

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique

Thème

**Control Et Optimisation D'un Système
Photovoltaïque Basé Sur Logique Floue**

Devant le jury composé de :

Dr. MAMMERI Oussama
Dr. LABBI Yacine
Dr. BARKA Nouredine

Présenté par :

- OUNISSI Med Bachir
- DOGGA Mohammed Yacine

2023/2022

Remerciement

*Tout d'abord, je remercie dieu -ALLAH- de tout puissant de
m'avoir donné le courage et*

.La patience durant toutes ces années d'études

*Je tiens à exprimer toute ma gratitude et mes sincères
remerciements à Monsieur*

*Dr, **Mammeri Oussama**, Docteur à L'Université Echahid Hamma
Lakhdar*

D'El Oued, pour avoir dirigé ce travail.

*Mes sincères remerciements aux messieurs les membres du jury
pour*

L'honneur qu'ils me font en participant au jugement de ce travail.

*Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont
aidé*

À élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous aidés

De près ou de loin à accomplir ce travail.

*En fin je remercie tout particulièrement mes parents, pour leur
Soutien inconditionnel tout au long de ces longues années
d'études.*

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

*A mes chers parents que dieu les garde A mes chers
frères et sœurs.*

Mes neveux et nièces ;

Mon grand-père et Mon grand-mère Mes beaux-frères ;

*Mes enseignants depuis mon enfance ; A toute mes
amis.*

Table des matières

Introduction Générale.....	11
Introduction Générale.....	a
Chapitre I.....	3
I.1 Introduction.....	4
I.2 Générateur photovoltaïque.....	4
I.2.1 Principe de la conversion photovoltaïque.....	5
I.2.2 Cellule photovoltaïque.....	5
I.2.3 Module photovoltaïque.....	6
I.2.4 Champ photovoltaïque.....	7
I.3 Modélisation du module photovoltaïque.....	7
I.3.1 Cas d'une cellule idéale.....	7
I.3.2 Cas d'une cellule réelle.....	9
I.4 Identification des paramètres du module photovoltaïque.....	10
I.4.1 Identification des paramètres du GPV en utilisant le modèle d'une cellule réelle.....	12
I.4.2 Le courant de saturation de la diode I_0 :.....	12
I.4.3 Résistance série R_s.....	12
I.4.4 Résistance parallèle R_p.....	13
I.4.5 Le photo-courant I_{ph}.....	13
I.4.6 Le facteur d'idéalité B.....	14
I.4.7 Méthode itérative.....	14
I.5 Simulation du module photovoltaïque sous Proteus.....	15
I.5.1 Influence de l'éclairement et de la température :.....	18
I.5.2 Influence de variation de deux résistance R_s et R_p sur la caractéristique I-V.....	19
I.6.Conclusion.....	20
Chapitre II.....	21
II.1 Introduction.....	22
II.2 Convertisseur DC/DC.....	22
II.2.1 Convertisseur abaisseur (Buck).....	22
II.2.1.1 Principe de fonctionnement.....	23
II.2.2 Convertisseur élévateur (Boost).....	24
II.2.1.1 Principe de fonctionnement.....	25
II. 2.2 La commande MPPT.....	26

II. 2.2.1 Critères d'évaluation d'une commande MPPT	26
II.2.3.1 La méthode Perturbation et Observation (P&O)	27
II.2.3.2. La méthode Incrément des conductances (INC)	30
II.2.3.3 Commande par la logique floue	31
II.2.3.3.1 Concept de système de contrôleur à logique floue et application sur système PV	32
II.2.3.3.2 Fonctions d'ensemble flou et d'appartenance	32
II.2.3.3.3 Variable linguistique et règles	32
II.2.3.3.4 Architecture du contrôleur à logique floue	33
Chapitre III	37
Commande MPPT Basée sur	37
L'Approche Floue	37
III.1 Introduction	38
III.2 Principe de la commande MPPT	38
III.3 Classification Des Commandes MPPT	39
III.3.1 Classification Des Commandes MPPT Selon Les Paramètres D'entrée	40
III.3.2 Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche	40
III.3.3 Les algorithmes MPPT	41
III.4 Modélisation de la régulation de puissance maximale des panneaux solaires via MATLAB/SIMULINK	45
III.4.1 Modèle SIMULINK du contrôleur MPPT à base de P&O	45
III.4.1.1 Résultats de simulation MPPT P&O	46
III.5 Algorithme P&O MPPT Basé Sur la Logique Floue Proposé	47
III.5.1 Modèle SIMULINK du contrôleur MPPT à base de P&O optimiser par logique floue	48
III.6 Résultats de simulation MPPT P&O	50
III.7. Conclusion	52
Conclusion Général	53
Bibliographies	55

Liste des figures

Figure(I-1): Schéma d'une cellule élémentaire.....	05
Figure(I-2): Cellule photovoltaïque.....	06
Figure(I-3): Module photovoltaïque.....	06
Figure (I-4) :Champ photovoltaïque.....	07
Figure (I-5) :Schema equivalent d'une cellule idéale.....	08
Figure (I-6) : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.....	09
Figure (I-7) : Caractéristiques réelles extraites des tests pratiques du PV.....	11
Figure (I-8) : Test de mesure de la tension V_{co} Figure (I-9) : Test de mesure du courant I_{cc} .	12
Figure (I-10) : Schéma équivalent du module photovoltaïque dans proteus.....	15
Figure (I-11) : Tension de circuit ouvert V_{co}	16
Figure (I-12) : Courant de court-circuit I_{cc}	16
Figure (I-13) : Caractéristiques I-V et P-V obtenues par Proteus et pratique.....	17
Figure (I-14) : Caractéristiques I-V et P-V obtenues par simulation sous Proteus au TCS.....	17
Figure (I-15) : L'influence de la température sur les caractéristiques I-V et P-V.....	18
Figure (I-16) : L'influence de l'éclairement sur les caractéristiques I-V et P-V.....	19
Figure (I-17) : Courbes I-V pour différentes valeurs de R_s et R_p [Ω]	19
Figure (II-1) : Schéma de base d'un convertisseur Buck.	23
Figure (II-2) : Convertisseur Buck à l'état passant	24
Figure (II-3) : Schémas de base d'un convertisseur Boost.	24
Figure (II-4) : Schéma du Boost (S fermé). Schéma du Boost (S fermé)..	25
Figure (II-5) : Schéma du Boost (K ouvert)..	25
Figure (II-6) : Principe de la Commande.	26
Figure (II-7) : Courbe caractéristique de puissance du générateur photovoltaïque.....	28
Figure (II-8) : Organigramme de la Methode P&O.	29
Figure (II-9) : Divergence de la divergence de la méthode P&O.	30
Figure (II-10) : Organigramme de le méthode INC.	31
Figure (II-11) : L'architecture d'un contrôleur flou.	33
Figure (II-12) : Fonctions d'appartenance des entrées.	34
Figure (II-13) : Fonctions d'appartenance de la sortie.....	35

Figure (III.1): Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.....	38
Figure (III.2): Principe de la commande MPPT.....	39
Figure (III.3): Recherche du PPM par la méthode (P&O).....	43
Figure (III.4): L'algorithme de P&O classique.....	44
Figure (III.5): Conception du système d'optimisation.....	45
Figure(III.6): MPPT basé sur P&O : Profil d'extraction de tension du panneau photovoltaïque.....	46
Figure (III.7): MPPT basé sur P&O : Profil d'extraction de courant du panneau photovoltaïque.....	46
Figure(III.8): MPPT basé sur P&O : Profil d'extraction de courant du panneau photovoltaïque.....	47
Figure (III.9): Algorithme P&O MPPT Basé Sur la Logique Floue.....	48
Figure(III.10): Conception du système d'optimisation.....	49
Figure(III.11): Fuzzy logic control.....	50
Figure(III.12): MPPT basé sur P&O optimisé par FLC : Profil d'extraction de puissance du GPV.	50
Figure(III.13): MPPT basé sur P&O optimisé par FLC: Profil d'extraction de tension du GPV.....	51
Figure (III.14): MPPT basé sur P&O optimisé par FLC: Profil d'extraction de courant du GPV.....	51

List des tableaux

Tableau (I-1) : Caractéristiques du panneau PV 10 W	11
Tableau (I-2) : Caractéristiques réelles du panneau	11
Tableau (I.3) : Les cinq paramètres identifiés par la méthode de calcul à partir de la datasheet	15
Tableau (II-1) : – Tableau des règles floue.	35

Acronymes

GPV : Générateur Photovoltaïque.

DC : Courant Continu.

STC : Conditions de tests standards 'Standard Test Conditions'.

MPP : Point de fonctionnement optimal.

MPPT : Poursuite du Point de Puissance Maximale. 'Maximum Power Point Tracking'.

Symboles

λ : Longueur d'onde en mètre.

EO : Éclairement en dehors de l'atmosphère terrestre, appelée constante solaire.

P_m : Puissance produite par le générateur PV.

E : Éclairement absorbé par la cellule (1000 w/m^2).

K : Constant de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$).

q : Charge de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$).

I_{pv} : Courant généré par la cellule photovoltaïque.

I_{ph} : Courant de la cellule PV (Photo-Courant).

I_d : Courant circulant dans la diode.

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode.

V_{pv} : Tension de sortie d'un panneau photovoltaïque.

I_p : Courant circulant dans la résistance R_P .

R_{sh} : Résistance shunt de la cellule PV.

R_S : Résistance série de la cellule PV.

N_S : Nombre de cellules en série.

N_P : Nombre de cellules en parallèle.

A : Facteur d'idéalité de la jonction (cellule PV) p-n

$V_{mpp} = V_m$: Tension d'un module PV au point de puissance maximale [V].

$I_{mpp} = I_m$: Courant d'un module PV au point de puissance maximale [A].

I_{mr} : Courant de référence d'un module PV au point de puissance maximale.

T : Température de la jonction des cellules PV [°K].

$T_{réf}$: Température de référence des cellules PV [°K].

I_{CC} : Courant de court-circuit d'une cellule ou d'un module solaire [A].

V_{CO} : Tension en circuit ouvert d'un module solaire [V].

R_L : Résistance de filtre.

D : Rapport cyclique.

ΔD : Variation du rapport cyclique.

$P\&O$: Perturbation et Observation.

$E(K)$: Erreur.

$CE(K)$: Variation de l'Erreur.

Introduction Générale

Introduction Générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures.[1]

Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue.[1]

L'exploitation directe de l'énergie solaire au moyen des capteurs relève de deux technologies bien distinctes : l'une produit des calories, c'est l'énergie solaire thermique, et l'autre produit de l'électricité, et c'est cette dernière énergie solaire photovoltaïque qui fait l'objet de ce mémoire.[1]

A travers l'effet photovoltaïque, l'énergie fournie est très variable et est toujours en courant continu : il faut souvent la stocker et parfois la transformer. L'association des centrales PV connectées au réseau électrique se fait à l'aide d'un convertisseur. Dans le cadre de notre travail, nous traitons l'une des structures les plus recommandées dite « onduleur de tension » qui sera utilisé pour injecter l'énergie électrique issue d'une source PV vers le réseau de distribution [1]. Cette mémoire comporte quatre chapitres :

Le premier chapitre consacré à la généralité et modélisation d'un système photovoltaïque, ainsi le principe de la conversion photovoltaïque puis nous donnerons les principales caractéristiques d'un générateur photovoltaïque.

Le deuxième chapitre est consacré à une modélisation de convertisseur DC-DC. Il montre une technique de poursuite du point de puissance maximale MPPT, et nous intéressons à l'étude de la méthode « Perturbation-Observation ».

Dans le troisième chapitre nous présenterons la commande floue d'un système photovoltaïque pour la recherche du point de puissance maximale (MPP).

Le travail a été complété par une étude comparative avec un test de robustesse entre les méthodes dites conventionnelles à savoir, la méthode Perturbation-Observation (P&O) et celle basée sur l'approche Floue.

Les résultats obtenus mettent en évidence l'avantage de l'approche Floue par rapport à la méthode Perturbation et Observation (P&O).

Chapitre I

Généralités sur les systèmes photovoltaïques



I.1 Introduction

Dans nos jours, il nous semble que personne ne peut s'en douter sur l'importance de l'eau et de l'énergie pour les besoins humains. Avec les avancées technologiques, le besoin en énergie ne cesse d'augmenter. Ce problème d'énergie est encore plus sensible dans les sites isolés où l'utilisation des ressources classiques s'avère souvent très coûteuse [1].

Comme nous le savons, la plus grande partie de l'énergie consommée actuellement provient de l'utilisation des combustibles fossiles comme le pétrole, le charbon ou encore l'énergie nucléaire.

Les études et les prévisions récentes nous alertent que l'utilisation massive de ces ressources conduira certainement à l'épuisement total de ces réserves. En plus, tout le monde est mondialement convaincu par le danger de ce processus sur l'environnement. A partir de ce constat, il est nécessaire de chercher d'autres énergies renouvelables, comme l'énergie photovoltaïque. Ce type d'énergie n'est pas seulement gratuit et inépuisable, mais aussi très propre pour l'environnement

Dans ce chapitre, nous effectuons un bref rappel sur les générateurs photovoltaïques (cellules, modules et champs). Nous présentons ensuite, la modélisation des modules PV et l'identification de ses paramètres électriques. Nous terminons par une simulation d'un module photovoltaïque 10 W sous Proteus 8 Professional.

I.2 Générateur photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière [1] [2].

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance de quelques dizaines de centimètres carrés délivre, au maximum, quelques watts sous une tension inférieure à l'un volt.

Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un champ photovoltaïque. La connexion en série des cellules permet d'augmenter facilement la tension de l'ensemble, tandis que la mise en parallèle permet d'accroître le courant.

Le câblage série/parallèle est donc utilisé pour obtenir globalement un générateur PV aux caractéristiques souhaitées. [1]

I.2.1 Principe de la conversion photovoltaïque

La tension générée par une cellule photovoltaïque peut varier entre 0.3 et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule [3].

