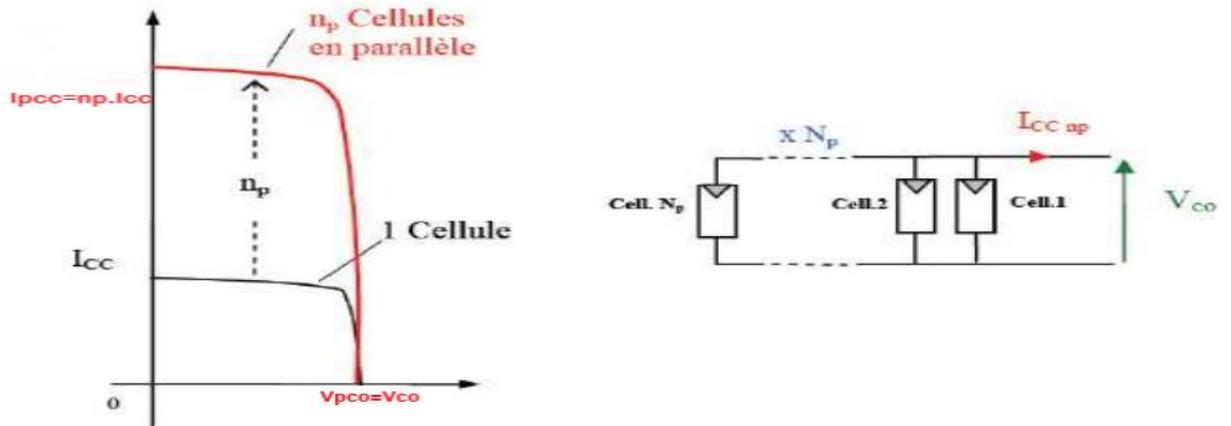


Figure I.10 : la caractéristique résultante obtenue en association en parallèles.

I.4.1.3. Association série-parallèle

Selon l'association en série et en parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à vide totale son données par les relations suivant [8] :

$I_{ccNp} = n_p \cdot I_{cc}$ et $V_{coNs} = n_s \cdot V_{co}$ (I.3)

- n_p : nombre de cellule en parallèle.
- n_s : nombre de cellule en série.

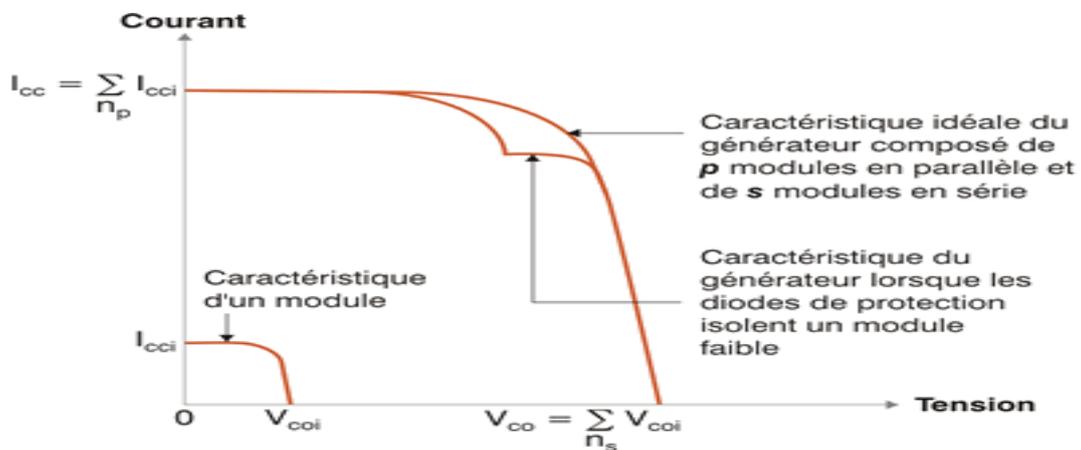


Figure I.11 : la caractéristique résultante obtenue en association en parallèles/série.

I.5 Différents types de systèmes photovoltaïques

Il existe généralement trois de systèmes PV, les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes connectés au réseau.

I.5.1 Système photovoltaïque autonome

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions Isolées et éloignées du réseau.

Ces systèmes nécessitent l'utilisation de batteries d'accumulateur pour stocker l'énergie durant l'absence du soleil.

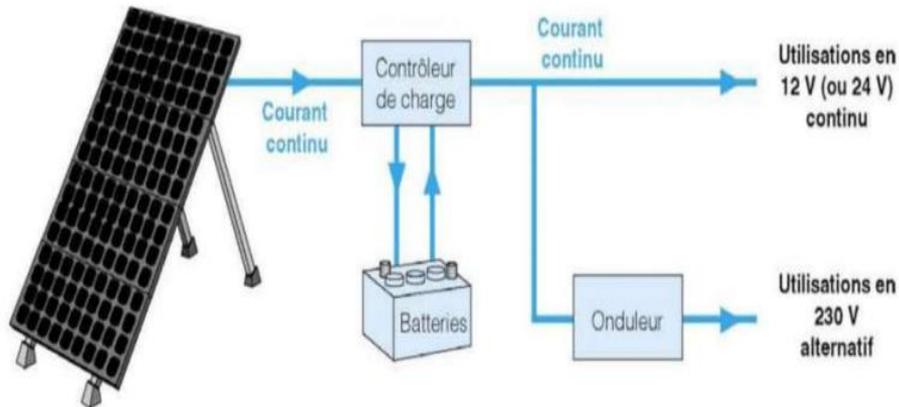


Figure I.12 : Système photovoltaïque autonome.

I.5.2 Les systèmes connectés au réseau :

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectés à un réseau (figure I.14) sont une résultante de la tendance à la décentralisation du réseau électrique. L'énergie est produite plus près des lieux de consommation. Les systèmes connectés à un réseau réduisent la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Il produit sa propre électricité et achemine son excédent d'énergie vers le réseau, auprès duquel il s'approvisionne au besoin, ces transferts éliminent le besoin d'acheter et d'entretenir une batterie. Il est toujours possible d'utiliser ceux systèmes pour servir d'alimentation d'appoint lorsque survient une panne de réseau [4].

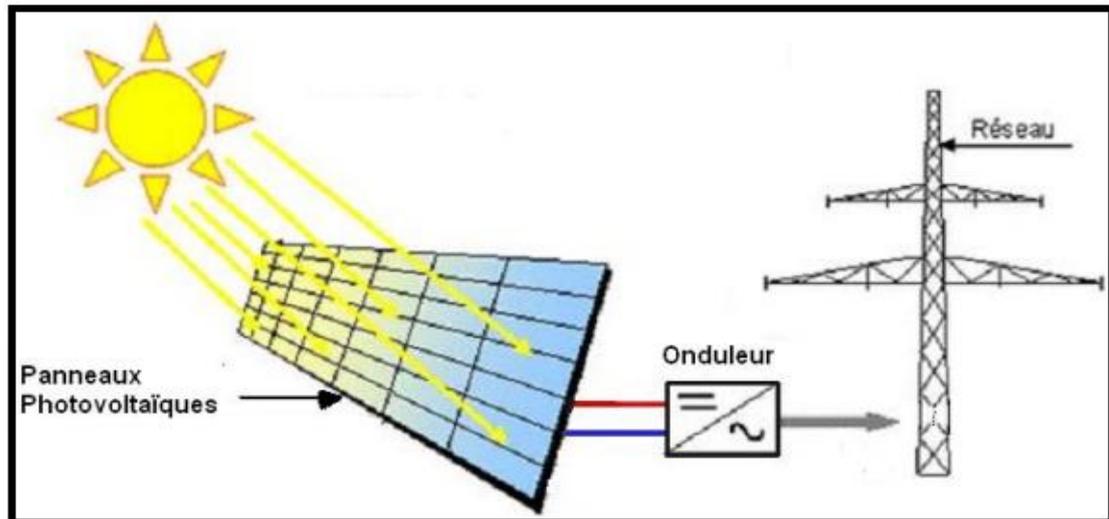


Figure I.13 : Systèmes photovoltaïque connectés au réseau.

I.5.3 Les systèmes hybrides :

Les systèmes d'énergie hybride associent au moins deux sources d'énergie renouvelable aussi une ou plusieurs sources d'énergie classiques. Les sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque et l'éolienne ne délivrent pas une puissance constante, mais vu leurs complémentarités, leur association permet d'obtenir une production électrique continue. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées [4].

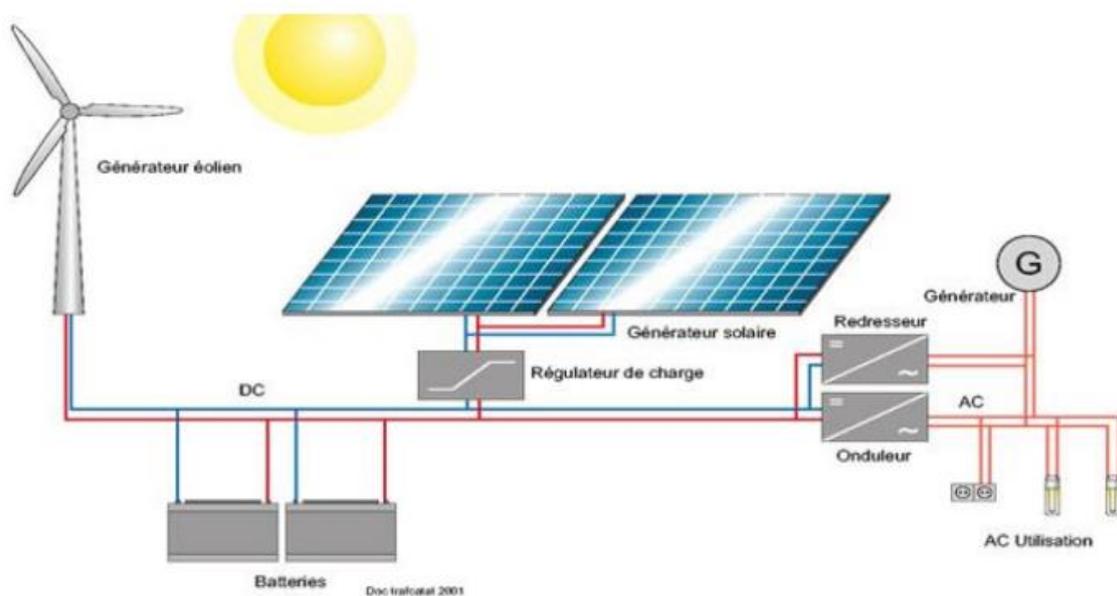


Figure I.14 : Système photovoltaïque hybride.

I.6 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

I.6.1 Avantages

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages :

- L'énergie solaire est, à l'échelle humaine, inépuisable et disponible gratuitement en très grandes quantités. De plus, lors de la phase d'exploitation, la production d'électricité au moyen de panneaux photovoltaïques n'est pas polluante.
- Le silicium, matériau utilisé dans les panneaux solaires actuels les plus répandus, est très abondant et n'est pas toxique.
- Les panneaux solaires ont une durée de vie de 20 à plus de 30 ans et sont presque intégralement recyclables.
- La modularité des panneaux est très importante, c'est-à-dire qu'il est possible de concevoir des installations de tailles diverses dans des environnements très variés. Ceux-ci sont par conséquent adaptés à la production décentralisée d'électricité en sites isolés.
- Les panneaux photovoltaïques peuvent être utilisés à des fins domestiques de petite échelle ou à des fins de production énergétique industrielle à grande échelle [5]

I.6.2 Inconvénients

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients :

- Fabrication et recyclage des panneaux peu écologiques.
- Production qui dépend des conditions d'ensoleillement. –
- Durée de vie limitée (env. 20 ans).
- Rendement assez faible (15%) [5].

Conclusion

Nous avons parcouru dans ce chapitre, des généralités sur la conversion photovoltaïque, de l'élément de base qui est la cellule aux différentes structures des systèmes photovoltaïques. Le principe physique de cette conversion et les différentes technologies des cellules sont définis. Puis nous avons évoqué les différents systèmes de conversion et nous avons terminé par les avantages et les inconvénients de la conversion photovoltaïque.

Chapitre II :

Convertisseurs statiques DC-DC et techniques MPPT.

Introduction

Dans les systèmes PV, les convertisseurs statiques DC-DC et les techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) jouent un rôle essentiel pour maximiser l'efficacité de conversion et l'extraction de la puissance des panneaux solaires.

Les convertisseurs statiques DC-DC sont utilisés pour adapter la tension de sortie des panneaux solaires à celle requise par le système, tandis que les techniques MPPT sont utilisées pour maintenir les panneaux solaires à leur point de puissance maximale, ce qui permet d'optimiser l'efficacité globale du système PV.

II.1 Connexion directe entre générateur PV-charge

Le choix est principalement lié à la simplicité de l'opération et le très faible degré de fiabilité, dû fondamentalement à l'absence d'électronique, sans parler d'un faible coût. La (Figure.II.1) montre ce cas de connexion. Si cette charge était une batterie, lorsque le module n'est pas éclairé, celui-ci pourrait fonctionner en tant que récepteur, la batterie pourrait donc se décharger sur le générateur photovoltaïque et en plus l'endommager irréversiblement, Ainsi, pour éviter cette situation, la connexion doit être assurée à l'aide d'une diode anti-retour placée entre le GPV et la charge. L'inconvénient de cette configuration, c'est qu'elle n'offre aucun type de limitation et/ou réglage de la tension de la batterie. Le transfert de puissance maximale disponible aux bornes du générateur photovoltaïque vers la charge n'est pas non plus garanti [9].

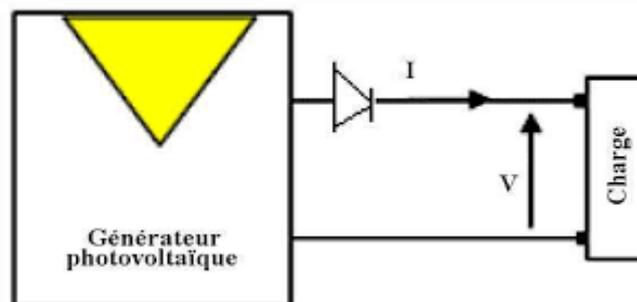


Figure II.1 : Couplage direct GPV-Charge.

II.2 Adaptation entre source et charge

Un générateur photovoltaïque présente des caractéristiques $I(V)$ non linéaires avec de point de puissance maximum PPM. Ces caractéristiques dépendent entre autre du niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe. Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur photovoltaïque et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge comme décrit sur la (FigureII.2). Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de puissance maximale disponible [10].

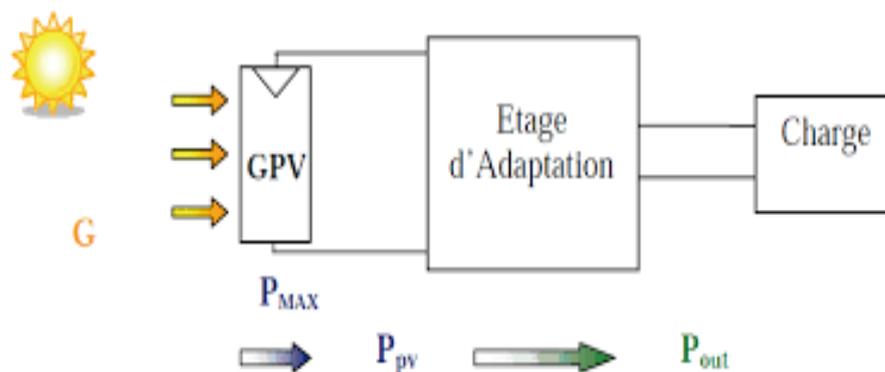


Figure II.2 : Étage d'Adaptation entre un Générateur PV et une Charge

Dans le contexte des générateurs photovoltaïques, pour assurer un fonctionnement optimal du générateur PV dans la plupart des conditions, il est courant d'utiliser un convertisseur statique, appelé convertisseur DC-DC, qui agit comme un adaptateur entre la source (le générateur PV) et la charge.

Le convertisseur DC-DC joue un rôle crucial en permettant au générateur photovoltaïque de fonctionner à son point de puissance optimale, quelles que soient les conditions d'éclairement et de charge. Il assure un transfert de puissance efficace du générateur PV à la charge, maximisant ainsi l'utilisation de l'énergie solaire.

II.3 Les convertisseurs DC-DC

Le hacheur, ou convertisseur continu – continu (DC-DC), est un dispositif électronique qui permet d'obtenir une valeur de tension continue constante avec un rendement élevé. Ils se composent de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Généralement le commutateur est un transistor MOSFET qui travaille en mode bloqué-saturé.

Le commutateur du convertisseur est commandé par un signal PWM (Pulse Width Modulation) ou MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion), avec une fréquence de commutation FS fixe et un rapport cyclique α variable [11].

III.3.1 Principe du MLI (PWM)

Dans les convertisseurs DC-DC, la tension de sortie doit être régulée pour être constamment égale à une tension de référence, du fait que la tension d'alimentation V et les caractéristiques de la charge peuvent varier. Une méthode pour réguler la tension de sortie afin d'obtenir une tension moyenne fixe consiste à ajuster en permanence le rapport cyclique de commande de l'interrupteur α . Le signal de contrôle de l'interrupteur S devra être élaboré par comparaison entre le rapport cyclique α et une tension en dents de scie comme suit [11] :

- Lorsque $\alpha > V_{cc}$: $S = 1$, l'interrupteur S est commandé à la fermeture (état ON).
- Lorsque $\alpha < V_{cc}$: $S = 0$, l'interrupteur S est commandé à l'ouverture (état OFF).

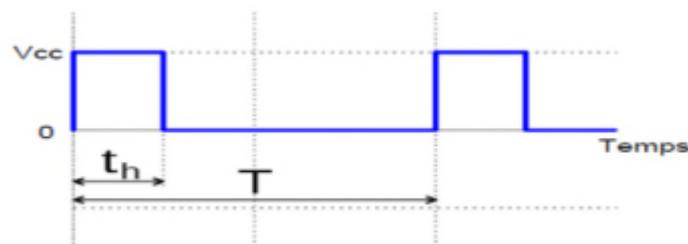


Figure II.3 : Signal PWM.

II.4 Différents types de convertisseurs DC-DC

Les convertisseurs DC-DC peuvent être classés en plusieurs types, tels que le convertisseur abaisseur (BUCK), le convertisseur élévateur (BOOST), le convertisseur

abaisseur-élevateur (BUCK-BOOST), chaque type a ses propres caractéristiques d'efficacité, de tension d'entrée et de sortie, et de régulation de la puissance.

II.4.1 Convertisseur Buck

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 [14].

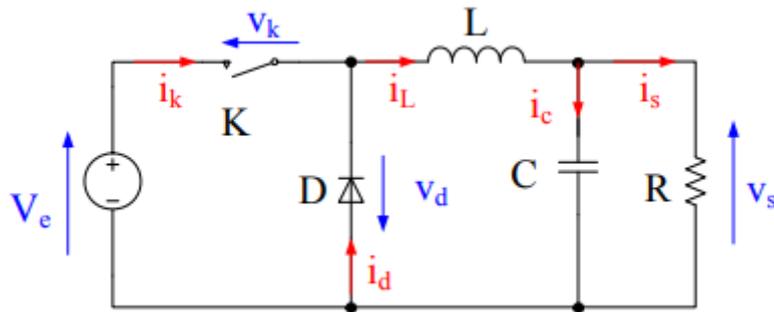


Figure II.4 : Schéma du hacheur Buck

- Dans l'état passant, l'interrupteur K est fermé, la tension aux limites de l'inductance vaut $V_L = V_e - V_s$. Le courant traversant l'inductance augmente linéairement. La tension aux limites de la diode étant négative, aucun courant ne la traverse.
- Dans l'état bloqué, l'interrupteur est ouvert. La diode devient passante afin d'assurer la continuité du courant dans l'inductance. La tension aux limites de l'inductance vaut $V_L = -V_s$. Le courant traversant l'inductance décroît.

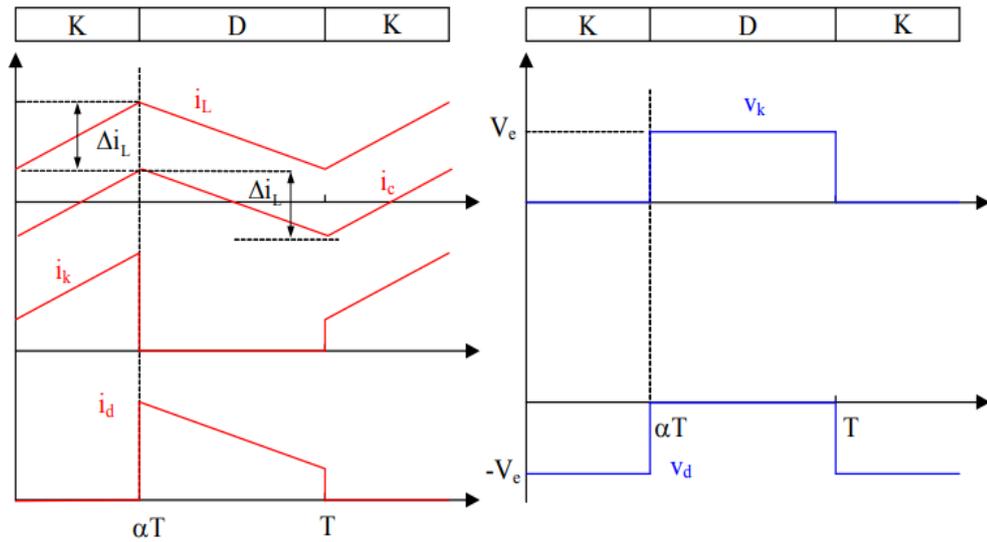


Figure II.5 : Caractéristique de la tension et de courant du convertisseur Buck.

II.4.2 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 [14].

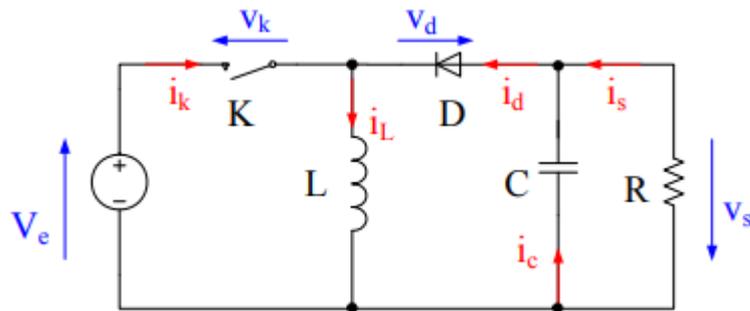


Figure II.6 : Schéma du hacheur Buck-Boost

- Dans l'état passant, l'interrupteur K est fermé, conduisant ainsi à une augmentation de l'énergie stockée dans l'inductance.
- Dans l'état bloqué, l'interrupteur K est ouvert. L'inductance est reliée à la charge et à la capacité. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité et la charge.