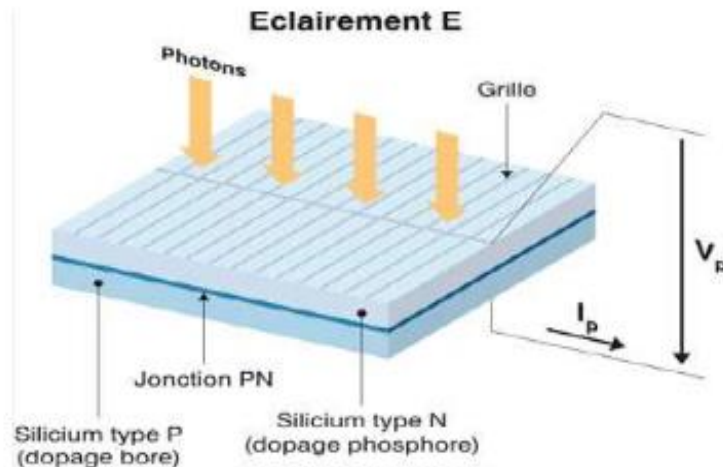


Figure (I-1) : Schéma d'une cellule élémentaire

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photosensible. Son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs.

L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N) permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu.

Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées sur les deux couches du semi-conducteur, l'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux. Une couche anti reflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée [4].

I.2.2 Cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est une composante optoélectronique qui transforme directement la lumière solaire en électricité, a été découverte par E. Becquerel en 1839. Une cellule photovoltaïque est constituée par un matériau semi-conducteur de type P-N. La taille de chaque cellule est de quelques

centimètres carrés. La figure (I.2) représente un échantillon schématisé d'une configuration de la cellule photovoltaïque [1].

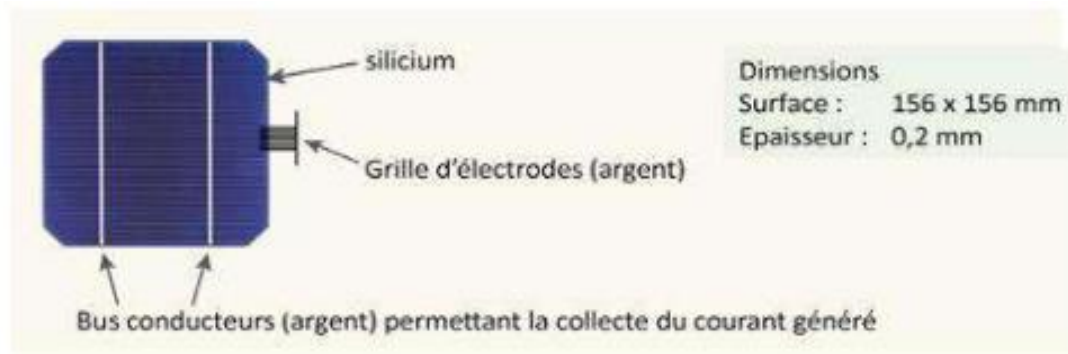


Figure (I-2) : Cellule photovoltaïque

I.2.3 Module photovoltaïque

Le composant le plus important de toute installation PV est le module photovoltaïque, qui se compose de cellules solaires interconnectées. Ces modules sont raccordés entre eux pour former des champs de manière à pouvoir satisfaire différents niveaux de besoins en énergie. La figure(I.3) représente un module photovoltaïque.

Des modules de plus en plus puissants sont disponibles sur le marché, en particulier pour la connexion du réseau, mais il y'a tout de même une limite liée au poids et à la manipulation. [1]



Figure (I-3) : Module photovoltaïque

I.2.4 Champ photovoltaïque

Le champ photovoltaïque se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le module PV avec un angle d'inclinaison spécifique. La figure (1.4) représente un champ photovoltaïque. [1]



Figure (I-4) : Champ photovoltaïque

I.3 Modélisation du module photovoltaïque

De nombreux modèles mathématiques de modules photovoltaïques, ont été développés, dont le but est l'obtention de la caractéristique Courant-Tension et Puissance-Tension pour l'analyse et l'évaluation des performances des systèmes photovoltaïques. [1]

I.3.1 Cas d'une cellule idéale

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque peut être schématisée par un générateur de courant I_{ph} en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la figure (I.5), qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale [5].

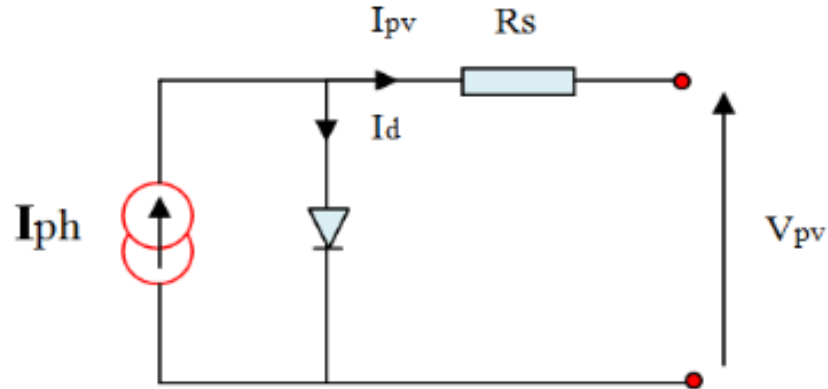


Figure (I-5) : schéma équivalent d'une cellule idéale

L'équation retenue de ce modèle est :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (I-1)$$

Le courant I_{ph} est assimilé au courant I_{cc} avec $V_{pv} = 0$, courant de court-circuit.

$$I_{ph} = [I_{cc} + K_i * (T_c - T_{ref})] * \frac{E}{E_{ref}} \quad (I-2)$$

K_i : Coefficient de température du court-circuit de la cellule (Ampères / K)

T_c : Température de la cellule en Kelvin

E : L'éclairement absorbé par la cellule

E_{ref} : L'éclairement de référence (1000 w/m²)

$$I_d = I_0(e^{(v_d/v_t)} - 1)$$

I_0 : Courant de saturation de la diode

$$v_t = \frac{BKT}{q} \quad (I-3)$$

v_t : Tension thermique

B : Facteur d'idéalité

K : Constant de Boltzmann (1,38.10⁻²³J/K)

q : Charge de l'électron (1,6.10⁻¹⁹C)

I.3.2 Cas d'une cellule réelle

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte l'effet résistifs parasites dues à la fabrication et représenté sur la figure (I.6). Ce schéma équivalent est constitué d'une diode (d) caractérisant la jonction, une source de courant (I_{ph}) caractérisant le photo - courant, une résistance série (R_s) représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunte (R_p) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à (R_s)[5].

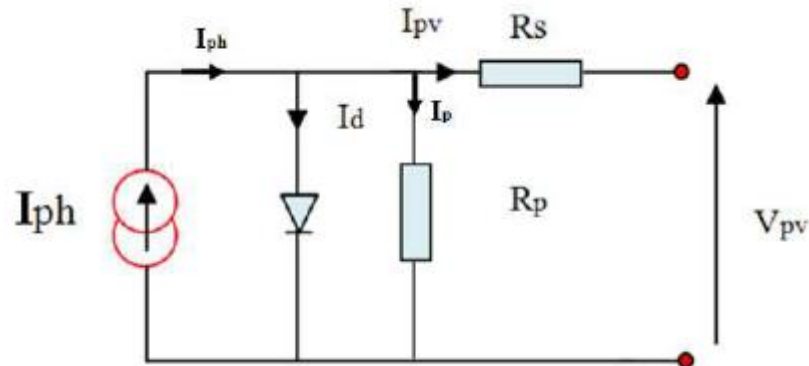


Figure (I-6) : schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle

Courant de sortie d'une cellule photovoltaïque se met sous la forme mathématique suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_p \quad (I-4)$$

I_{pv} : Courant générer par la cellule photovoltaïque

I_{ph} : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident)

I_d : Le courant circulant dans la diode.

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \quad (I-5)$$

$$I_0 = I_{0r} \left(\left(\frac{T}{T_n} \right)^3 e^{\left[\frac{E_g}{BK} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right]} - 1 \right) \quad (I-6)$$

I_{0r} : Le courant de court- circuit de la cellule à la température et l'éclairement de référence

T : Température de la jonction des cellules PV [$^{\circ}K$]

B : Facteur d'idéalité de la Junction

E_g : Énergie de gap [eV]

R_s : Résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi- conducteur, ainsi les résistances ohmiques et de contact au niveau des connexions des cellules

V_{pv} : La tension de sortie

I_p : Le courant circulant dans la résistance R_p

R_p : Résistance shunt représente les fuites autour de la jonction p-n et sur les coins de cellule.

En substituant les équations (I.6 ; I.7) dans l'équation (I.5), le courant I_{pv} devient :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[e \left(\frac{v_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{v_t} \right) - 1 \right] - \frac{v_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_p} \quad (I-7)$$

$$I_p = \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_p} \quad (I-8)$$

1.4 Identification des paramètres du module photovoltaïque

Il est bien connu que l'étape d'identification des paramètres de n'importe quel système est une étape très importante aussi bien pour la simulation que pour la pratique. Donc comme tout système, une connaissance précise des paramètres des modules photovoltaïques est indispensable pour la simulation, le contrôle de qualité et pour des estimations de leurs performances. Les constructeurs des cellules et des panneaux PV fournissent généralement une fiche technique (datasheet) contenant quelques paramètres du panneau PV composé par un groupement de plusieurs cellules. Mais il y a d'autres paramètres qui ne sont pas fournis sur la fiche technique. En pratique la détermination de ces paramètres inconnus est très importante.

Dans cette partie, on aborde une des questions importantes liées aux systèmes photovoltaïques qui consiste à la détermination de ces paramètres inconnus. L'objectif principal, est de trouver les cinq paramètres de l'équation non linéaire $I(V)$ à partir de données obtenues dans la fiche technique (datasheet) du module PV.

Pour identifier les paramètres du panneau PV, nous avons effectué nos expériences sur un panneau solaire de 10 W, ayant les caractéristiques regroupées dans le tableau (I.1).

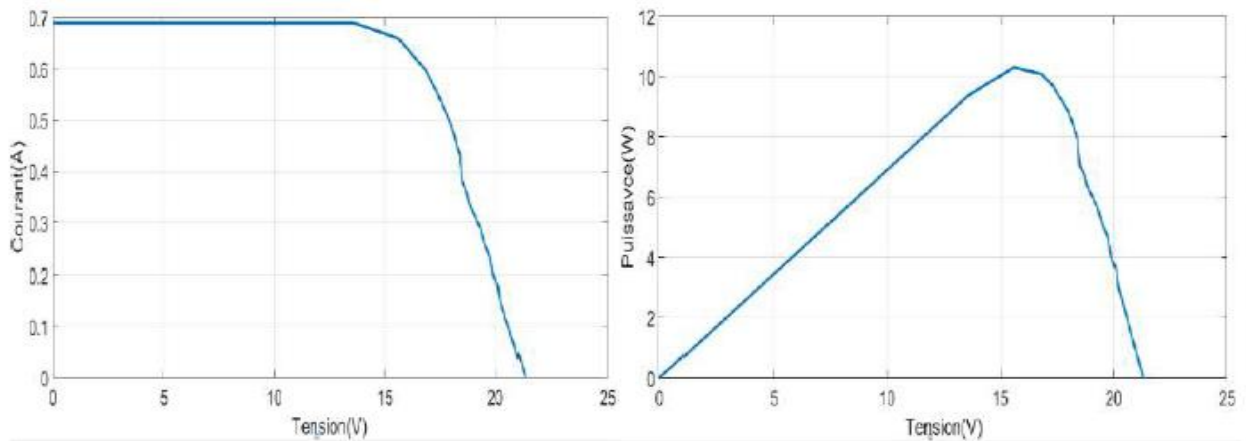
Tableau (I.1) : Caractéristiques du panneau PV 10 W

<i>Puissance maximal</i>	<i>Pmax</i>	<i>10</i>	<i>W</i>
<i>Tension à point maxima</i>	<i>Vpm</i>	<i>17.5</i>	<i>V</i>
<i>Courant à puissance maximal</i>	<i>Ipm</i>	<i>0.56</i>	<i>A</i>
<i>Tension en circuit ouvert</i>	<i>Vco</i>	<i>21.5</i>	<i>V</i>
<i>Courant de court-circuit</i>	<i>Icc</i>	<i>0.59</i>	<i>A</i>

Les caractéristiques réelles extraites des tests pratiques de notre PV sont regroupées dans le tableau (I 2).

Tableau (I 2) : Caractéristiques réelles du panneau

<i>Puissance maxima</i>	<i>Pmax</i>	<i>10.29</i>	<i>W</i>
<i>Tension à point maxima</i>	<i>Vpm</i>	<i>15.6</i>	<i>V</i>
<i>Courant à puissance maxima</i>	<i>Ipm</i>	<i>0.66</i>	<i>A</i>
<i>Tension de circuit ouvert</i>	<i>Vco</i>	<i>21.5</i>	<i>V</i>
<i>Courant de court-circuit</i>	<i>Icc</i>	<i>0.69</i>	<i>A</i>



a) Caractéristique Courant-Tension

b) Caractéristique Puissance-Tension

Figure (I 7) : Caractéristiques réelles extraites des tests pratiques du PV



Figure (I 8) : Test de mesure de la tension V_{co}

Figure (I 9) : Test de mesure du courant I_{cc}

I.4.1 Identification des paramètres du GPV en utilisant le modèle d'une cellule réelle.

Prenons le modèle mathématique à une diode donné par la Figure. I.6.

D'après l'équation (I.8) on a :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[e \left(\frac{v_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{v_t} \right) - 1 \right] - \frac{v_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_p} \quad (\text{I-9})$$

Cette équation exige la connaissance des cinq paramètres (I_{ph} , I_0 , R_s , R_p , B).

I.4.2 Le courant de saturation de la diode I_0 :

Le premier calcul à faire est d'utiliser l'équation (I.7) pour calculer le courant de saturation de la diode (I_0).

I.4.3 Résistance série R_s

La résistance série R_s peut être calculée par la puissance maximale à TCS. La dérivée de la puissance de sortie maximale par rapport à la tension de sortie au point de puissance maximale est exprimée par l'équation (I.11). [6]

$$\left. \frac{dP}{dV} \right|_{p_m} = \left. \frac{d(IV)}{dV} \right|_{p_m} = I_{p_m} + V_{p_m} \left(\left. \frac{dI}{dV} \right|_{p_m} \right) = 0 \quad (\text{I-10})$$

En utilisant l'équation (I.10), La dérivée du courant du module par rapport à la tension peut être calculé et substitué dans l'équation (I.11). La résistance série peut alors être calculée comme indiqué dans l'équation (I.12) :

$$R_s = \frac{V_{pm}}{I_{pm}} - \frac{BN_c V_t R_p}{I_0 R_{pexp} \left(\frac{V_{pm} + I_{pm} R_s}{BN_s V_t} \right) + BN_c V_t} \quad (I-11)$$

La résistance parallèle (R_p) du côté droit de l'équation (I.12) est encore inconnue. Le calcul de celui-ci nécessite une valeur pour R_s .

I.4.4 Résistance parallèle R_p

Au point de puissance maximale, l'équation (I.8) donne l'équation (I.13) :

$$\frac{P_{pm}}{V_{pm}} = I_{pm} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V_{pm} + I_{pm} R_s}{BN_c V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pm} + I_{pm} R_s}{R_p} \quad (I-12)$$

Cela peut être réarrangé dans l'équation (I.14) :

$$R_p = \frac{V_{pm} + I_{pm} R_s}{I_{ph} - I_{pm} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V_{pm} + I_{pm} R_s}{BN_c V_t} \right) - 1 \right]} \quad (I-13)$$

Il y a deux paramètres inconnus sur le côté droit de cette équation, la résistance série R_s et le courant photoélectrique I_{ph} .

I.4.5 Le photo-courant I_{ph}

L'hypothèse $I_{ph} \cong I_{cc}$ est généralement utilisée dans la modélisation des modules PV, parce que dans les modules pratiques la résistance série est faible et la résistance parallèle est élevée. Le photo-courant généré par la cellule PV à partir de la lumière dépend linéairement de l'éclairement et est également influencé par la température. Une meilleure approximation peut être faite en utilisant les résistances en série et en parallèle pour calculer le courant comme indiqué dans l'équation (I.15) :

$$I_{ph} \approx \frac{R_p + R_s}{R_p} I_{cc} \quad (I-14)$$

Ce calcul nécessite des valeurs pour les deux résistances.

I.4.6 Le facteur d'idéalité B

Ce paramètre est appelé aussi paramètre d'ajustement. Habituellement, $1 \leq B \leq 1,5$ et le choix dépend d'autres paramètres du modèle PV. Le facteur B donne le degré d'idéalité de la diode, et il est tout à fait empirique, une valeur initiale de B peut être choisie pour ajuster le modèle PV.

Cette valeur de B peut être modifiée par la suite afin d'améliorer le modèle, si nécessaire. Cette constante affecte la courbure de la courbe I(V) et peut ramener une légère amélioration de la précision du modèle.

I.4.7 Méthode itérative

Comme tous les paramètres dépendent l'un de l'autre, la méthode itérative est une manière pour trouver les paramètres du panneau photovoltaïque avec minimisation de l'erreur.

Dans [3], il est suggéré d'itérer les paramètres et de minimiser l'erreur donnée dans l'équation (I.19) en utilisant la résolution des équations, I.16, I.17 et I.18 par la méthode de Newton-Raphson.

$$E_{rr1} = \frac{V_{mpp}}{I_{mpp}} - \frac{BN_c V_t R_p}{I_0 R_p \exp \left[\left(\frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{BN_c V_t R_s} \right) \right] + BN_c V_t} - R_s \quad (I-15)$$

$$E_{rr2} = \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{I_{ph} - I_{mpp} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{BN_c V_t} \right) - 1 \right]} - R_p \quad (I-16)$$

$$E_{rr3} = \frac{R_p + R_s}{R_{pp}} I_{cc} - I_{ph} \quad (I-17)$$

$$E_{rr} = (E_{rr1})^2 + (E_{rr2})^2 + (E_{rr3})^2 \quad (I-18)$$

Après, l'application de la méthode d'identification, les paramètres identifiés du module PV sont donnés dans le tableau. I.3.

Tableau (I.3) : Les cinq paramètres identifiés par la méthode de calcul à partir de la datasheet

Paramètres identifiés	
Résistance parallèle	$R_p = 26738.6119 \Omega$
Résistance série	$R_s = 5.4874 \Omega$
Courant de saturation	$I_o = 4.9281e-12 A$
Photo-courant	$I_{ph} = 0.6951 A$
Facteur d'idéalité	$B = 0.90618$

I.5 Simulation du module photovoltaïque sous Proteus

Afin de simuler un panneau PV dans l'outil Proteus, son circuit équivalent est fait avec une source de courant contrôlée et une diode avec un Script Spice modifié, cela afin de concevoir un vrai modèle de panneau PV. La figure (I-10) présente le modèle Proteus et son code Spice [7].

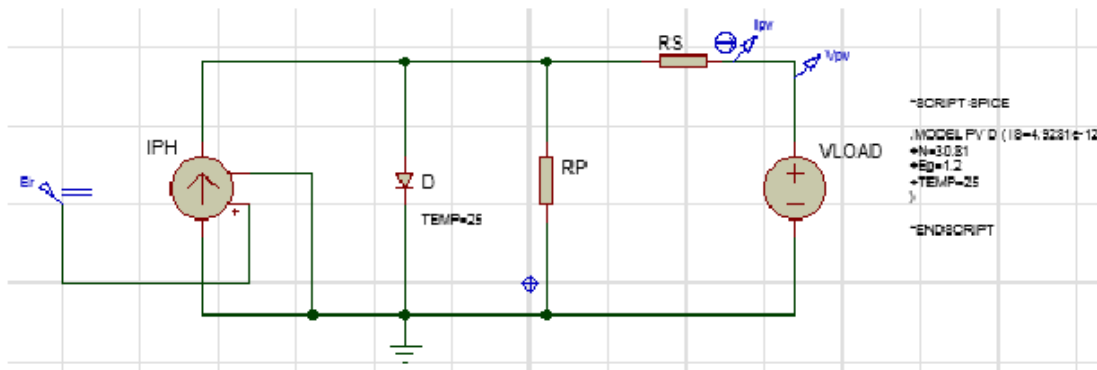


Figure (I 10) : Schéma équivalent du module photovoltaïque dans proteus

Pour simuler le panneau PV dans l'outil Proteus, les étapes ci-dessous sont suivies :

1. Un bloc "Voltage Controlled Current Source" est utilisé pour simuler la source de courant. Par exemple, pour simuler notre modèle en TCS, la valeur du bloc "Er" est réglée à la valeur 1000w/m2.
2. Comme le montre la figure (I.10), une diode avec Script Spice modifié est utilisée dans ce modèle, car il est nécessaire de changer les valeurs du courant de saturation I_0 , le facteur d'idéalité B, et le nombre de cellules dans le code Spice à la spécification du panneau [7]. Notez que N est défini par 30.81, qui est la multiplication entre le facteur d'idéalité et le nombre de cellules.
3. Deux résistances sont utilisées pour modéliser la résistance shunt et la résistance série avec les valeurs mentionnées dans le tableau (I.3).

4. Un bloc "DC Voltage Source" est connecté au modèle de panneau PV en tant que charge variable. Sa valeur est égale à la valeur de "Sweep variable" du graphique "DC SWEEP ANALYSIS" qui est utilisé pour varier la tension V_{pv} dans notre modèle sous Proteus, notez que la plage de la variable "Sweep variable" doit être comprise entre 0V et la tension en circuit ouvert 21.5V.

Les figures (I.11) et (I.12) montrent les valeurs de la tension de circuit ouvert V_{co} (21.5V) et du courant de court-circuit I_{cc} (0.69A) dans Proteus.

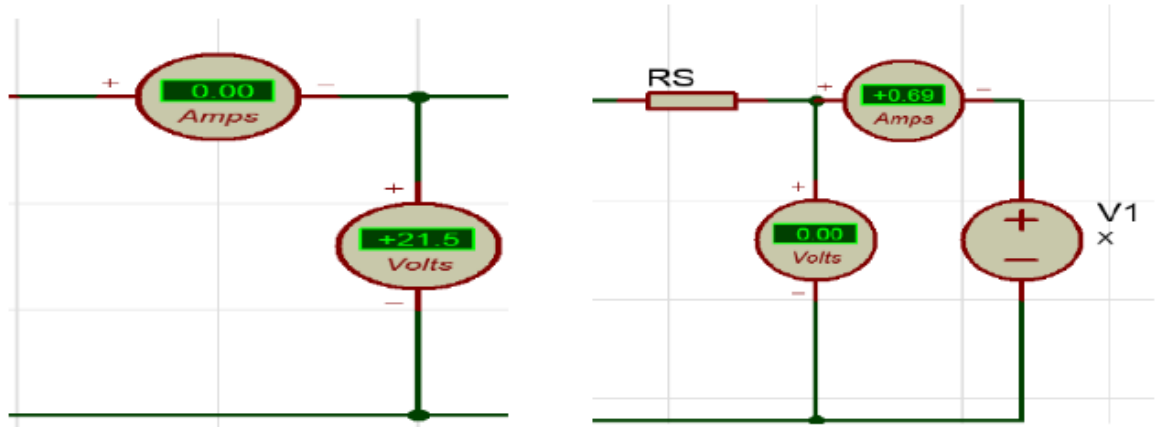


Figure (I .11) : Tension de circuit ouvert V_{co} Figure (I 12) : Courant de court-circuit I_{cc}

La figure (I.13) montre les caractéristiques I-V et P-V obtenues par simulation sous Proteus et par les données expérimentales au TCS. Dans la figure (I-13), le modèle est exactement conforme aux résultats expérimentaux dans les caractéristiques I-V et P-V.

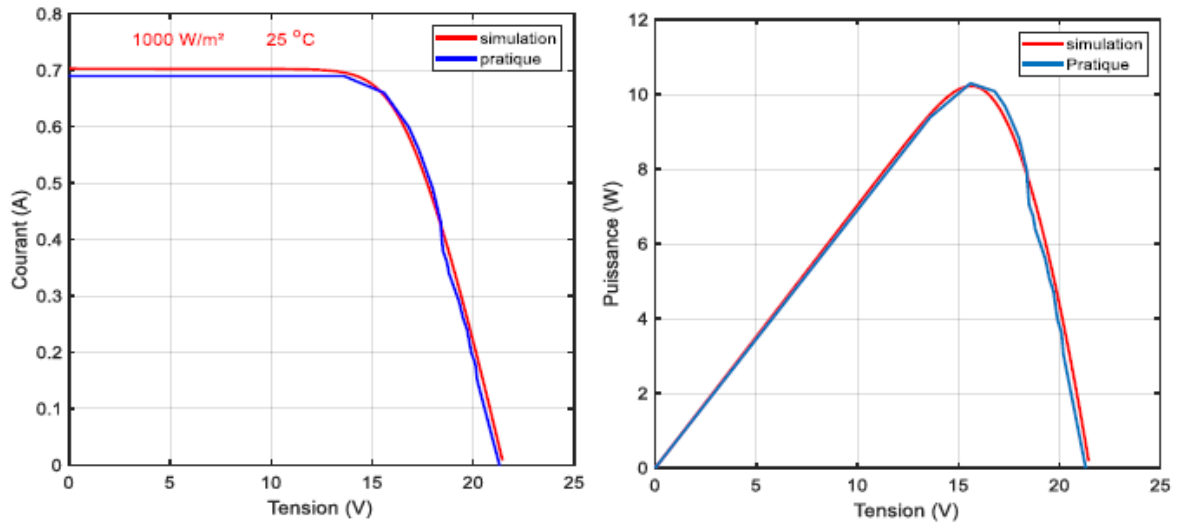


Figure (I 13) : Caractéristiques I-V et P-V du GPV

Dans ce qui suit, nous présentons les résultats de simulation des caractéristiques Courant- Tension et Puissance-Tension pour différentes températures et différents éclairements, puis L'influence de variation de deux résistances série R_s et parallèle R_p sur les caractéristiques I-V et P-V

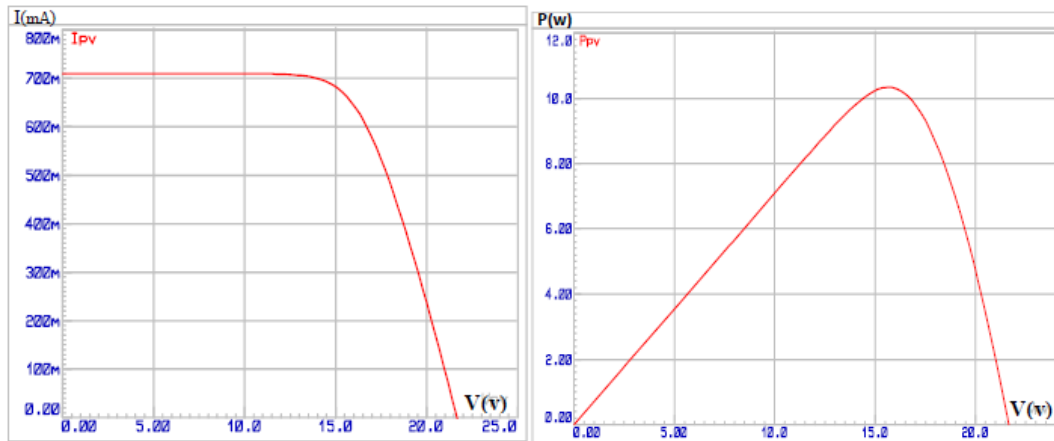
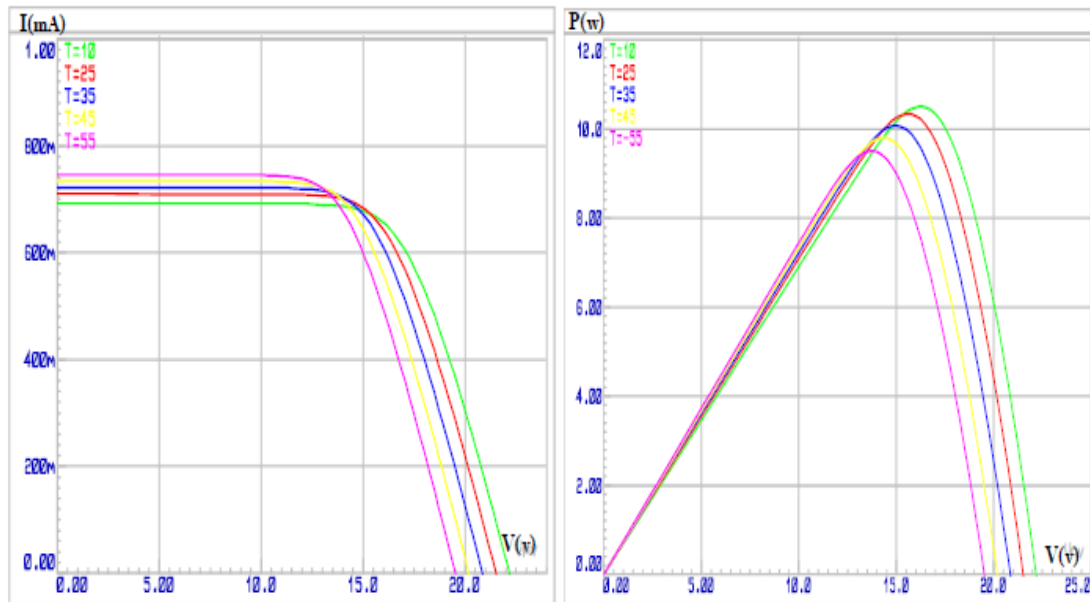


Figure (I -14) : Caractéristiques I-V et P-V obtenues par simulation sous Proteus au TCS

I.5.1 Influence de l'éclairement et de la température :

Nous avons effectué une simulation où nous avons maintenu un éclairement E constant pour différentes températures. La courbe présente des allures différentes selon la température. La tension à vide va diminuer avec la température, à l'inverse du courant de court-circuit.