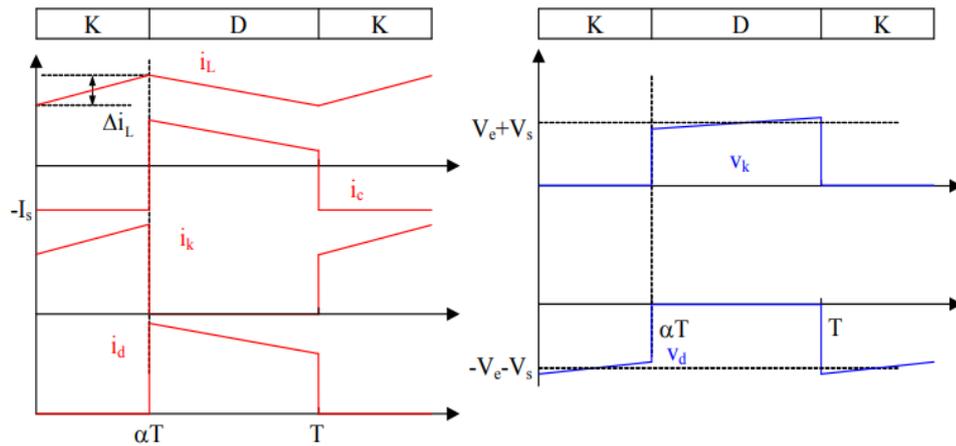


Figure II.7 : Caractéristique de la tension et de courant du convertisseur Buck-Boost.

II.4.3 Convertisseur Boost

Le convertisseur BOOST est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur [14].

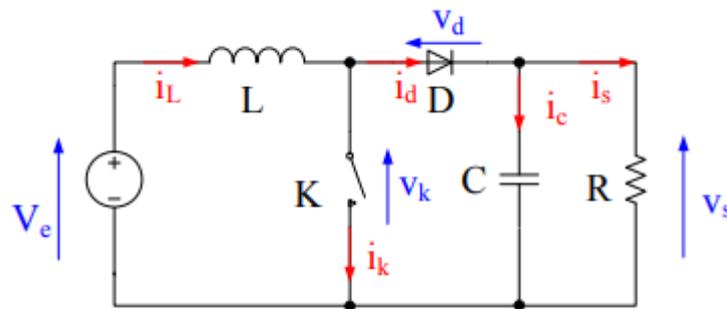


Figure II.8 : Schéma du hacheur Boost.

- lorsque l'interrupteur K est fermé (état passant), cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode D est alors bloquée et la charge est alors déconnectée de l'alimentation.
- Lorsque l'interrupteur est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur et sa f.e.m. s'additionne à celle du générateur. Le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode D, le condensateur C et la charge R. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité.

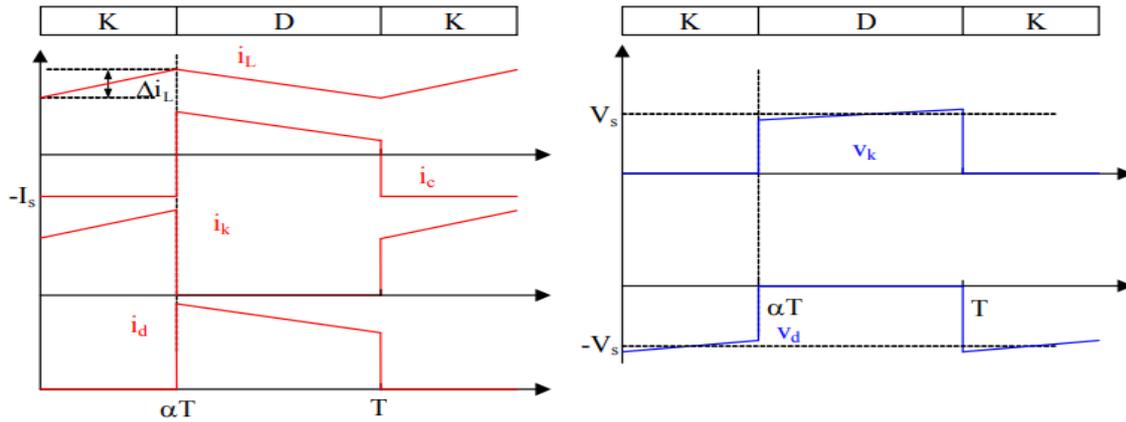


Figure II.9 : Caractéristique de la tension et de courant du convertisseur Boost.

- Lorsque l'interrupteur K est fermé ($0 < t < \alpha T_d$), le circuit du convertisseur devient [14] :

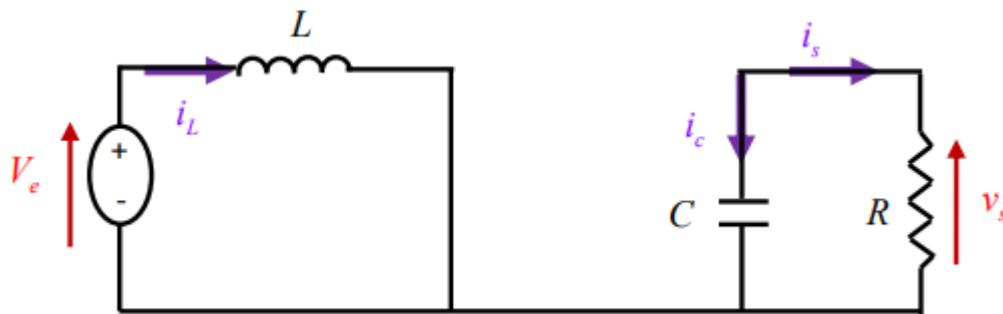


Figure II.10 : Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est fermé.

$$L \frac{di_L}{dt} = V_e \quad (\text{II.1})$$

$$i_L = I_{min} + \frac{V_e}{L} \cdot t \quad (\text{II.2})$$

A l'instant $t = T = \alpha T_d$, le courant dans l'inductance atteint sa valeur maximale I_{max}

$$I_{max} = I_{min} + \frac{V_e}{L} \cdot \alpha T_d \quad (\text{II.3})$$

- Lorsque l'interrupteur K est ouvert ($\alpha T_d < t < T_d$) le circuit du convertisseur devient [13] :

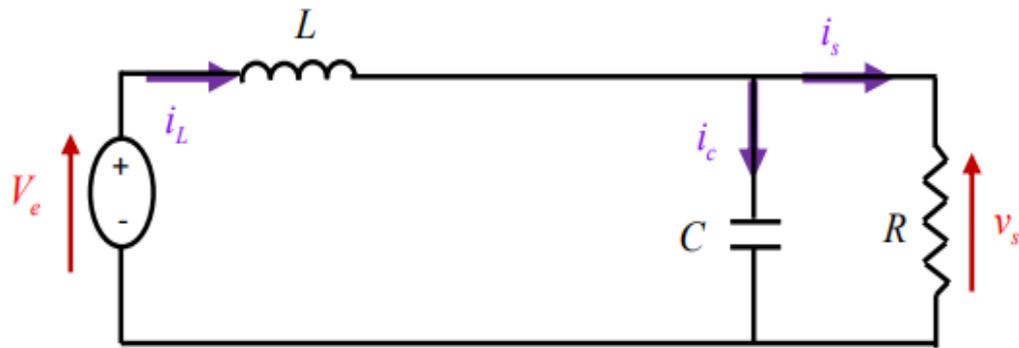


Figure II.11 : Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est ouvert.

$$L \frac{di_L}{dt} = V_e - V_s \quad (\text{II.4})$$

$$i_L = I_{max} + \frac{V_e - V_s}{L} \cdot (t - \alpha T_d) \quad (\text{II.5})$$

A l'instant $t = T_d$, le courant dans l'inductance revient à sa valeur minimale I_{min}

$$I_{min} = I_{max} + \frac{V_e - V_s}{L} \cdot (1 - \alpha) T_d \quad (\text{II.6})$$

On peut déduire la valeur moyenne de la tension de sortie V_s :

$$V_s = \frac{1}{1-\alpha} V_e \quad \text{Tel que } \alpha \in [0.1 \ 0.9] \quad (\text{II.7})$$

II.4.3.1 Avantage de convertisseur BOOST

- le convertisseur BOOST peut être plus approprié aux systèmes photovoltaïques avec le suiveur du point de puissance maximale (MPPT) puisque le convertisseur fonctionne au mode de courant continu.
- Fournit une sortie tension supérieure à la tension d'entrée sans transformateur, haute efficacité.
- Haut rendement.
- Le courant d'entrée continu.
- Le convertisseur BOOST est capable de stocker de l'énergie dans son inductance.

II.5 Commandes MPPT

La commande MPPT est une commande essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique α en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance

délivrée par le panneau PV. Pour cette raison, on va présenter et étudier par la suite les algorithmes de commande les plus populaires [12].

II.6 Principe de la recherche du point de puissance maximale

Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximal (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance. Ainsi, quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum. La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur statique commandé par une MPPT. [1]

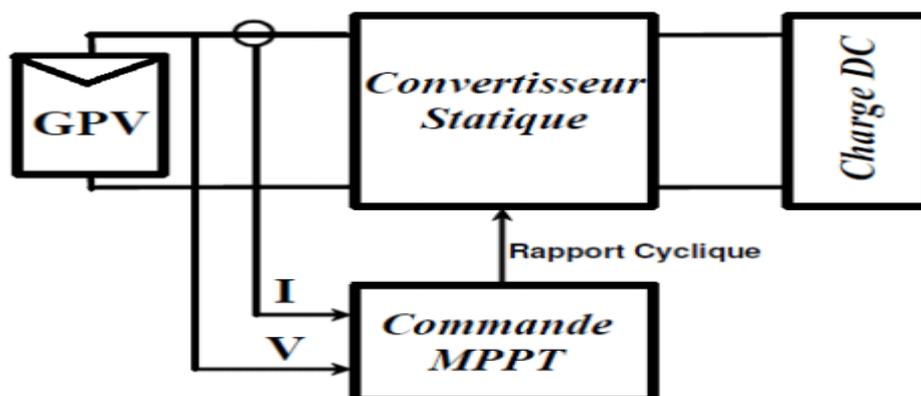


Figure II.12 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.

II.7 Méthodes MPPT

Il existe plusieurs méthodes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour maximiser la puissance d'un panneau solaire, Les méthodes les plus utilisées sont :

- Perturbation et Observation (P&O, Perturb and Observe).
- Incrémentation de la conductance (INC, Incremental Conductance).
- Logique Flou (FLC)

Dans ce mémoire, nous allons nous intéresser à une méthode MPPT intelligente, Contrôleur par la logique floue (FLC), en comparaison avec une méthode MPPT classique, Perturbation & Observation (P&O).

II.8 Méthode Perturbation et observation (P&O)

La méthode Perturbe & Observe (P&O) est l'une des méthodes les plus utilisées car elle est simple et facile à mettre en œuvre. C'est une méthode itérative permettant d'obtenir le MPP on mesure les caractéristiques du panneau PV puis on induit une petite perturbation sur la tension (ou le courant) afin d'analyser la variation de puissance qui en résulte.

II.8.1 Principe de la commande P&O

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension ou le courant de charge du panneau solaire et à observer l'effet de la perturbation sur la puissance de sortie. Si la puissance augmente, la perturbation est poursuivie dans la même direction. Si la puissance diminue, la perturbation est inversée. Ce processus de perturbation et d'observation se poursuit jusqu'à ce que le point de puissance maximale soit atteint.

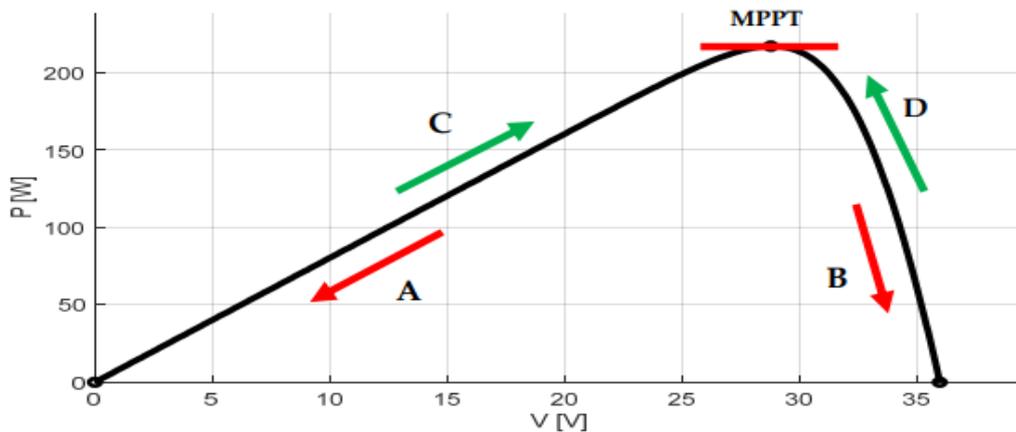


Figure II.13 : Le fonctionnement de l'algorithme PO.

La Figure montre les 4 options possibles présentées lors du suivi du MPP, le point 1 étant la position précédente et le point 2 la position actuelle de chaque cas (A, B, C et D).

- Cas A : $\Delta P < 0$ et $\Delta V < 0$
- Cas B : $\Delta P < 0$ et $\Delta V > 0$
- Cas C : $\Delta P > 0$ et $\Delta V > 0$
- Cas D : $\Delta P > 0$ et $\Delta V < 0$

Dans les cas A et C, le rapport cyclique doit diminuer, entraînant une augmentation de la tension du module PV.

Alors que dans les cas B et D, le rapport cyclique doit être augmenté de façon à ce que la tension du module PV diminue [13].

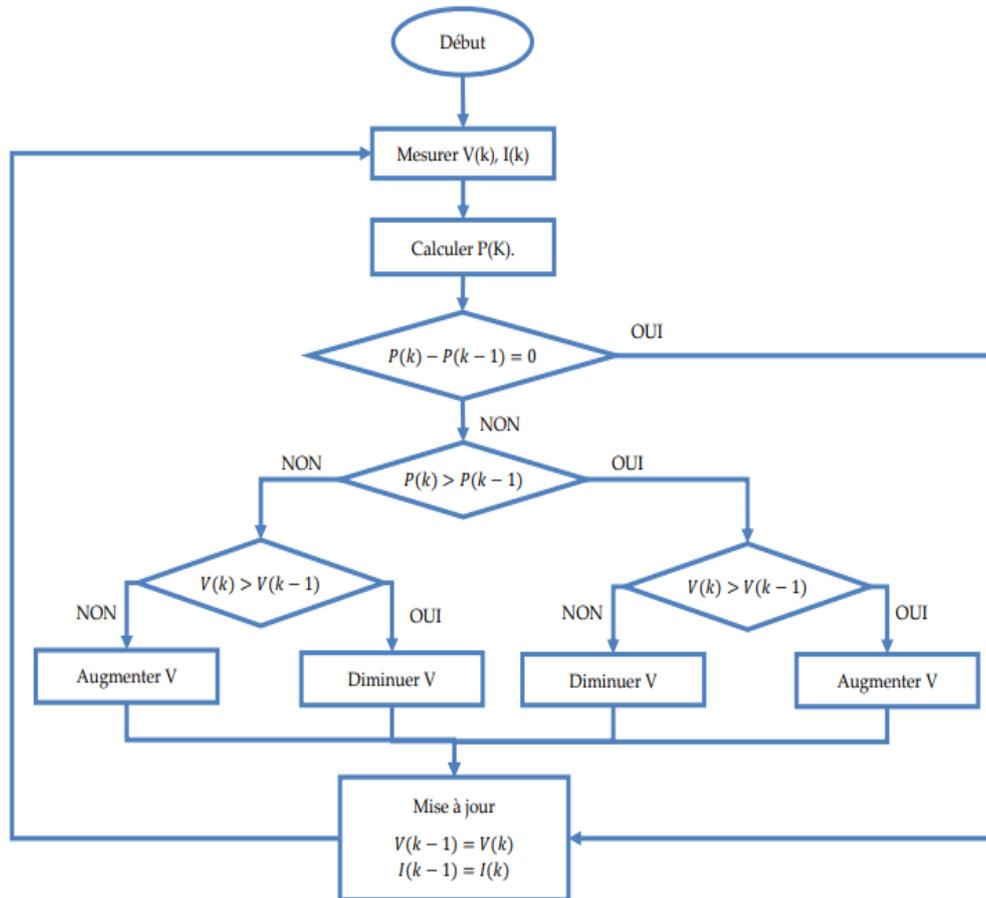


Figure II.14 : Algorithme de perturbation et de l’observation (P et O).

L’organigramme de l’algorithme de perturbation et de l’observation (P et O) est donné par la Figure (II.14)

L’algorithme P&O a comme avantage la précision et la rapidité de réaction. Il permet de déterminer le point de puissance maximale pour un ensoleillement et une température ou un niveau de dégradation des caractéristiques. Le problème avec cet algorithme est :

- L’oscillation autour du PPM dans les conditions de fonctionnement normales.

– La mauvaise convergence de l'algorithme dans le cas des variations brusques de la température et/ou de l'ensoleillement.

Il faut noter que ces oscillations peuvent être réduites si on fixe un faible pas d'incrémentations mais au détriment du temps de convergence. Alors, un compromis doit être fait entre précision et rapidité lors du choix de ce pas de mise à jour [14].

II.9 Méthode à base de Logique floue (FLC)

Cette commande est classée parmi les plus utilisées grâce à l'évolution des microcontrôleurs, l'avantage de cette technique est qu'elle peut fonctionner avec des valeurs d'entrées peu précises, l'approche de FL est issue de la décomposition d'une plage de variation d'une variable réelle sous formes de variables linguistiques et l'attribution de la fonction d'appartenance pour chaque variable, Cette théorie est adaptée au problème d'optimisation atteindre le MPP, elle repose sur l'observation en temps réel de deux critères d'entrée qui sont l'écart E par rapport à la valeur recherchée $E = 0$ et la variation de l'erreur CE qui représente le sens et la vitesse de convergence, et une variation de sortie D qui pilote le convertisseur statique pour rechercher le MPP [14].

Les deux entrées de contrôleur sont définies par les équations suivantes :

$$E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \quad (\text{II.8})$$

$$CE(k) = E(k) - E(k-1) \quad (\text{II.9})$$

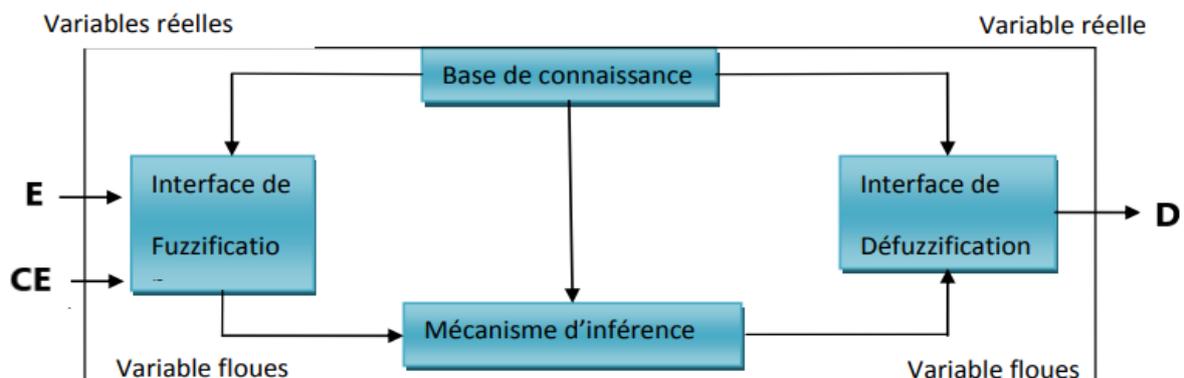


Figure II.15 : Schéma bloc de l'algorithme à base de la logique floue.

II.9.1 Ensemble flou

Dans la théorie classique des ensembles, c'est la fonction caractéristique qui définit l'ensemble. Cette fonction ne prend que les deux valeurs discrètes 0 (l'élément n'appartient pas) ou 1 (...appartient à l'ensemble). Alors qu'en logique floue, il peut admettre les deux propositions avec un degré de vérité pour chacune.

L'idée est de remplacer l'ensemble binaire $\{0,1\}$ par un intervalle $[0,1]$ ceci permet des graduations dans l'appartenance d'un élément à une situation, ce qui permet la modélisation de l'observation humaine exprimée par des expressions linguistiques [15].

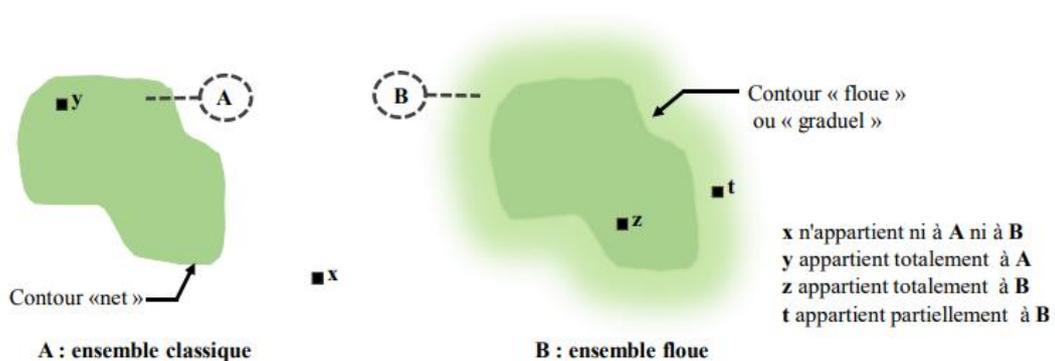


Figure II.16 : Différence entre ensemble classique et ensemble Flou (a : ensemble classique, b : ensemble floue)

II.9.2 Fonction d'appartenance [15]

- **Fonction triangulaire** : elle est définie par trois paramètres $\{a, b, c\}$

$$\mu_C(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (\text{II.10})$$

- **Fonction trapézoïdale** : elle est définie par trois paramètres $\{a, b, c, d\}$

$$\mu_C(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{d-x}{d-b}\right), 0\right) \quad (\text{II.11})$$

- **Fonction Gaussienne** : elle est définie par deux paramètres $\{a, x_0\}$

$$\mu_C(x) = \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2a}\right) \quad (\text{II.12})$$

- **Fonction Cloche** : elle est définie par deux paramètres $\{a, x_0\}$

$$\mu_C(x) = \frac{1}{1+\left(\frac{x-x_0}{a}\right)^2} \quad (\text{II.13})$$

- **Fonction Sigmoidale** : elle est définie par deux paramètres $\{a, c\}$

$$\mu_C(x) = \frac{1}{1+\exp(a(x-c))} \quad (\text{II.14})$$

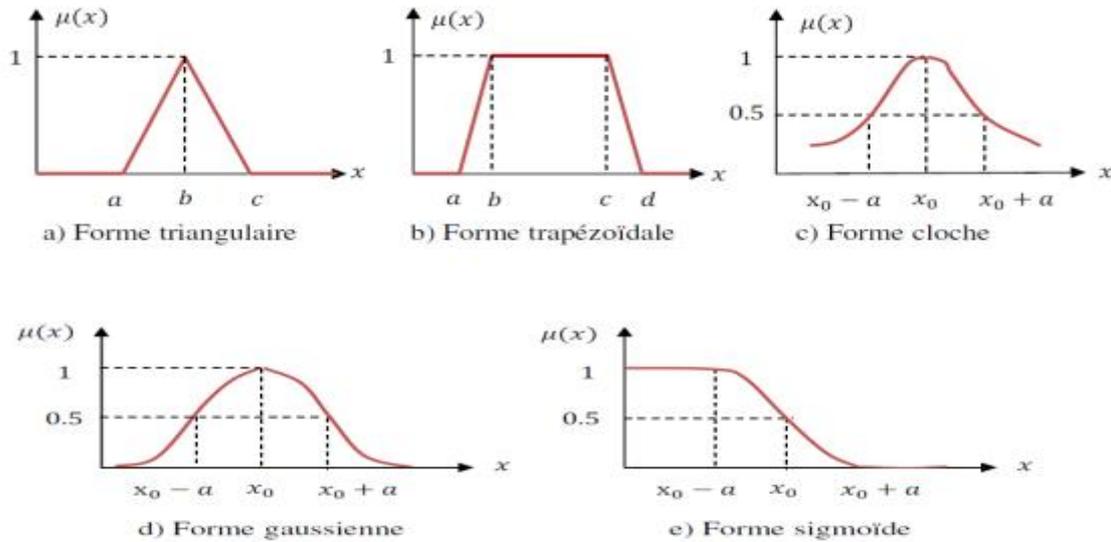


Figure II.17 : Formes usuelles des fonctions d'appartenance.