La variation de tension à vide est pratiquement compensée par la variation du courant de court-circuit, et la puissance nominale fournie par une cellule va donc varier très légèrement avec la température de jonction.

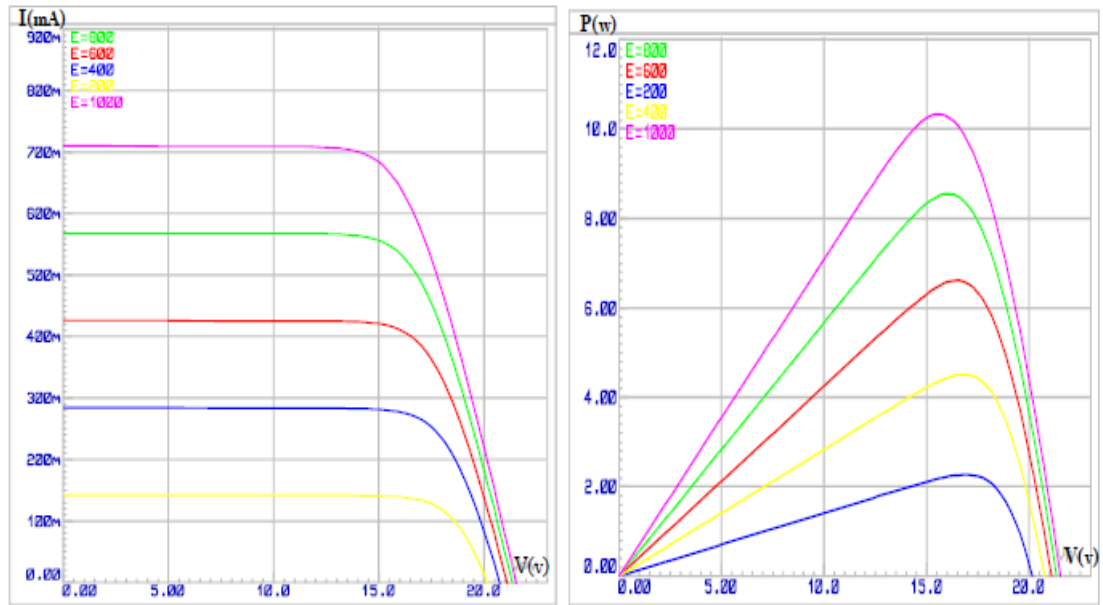


a)- Caractéristique I-V

b)- Caractéristique P-V

Figure (I- 15) : L'influence de la température sur les caractéristiques I-V et P-V

Lorsque nous avons maintenu une température constante à différents éclairements, on remarque que l'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que l'augmentation de la tension de circuit ouvert, car le courant de court-circuit (V_{cc}) est une fonction linéaire de l'éclairement et la tension du circuit ouvert (V_{oc}) est une fonction logarithmique.

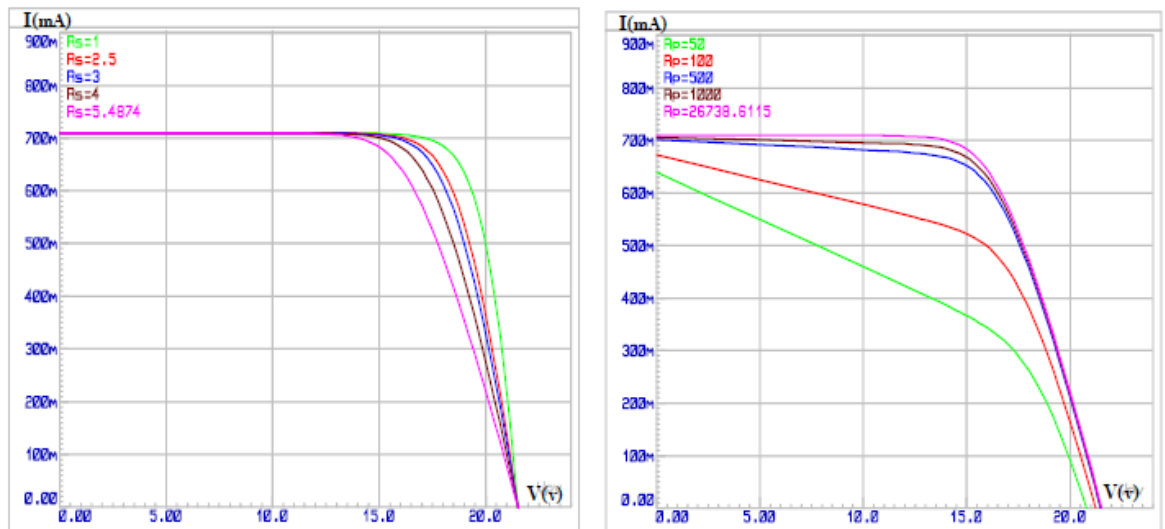


a) - Caractéristique I-V

b) - Caractéristique P-V

Figure (I -16) : L'influence de l'éclairement sur les caractéristiques I-V et P-V

1.5.2 Influence de variation de deux résistance R_s et R_p sur la caractéristique I-V



a)- Variation de R_s

b)- Variation de R_p

Figure (I- 17) : Courbes I-V pour différentes valeurs de R_s et R_p [Ω]

La Figure (I.17) montre l'effet des différentes valeurs de R_s et R_p sur la caractéristique I(V). On peut dire que la résistance série R_s influe légèrement sur la tension en circuit ouvert V_{co} qui diminue

à partir d'une certaine valeur de R_s . Par contre, la résistance parallèle R_p est liée directement aux processus de fabrication, et son influence ne se fait sentir que pour de très faibles valeurs.

I.6.Conclusion

Ce chapitre est consacré à la présentation du générateur photovoltaïque. Nous avons étudié le générateur photovoltaïque pour différentes puissances générées (cellules, modules et champs). Ensuite, nous avons la modélisation des modules ainsi l'identification de paramètres électriques du GPV. En fin, nous avons fait une simulation du module photovoltaïque P-10W dans l'environnement Proteus 8 Professional et étudié les différents effets sur les caractéristiques Courant-Tension et Puissance-Tension telle que, l'influence de l'éclairement et la température en plus l'influence de résistance série (R_S) et parallèle (R_p).

Dans le chapitre prochain, nous présenterons une étude sur les convertisseurs DC-DC (hacheurs) et leurs commande MPPT pour chercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale.

Chapitre II

Commande MPPT d'un système photovoltaïque



II.1 Introduction

Les générateurs photovoltaïques ont des caractéristiques non linéaires (P-V) et peuvent atteindre un point de fonctionnement optimal unique lors des conditions d'éclairage uniformes. Le point de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque (GPV) dépend directement de la charge à laquelle il est connecté. En effet, pour que le GPV fonctionne à puissance maximale, un étage d'adaptation doit être inséré entre l'alimentation et la charge. Celui-ci peut être un convertisseur DC/DC abaisseur ou élévateur.

Dans ce chapitre sont représentés différentes topologies des convertisseurs DC/DC pour la conception d'une interface de puissance. Après la détermination de la structure du convertisseur utilisé, différentes technologies MPPT, permettant au GPV de fonctionner à sa puissance maximale, sont abordées.

II.2 Convertisseur DC/DC

Les convertisseurs DC/DC sont utilisés pour convertir une tension continue non régulée à l'entrée en une autre régulée à un niveau requis à la sortie. Les convertisseurs DC/DC se composent de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, d'où les bons rendements des hacheurs.

Le commutateur est un dispositif semi-conducteur en mode (bloqué-saturé), habituellement c'est un transistor MOSFET. Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est égal à zéro et par conséquent sa dissipation de puissance est nulle. Si le dispositif est à l'état saturé, la chute de tension à ses bornes sera presque égale à zéro et par conséquent la puissance perdue sera très infime.

La régulation de la tension de sortie est obtenue par variation du rapport cyclique de l'élément interrupteur (l'élément de commutation). Pour cette raison, toute la conversion de puissance échangée doit être réalisée autour des composants de stockage d'énergie (inductance et condensateurs) et les commutateurs.

II.2.1 Convertisseur abaisseur (Buck)

Le convertisseur DC/DC permet d'adapter le point de fonctionnement du panneau à la charge, si la tension de sortie du convertisseur est inférieure au point nominal de fonctionnement du générateur PV [8]. Dans le cas d'un convertisseur statique de type abaisseur de tension (Buck), on peut exprimer sa tension d'entrée comme suit :

$$V_i = \frac{V_s}{D} \quad (\text{II-1})$$

Où :

V_i : la tension d'entrée.

V_s : la tension de sortie.

D : le rapport cyclique du convertisseur.

II.2.1.1 Principe de fonctionnement

Le convertisseur abaisseur utilise un interrupteur K (commutateur) commandé sans isolation entre la source d'entrée et la sortie (Figure II.1). Le fonctionnement de ce convertisseur peut être scindé en deux configurations [9].

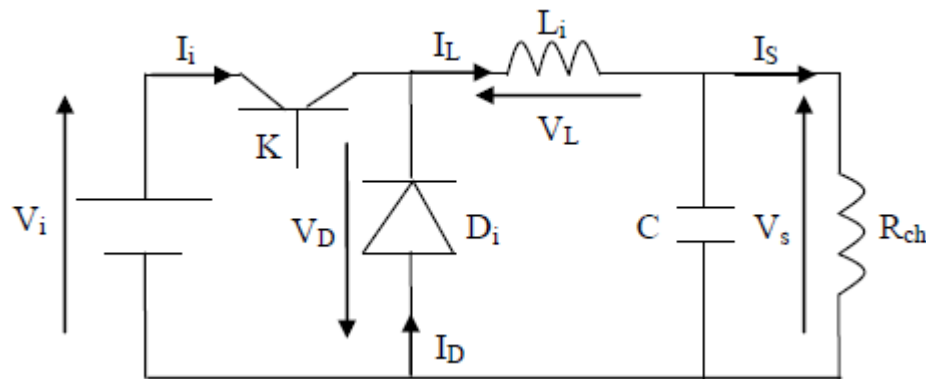


Figure (II- 1) : Schéma de base d'un convertisseur Buck.

- l'état passant

Dans l'état passant, l'interrupteur K est fermé (Figure II.2), la tension aux bornes de l'inductance vaut

$$V_L = V_i - V_s \quad (\text{II-2})$$

Le courant I_L n'augmente pas instantanément, mais plutôt linéairement avec un taux d'accroissement imposé par l'inductance L_i .

- l'état bloqué

Dans l'état bloqué, l'interrupteur K est ouvert (Figure II.2), la diode devient passante afin d'assurer, la continuité du courant dans l'inductance. La tension de sortie est :

$$V_s = -V_L \tag{II-2}$$

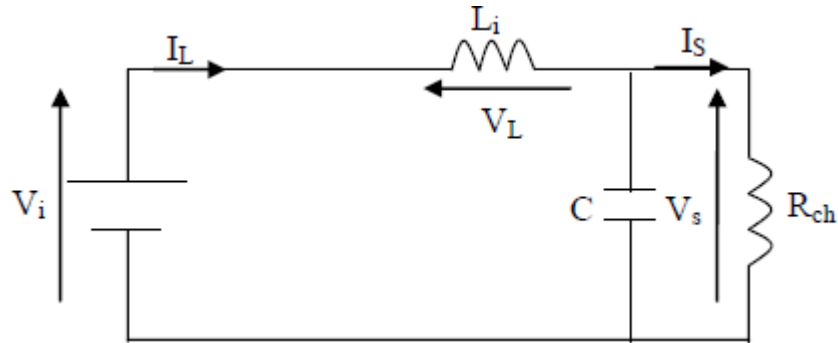


Figure (II- 2) : Convertisseur Buck à l'état passant

II.2.2 Convertisseur élévateur (Boost)

Le schéma de la figure (Figure II.3) représente le circuit Boost. Il est couramment employé dans les systèmes alimentés par batterie nécessitant des tensions d'alimentation élevées [10]. Dans ce cas, le convertisseur est utilisé pour réduire le nombre de composants nécessaires pour atteindre la tension requise. Le rapport entre les tensions d'entrée et de sortie peut être exprimé par :

$$V_s = \frac{V_i}{1 - D} \tag{II-3}$$

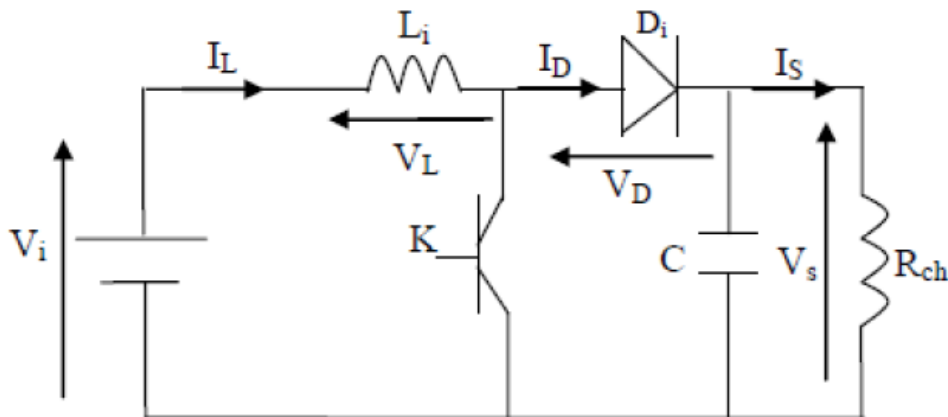


Figure (II- 3) : Schémas de base d'un convertisseur Boost

II.2.1.1 Principe de fonctionnement

Le circuit étant alimenté par une source de tension V_i , le fonctionnement d'un convertisseur Boost peut être divisé en deux phases distinctes selon l'état de l'interrupteur K [11].