II.9.3 Opérateurs de la logique floue [16]

La description d'une situation où il Ya plus qu'une variable qui intervient, nécessite l'utilisation des opérateurs logique tels que : "ET", "OU», et "NON".

Dans la théorie de la logique floue l'opérateur "ET" correspond à l'opération "Minimum", "OU" à l'opération "Maximum", et "NON" au complément à un.

	Logique classique	Logique floue
$C=A \text{ ET } B$	$C=A \cap B$	$\mu_c(x) = \text{Min} (\mu_A(x), \mu_B(x))$
$C=A \text{ OU } B$	$C=A \cup B$	$\mu_c(x) = \text{Max} (\mu_A(x), \mu_B(x))$
$C = \text{NON } A$	$\bar{C} = \bar{A}$	$\mu_c(x) = 1 - \mu_A(x)$

Tableau II.1 : Application des opérateurs dans les deux ensembles

➤ **Opérateur ET (Intersection floue)**

Le sous-ensemble flou, correspondant à l'intersection des sous-ensembles E et F est défini par les éléments de l'univers de discours UD qui appartiennent à E et à F.

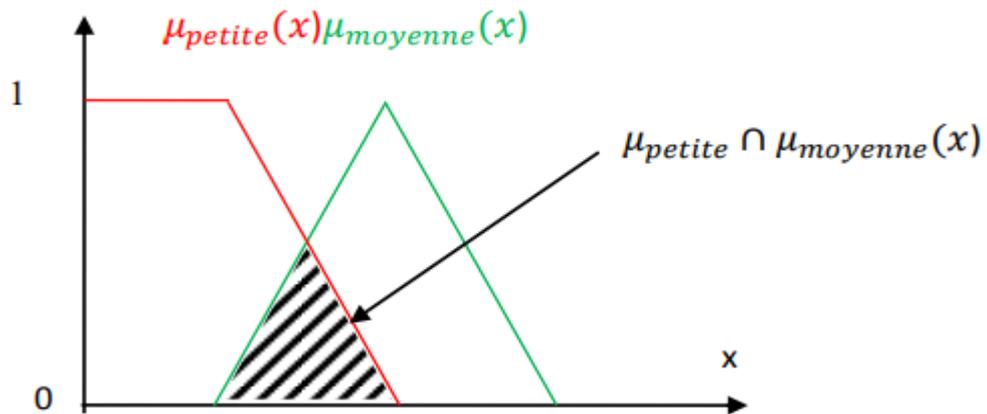
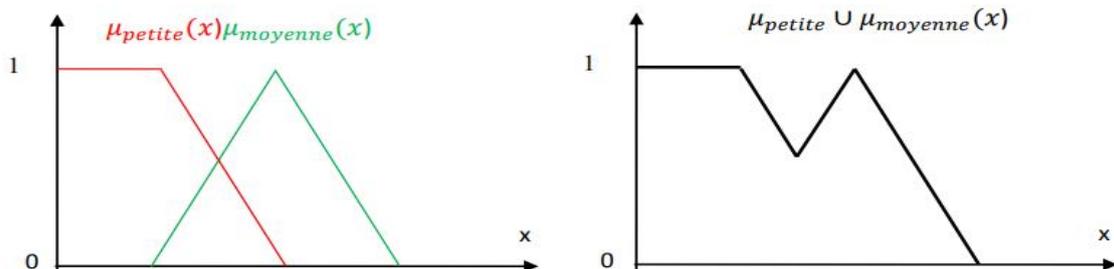


Figure II.18 : Intersection des sous-ensembles flous « petit » et « moyenne » pour la variable linguistique (Taille).

L'opérateur ET peut être exprimé par : $\mu_{E \cap F}(x) = \text{Min} \{ \mu_E(x), \mu_F(x) \} \forall x \in UD$

➤ **Opérateur OU (Union floue)**

L'opérateur OU est généralement réalisé par la formation du maximum, quel 'on exprime comme suit : $\mu_{E \cup F}(x) = \text{Max} \{ \mu_E(x), \mu_F(x) \} \forall x \in UD$



a) Partition floue de l'univers de discours

b) Ensemble flou : « TP ou TM »

Figure II.19 : Union des sous-ensembles flous « petit » et « moyenne » pour la variable linguistique (Taille).

➤ **Operateur NON (complémentation floue)**

Le sous-ensemble flou complémentaire du sous-ensemble E est un sous-ensemble de l'univers de discours UD défini par les éléments de l'UD qui n'appartiennent pas au sous-ensemble flou E. On peut exprimer ça par : $\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \forall x \in UD$

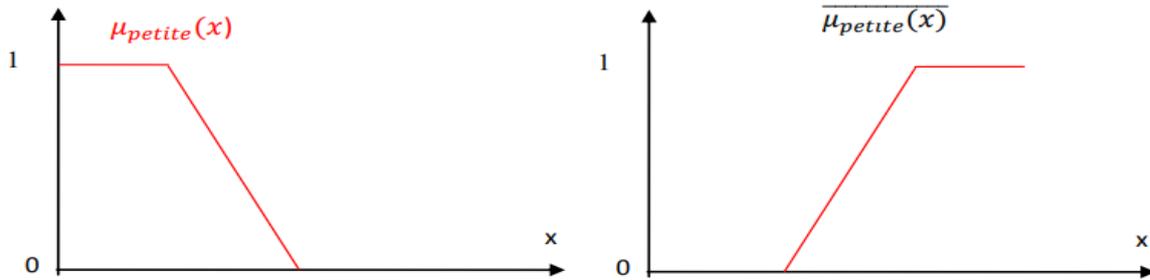


Figure II.20 : Complémentation de sous-ensemble flou « petite ».

II.9.4 Variable linguistique

La description d'une certaine situation imprécise ou incertaine peut contenir des expressions floues comme : très grand, grand, moyen, petit, ...etc. Ces expressions forment les valeurs d'une variable x, appelée "variable linguistique".

Une variable linguistique est caractérisée par un triplet (x, U, Tx) où x est une variable définie sur l'univers de discours U et $T_x = \{A_1, A_2, \dots\}$ est un ensemble composé de sous-ensembles flous de U qui caractérisent x. On associe souvent à chaque sous-ensemble flou de T_x une valeur ou un terme linguistique (étiquette).

La figure (III-2) illustre un exemple de la variable linguistique 'vitesse', l'univers de discours est un ensemble réel de l'intervalle [1000, 3000] et on attribue à cette variable trois sous-ensembles : petite, moyenne, grande. Chaque sous-ensemble est caractérisé par une fonction d'appartenance $\mu_{\text{petite}}(x)$, $\mu_{\text{moyenne}}(x)$, $\mu_{\text{grande}}(x)$ [15].

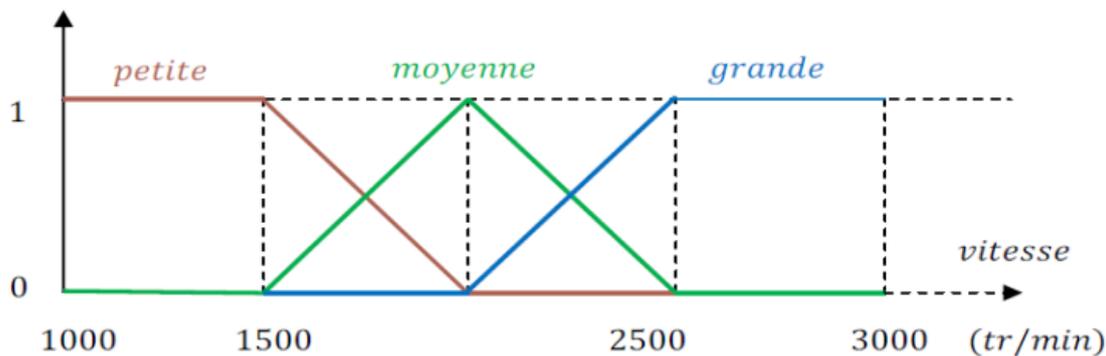


Figure II.21 : Exemple d'une variable linguistique 'vitesse'.

II.9.5 Structure d'une commande à logique floue

La commande floue est l'application la plus utilisée de la logique floue. Le contrôleur flou comporte essentiellement quatre parties ; un bloc de fuzzification, une base des règles, un mécanisme d'inférence et un bloc de défuzzification.

II.9.5.1 La fuzzification

La fuzzification est l'étape de conversion des données numériques en variables linguistiques à l'aide de fonctions d'appartenance, ce qui permet de traiter les informations de manière floue dans un système flou.

Pour **fuzzifier**, il faut donner :

- L'univers du discours.
- Une partition en classe floue de cet univers.
- Les fonctions d'appartenances de chacune de ces classes.

II.9.5.2 Base de règles :

Une règle floue peut être définie comme étant l'ensemble d'implications. Elle exprime le lien entre les variables linguistiques d'entrée et celles de la sortie. La forme typique d'une règle floue est :

Si <Conditions liées par des opérateurs flous> **Alors** <Action>

La première partie (conditions de la règle) teste la validité de certaines conditions, et la deuxième (conclusion de la règle) exprime la réaction souhaitée en fonction de la validité de la première partie.

On peut écrire les règles d'inférence sous forme d'une matrice appelée Matrice d'inférence. A titre d'exemple, si on considère un contrôleur flou à deux entrées (x et y) et une seule sortie (z), caractérisées par cinq ensembles flous {NG : Négatif Grand, NP : Négatif Petit, ZE : Zéro, PP : Positif Petit, PG : Positif Grand}. [15] :

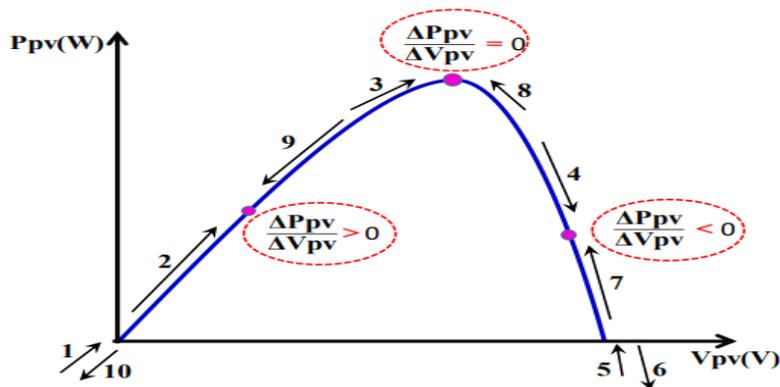


Figure III.22 : La variation du point de puissance maximal.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ΔP	+	+	0	-	-	+	+	0	-	-
ΔV	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-
$E = \Delta P / \Delta V$	+	+	0	-	-	-	-	0	+	+
ΔE	+	+	0	-	-	-	-	0	+	+
D	PG	PP	ZE	NP	NG	PG	PP	ZE	NP	NG

Tableau II.2 : Les règles du contrôleur flou.

II.9.5.3 Inférence floue

L'inférence est une étape qui relie le signal de sortie aux signaux d'entrée par des conditions linguistiques, on utilise en général l'une des trois méthodes suivantes :

- Méthode d'inférence Max-Min (Méthode de Mamdani)
- Méthode d'inférence Max-Produit (Méthode de Larsen)
- Méthode d'inférence Somme-Produit (Sugeno)

II.9.5.4 Défuzzification

Les ensembles flous de sortie sont agrégés et convertis en une valeur numérique précise pour obtenir une réponse claire. Différentes méthodes de défuzzification peuvent être utilisées, telles que la moyenne pondérée, le centre de gravité ou la méthode du maximum.

La (Figure III.30) donne un aperçu sur le fonctionnement la technique MPPT basée sur le contrôleur flou.

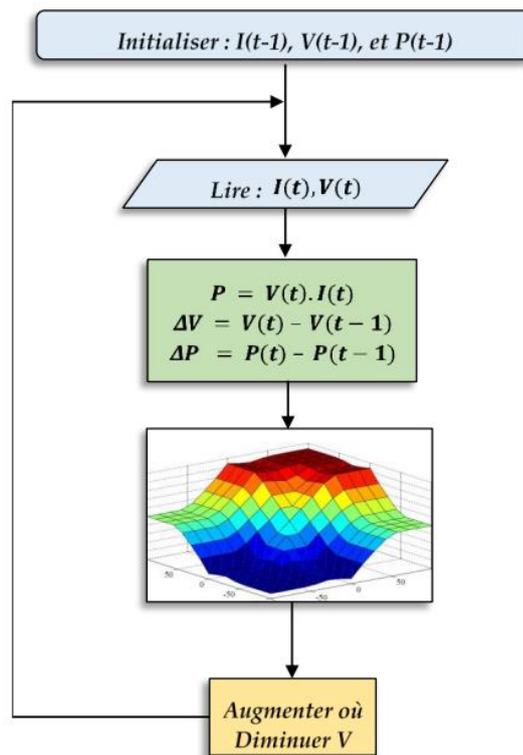


Figure III.23 : la technique MPPT basée sur le contrôleur flou.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents convertisseurs DC-DC ainsi que leurs caractéristiques électriques, En suite nous avons étudié la commande MPPT avec deux méthodes : une méthode classique (Perturbation et Observation - P&O) et une méthode intelligente basée sur la logique floue (Fuzzy Logic Control - FLC).

Chapitre III :
Description du système
photovoltaïque adopté.

Introduction

Les générateurs photovoltaïques sont sensibles aux variations des conditions environnementales, telles que l'intensité lumineuse, la température et les ombres, ce qui entraîne des fluctuations dans leurs caractéristiques courant-tension et leur puissance maximale. Pour tirer le meilleur parti de ces générateurs PV, il est nécessaire d'utiliser un convertisseur DC-DC et un contrôleur de poursuite du point de puissance maximale (MPPT).

Le convertisseur BOOST est un type de convertisseur DC-DC utilisé dans les systèmes PV pour augmenter la tension de sortie des panneaux solaires afin de s'adapter aux besoins du système de stockage ou du réseau électrique.

les techniques MPPT P&O et floue sont couramment utilisées dans les systèmes PV pour maximiser la production d'énergie en suivant le point de puissance maximale (MPP).

III.1 Présentation du panneau photovoltaïque étudié

Les paramètres du panneau de type ARRAY sont donnés par la figure suivant :

PV array (mask) (link)
Implements a PV array built of strings of PV modules connected in parallel. Each string consists of modules connected in series.
Allows modeling of a variety of preset PV modules available from NREL System Advisor Model (Jan. 2014) as well as user-defined PV module.
Input 1 = Sun irradiance, in W/m2, and input 2 = Cell temperature, in deg.C.

Parameters **Advanced**

Array data

Parallel strings

Series-connected modules per string

Module data

Module: **User-defined**

Maximum Power (W) Cells per module (Ncell)

Open circuit voltage Voc (V) Short-circuit current Isc (A)

Voltage at maximum power point Vmp (V) Current at maximum power point Imp (A)

Temperature coefficient of Voc (%/deg.C) Temperature coefficient of Isc (%/deg.C)

Display I-V and P-V characteristics of ...
array @ 25 deg.C & specified irradiances
Irradiances (W/m2) [1000 800 500 300]
Plot

Model parameters

Light-generated current IL (A)

Diode saturation current I0 (A)

Diode ideality factor

Shunt resistance Rsh (ohms)

Series resistance Rs (ohms)

Figure III.1 : Paramètres du panneau PV.

III.1.1 Caractéristiques I(V) et P(V) du panneau étudié :

Pour l'analyse du fonctionnement du panneau PV choisi, en se basant sur le modèle étudié, une série de simulation ainsi que les résultats obtenus sont présentés sur les figures suivantes.

Les figures (III.2, III.3) Présentent les résultats obtenus par la simulation des caractéristiques courant-tension I(V) et puissance-tension P(V) du panneau photovoltaïque dans des conditions standard ($T = 25^{\circ}\text{C}$, $E = 1000\text{W}/\text{m}^2$).

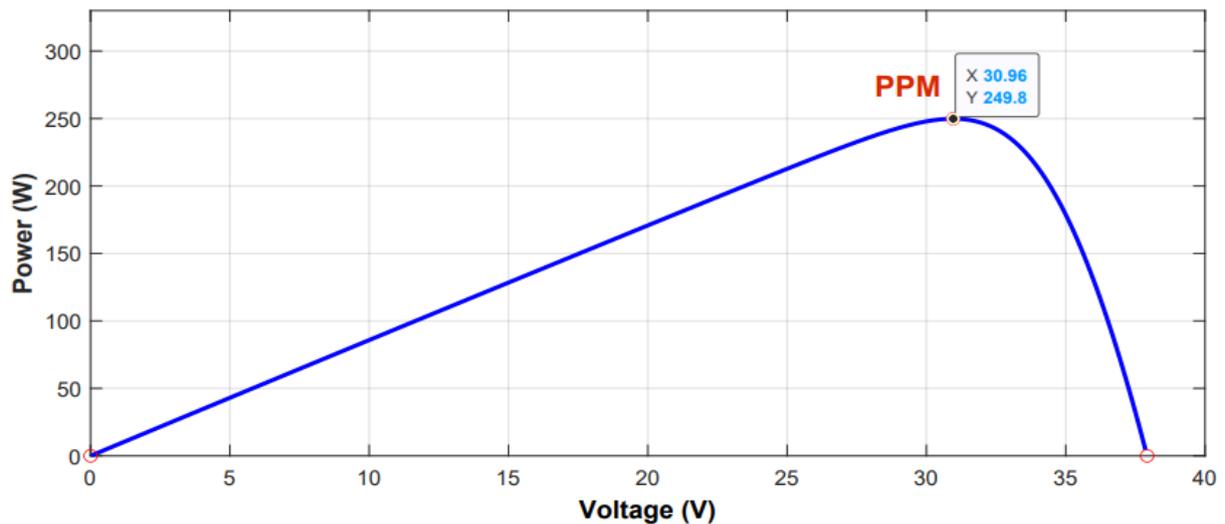


Figure III.2 : caractéristique puissance-tension du panneau.

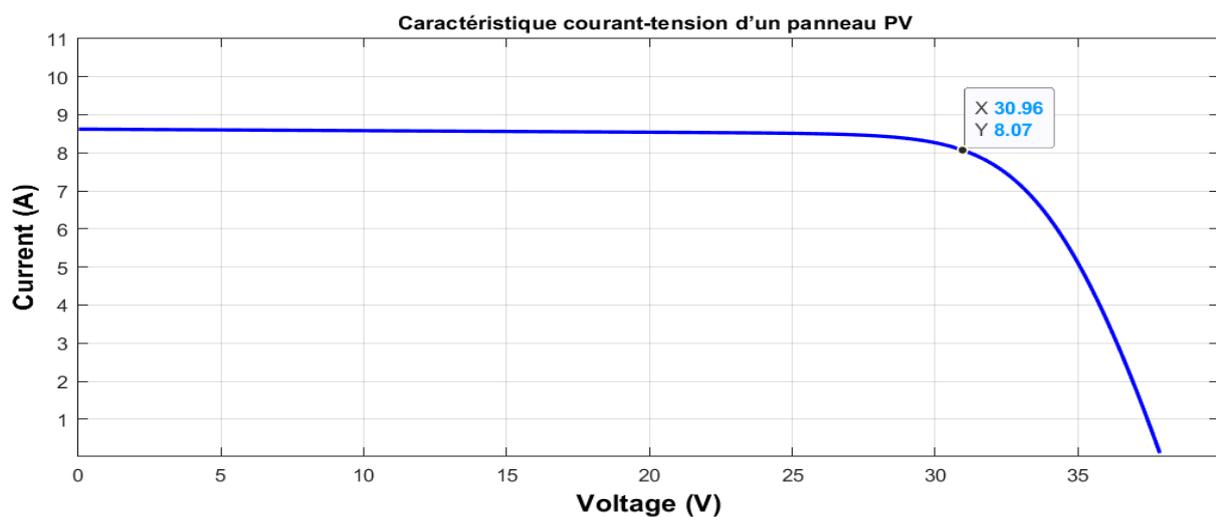


Figure III.3 : caractéristique courant-tension du panneau.

On observe que pour le bon fonctionnement de panneau PV le courant doit Atteindre $I \approx 8A$ et la tension $V \approx 31V$ ce qui donne une puissance maximale de $P \approx 250W$.

Donc le point de fonctionnement maximal (MPP) correspondant à une puissance atteindre les 250W. C'est au voisinage de ce point qu'il faut chercher à maintenir le fonctionnement du panneau PV.

III.1.2 Effet de la température et de l'éclairement sur les courbes I(V) et P(V) :

➤ Influence de l'éclairement

On a considéré une température constante de 25 °C et un ensoleillement variable. Le résultat donnant la variation de puissance et du courant en fonction de la tension est représenté sur les figures suivantes :

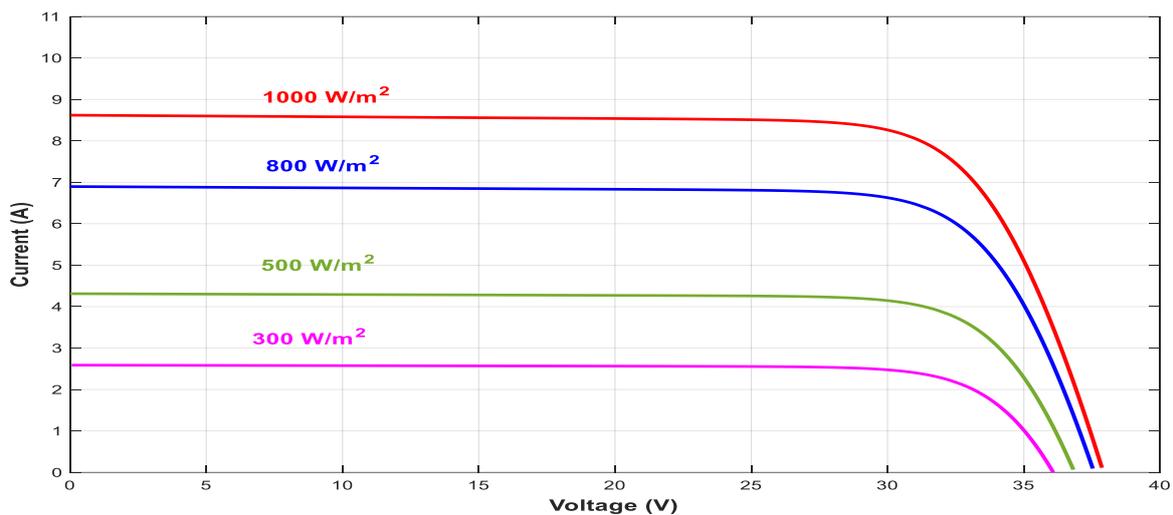


Figure III.4 : Influence de l'éclairement sur les Caractéristiques I(V).

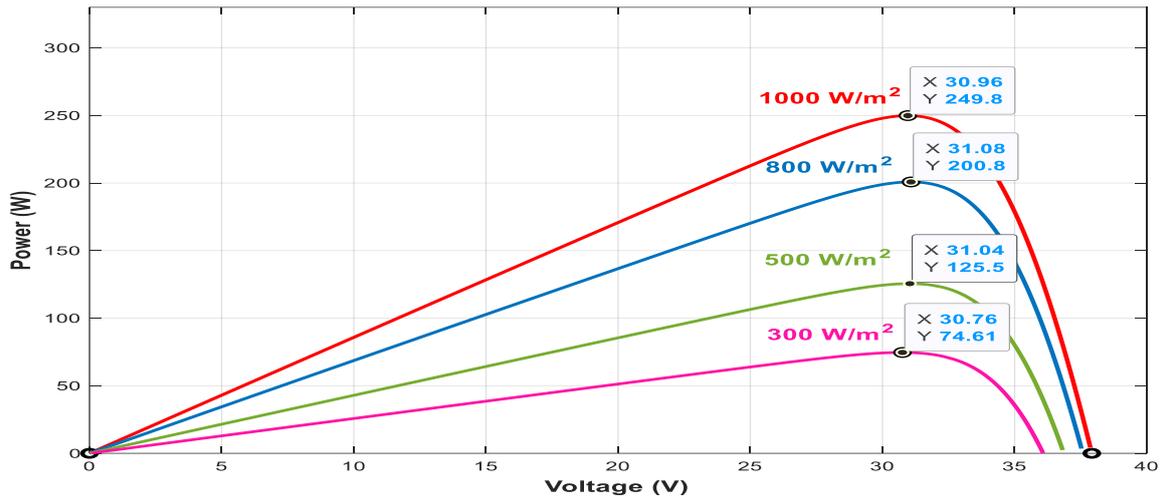


Figure III.5 : Influence de l'éclairement sur les Caractéristiques P(V).

On remarque que la tension du circuit ouvert (V_{oc}) rester relativement stable, avec peu de variation lorsqu'on fait varier l'éclairement, tandis que le courant de court-circuit (I_{sc}) augmente avec l'augmentation de l'éclairement ce qui engendre une augmentation de la puissance photovoltaïque car La puissance photovoltaïque (P) est calculée en multipliant la tension (V) par le courant (I) de sortie du panneau solaire. $P = V * I$.

➤ **Influence de de la température**

On considère un éclairement constant de $1000W/m^2$ avec une température variable ($0^\circ C$, $15^\circ C$, $30^\circ C$, $50^\circ C$), Les résultats de simulation sont donnés dans les figures ci-dessous.

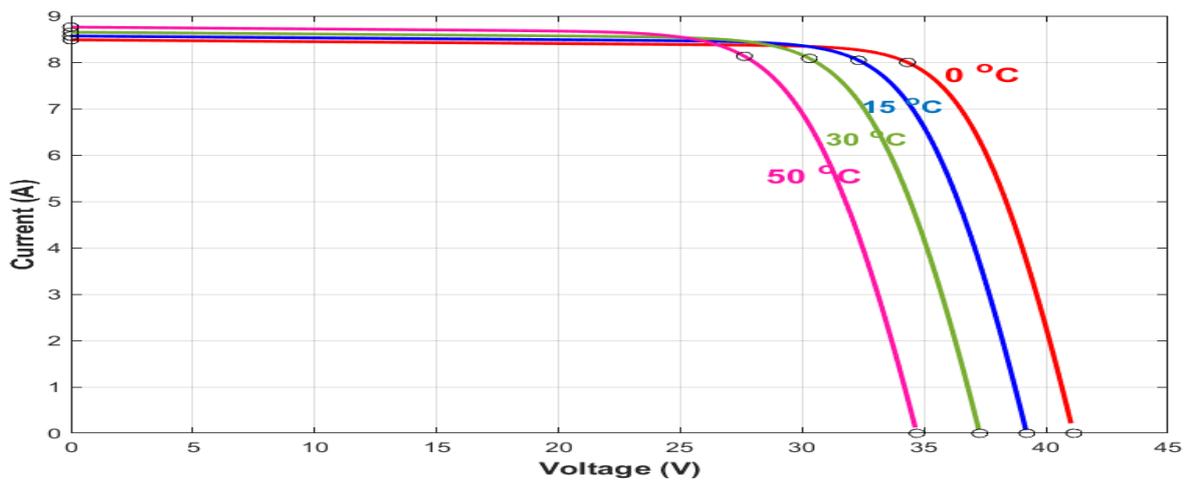


Figure III.6 : Influence de la température sur les Caractéristiques I(V).

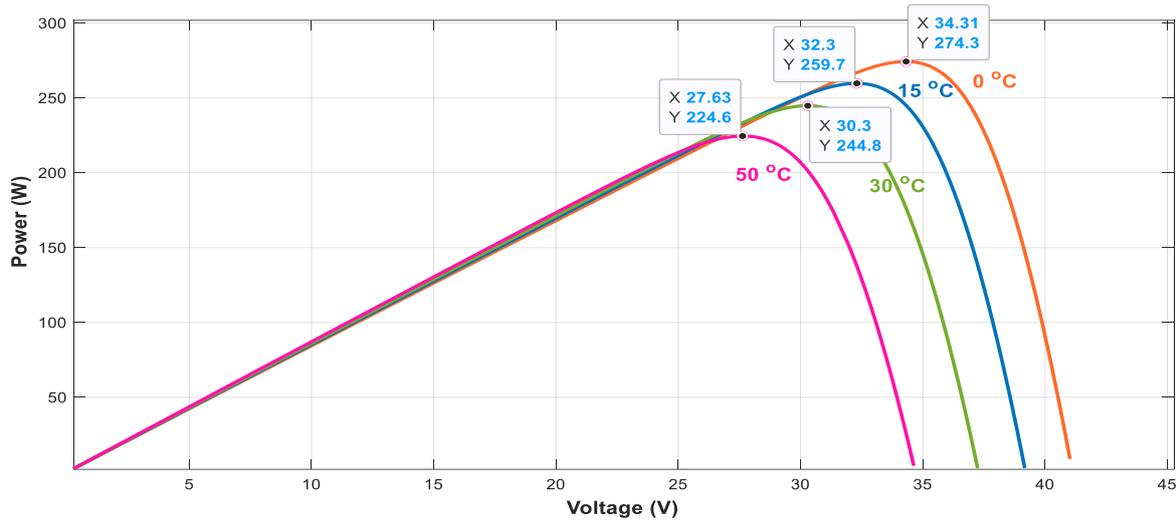


Figure III.7 : Influence de la température sur les Caractéristiques P(V).

On remarque que le courant de court-circuit (I_{sc}) a tendance à rester peu sensible à la variation de la température, Tandis que la tension du circuit ouvert (V_{oc}) diminue avec l'augmentation de la température.

Cette diminution de la tension entraîne une diminution de la puissance photovoltaïque.

III.2 Choix du convertisseur

La tension délivrée par les panneaux d'un système PV est continue et de faible amplitude. Pour l'élever à une valeur supérieure on utilise un convertisseur appelé hacheur de type élévateur ou BOOST. Le convertisseur BOOST permet d'augmenter la tension de sortie du panneau solaire, tout en réduisant le courant, afin d'optimiser la puissance de sortie.

III.2.1 Simulation de convertisseur BOOST

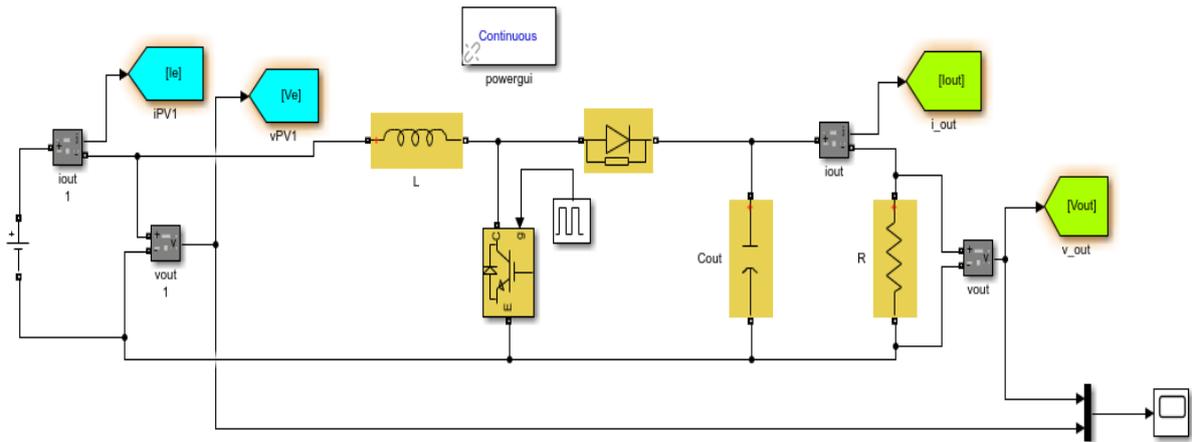


Figure III.8 : schéma bloc de ce convertisseur sous MATLAB/Simulink.

- les paramètres de convertisseur BOOST :

$$V_e = 24V, \quad L = 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ H}, \quad R = 80\Omega, \quad C = 150 \cdot 10^{-6} \text{ F}.$$

- le rapport cyclique fixé **D=0.6**

Les résultats de simulation du convertisseur survolteur représentent par (la figure III.8)

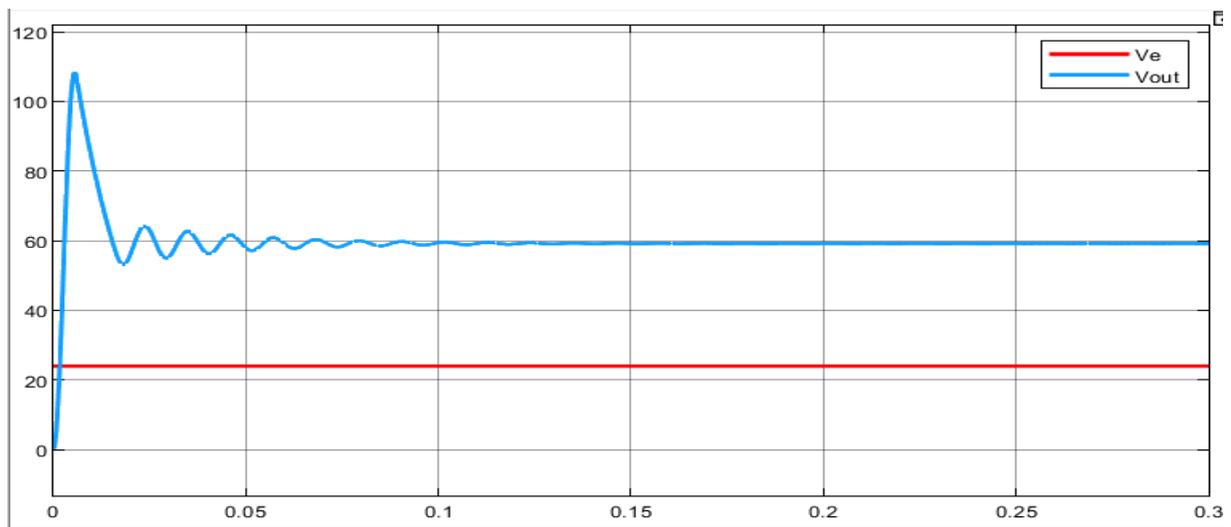


Figure III.9 : la tension d'entrée et de sortie du convertisseur BOOST.

Pour une tension d'entrée $V_e = 24V$ la tension de sortie est presque égale à $60V$, avec les chutes de tension au niveau du BOOST tel que $V_s \cong 60V$ se qui vérifie l'équation

$$Vs = \frac{1}{1-\alpha} \cdot Ve \quad (\text{III.1})$$

Ces résultats montrent que la tension de sortie du convertisseur BOOST est supérieure à celle d'entrée. Donc le convertisseur BOOST effectue correctement son rôle.

III.3 Modélisation de Commande MPPT

Dans ce mémoire, nous choisirons deux méthodes pour évaluer les performances de notre panneau PV. Une méthode MPPT classique (Perturbation & Observation (P&O)) Et une méthode MPPT intelligente (Contrôleur par la logique floue FLC).

Les détails de chaque méthode sont donnés dans le Chapitre II, Dans ce chapitre, nous verrons les programmes pour chaque méthode que nous utiliserons dans la simulation.

III.3.1 Programme de l'algorithme perturbation et observation :

Cet algorithme de commande MPPT utilise les variations de tension (ΔV) et de puissance (ΔP) pour ajuster le rapport cyclique du convertisseur. Une variation positive de la tension est obtenue en diminuant le rapport cyclique, tandis qu'une variation négative de la tension est obtenue en augmentant le rapport cyclique. L'objectif est de trouver le PPM où la puissance est maximale.

```

function D = PO(Vpv, Ipv)
    Dmax=0.9;
    Dmin=0.2;
    Dinit=0.7;
    deltaD=1e-4;
    persistent Dpre Ppre Vpre;

    if isempty(Dpre)
        Dpre=Dinit;
        Vpre=0;
        Ppre=0;
    end
    Ppv=Vpv*Ipv;
    dp=Ppv-Ppre;
    dv=Vpv-Vpre;

    if dp~=0
        if (dp>0)
            if (dv<0)
                D=Dpre+deltaD;
            else
                D=Dpre-deltaD;
            end
        else
            if (dv<0)
                D=Dpre-deltaD;
            else
                D=Dpre+deltaD;
            end
        end
    else
        D=Dpre;
    end

    if D>=Dmax || D <= Dmin
        D=Dpre;
    end
end
    
```

Figure III.10 : le programme P&O sous script MATLAB.

➤ Analyse de Programme de l’algorithme P&O

-Les valeurs limites pour le rapport cyclique, **Dmax** et **Dmin**, ainsi que la valeur initiale **Dinit** et le pas de variation **deltaD**.

-Les variables (Dpre, Ppre, Vpre) pour stocker les valeurs précédentes du rapport cyclique, de la puissance précédente et de la tension précédente.

1-La tension **Vpv** et le courant **Ipv** électrique sont mesurés à la sortie du panneau PV, ensuite on calcule la puissance **Ppv** à partir de la formule mathématique

$$P_{pv} = V_{pv} \times I_{pv}$$

2- Calcule les différences entre la puissance actuelle (P_{pv}) et la puissance précédente (P_{pre}), ainsi que la tension actuelle (V_{pv}) et la tension précédente (V_{pre})

3- Pour déterminer si la puissance a augmenté ou diminué par rapport à la dernière mesure, en utilisant les différences Δp et Δv .

- Si Δp est différent de zéro, cela signifie que la puissance a changé.

- Si $\Delta p > 0$, cela signifie que la puissance a augmenté. En fonction de Δv ,

$$\begin{cases} \Delta V < 0 \Rightarrow D = D_{pre} + \Delta D \\ \Delta V > 0 \Rightarrow D = D_{pre} - \Delta D \end{cases}$$

- Si $\Delta p < 0$, cela signifie que la puissance a diminué. En fonction de Δv ,

$$\begin{cases} \Delta V < 0 \Rightarrow D = D_{pre} - \Delta D \\ \Delta V > 0 \Rightarrow D = D_{pre} + \Delta D \end{cases}$$

- Si Δp est égal à zéro, cela signifie que la puissance n'a pas changé, vous conservez donc la valeur précédente du rapport cyclique D_{pre} .

$$D = D_{pre}$$

4- vérification Si la valeur du rapport cyclique D est en dehors des limites D_{max} et D_{min} alors $D = D_{pre}$

5- La mise à jour des valeurs précédentes P_{pre} , V_{pre} et D_{pre} avec les valeurs actuelles P_{pv} , V_{pv} et D .

6- La fonction retourne la valeur finale du rapport cyclique D .

III.3.2 Application du contrôleur flou pour la commande MPPT

Dans le premier type de la commande MPPT flou les entrées du contrôleur sont :

- la variation de la puissance par rapport à la tension nommée l'erreur E .

$$E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \quad (\text{III.1})$$

- la variation ΔE qui représente le sens et la vitesse de convergence

$$CE(k) = E(k) - E(k-1) \dots\dots\dots (\text{III.2})$$

En sortie ΔD qui est la variation du rapport cyclique du convertisseur DC/DC.

III.3.2.1 Le 1 er cas avec 3 sous-ensembles flous

- Univers de discours des variables du contrôleur

Après une série de tests et en se basant sur la caractéristique $P_{pv} - V_{pv}$ du panneau photovoltaïque, nous avons opté pour les univers de discours suivants :

- L'intervalle de variation $[-8, 8]$ pour la variable d'entrée E ,
- L'intervalle de variation $[-8, 8]$ pour la variable d'entrée CE ,
- L'intervalle de variation $[-1, 1]$ pour la variable de sortie D .

➤ Fuzzification

Chaque variable du contrôleur est définie par trois (3) fonctions d'appartenance. Nous utilisons des fonctions de triangulaires et trapézoïdales aux extrémités des univers de discours pour les variables d'entrée (E et DE) et de sortie (D). Les termes linguistiques associés aux fonctions d'appartenance sont : P (positif), Z (Zéro), N (négatif).

La figure (III.9) donne respectivement les fonctions d'appartenance associées aux variables E , DE et D .

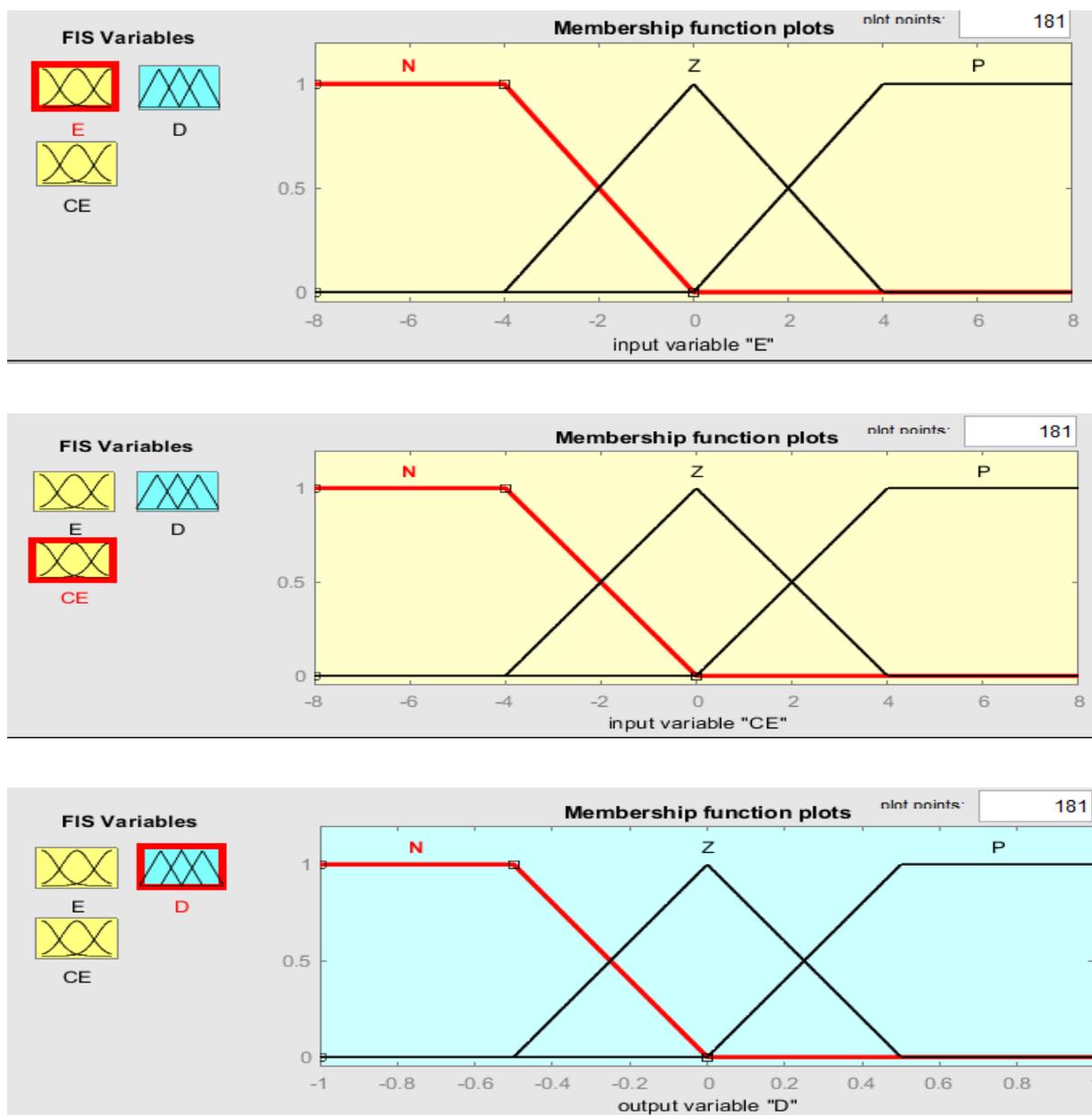


Figure III.11 : les fonctions d'appartenance pour chaque changement de l'entrée et sortie.