• l'état passant

Lorsque l'interrupteur est fermé ($0 < t < DT$) (Figure II.4), le courant dans l'inductance augmente et l'énergie est emmagasinée sous forme d'énergie magnétique. La diode D_i est alors bloquée et la charge est, par conséquent déconnectée de l'alimentation.

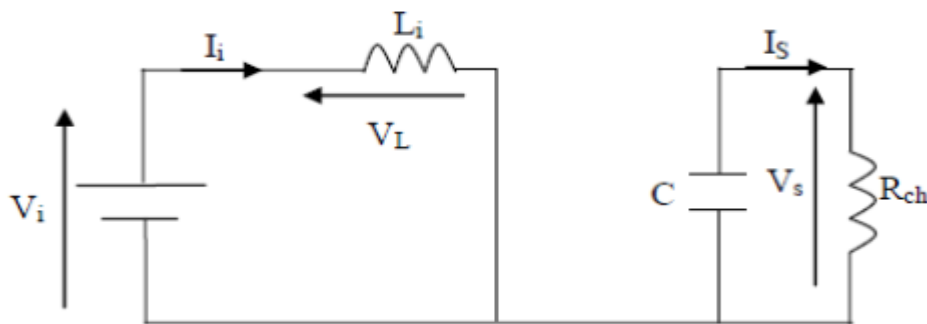


Figure (II- 4) : Schéma du Boost (S fermé). Schéma du Boost (S fermé).

• l'état bloqué

À l'instant $t = DT$, l'interrupteur K s'ouvre (figure II.5), la f.é.m. de l'inductance s'ajoute à celle du générateur, conséquence du placement en série de l'inductance avec le générateur (effet élévateur de tension). La diode est alors passante, le courant traverse l'inductance, le condensateur et la charge. Il en résulte un transfert vers la capacité de l'énergie accumulé.

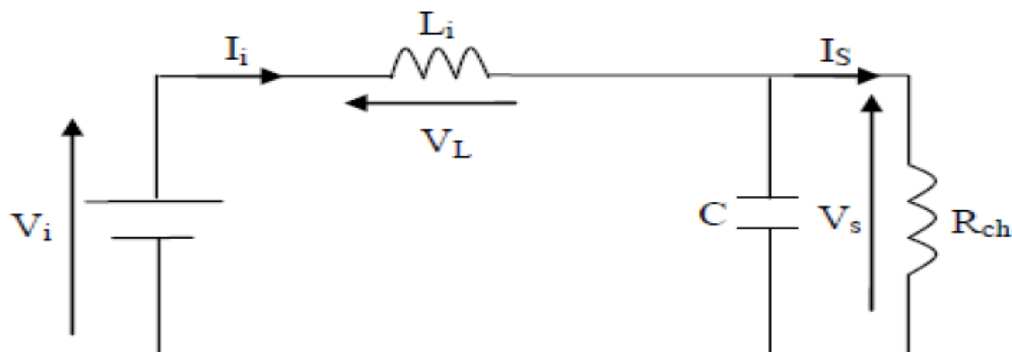


Figure (II- 5) : Schéma du Boost (K ouvert).

II. 2.2 La commande MPPT

La commande Maximum Power Point Tracking (MPPT) est une commande essentielle qui assure le fonctionnement du module photovoltaïque en son point de

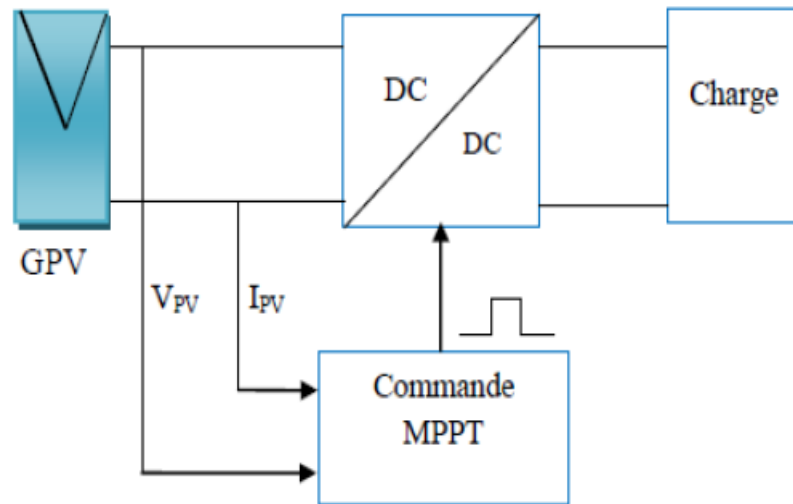


Figure (II- 6) : Principe de la Commande

Fonctionnement optimal, quelles que soient la charge et les conditions atmosphériques (température et ensoleillement). Le principe de cette commande est basé sur la variation du point de fonctionnement en modifiant le rapport cyclique pour atteindre la valeur optimale (Figure 2.7) [12].

II. 2.2.1 Critères d'évaluation d'une commande MPPT

La qualité de la commande MPPT peut être définie comme la position du point de fonctionnement du système par rapport au Point de Puissance Maximum (PPM).

La puissance réelle fournie par le GPV dépend des commandes utilisées au niveau du convertisseur (MPPT, contrôle de tension, connexion directe, etc.). L'efficacité du point de fonctionnement qui en résulte (η_{MPPT}) permet de mesurer l'efficacité de la commande du convertisseur de puissance. Le η_{MPPT} détermine le % de perte de puissance du module PV par rapport à la puissance maximale qui peut être produite [13].

$$\eta_{MPPT} = \frac{P_{eff}}{P_{max}} \quad (II-5)$$

η_{MPPT} : Le rendement du point de fonctionnement

P_{eff} : La puissance effectivement délivrée par le GPV

P_{max} : Le maximum de puissance potentiellement disponible à la sortie d'un panneau PV.

L'évaluation de la performance d'une commande MPPT n'est pas limitée au seul paramètre η_{MPPT} . D'autres critères, aussi importants, sont utilisés pour l'évaluation de la qualité de commande [14] :

- **Simplicité et Coût**

La commande MPPT doit être de conception simple, non énergivore et à coût d'exploitation raisonnable de sorte que son utilisation compense les dépenses supplémentaires investies.

- **Réponse dynamique**

La commande MPPT doit avoir de bonnes performances dynamiques pour contrôler l'étage d'adaptation et assurer que suite aux changements d'éclairement ou de température, un nouveau PPM soit trouvé le plus rapidement possible.

- **Flexibilité**

Quelles que soient les conditions d'utilisation, la commande MPPT doit être précise et stable. Elle doit être conçue pour fonctionner, avec précision et robustesse, de manière universelle avec des panneaux de technologies différentes sans exigence d'importantes modifications.

- **Compétitive sur une large gamme de puissance**

La commande MPPT utilisée doit poursuivre le PPM généré par le module photovoltaïque, quel que soit le niveau d'ensoleillement. La commande MPPT est considérée compétitive, si le PPM est atteint avec une erreur statique, qui correspond à la position du point de fonctionnement par rapport au PPM, relativement faible dans une large plage de puissance.

2.3 Les techniques de recherche du point de puissance maximale

La littérature propose un certain nombre d'algorithmes de recherche de MPP dont plusieurs ont été élaborés il y a déjà quelques décennies [12][15][16].

II.2.3.1 La méthode Perturbation et Observation (P&O)

La méthode P&O est surtout largement utilisée dans la pratique en raison de sa facilité de mise en œuvre. Cette méthode implique une perturbation de la tension de fonctionnement du générateur

photovoltaïque [17][18]. Quand le GPV est connecté à un convertisseur de puissance, la perturbation se répercute sur le rapport cyclique et par conséquent sur la tension.

La figure 2.8 montre que l'incrément (décrément) de la tension augmente (diminue) la puissance lorsqu'elle fonctionne à gauche du PPM et diminue (aug-mente) la puissance lorsqu'elle est à droite du PPM. Par conséquent, s'il y a une augmentation de puissance, la perturbation subséquente doit être maintenue la même pour atteindre le MPP et s'il y a une diminution de puissance, la perturbation doit être inversée. Le processus est répété périodiquement jusqu'à ce que le PPM soit atteint. Le système oscille alors autour du PPM. L'oscillation peut être minimisée en réduisant la taille du pas de perturbation. Cependant, un pas de perturbation de taille plus petite ralentit le MPPT.

L'organigramme de l'algorithme P&O conventionnel est présenté dans la Figure 2.9.

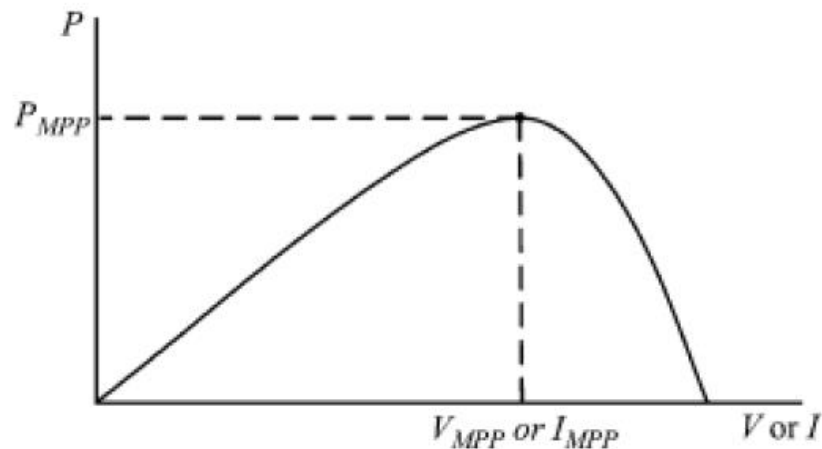


Figure (II- 7) : Courbe caractéristique de puissance du générateur photovoltaïque.

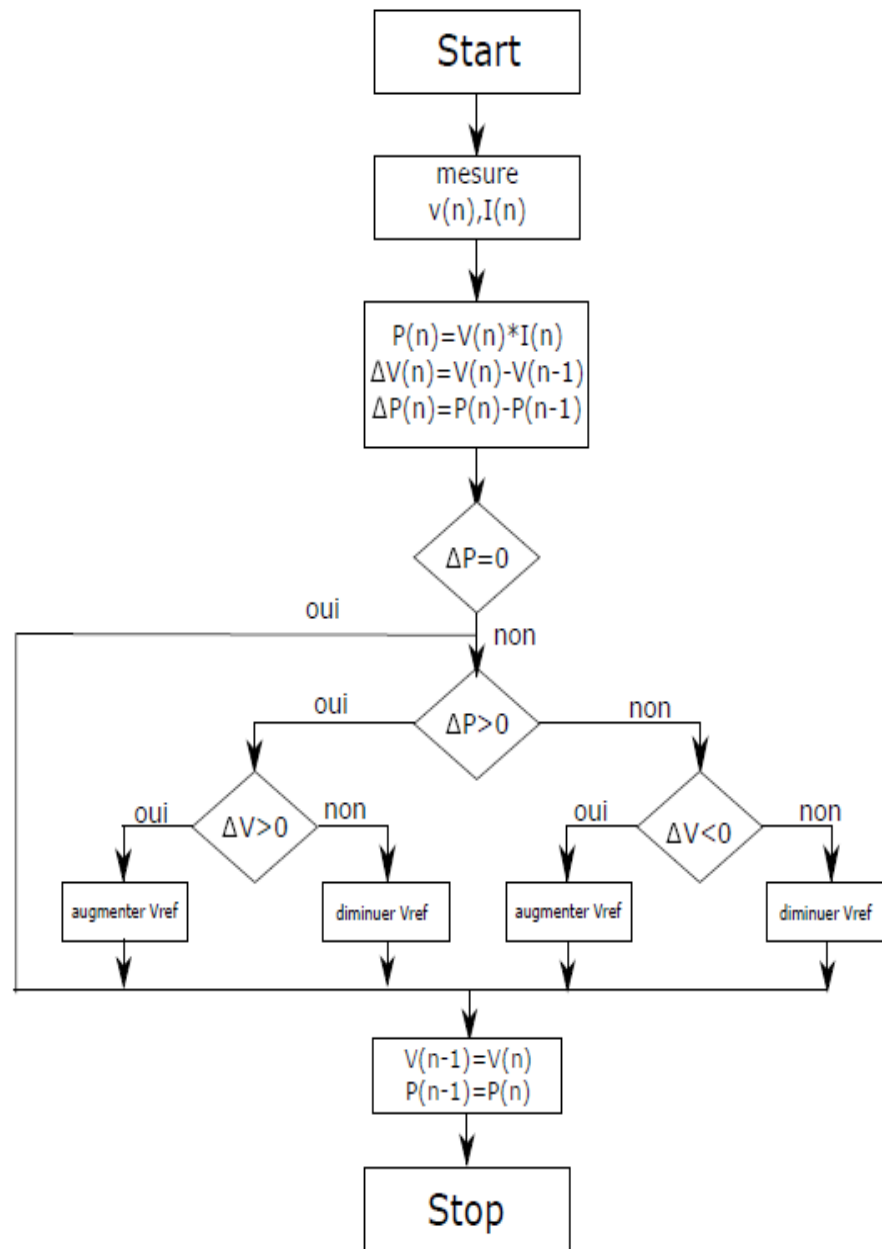


Figure (II- 8) : Organigramme de la Methode P&O

Cependant, si le rayonnement augmente et se déplace de la courbe de puissance de P_1 à la courbe P_2 pour une période d'échantillonnage, le point de fonctionnement passe alors de A à C ; cela représente une augmentation de puissance et la perturbation est alors maintenue. Par conséquent, le point de fonctionnement diverge du PPM et continue à diverger si le rayonnement augmente régulièrement 2.10.