➤ **Inférence floue et règles linguistiques**

C'est la méthode d'inférence de Mamdani qui a été utilisée pour le traitement des règles floues. Elle consiste à modéliser l'opérateur MIN pour le ET flou et l'opérateur MAX pour le OU flou

Changement de rapporte cycle D		CE		
		N	Z	P
E	N	P	P	Z
	Z	P	Z	N
	P	Z	N	N

Tableau III.1 : Tableau des règles d'inférence pour le 1^{er} cas.

➤ **Défuzzification**

La sortie du contrôleur MPPT flou est le changement du rapport cyclique. Le processus de Défuzzification convertit la valeur linguistique de la sortie en une valeur réelle, il existe plusieurs méthodes de Défuzzification, l'une de ces méthodes les plus utilisées est la méthode de centre de gravité qui consiste à faire la moyenne des valeurs du référentiel pondérées par leurs degrés d'appartenance.

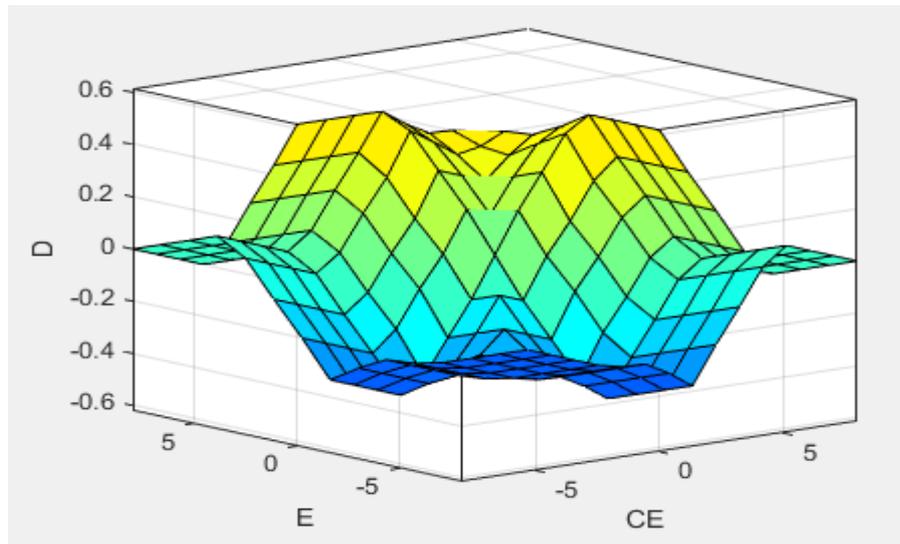


Figure III.12 : Surface de la variation des fonctions d'appartenance.

III.3.2.2 Le 2^{ème} cas avec 5 sous-ensembles flous

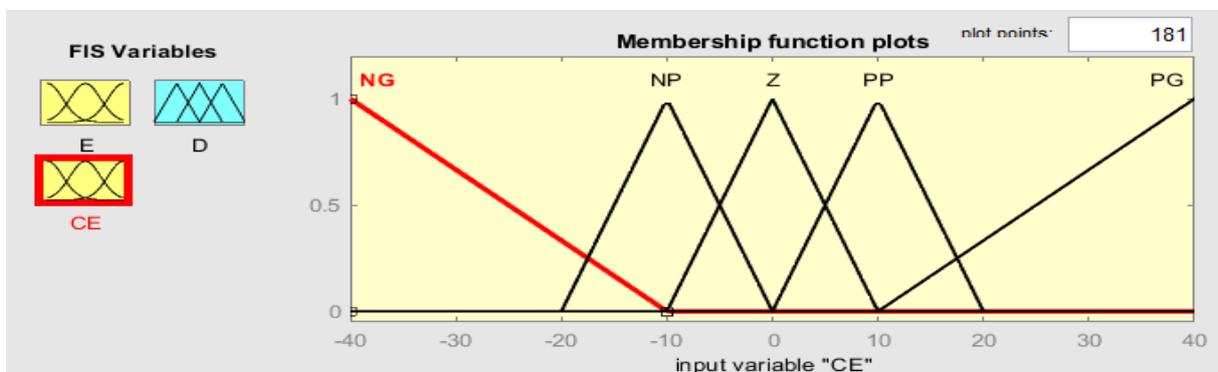
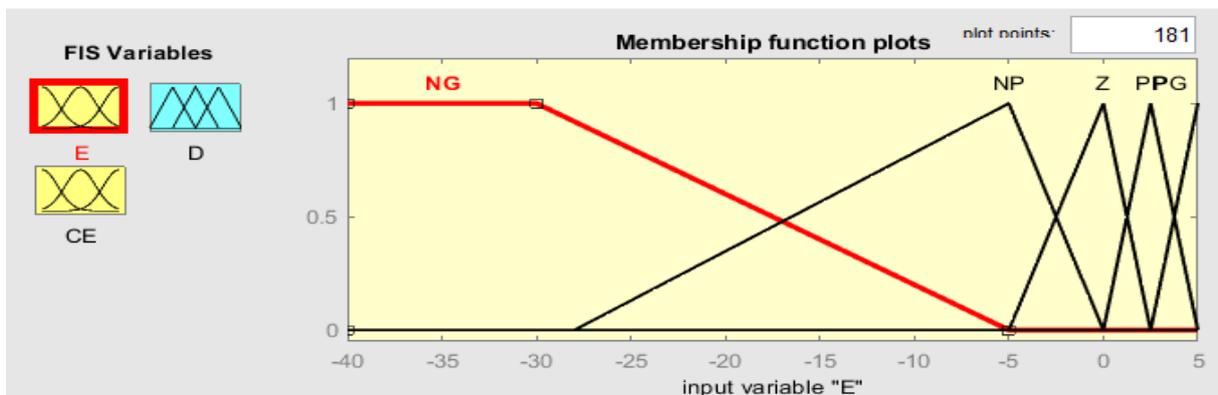
➤ Univers de discours des variables du contrôleur

Après une série de tests et en se basant sur la caractéristique $P_{pv} - V_{pv}$ du panneau photovoltaïque, nous avons opté pour les univers de discours suivants :

- L'intervalle de variation $[-40, 5]$ pour la variable d'entrée E ,
- L'intervalle de variation $[-40, 40]$ pour la variable d'entrée CE ,
- L'intervalle de variation $[-1, 1]$ pour la variable de sortie D .

➤ Fuzzification

En utilisant les bases des sous-ensembles flous, on peut exprimer les variables d'entrées et de sorties en terme des variables linguistiques suivantes : PG : (positif grand), PP : (positif petit), ZE : (environ Zéro), NP : (négatif petit) et NG : (négatif grand).



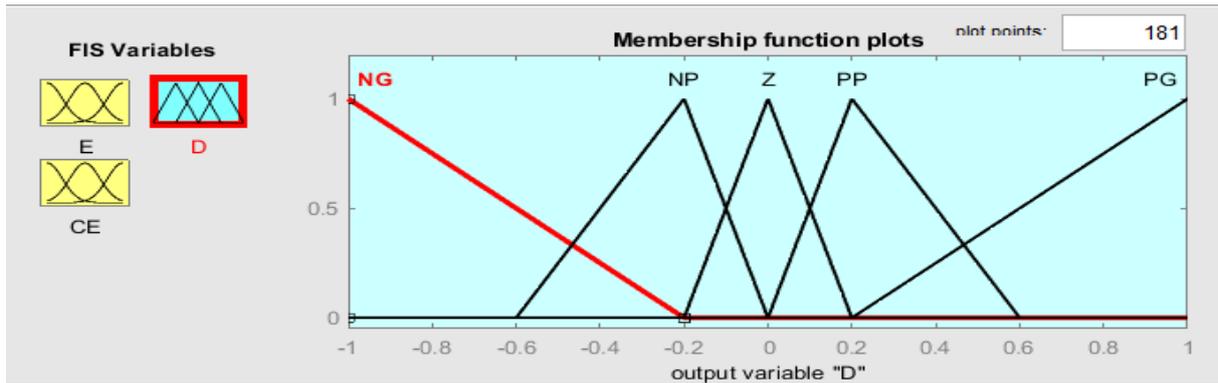


Figure III.13 : Fonctions d'appartenances de : L'entrée erreur E, L'entrée changement d'erreur CE et La sortie D.

➤ **Inférence floue et règles linguistiques**

Le tableau ci-dessous montre les règles choisies, pour la mise en œuvre de notre système de poursuite du point maximal de puissance d'un générateur PV, ces règles sont fixées après plus essai plus ou moins réussi.

Changement de rapporte cycle D		E				
		NG	NP	Z	PP	PG
CE	NG	PG	PG	NP	NG	NG
	NP	PG	PP	NP	NP	NG
	Z	PP	PP	Z	NP	NP
	PP	PG	PP	PP	NP	NG
	PG	PG	PG	PP	NG	NG

Tableau III.2 : Tableau des règles d'inférence pour le 2^{ème} cas.

Le Tableau III.2 inclut 25 règles floues de commande. Ces règles sont employées pour la commande de convertisseur BOOST tels que la puissance maximum du panneau solaire est vérifiée.

Par exemple :

- la case (4, 2) du Tableau III.2 représente la règle de commande :

SI E est PP et CE est NP alors D est NP.

- la case (3, 3) du Tableau III.2 représente la règle de commande :

SI E est Z et CE est Z alors D est Z.

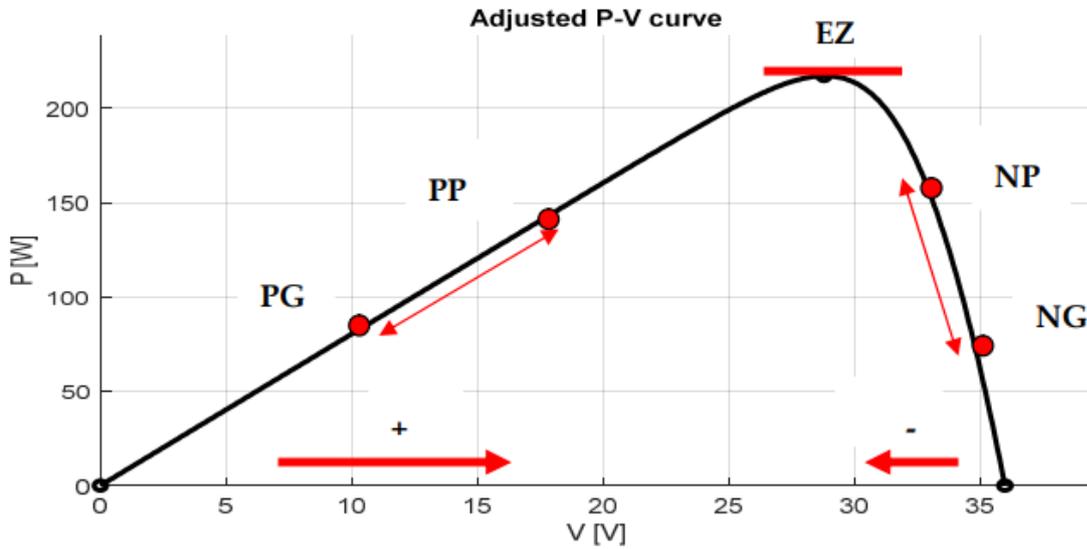


Figure III.14 : Principe de MPPT floue

➤ Défuzzification

C'est une étape vers laquelle on attribue pour D des valeurs numériques.

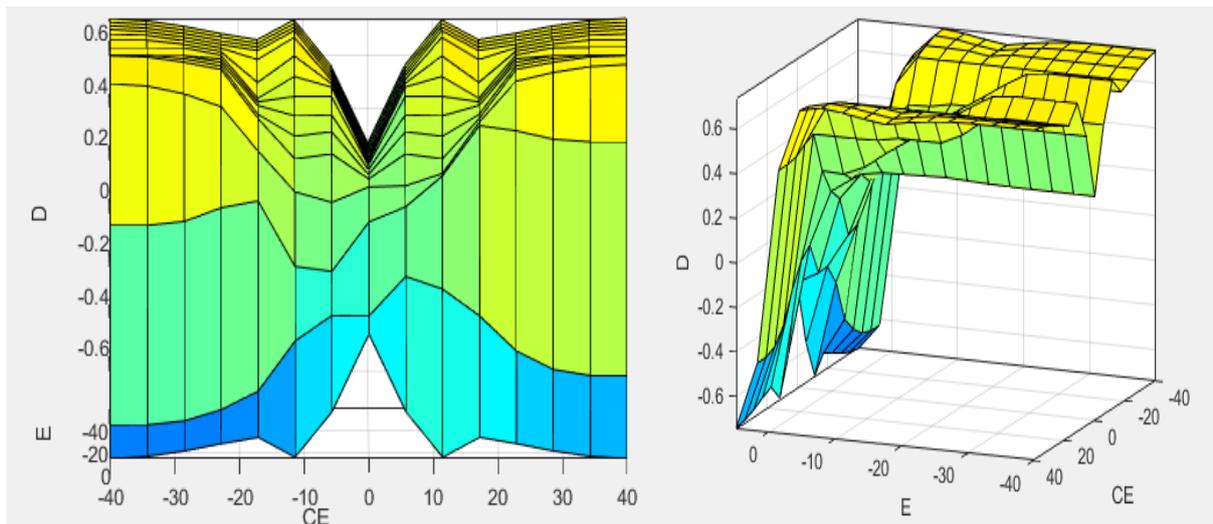


Figure III.15 : Surface de la variation des fonctions d'appartenance.

III.3.3 Représentation de schéma block avec la logique floue

La figure III.31 représente le schéma block MATLAB/Simulink de l'algorithme à base de logique floue qu'on a réalisé.

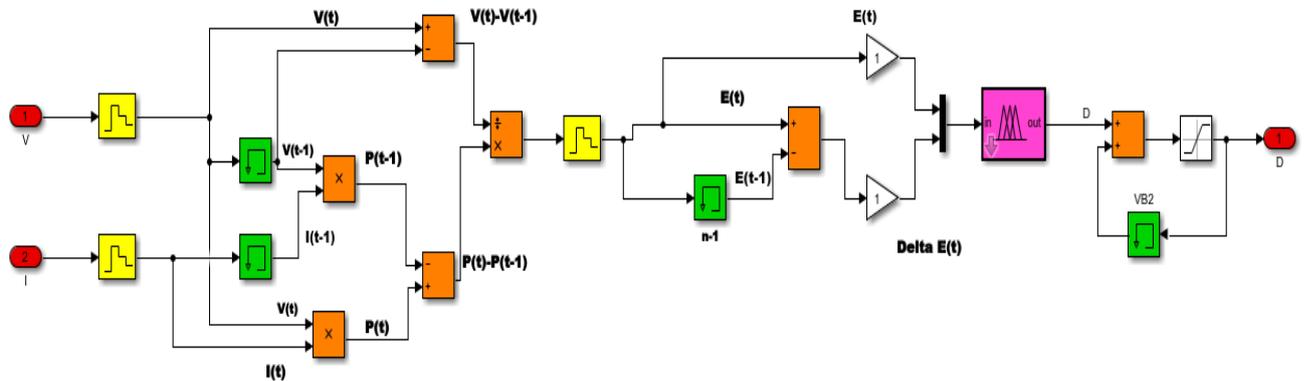


Figure III.16 : Modèle 'SIMULINK' du contrôleur MPPT flou.

Conclusion

La poursuite du point de puissance maximale dans les systèmes PV fait jusqu'à nos jours l'objet de plusieurs recherches. Plusieurs méthodes MPPT ont été trouvées dans la littérature et la plus utilisée est la méthode de type P&O. De même pour les convertisseurs statiques, il existe plusieurs structures comme cité dans le chapitre II.

Dans ce chapitre, nous avons intéressé au convertisseur BOOST et la commande MPPT par la logique floue. Les résultats de simulation sous MATLAB/SIMULINK sont présentés dans le prochain chapitre.

Chapitre IV :

Interprétation des résultats

de simulation

Introduction

En utilisant la simulation, nous pouvons implémenter différentes stratégies de commande MPPT et évaluer leur efficacité dans différentes conditions. Nous pouvons comparer les performances de différentes méthodes et sélectionner celle qui offre les meilleurs résultats pour notre système.

Dans ce chapitre nous allons évaluer les deux méthodes de poursuite MPPT que nous avons introduit, notre propre méthode de poursuite utilisant le contrôleur flou et la méthode P&O. Les deux systèmes sont simulés en les combinant avec le convertisseur DC/DC (BOOST), Les simulations seront réalisées dans des conditions environnementales stables et variables (changement de l'ensoleillement et de température).

IV.1 Description du système photovoltaïque global

La Figure IV.1 montre le schéma bloc sous Simulink du système photovoltaïque général, ce dernier se compose des éléments suivants déjà décrit dans les chapitre précédent, c.-à-d. le GPV (panneau PV de type ARRAY), le Convertisseur BOOST et le bloc qui contient le contrôleur MPPT (P&O et FLC) qui permet de maximiser la puissance générée par le panneau.

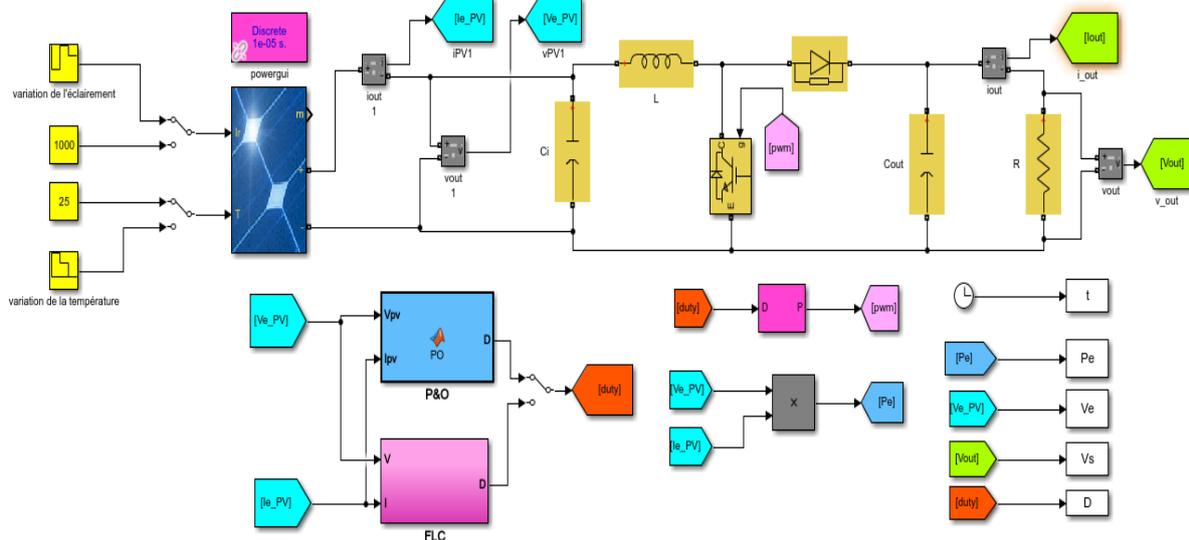


Figure IV.1 : Schéma bloc du système PV avec MPPT Floue et P&O.

L'étude des performances de la commande MPPT est basée sur une comparaison entre deux méthodes MPPT différentes : Perturbation et Observation (P&O) et Commande par la logique floue (FLC).

L'étude des performances de ces deux méthodes MPPT permettra de comparer leur efficacité en termes de précision de suivi du PPM, de stabilité, de temps de réponse et de capacité à s'adapter aux variations des conditions atmosphériques (changement de l'ensoleillement et de température). Ces résultats aideront à choisir la méthode MPPT la plus appropriée en fonction des besoins spécifiques de l'application du GPV.

IV.2 Résultats de simulation de la méthode P&O

IV.2.1 Simulation sous des conditions climatiques stables

Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT de type « P&O » sous des conditions atmosphériques fixes (un éclairement 1000W/m^2 et une température de 25°C) sont représentés par les figures ci-dessous.

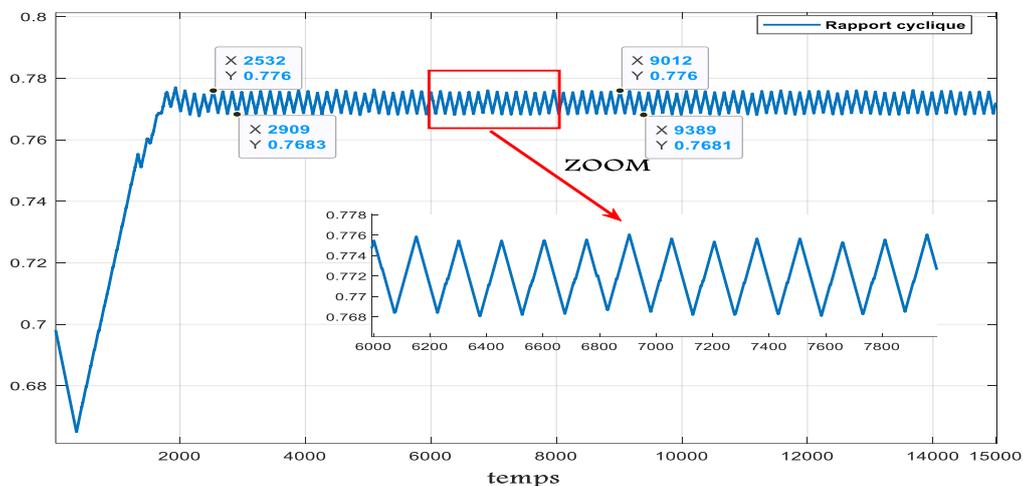


Figure IV.2 : Courbe de rapport cyclique D du GPV (P&O).

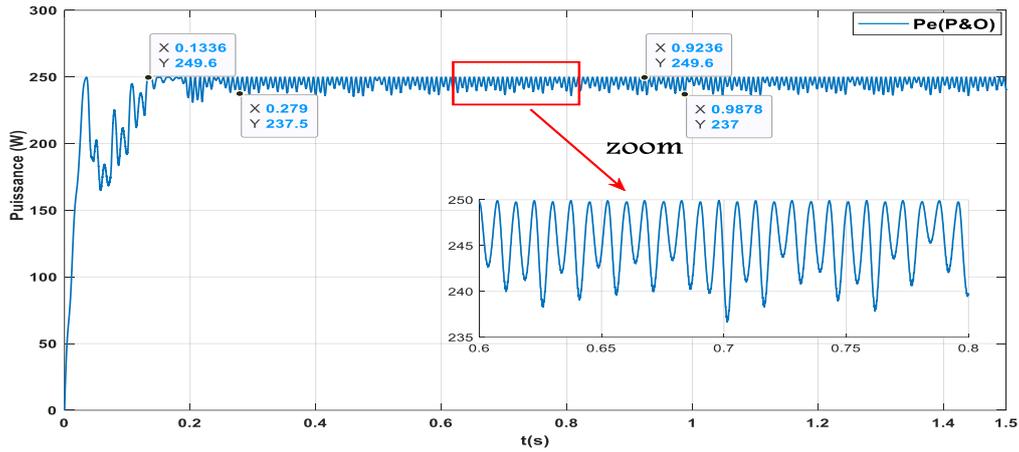


Figure IV.3 : Puissance aux bornes du GPV(P&O).

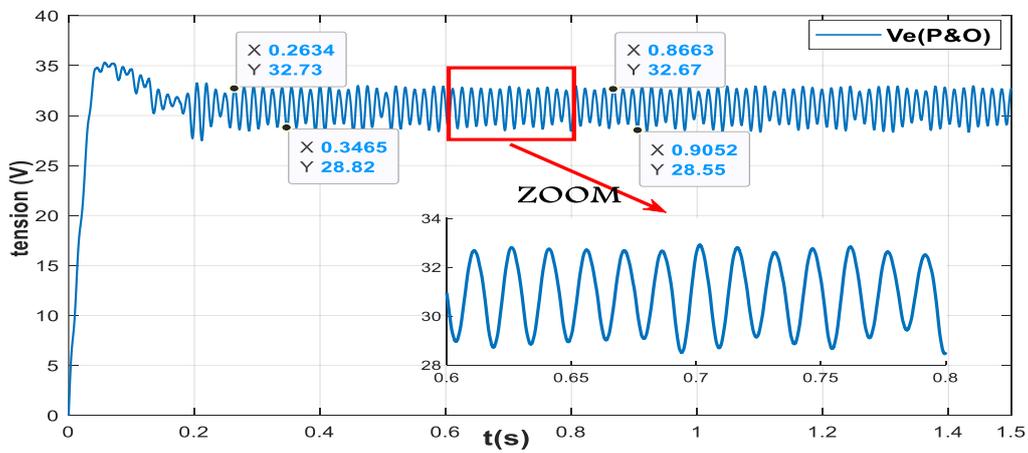


Figure IV.4 : Tension aux bornes du GPV (P&O).

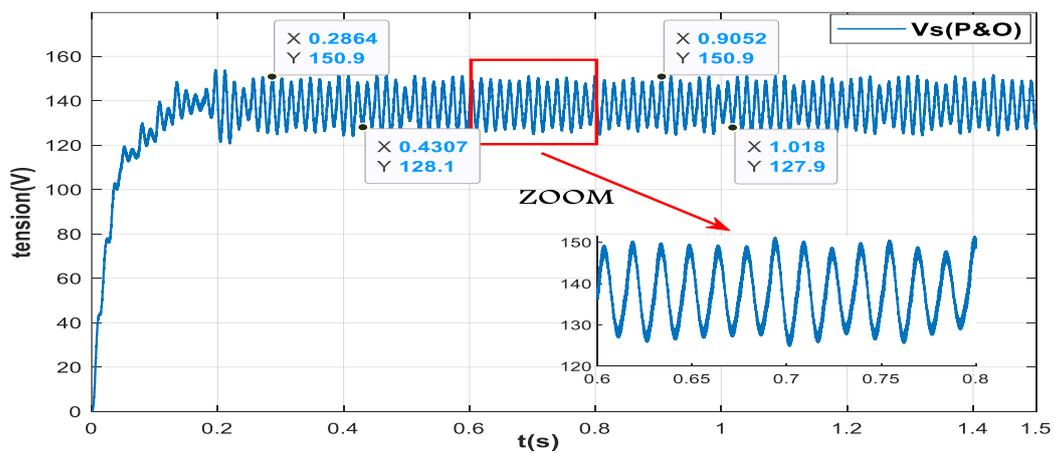


Figure IV.5 : Tension de sortie du système (P&O).

IV.2.2 Fonctionnement sous un éclairage variable

Le fonctionnement du système étudié sous une température fixe à 25°C et un éclairage variable (500W /m², 1000W /m², 800W/m²).

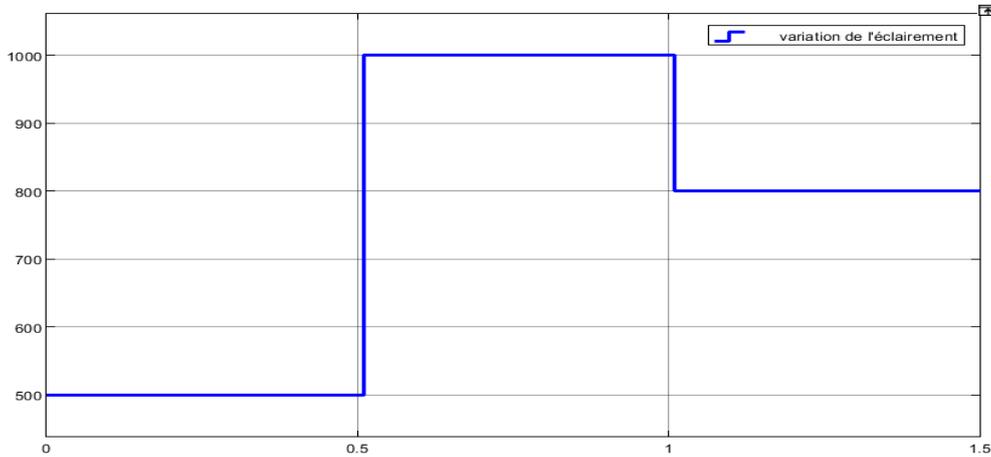


Figure IV.6 : Profile d'un éclairage injecté dans le générateur photovoltaïque.

➤ Les résultats de simulation :

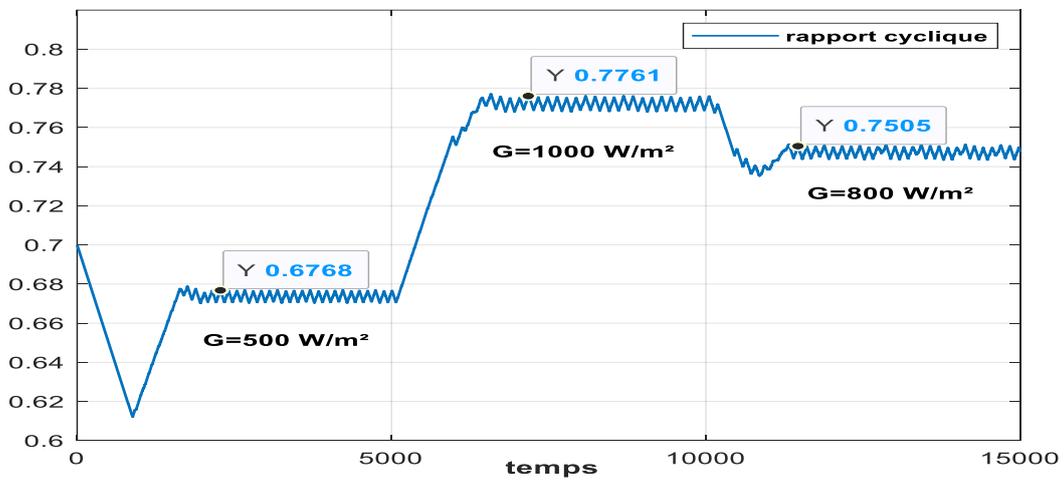


Figure IV.7 : Courbe de rapport cyclique D du GPV(P&O).

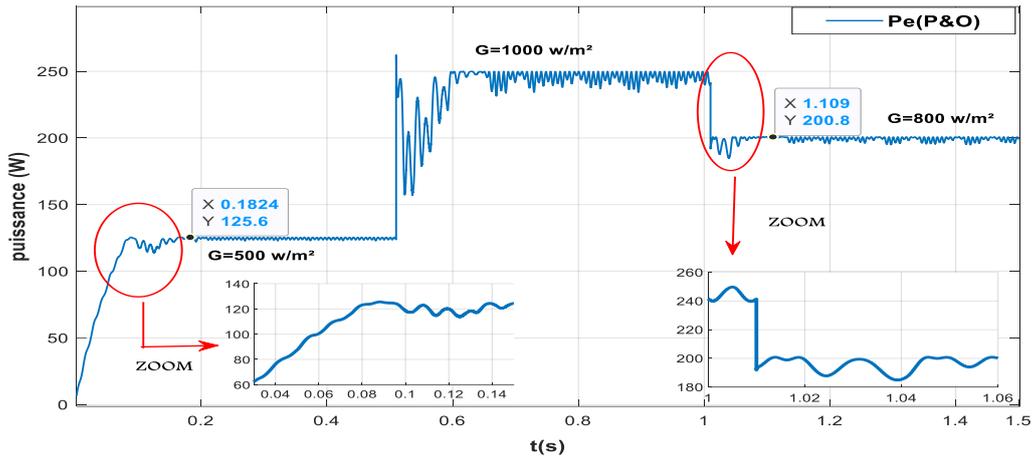


Figure IV.8 : Puissance aux bornes du GPV(P&O).

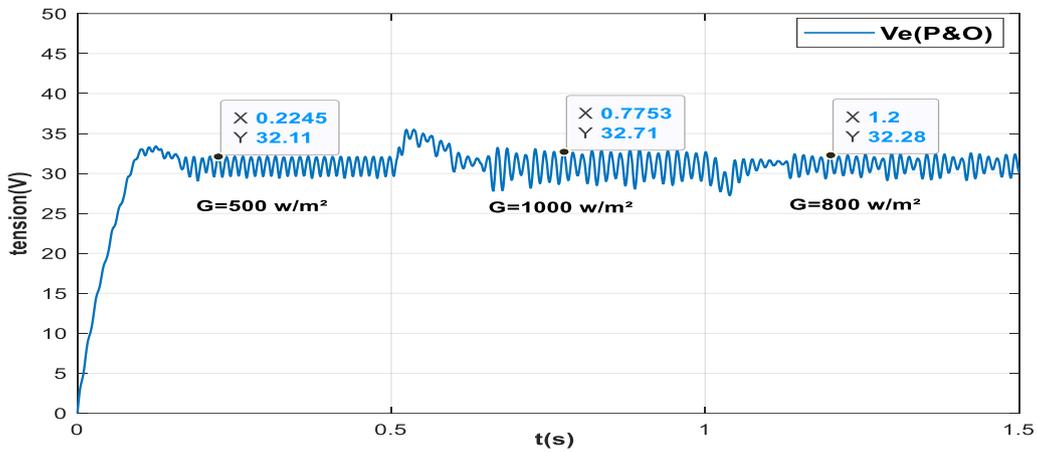


Figure IV.9 : Tension aux bornes du générateur photovoltaïque(P&O).

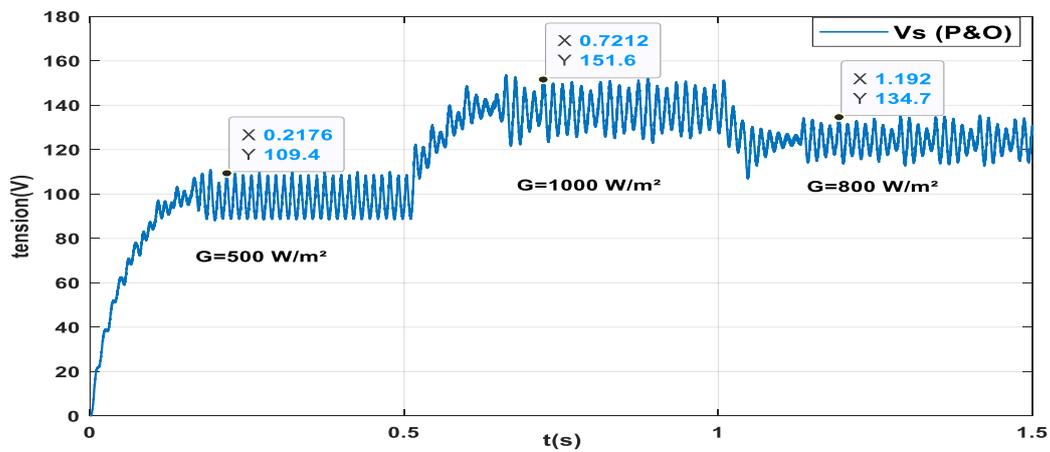


Figure IV.10 : Tension de sortie du système(P&O).

IV.2.3 Fonctionnement sous une température variable

Nous avons testé le fonctionnement du système étudié sous un éclairage fixe de 1000 W/m² et une température variable (50°C, 30°C, 0°C,) comme illustré dans la figure suivante :

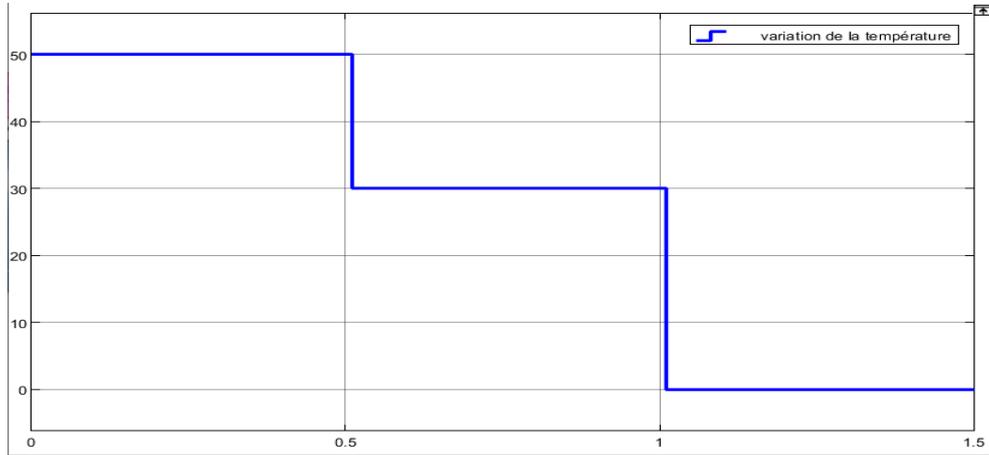


Figure IV.11 : Profile d'une température injectée dans le générateur photovoltaïque.

➤ Les résultats de simulation :

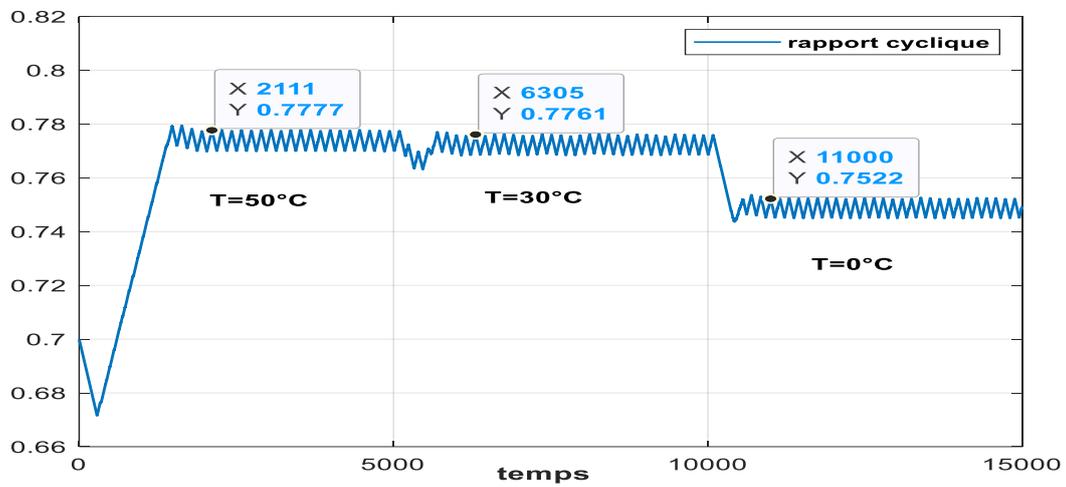


Figure IV.12 : Courbe de rapport cyclique D du GPV(P&O).

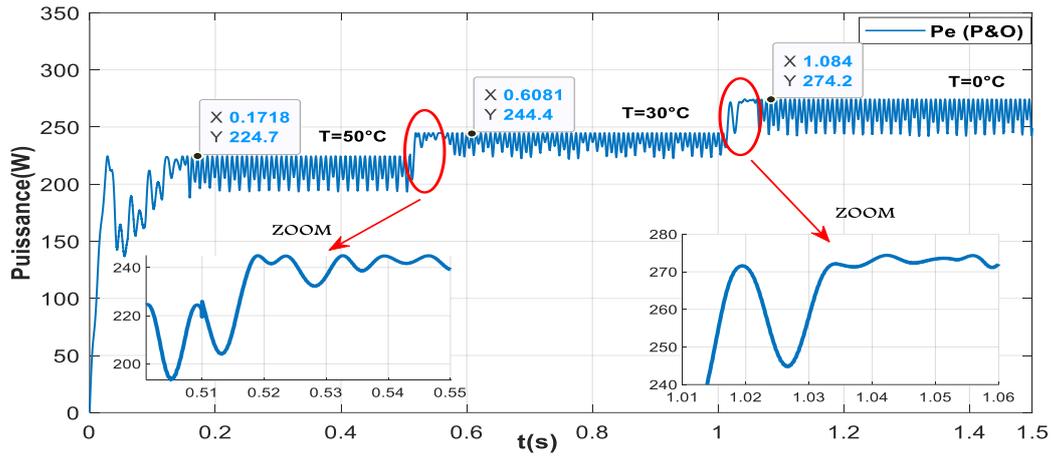


Figure IV.13 : Puissance aux bornes du GPV(P&O).

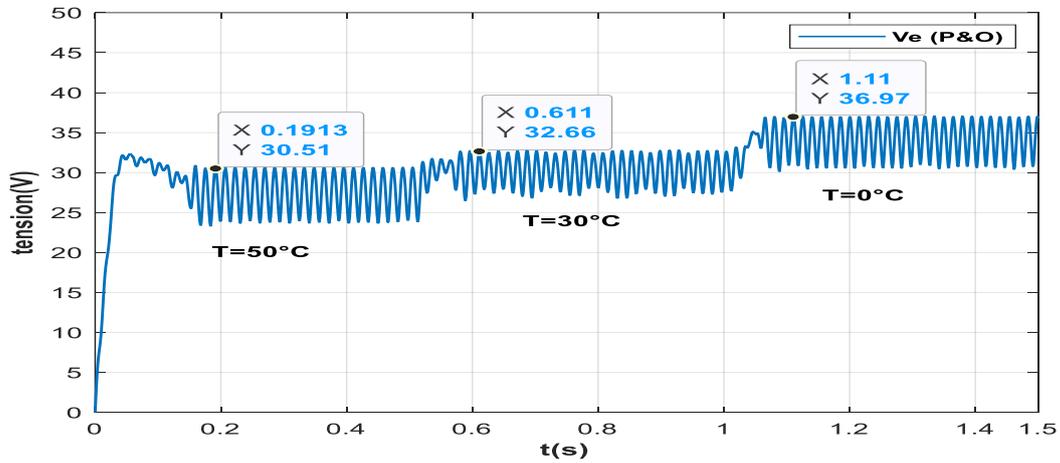


Figure IV.14 :Tension aux bornes du générateur photovoltaïque(P&O).

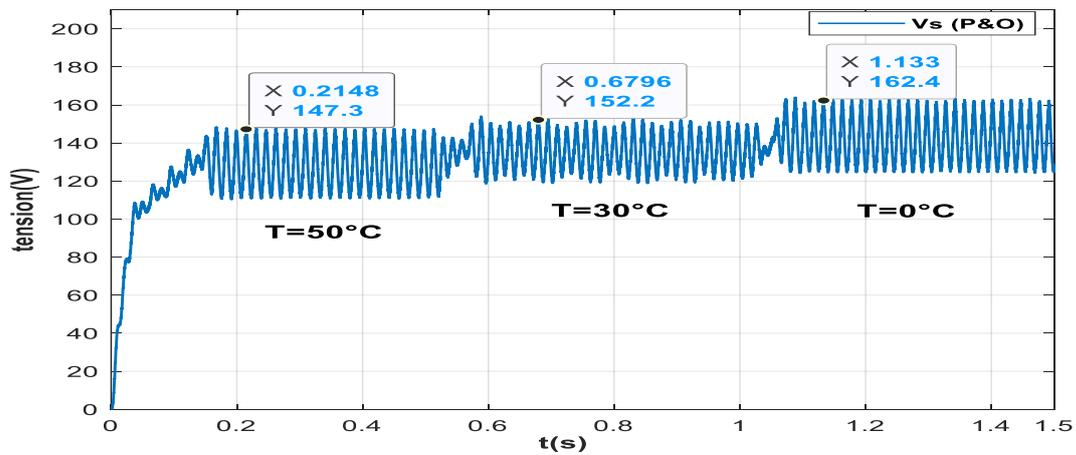


Figure IV.15 : Tension de sorti du système (P&O).

➤ Analyse des résultats de la méthode P&O :

- D'après les résultats des simulations, on constate que la méthode PO parvient à suivre le point de puissance maximale (MPP) du panneau mais cette technique présente des oscillations autour du PPM (la courbe de la puissance illustrée dans la Figure (IV.3) atteint jusqu'à 250 W avec de grandes oscillations).
- À partir des courbes présentées pour les différents cas de simulation, le convertisseur BOOST fournit une tension de sortie V_s supérieure à celle du générateur photovoltaïque. Donc le convertisseur BOOST effectue correctement son rôle d'augmenter la tension de sortie.
- Dans le cas du fonctionnement avec l'éclairement ou la température variable le PPM se déplace et l'algorithme P&O s'adapte en ajustant le rapport cyclique pour trouver le nouveau PPM correspondant à cette irradiation ou à cette température, Ainsi on constate que les courbes de puissance et de tension présentent des oscillations dans le régime permanent.

IV.3 Résultats de simulation de la méthode MPPT flou

La méthode MPPT flou, est une technique intelligente utilisée pour contrôler le point de puissance maximale d'un système PV, Pour valider le meilleur contrôleur MPPT flou optimal, nous avons effectué une série de test par simulation sous MATLAB/Simulink, pour cela nous avons fait une comparaison entre deux cas :

- 1^{er} cas : la méthode MPPT floue avec 3 sous-ensembles.
- 2^{ème} cas : la méthode MPPT floue avec 5 sous-ensembles.