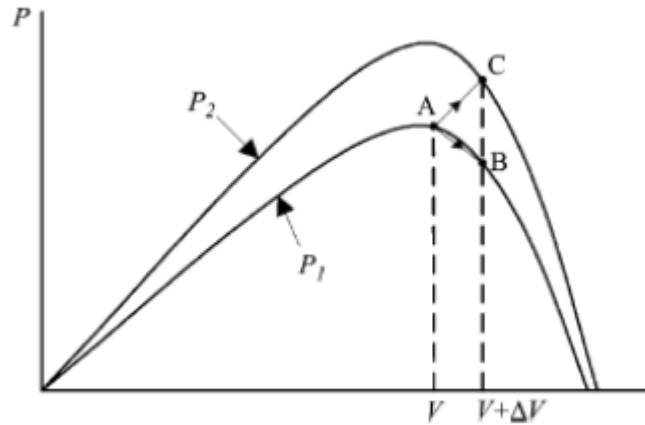


Figure (II- 9) : Divergence de la divergence de la méthode P&O

Deux capteurs sont généralement nécessaires pour mesurer la tension et le courant du générateur photovoltaïque à partir desquels l'énergie est calculée.

II.2.3.2. La méthode Incrément des conductances (INC)

La technique MPPT de conductance incrémentale (INC) est une des stratégies MPPT les plus utilisées, qui présente l'avantage d'un suivi rapide du PPM [19]. Par rapport à la stratégie P&O MPPT, INC combine et utilise les caractéristiques uniques de la courbe P–V de sortie et de la courbe I–V du générateur photovoltaïque et poursuit le PPM plus rapidement et précisément [20]. Cette technique repose sur la pente de la courbe caractéristique P – V (figure 2.8) où le PPM est suivi lorsque $dP/dV = 0$ comme suit :

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dV} &= \frac{d(V \cdot I)}{dV} = I \frac{dV}{dV} + V \frac{dI}{dV} \\ &= I + V \frac{dI}{dV} \approx I + \frac{\Delta I}{\Delta V} \end{aligned} \quad (\text{II-6})$$

Comme l'indique cette la figure 2.8, la pente de la courbe de puissance du générateur photovoltaïque est nulle au PPM, positive à gauche, et négative à droite.

L'équation 2.6 indique que le PPM est atteint lorsque $dI/dV = -I/V$.

Si $dI/dV > -I/V$ le point de fonctionnement est sur la gauche du PPM sur la courbe P – V.

Si $dI/dV < -I/V$ le point de fonctionnement est sur la droite.

Le PPM peut ainsi être poursuivi en comparant la conductance instantanée (I / V) à la conductance incrémentielle ($\Delta I/\Delta V$) comme indiqué dans l'organigramme de la figure 2.11.

La taille de l'incrément détermine la vitesse de suivi du MPP. Un suivi rapide peut être obtenu avec des incréments plus importants mais le système peut ne pas fonctionner exactement au PPM et osciller autour de ce dernier.

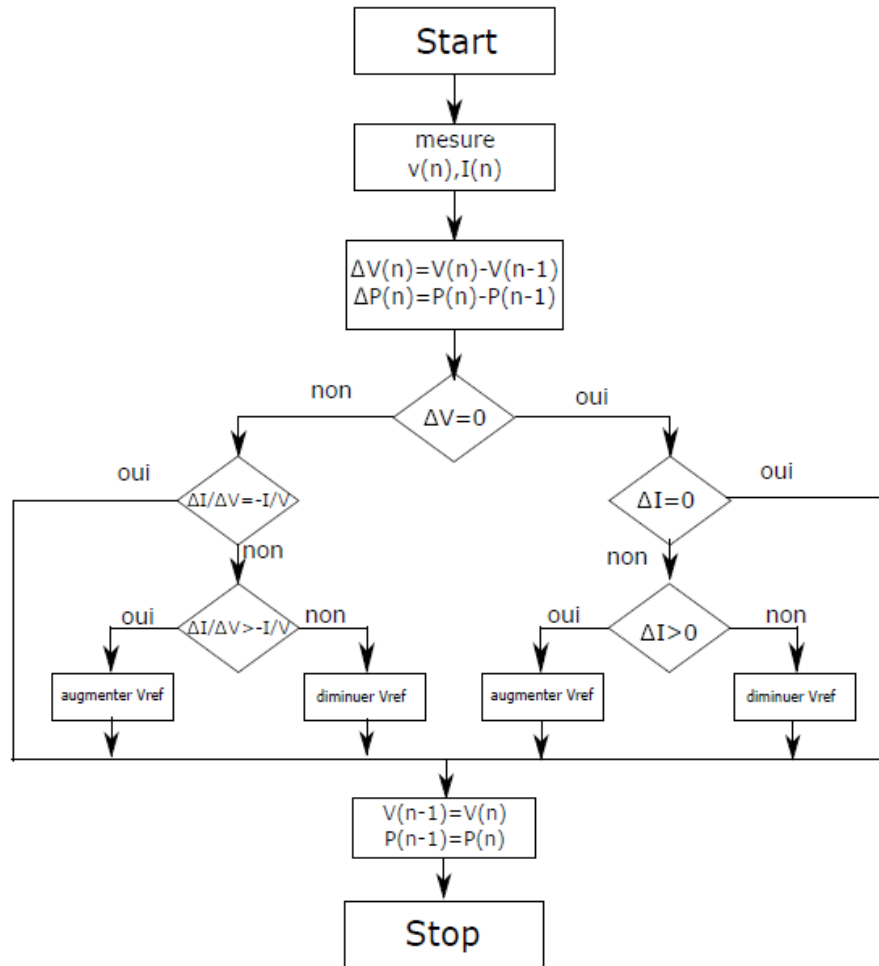


Figure (II- 10) : Organigramme de la méthode INC

II.2.3.3 Commande par la logique floue

Dans la logique classique, une proposition simple est une déclaration linguistique ou déclarative contenue dans un univers d'éléments, disons X, qui peut être identifiée comme étant une collection d'éléments en X, qui sont strictement vrais ou strictement faux.

En logique floue, une proposition est une déclaration impliquant un concept sans limites clairement définies. Les énoncés linguistiques qui ont tendance à exprimer des idées subjectives et qui peuvent être interprétés différemment par divers individus engagent généralement des propositions floues [21].

II.2.3.3.1 Concept de système de contrôleur à logique floue et application sur système PV

Cette méthode utilise la logique floue afin de rendre plus rapide la réponse du contrôleur et d'augmenter la stabilité du système une fois le point MPP atteint.

La poursuite du point MPP est scindée en deux phases : la première est une période de recherche grossière avec un très grand pas de recherche afin d'accélérer la réponse du contrôleur MPPT, tandis que la seconde est plus affinée avec un pas très petit, qui garantira la stabilité du système et la diminution au maximum des oscillations autour du point PPM [22] [23].

Cette caractéristique du contrôleur flou démontre son efficacité et le range parmi les meilleurs dispositifs de poursuite MPPT.

II.2.3.3.2 Fonctions d'ensemble flou et d'appartenance

L'ensemble flou A dans l'ensemble universel U (appelé univers du discours) est un ensemble de paires ordonnées d'un générique élément u (quantités généralement non numériques) et son degré d'appartenance $\mu_A(u)$, est défini par l'équation [21] :

$$A = \{(u, \mu_A(u)) : u \in U\} \quad (\text{II-7})$$

II.2.3.3.3 Variable linguistique et règles

Une variable linguistique est une variable floue qui n'est pas un nombre et est représentée sous la forme d'un mot ou phrase. Elle est appliquée dans la formation des règles floues, qui peuvent être trouvées dans le contrôleur flou.

Généralement, les variables sont nommées en fonction de l'entrée et de la sortie du système. La règle est conditionnelle sous la forme SI - ALORS, et rend l'algorithme et le contrôleur flou intelligents en se basant sur la décision humaine [21].

II.2.3.3.4 Architecture du contrôleur à logique floue

L'architecture générale du contrôleur à logique floue (Fuzzy Logic Controller FLC) utilisé dans un système de commande est représentée par la figure 2.12.

L'architecture du FLC type 1 est composée de trois unités principales [21] :

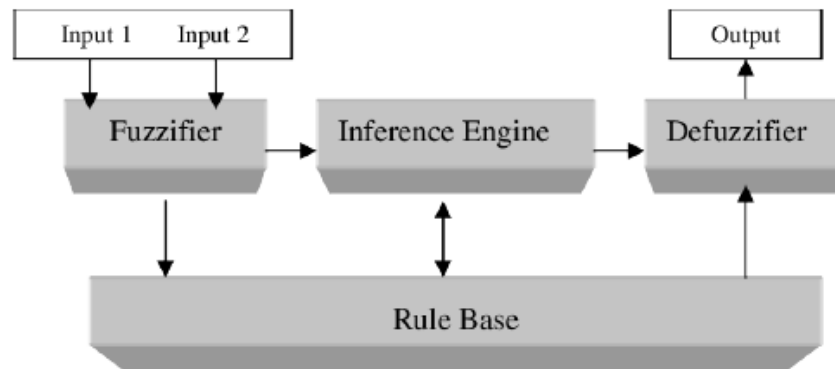


Figure (II- 11) : L'architecture d'un contrôleur flou

• Fuzzification

La fuzzification permet de convertir les entrées (variables numériques) en variables linguistiques selon les fonctions d'appartenance.

Dans notre cas, les entrées sont l'erreur et la variation de l'erreur, telles que décrites par les équations [24] :

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

$$\Delta E(n) = E(n) - E(n-1) \quad (\text{II-9})$$

L'approximation utilisée dans l'équation est basée sur l'idée que la quantité de dP/dV disparaît une fois que le MPP est atteint. La fuzzification est basée sur les fonctions d'appartenance montrées sur la figure 2.13. les entrées sont normalisées (avant d'entrer dans le FLC, ils étaient divisés par leurs valeurs maximales).

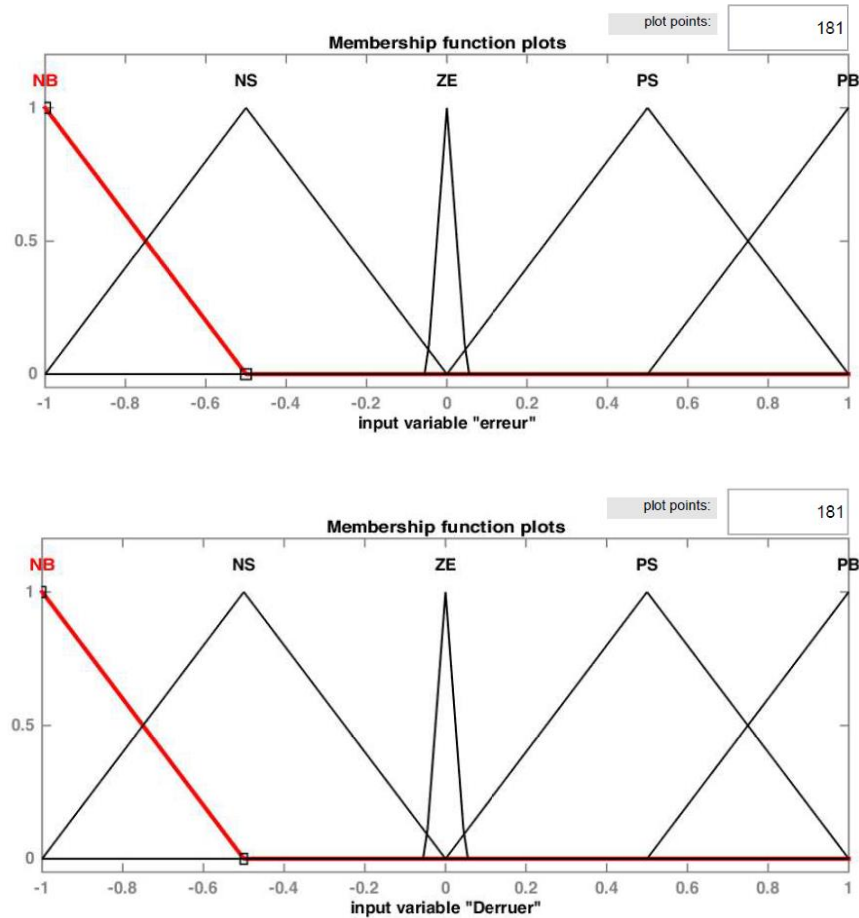


Figure (II- 12) : Fonctions d'appartenance des entrées

Comme l'illustre la figure 2.13, les deux entrées ont cinq niveaux flous : NB (négatif grand), NS (négatif petit), ZE (zéro), PS (petit positif), PB (grand positif) [25].

• Moteur d'inférence

La méthode d'inférence produit un ensemble de sorties floues selon la logique de la règle SI-ALORS (Tableau 2.1). La valeur linguistique de la sortie est alors déterminée [26].

Le contrôleur flou de type 1 (appelé Mamdani) a besoin d'une troisième unité dans laquelle la valeur linguistique de la sortie sera transformée en valeur numérique. Il existe un autre type de contrôleur (Takagi – Sugeno), qui se limite à deux unités, dans lequel la valeur numérique sera calculée à partir du tableau des règles.

Tableau (II- 1) : – Tableau des règles floue

E \ dE	NB	NS	ZE	PS	PB
	NB	ZE	ZE	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	ZE

• **Défuzzification**

Ce processus transforme l'ensemble flou de sortie en une sortie numérique. La technique du centroïde est l'une des méthodes de défuzzification les plus populaires. Cette méthode identifie un point qui représente le centre de gravité de l'ensemble flou à un certain intervalle :

$$\Delta D = \frac{\sum \mu_k * d_k}{\sum \mu_k} \tag{II-10}$$

Cette sortie est calculée sur la base des fonctions d'appartenance de la sortie, exposées dans la figure 2.14.

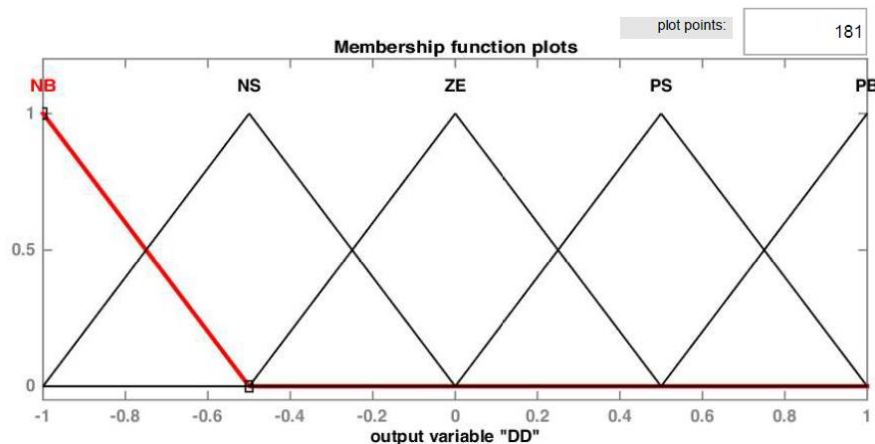


Figure (II- 13) : Fonctions d'appartenance de la sortie

L'algorithme basé sur la logique floue est un algorithme robuste et efficace. En effet, cet algorithme fonctionne au point optimal avec de petites 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, son efficacité dépend beaucoup de la connaissance de l'utilisateur dans le choix du calcul d'erreur et l'élaboration de la table de base de règles.