IV.3.1 Comparaison entre le 1^{er} cas et 2^{ème} cas

Les résultats de simulation de la puissance aux bornes du GPV sous des conditions atmosphériques fixes (un éclairement $1000W/m^2$ et une température de $25^{\circ}C$)

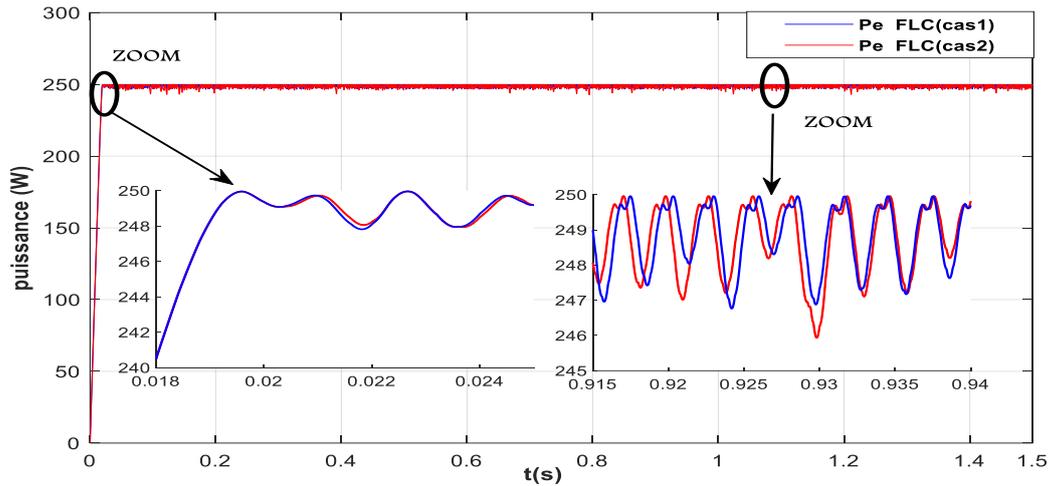


Figure IV.16 : Puissance aux bornes du GPV (Comparaison entre le 1er cas et 2ème cas).

En visualisant cette figure on peut remarquer que les résultats des deux cas sont presque identiques, pour étudier les performances de la méthode MPPT floue nous choisirons le contrôleur flou avec 3 sous-ensembles.

IV.3.2 Simulation sous des conditions climatiques stables

Les résultats de simulation par la commande MPPT flou sous des conditions climatiques fixes (un éclairement 1000W/m^2 et une température de 25°C) sont représentés par les figures ci-dessous.

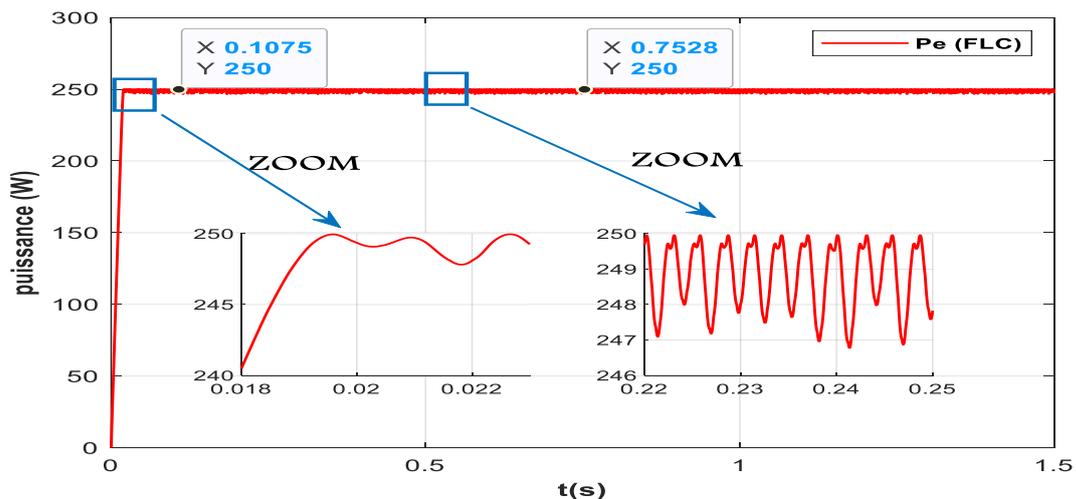


Figure IV.17 : Puissance aux bornes du GPV (FLC).

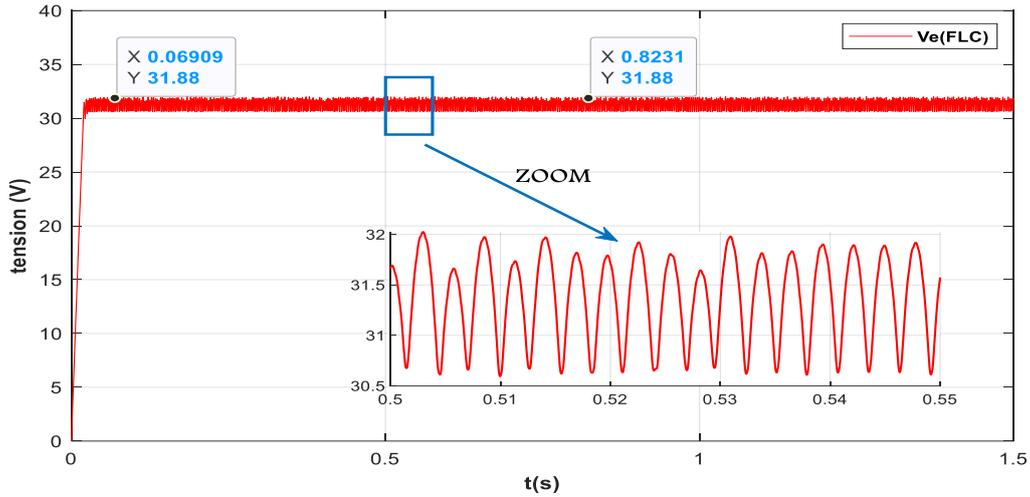


Figure IV.18 : Tension aux bornes du générateur photovoltaïque (FLC).

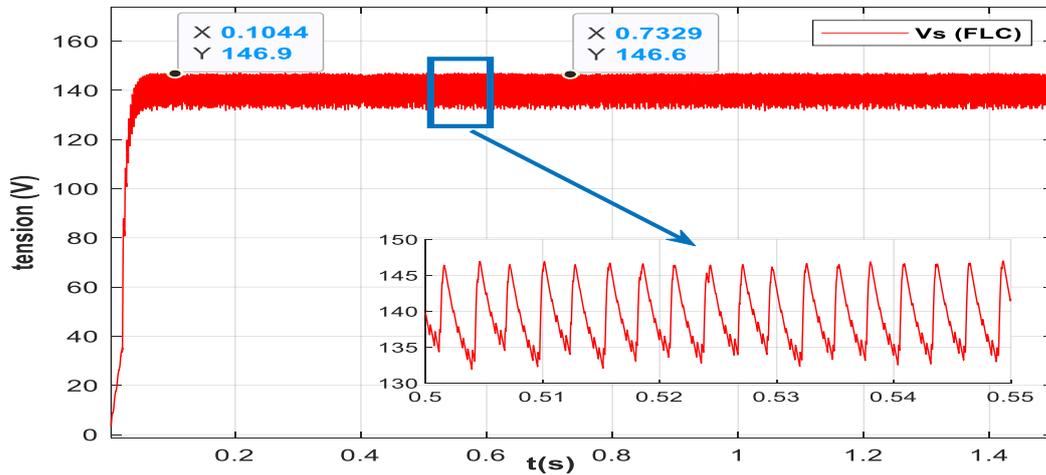


Figure IV.19 : Tension de sortie du système (FLC).

IV.3.3 Fonctionnement sous un éclairage variable

Nous avons utilisé Le même profil de l'éclairage utilisé précédemment dans la Figure IV.6, Pour tester la technique proposée on fait maintenir la température à une valeur constante $T=25^{\circ}\text{C}$. Les résultats de simulation sont représentés par les figures ci-dessous :

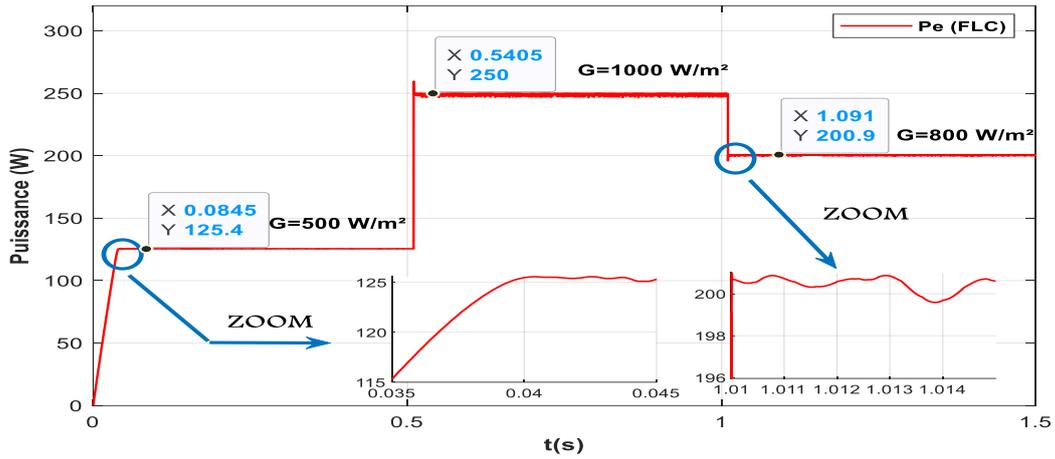


Figure IV.20 : Puissance aux bornes du GPV (FLC).

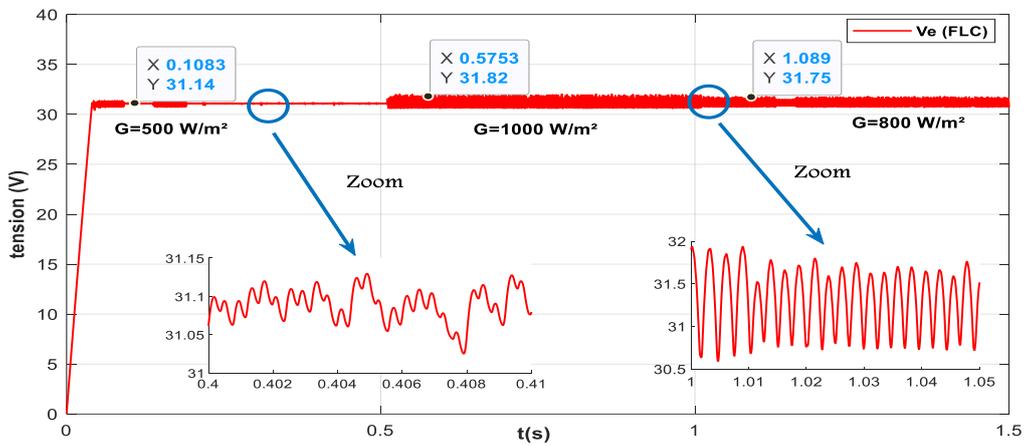


Figure IV.21 : Tension aux bornes du générateur photovoltaïque (FLC).

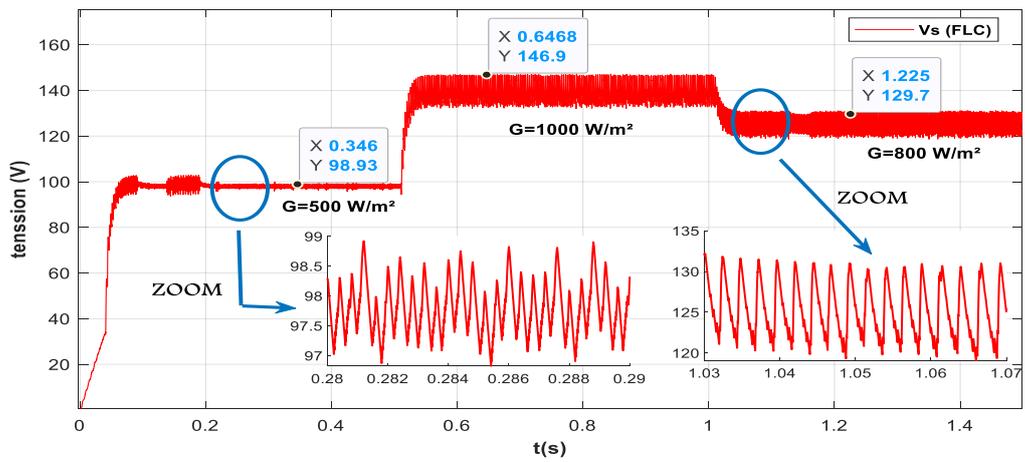


Figure IV.22 : Tension de sortie du système (FLC).

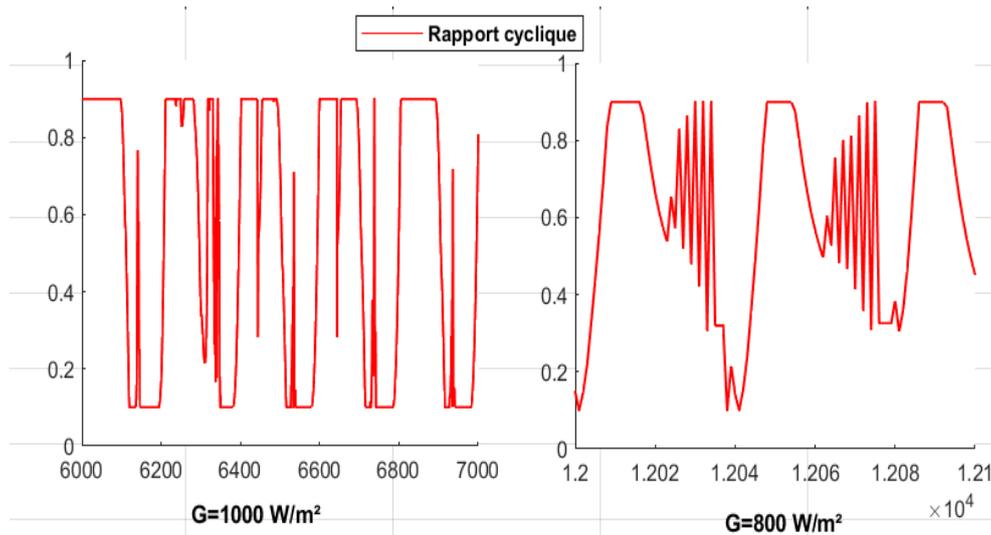


Figure IV.23 : Courbe de rapport cyclique D du GPV (FLC).

IV.3.4 Fonctionnement sous une température variable

Nous avons utilisé Le même Profil de la température utilisé précédemment dans Figure IV.11, Pour tester la technique proposée on fait maintenir l'éclairement à une valeur $G= 1000$ W/m^2 .

Les résultats de simulation sont représentés par les figures ci-dessous :

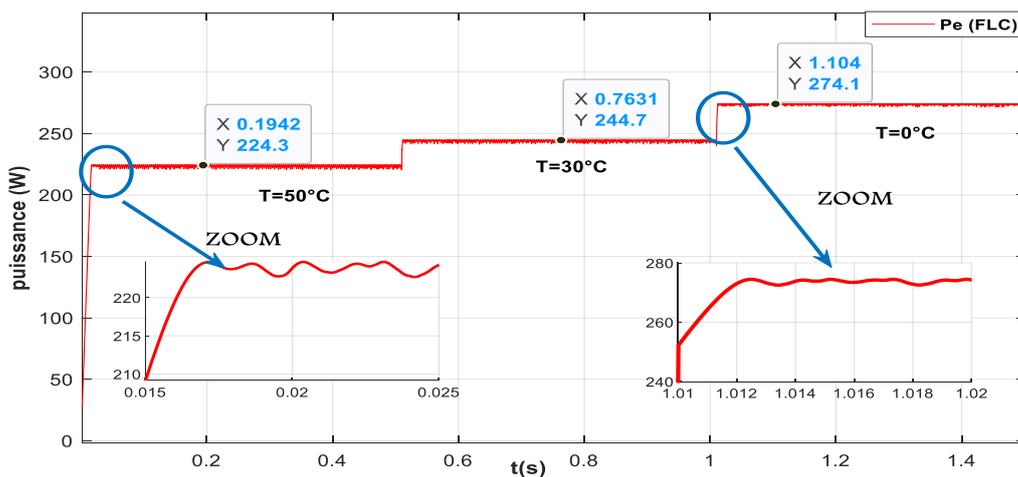


Figure IV.24 : Puissance aux bornes du GPV (FLC).

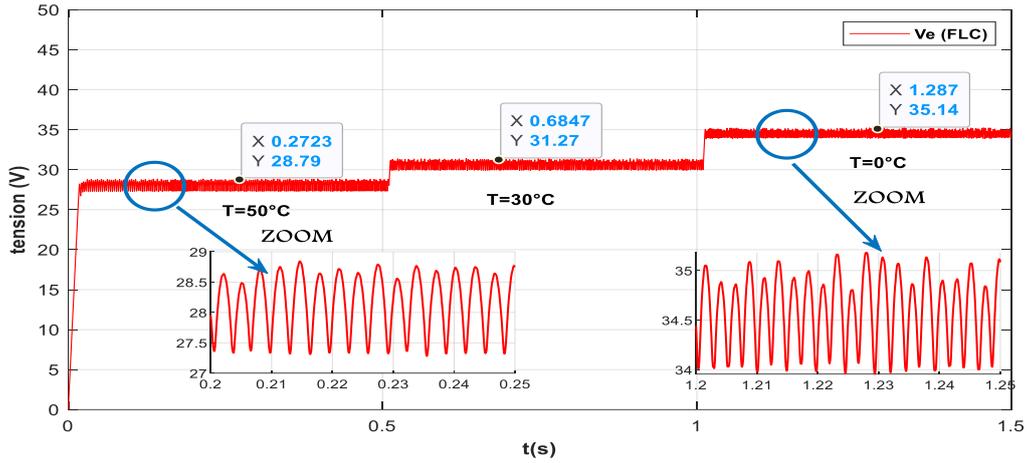


Figure IV.25 : Tension aux bornes du générateur photovoltaïque (FLC).

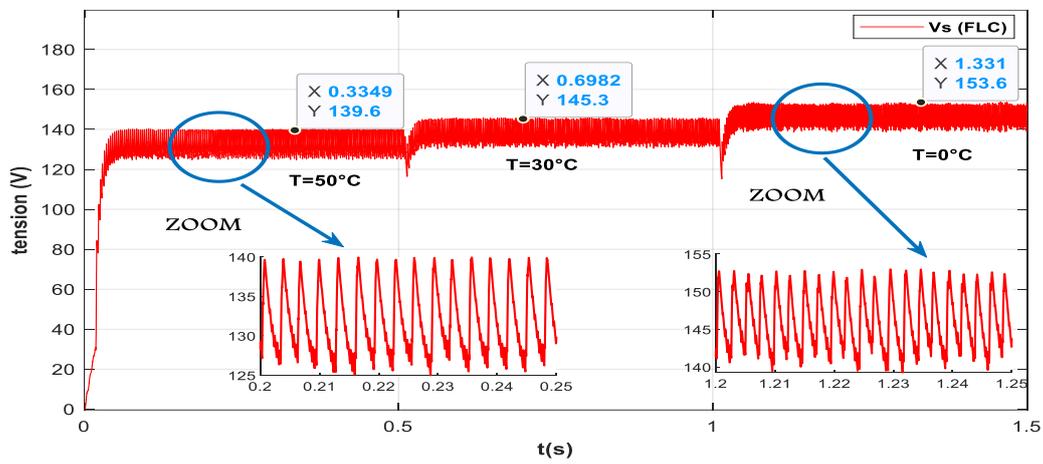


Figure IV.26 : Tension de sortie du système (FLC).

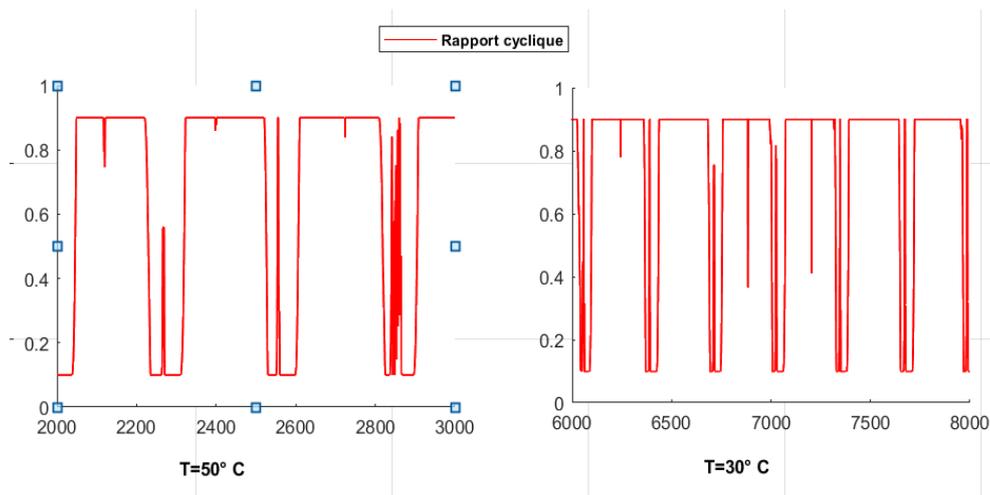


Figure IV.27 : Courbe de rapport cyclique D du GPV (FLC).

➤ Analyse des résultats de la commande floue :

- D'après les résultats de simulation obtenus, on remarque que le contrôleur flou conduit à des meilleures performances, avec moins d'oscillations dans le régime permanent, et un temps de réponse plus rapide (temps très court dans l'ordre de millisecondes).
- L'utilisation de la logique floue permet à la commande MPPT floue de réagir plus efficacement aux variations des conditions environnementales, minimisant ainsi les oscillations et un temps de réponse plus rapide dans le régime permanent.
- on remarque qu'une variation rapide de la température (augmentation ou diminution) provoque une variation considérable de la tension (V_e), Par contre dans le cas de la variation de l'éclairement la tension (V_e) varie légèrement.

IV.4 Etude comparative entre MPPT P&O et MPPT flou

Pour faire une étude de robustesse des deux méthodes Dans des conditions ambiantes, nous avons effectué les tests suivants :

D'abord on maintient une température constante (25°C) et on varie l'éclairement en suite on maintient l'éclairement à une valeur fixe (1000 W/m²) et on varie la valeur de la température.