Chapitre III

Commande MPPT Basée sur L'Approche Floue



III.1 Introduction

Il existe des stratégies de commande spécifiques conçues pour amener les dispositifs à fonctionner à leur performance maximale, même si le point de performance maximal est inconnu à l'avance, ou s'il a été modifié sans préavis ou sans explication. Dans le cas des sources d'énergie, cela correspond à leur point de puissance maximale. Ces techniques de commande sont communément appelées « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou « Maximum Power Point Tracking » (MPPT) dans la littérature technique. Le principe de ces techniques est de trouver le point de puissance maximale (PPM) tout en assurant une adaptation optimale entre le générateur et sa charge, de manière à maximiser le transfert de puissance. [27]

III.2 Principe de la commande MPPT

En utilisant une commande MPPT associée à un étage intermédiaire d'adaptation, il est possible de faire fonctionner un générateur photovoltaïque (GPV) de manière à produire en permanence sa puissance maximale, comme le stipule sa définition. Ainsi, quelle que soit la variation des conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur permet de placer le système au point de fonctionnement maximum (VPPM et IPPM). Pour optimiser la chaîne de conversion photovoltaïque, un convertisseur statique (CS) est utilisé et est commandé par la commande MPPT [28]. Il peut être représenté par le schéma de la Figure IV.1.

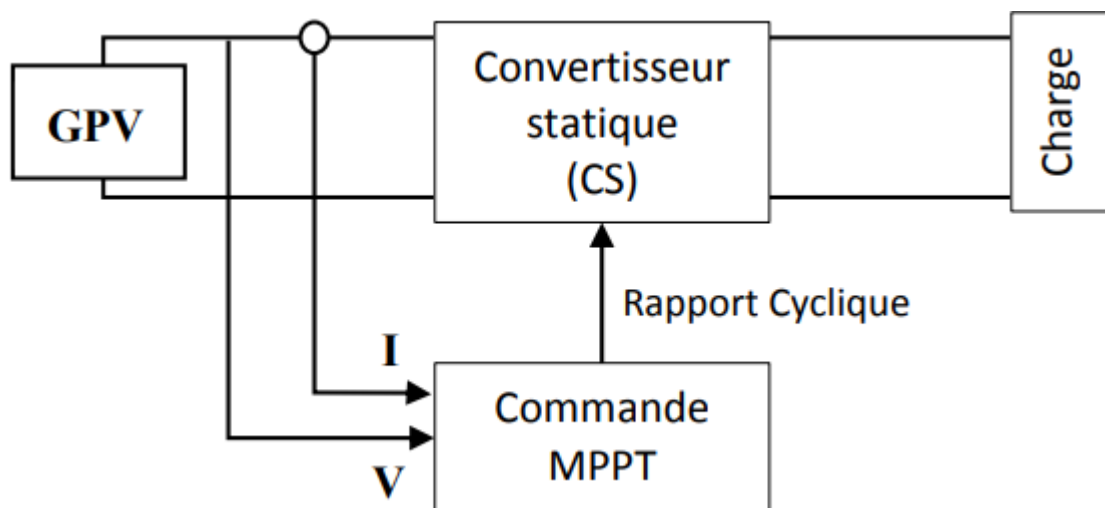


Figure III.1 Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge. [28]

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPPT [29].

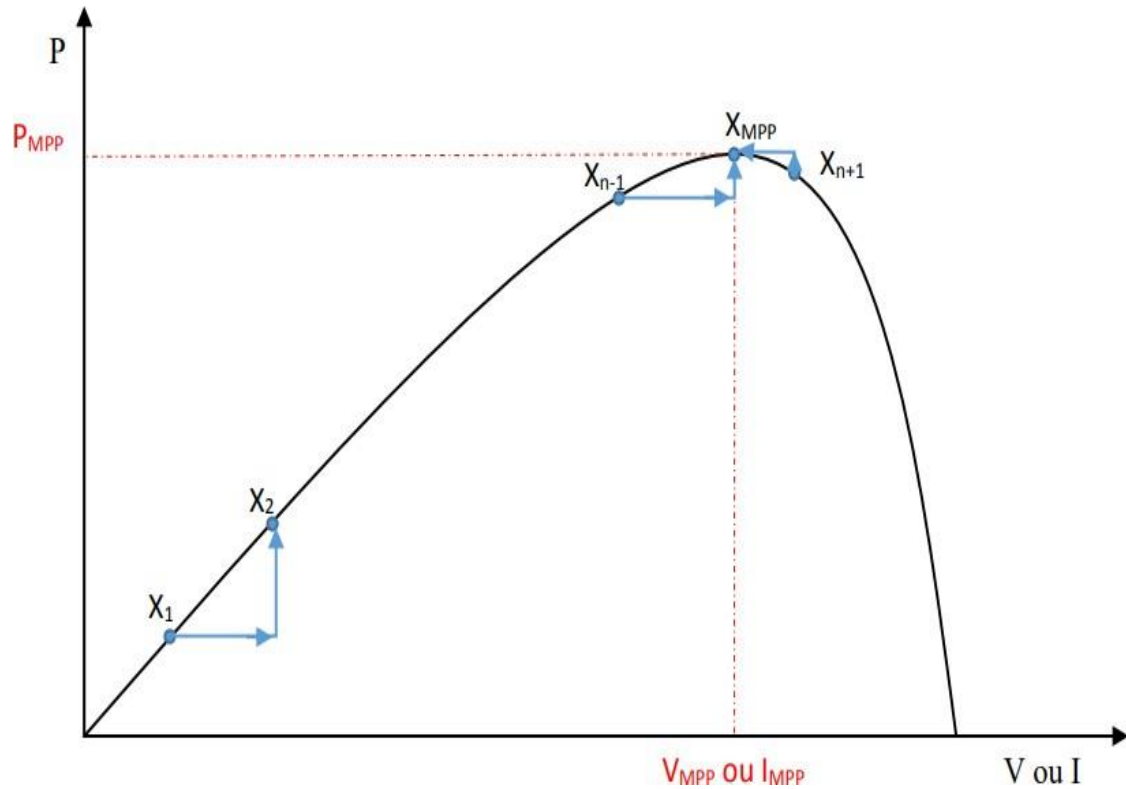


Figure III.2 Principe de la commande MPPT. [28]

III.3 Classification Des Commandes MPPT

En général, les commandes MPPT peuvent être classées en fonction de leur implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Toutefois, il est plus pertinent de les classer en fonction du type de recherche effectuée et des paramètres d'entrée de la commande MPPT.

III.3.1 Classification Des Commandes MPPT Selon Les Paramètres D'entrée

- **Commandes MPPT fonctionnantes à partir des paramètres d'entrée du CS**

Il y a un certain nombre de commandes MPPT qui effectue une recherche du PPM selon l'évolution de la puissance fournie par le GPV. Comme la méthode de Perturb & Observe, les algorithmes d'incrément de conductance qui utilisent la valeur de la puissance fournie par le

GPV pour l'application d'une action de contrôle adéquate pour le suivi du PPM ou bien Les commandes qui sont basé sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maximal (VOPT et IOPT) et les paramètres caractéristiques du module PV (VOC et ICC). Notamment, les MPPT inspirées des réseaux de neurones. Dans ces commandes, soit on fait appel à des systèmes à mémoires informatiques importantes ayant stocké tous les cas possibles, soit les commandes sont encore une fois de plus approximatives. Toutes ces commandes ont comme avantages leurs précisions et leur rapidité de réaction [30].

- **Commandes MPPT fonctionnantes à partir des paramètres de sortie du convertisseur**

Dans la littérature, il existe également des algorithmes basés sur les paramètres de sortie des CS. Par exemple Les commandes MPPT basées sur la maximisation du courant de sortie qui sont principalement utilisées quand la charge est une batterie.

Dans tous les systèmes utilisant les paramètres de sortie, une approximation de Pmax est faite à travers le rendement du convertisseur. En somme, plus l'étage de conversion est bon, plus cette approximation est valable. Par contre, en général, tous les systèmes avec un seul capteur sont par essence, non précis. La plupart de ces systèmes ont été conçus à l'origine pour le spatial [28].

III.3.2 Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche

- **MPPT Indirect**

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées (Isc ou Voc), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur. Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt

destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques [28-31].

- **MPPT Direct**

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV. Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPP. Ce principe de base peut être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation. Ces erreurs peuvent survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction de recherche, résultant d'une hausse de puissance qui est due à une augmentation rapide du niveau de rayonnement. La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV, indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables. D'autres algorithmes se basent sur l'introduction de variations sinusoïdales en petit signal sur la fréquence de découpage du convertisseur pour comparer la composante alternative et la composante continue de la tension du GPV et pour ainsi placer le point de fonctionnement du GPV le plus près possible du MPP. L'avantage de ce type de commandes est leurs précisions et leur rapidité de réaction [28-31].

III.3.3 Les algorithmes MPPT

Les algorithmes MPPT (Maximum Power Point Tracking) sont utilisés pour maximiser la production d'énergie des panneaux solaires en ajustant leur point de fonctionnement optimal en fonction des conditions de lumière et de température. Voici quelques exemples d'algorithmes MPPT :

Perturbation et observation (P&O) : Cet algorithme mesure la puissance de sortie du panneau solaire à intervalles réguliers et modifie la tension d'entrée du convertisseur DC-DC jusqu'à ce que la puissance maximale soit atteinte. Il perturbe la tension de manière répétée en ajoutant ou en soustrayant un petit montant de tension, puis observe la puissance de sortie pour déterminer si la tension doit être augmentée ou diminuée.

Incrémentation conductance (InC) : L'algorithme Incrémentation conductance mesure la conductance instantanée du panneau solaire et ajuste la tension d'entrée pour maximiser la conductance. La conductance est déterminée en calculant la pente de la courbe caractéristique courant-tension du panneau solaire.

Perturbation adaptative en boucle fermée (ALP) : L'algorithme ALP utilise une perturbation en boucle fermée pour déterminer le point de puissance maximale. Il mesure la puissance de sortie et ajuste la tension d'entrée jusqu'à ce que la puissance maximale soit atteinte. Le contrôleur ajuste ensuite la fréquence de la perturbation en fonction de l'écart de puissance par rapport au point de puissance maximale pour réduire le temps de réponse.

Fuzzy logic (FL) : L'algorithme FL utilise des règles de logique floue pour ajuster la tension d'entrée du convertisseur DC-DC. Les règles sont définies en fonction des mesures de tension et de courant du panneau solaire, ainsi que des valeurs de référence pour la puissance et la tension.

Ces algorithmes peuvent être utilisés dans des systèmes autonomes ou connectés au réseau pour maximiser l'efficacité énergétique des panneaux solaires.

Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe)

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode repose sur la perturbation (une augmentation ou une diminution) de la tension V_{ref} , ou du courant I_{ref} , et l'observation de la conséquence de cette perturbation sur la puissance mesurée ($P=VI$) [28]. Cependant, la variable idéale qui caractérise le MPP est celle qui varie peu lors d'un changement climatique. La variation du rayonnement affecte davantage le courant que la tension photovoltaïque. Par contre, la variation de la température modifie plus la tension du GPV. Néanmoins, la dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV [32].

Le principe de commande P&O consiste à provoquer une perturbation de faible valeur sur la tension VPV, ce qui engendre une variation de la puissance. Figure IV.5 montre qu'on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension VPV engendre un accroissement de la puissance PPV, cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une

variation de tension sur la caractéristique $P(V)$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié [28].

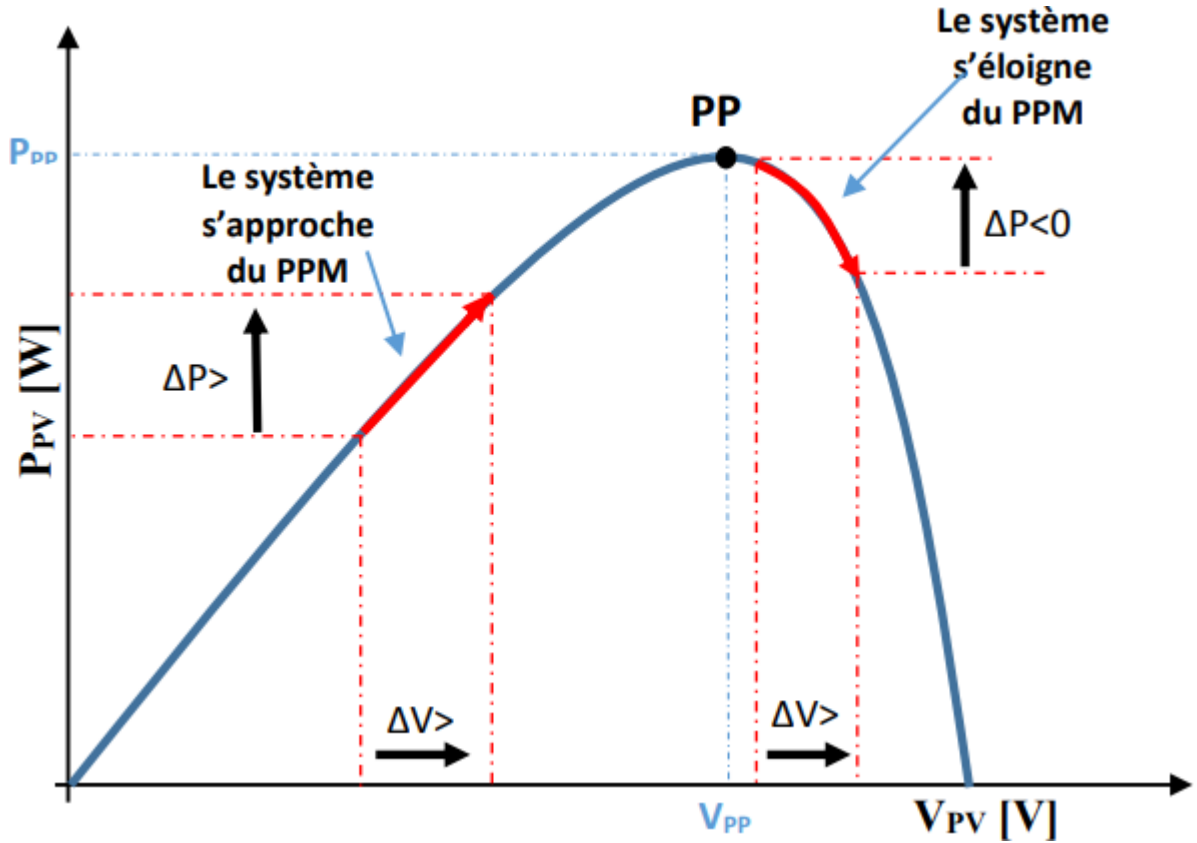


Figure III.3 Recherche du PPM par la méthode (P&O). [28]

A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $p(v)$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du GPV à chaque instant. L'utilisation d'un microprocesseur est plus appropriée pour la réalisation de la méthode P&O, même si des circuits analogiques peuvent être utilisés [33].