IV.4.1 Fonctionnement sous un éclairement variable

On garde toujours Le même profil de l'éclairement utilisé précédemment, Les résultats de simulation sont représentés par les figures ci-dessous :

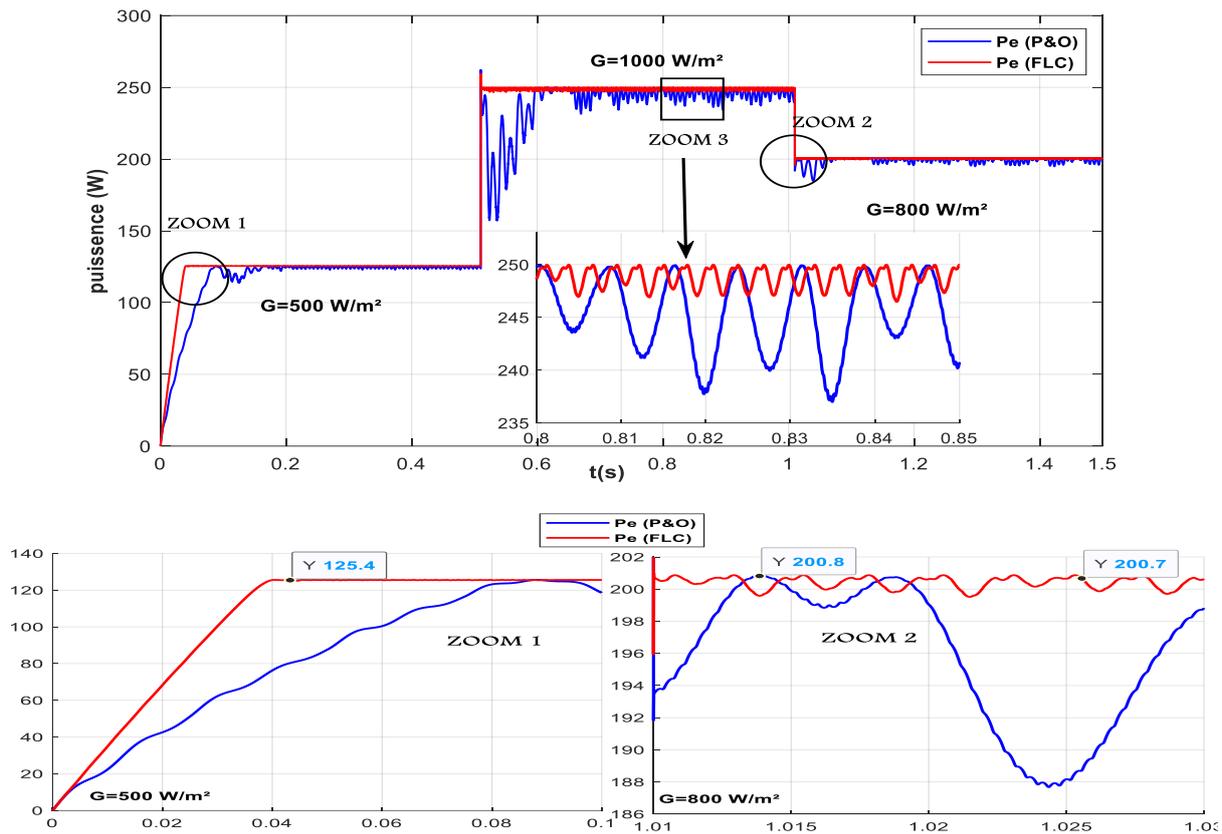


Figure IV.28 : Puissance aux bornes du GPV.

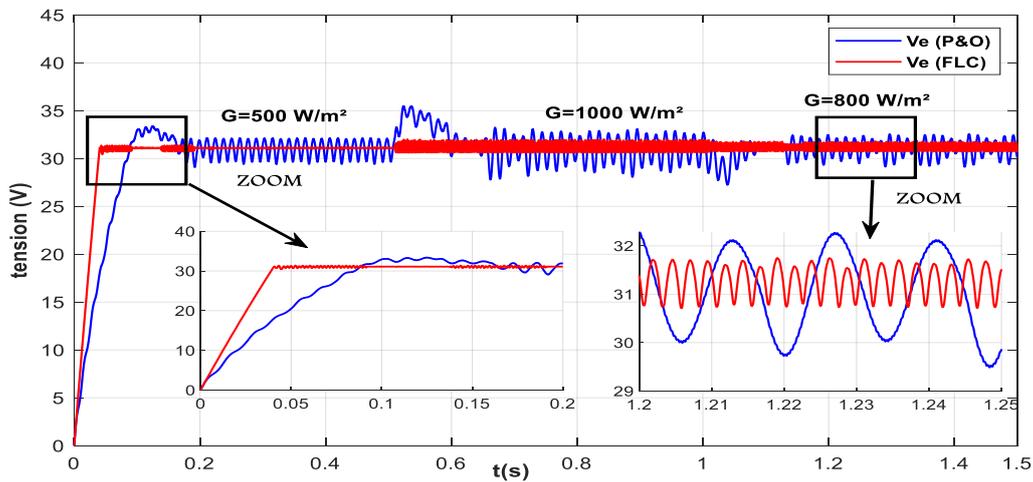


Figure IV.29 : Tension aux bornes du générateur photovoltaïque.

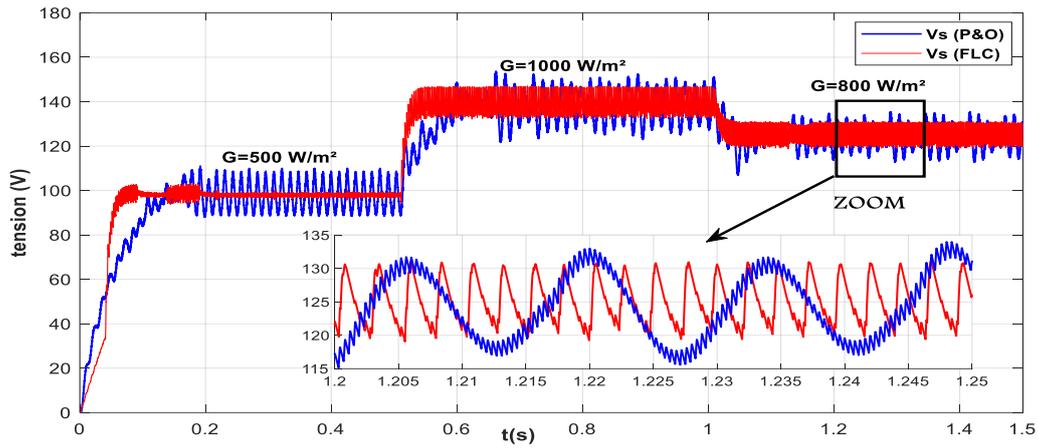


Figure IV.30 : Tension de sortie du système.

IV.4.2 Fonctionnement sous une température variable

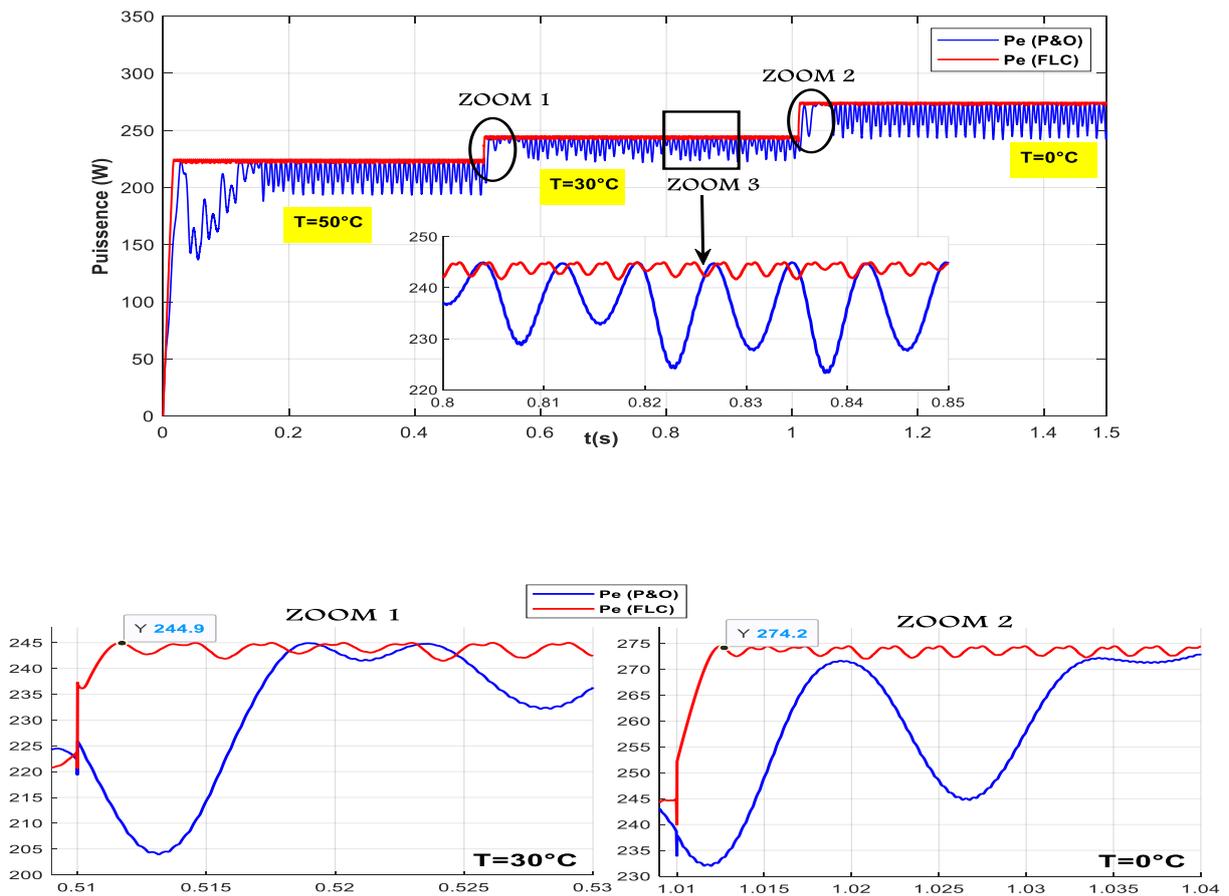


Figure IV.31 : Puissance aux bornes du GPV.

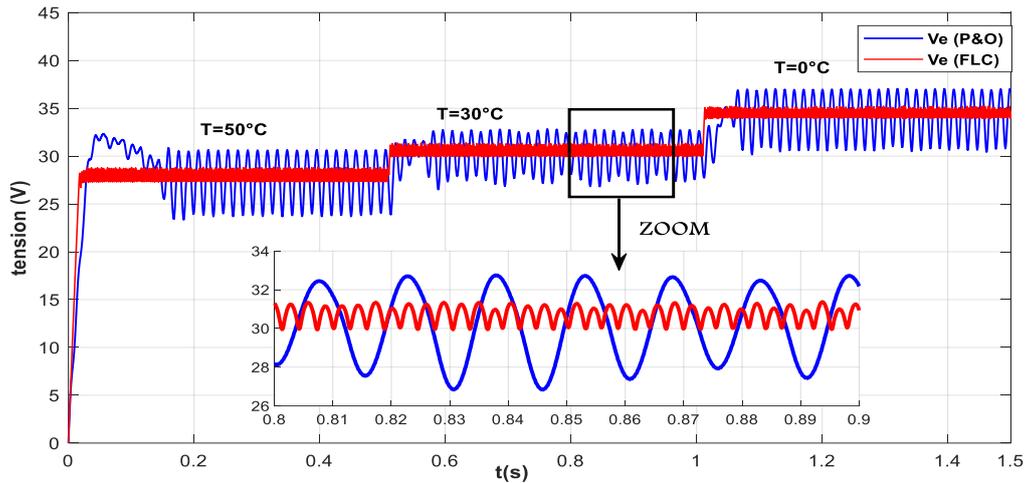


Figure IV.32 : Tension aux bornes du générateur photovoltaïque.

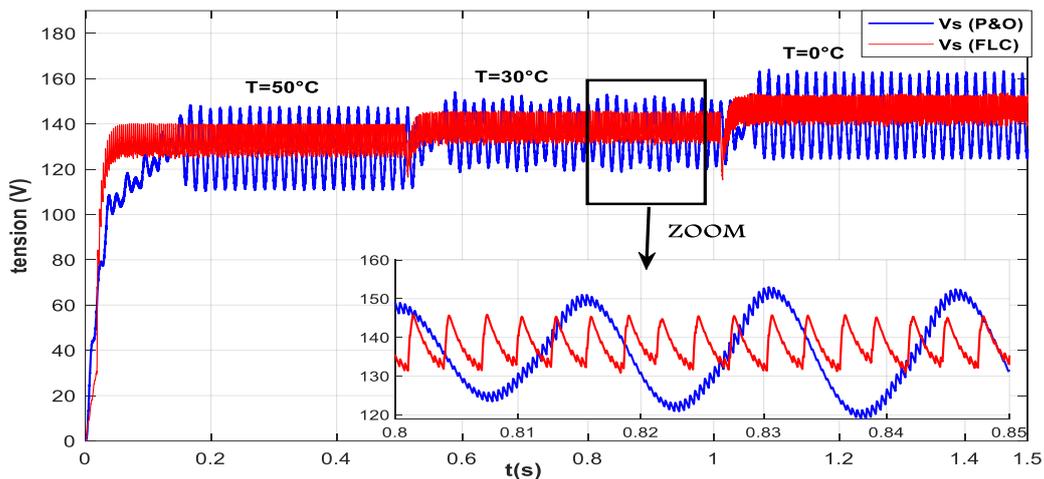


Figure IV.33 : Tension de sortie du système.

➤ Analyse les résultats de la comparaison (P&O et FLC)

- Les deux méthodes présentent une bonne poursuite de PPM sauf que le P&O présente quelques fluctuations autour du point de puissance maximale qui sont due au manque de précision par rapport au FLC.
- La commande P&O Présente une convergence lente et des oscillations autour du point de puissance maximale par contre la commande par logique floue offre une meilleure

flexibilité avec moins d'oscillations dans le régime permanent, une réponse plus rapide.et une précision plus accru, donc une erreur très faible en régime stationnaire.

- Dans le cas du fonctionnement avec l'éclairement ou la température variable, Le contrôleur flou suit la consigne avec de très faibles fluctuations tandis que le contrôleur P&O perd un peu de temps avant d'atteindre le MPP avec des grandes oscillations.

Pour résumer :

- l'algorithme P&O est un algorithme classique et simple. En général, cet algorithme dépend fortement des conditions initiales et il présente des oscillations autour de la valeur optimale.

- L'algorithme basé sur la logique floue est un algorithme robuste et efficace. En effet, Cet algorithme fonctionne au point optimal avec moins d'oscillations. En outre, il est caractérisé par un bon comportement en état transitoire. Cependant, l'implémentation de ce type d'algorithme est plus complexe que les algorithmes classiques. De plus, l'efficacité de cet algorithme dépend énormément du tableau d'inférence.

Conclusion

Ce chapitre présente les résultats obtenus des différentes techniques de commande MPPT appliquées à un panneau PV. Le travail a été réalisé sous des conditions climatiques stables (25° et 1000 w/m) et variables (changement d'ensoleillement et de température).

Nous avons présenté les résultats de simulation des deux commandes, la méthode classique P&O et la méthode intelligente de commande MPPT floue.

Une étude comparative des deux commandes proposées (classiques et modernes) a montré que le contrôleur basé sur la commande par logique floue donne de meilleures performances avec un temps de réponse rapide et une erreur en état permanent très faible, et qu'il est robuste aux différentes variations des conditions atmosphériques

Conclusion générale

Afin d'améliorer l'efficacité des systèmes photovoltaïques, différents algorithmes de la commande MPPT ont été étudiés pour le suivi du point de puissance maximale. Dans cet objectif, ce travail est une contribution pour la compréhension et la mise en œuvre d'un contrôle MPPT permettant de suivre la puissance maximale à tout instant et sous différentes conditions atmosphériques.

Dans la première partie de ce mémoire on a abordé quelques généralités sur les systèmes solaires photovoltaïques, le principe de fonctionnement de la cellule PV et ces différents technologies ensuite on a parlé sur la constitution du générateur PV.

Pour que le système photovoltaïque fonctionne à sa puissance maximale, il doit Comporter un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge associé à une commande MPPT. Pour se faire, nous avons utilisé des algorithmes MPPT qui sont l'algorithme «Perturbation et observation » (P&O) et l'algorithme «par la logique floue » (FLC) Commandée par un convertisseur élévateur (hacheur boost), tout cela est mentionné en détail dans la deuxième partie de ce mémoire.

Et puis nous avons simulé notre panneau PV pour voir le comportement du système PV (caractéristique puissance-tension et caractéristique courant-tension) par rapport aux variations climatiques. Les résultats de la simulation ont montré que la caractéristique du panneau photovoltaïque est directement liée essentiellement à ses conditions climatiques (l'ensoleillement et la température). Les résultats de simulation de convertisseurs BOOST ont montrés que la tension de sortie du convertisseur BOOST est supérieure à celle d'entrée et ça prouve qu'il a effectué correctement son rôle. Nous avons vue aussi les programmes de la commande MPPT (P&O et FLC) qui seront utilisés dans la simulation.

Finalement, on a terminé notre travail par la simulation d'un système photovoltaïque globale (GPV, convertisseur BOOST, commande MPPT, la présentation des résultats obtenus, les discussions et les comparaisons ont fait l'objet du dernier chapitre. Ce dernier englobe l'ensemble des simulations effectuées sous l'environnement MATLAB/Simulink. Le travail a été réalisé sous des conditions climatiques stables (25° et 1000 w/m) et variables (changement d'ensoleillement et de température).

Les résultats de cette étude ont montré que la méthode P&O est simple à mettre en œuvre, mais elle peut présenter des oscillations autour du point de puissance maximale, cette méthode peut être sensible aux conditions initiales, ce qui peut entraîner une convergence plus lente vers le point de puissance maximale.

Par contre la commande MPPT basée sur la logique floue offre de nombreux avantages, tels qu'une convergence rapide vers le point de puissance maximale, une réduction des oscillations et un bon comportement en état transitoire. Cependant, son implémentation est plus complexe et son efficacité dépend fortement du tableau d'inférence utilisé.

Bibliographie

[1] : KADDOUR Chams Eddine et SAHNOUNE Cherif «Etude et simulation des commandes MPPT d'un système photovoltaïque autonome», Mémoire Master, Université Abderrahmane Mira –BEJAIA 2021.

[2] : ROUBI Houdheyfa et AIB Hichem «Amélioration de la commande MPPT d'un système Photovoltaïque par backstepping», Mémoire Master, Université Mohamed Boudiaf - M'SILA 2019.

[3] : HANANOU Fatiha et ROUABAH Aicha «Modélisation et simulation d'un système Photovoltaïque», Mémoire Master, Université Kasdi Merbah-OUARGLA 2014

[4] : BELAID Lalouni Sofia «Cours Energie Solaire Photovoltaïque». Université Abderrahmane Mira –BEJAIA 2015.

[5] : GOAR Noureddine et MAHMOUDI Abdelkader «Réalisation d'un convertisseur DC/DC dans une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque», Mémoire Master, Université Larbi Ben M'Hidi - Oum El Bouaghi 2017.

[6] : A. T.SINGO «Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome», Thèse de doctorats, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.

[7] : HAMIDOUCHE Macylia et MOKHTARI Boubker « Etude d'un système photovoltaïque», Mémoire Master, Université Abderrahmane Mira –BEJAIA 2016.

[8] : BOUZEGANE Mhenna et GAOUAOUI Ferhat «Alimentation d'un moteur à courant continu par une Source photovoltaïque», Mémoire Master Université Mouloud Mammeri -Tizi-Ouzou 2018.

[9] : A. C. Pastor, «Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques», Institut National de Science Appliquée de Toulouse Thèse de doctorat.

[10] : A. Lyes, «Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque», Mémoire Master, Université Mouloud Mammeri -Tizi-Ouzou 2011.

[11] : ZIAT SoheirIbtissem et MEDJAHED nour el houda , «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque commandé par la commande MPPT (P&O)», Mémoire Master, Universitaire Belhadj Bouchaib -Ain-Temouchent 2020.

[12] : NASRI Mehdi et HAMMOUDI Kahina, «Techniques MPPT pour système Photovoltaïque sous des conditions» , Mémoire Master, Université Abderrahmane Mira – BEJAIA 2021.

[13] : TIGRINE Cylia et Ait Ouali Ouerdia, «Etude et simulation des techniques MPPT d'un système photovoltaïque», Mémoire Master, Université Abderrahmane Mira –BEJAIA 2019.

[14] : A. Belkaid, «Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance Pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome », thèse de doctorat, Université Sétif 1-Sétif 2015.

[15] : YAHIAOUI Yasmina «Commande MPPT à base la logique floue et les algorithmes génétiques», Mémoire Master, Université Abderrahmane Mira-BEJAIA 2013.

[16] : CHALABI Loubna «Poursuit par contrôleur flou du point de puissance maximum d'un GPV», Mémoire Master, Université Mohamed Boudiaf - M'SILA 2016.

Résumé

L'adaptation entre un générateur photovoltaïque (PV) comportant des caractéristiques non linéaires et une charge continue peut poser des problèmes techniques. L'objectif est d'optimiser le transfert de puissance entre le générateur PV et la charge, afin d'assurer un fonctionnement efficace du système. L'utilisation d'un convertisseur DC-DC avec une commande MPPT est une solution technique couramment utilisée pour résoudre ce problème

Notre contribution dans ce mémoire pour l'optimisation de la puissance d'un générateur photovoltaïque en utilisant un convertisseur BOOST et une commande MPPT par la logique floue. La commande floue est choisie pour sa capacité à s'adapter aux systèmes non linéaires et à fournir de bonnes performances. Les simulations effectuées dans l'environnement **Matlab/Simulink** et la mise en œuvre de l'algorithme ont confirmé la validité de notre système et ont démontré l'importance du suivi du point de puissance maximale, Les résultats d'analyse par simulations ont montré l'efficacité du contrôleur flou proposé, même dans des conditions de changements de l'ensoleillement et de la température.

ملخص

التكيف بين مولد الكهرو ضوئي الذي يتميز بخصائص غير خطية والحمولة المستمرة يمكن أن يشكل مشاكل تقنية

الهدف هو تحسين نقل الطاقة بين مولد الطاقة الشمسية والحمولة، استخدام محول التيار DC-DC مع تقنية التحكم MPPT

هو الحل التقني المستخدم عادة لحل هذه المشكلة من أجل ضمان عمل فعال للنظام .

مساهمتنا في هذا البحث هو تحسين قدرة مولد الكهرو ضوئي باستخدام محول BOOST وتحكم MPPT بواسطة المنطق الضبابي FLC

يتم اختيار التحكم الضبابي لقدرته على التكيف مع الأنظمة غير الخطية.

أظهرت المحاكاة التي تم إجراؤها في بيئة **Matlab/Simulink** وتنفيذ الخوارزمية صحة نظامنا وأظهرت أهمية متابعة نقطة الطاقة

القصوى. أظهرت نتائج التحليلات بالمحاكاة فعالية التحكم الضبابي المقترح، حتى في ظروف التغيرات في أشعة الشمس ودرجة الحرارة.