La Figure III.4 dans la page suivante illustre l'algorithme traditionnel d'un contrôleur MPPT basé sur la méthode Perturbation et Observation (P&O), dans lequel la variation de la puissance est évaluée après chaque perturbation de la tension d'entrée.

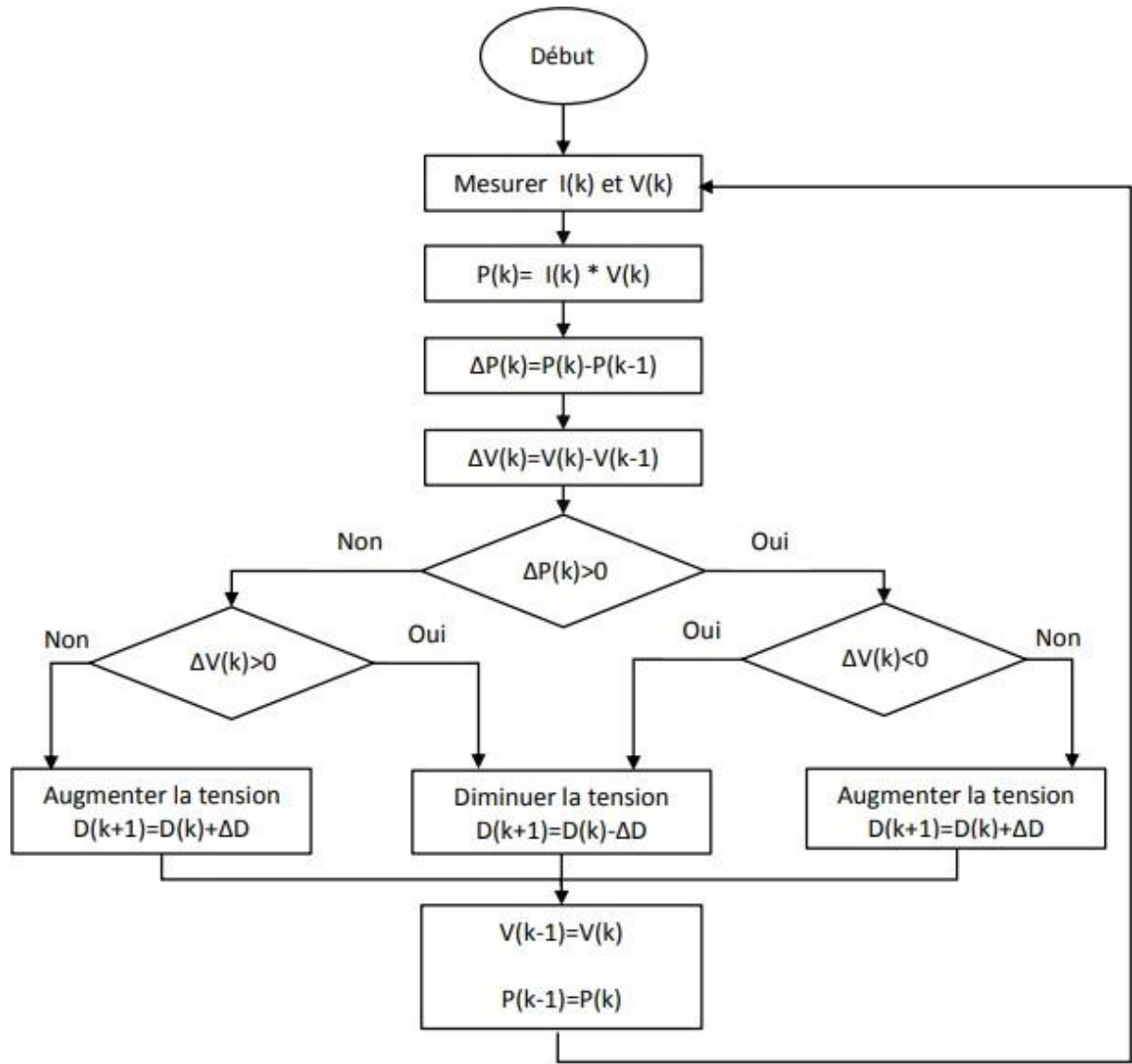


Figure III.4 L'algorithme de P&O classique. [28]

Bien que la méthode P&O soit populaire en raison de sa simplicité d'implémentation, elle présente certains inconvénients tels que des oscillations persistantes autour du Point de Puissance Maximale (PPM) lorsque le système atteint son état stationnaire. Cela est dû à la nécessité de répéter périodiquement la procédure de recherche du PPM, ce qui force le système à osciller constamment autour de cette valeur optimale [34]. Ces oscillations dépendent de la largeur du pas de la perturbation [28] :

- Si la largeur du pas est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou lentement changeantes.

III.4 Modélisation de la régulation de puissance maximale des panneaux solaires via MATLAB/SIMULINK

III.4.1 Modèle SIMULINK du contrôleur MPPT à base de P&O

Pour valider la mise en œuvre de l'algorithme recommandé, un modèle MATLAB/Simulink a été développé, comme illustré dans la figure II.18. Ce modèle est composé d'un module de générateur PV ainsi que d'une commande de convertisseur DC-DC Boost avec une commande MPPT (contrôleur MPPT et générateur PWM) connectée à la charge. L'ensemble est implémenté dans l'environnement Matlab/Simulink.

La simulation du générateur photovoltaïque a été réalisée dans l'environnement MATLAB, avec une irradiation de 1000 W/m² et une température de 25°C. L'algorithme MPPT a été implémenté en utilisant le codage de l'organigramme, ce qui a permis de faciliter la compréhension et la mise en œuvre des modifications dans l'algorithme conventionnel.

Le contrôle du convertisseur élévateur DC-DC, basé sur des Mosfet, était réalisé par le signal de grille, qui était déterminé par l'algorithme P&O recommandé. Le convertisseur élévateur DC-DC basé sur Mosfet était contrôlé par le signal de grille qui a été décidé par l'algorithme P&O proposé. Le convertisseur élévateur se composait de 1147.8 µH de l'inductance et de 3227 µF du condensateur. la charge est résistance d'une valeur de 100 Ω.

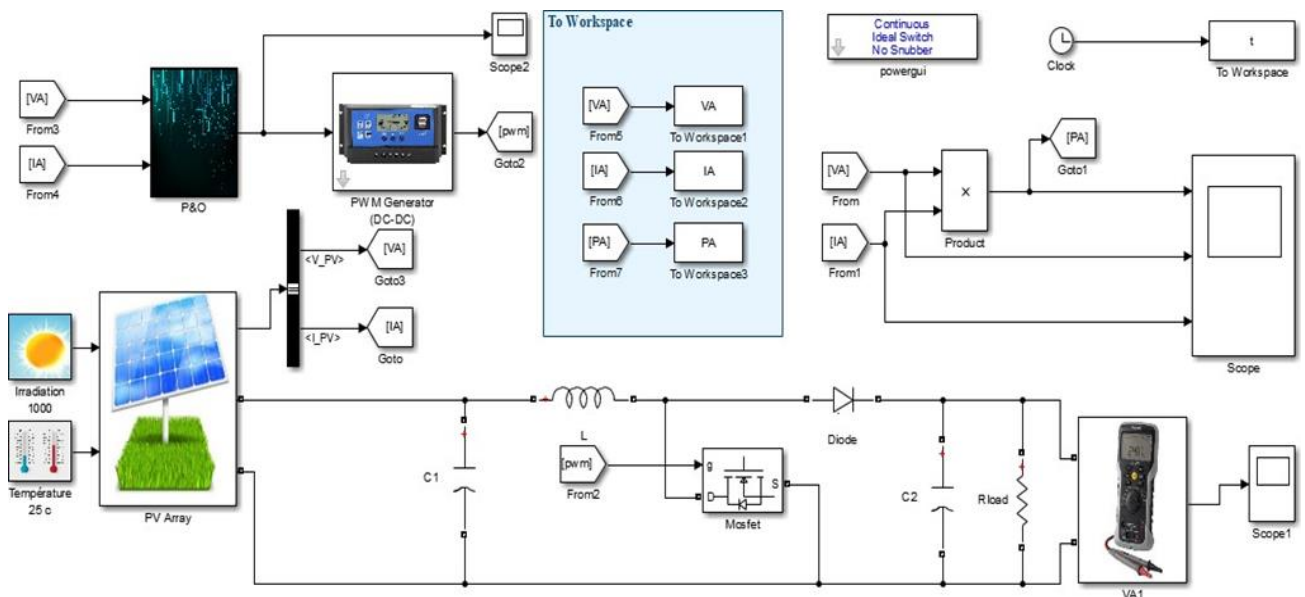


Figure III.5 Conception du système d'optimisation.

III.4.1.1 Résultats de simulation MPPT P&O

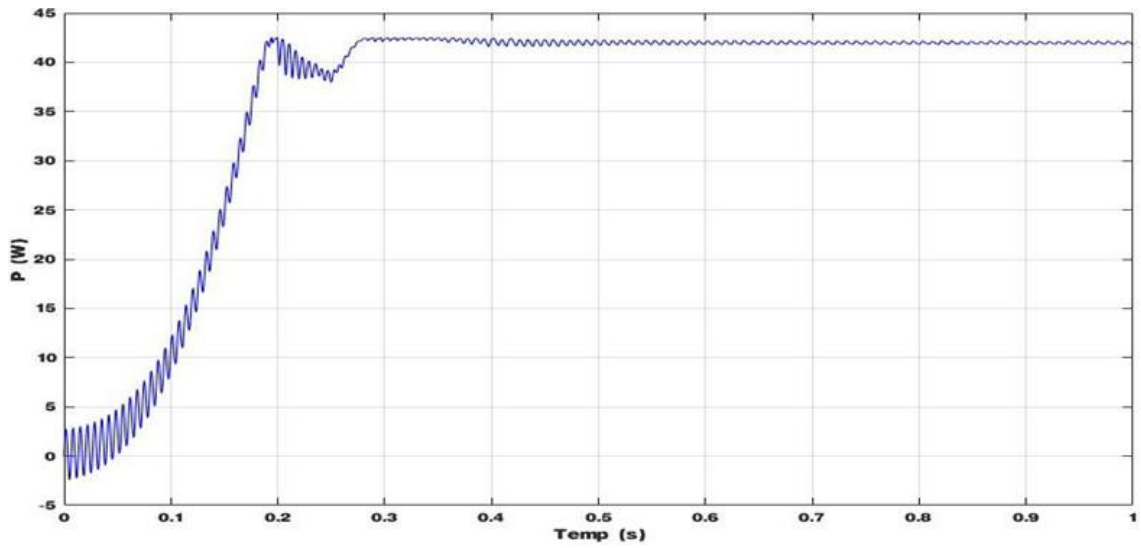


Figure III.6 MPPT basé sur P&O : Profil d'extraction de puissance du panneau photovoltaïque.

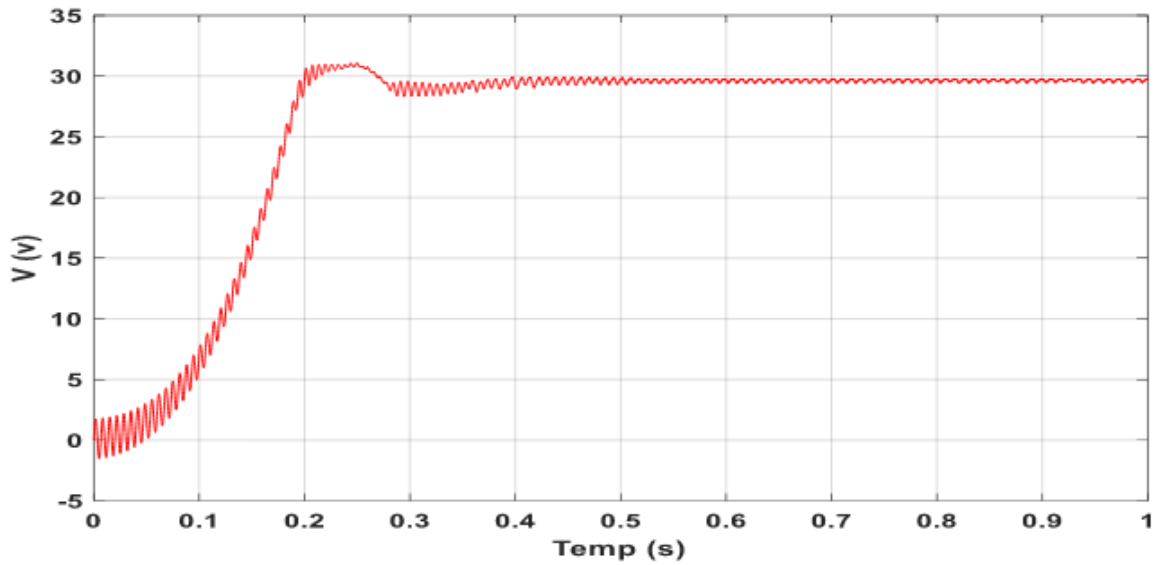


Figure III.7 MPPT basé sur P&O : Profil d'extraction de tension du panneau photovoltaïque.

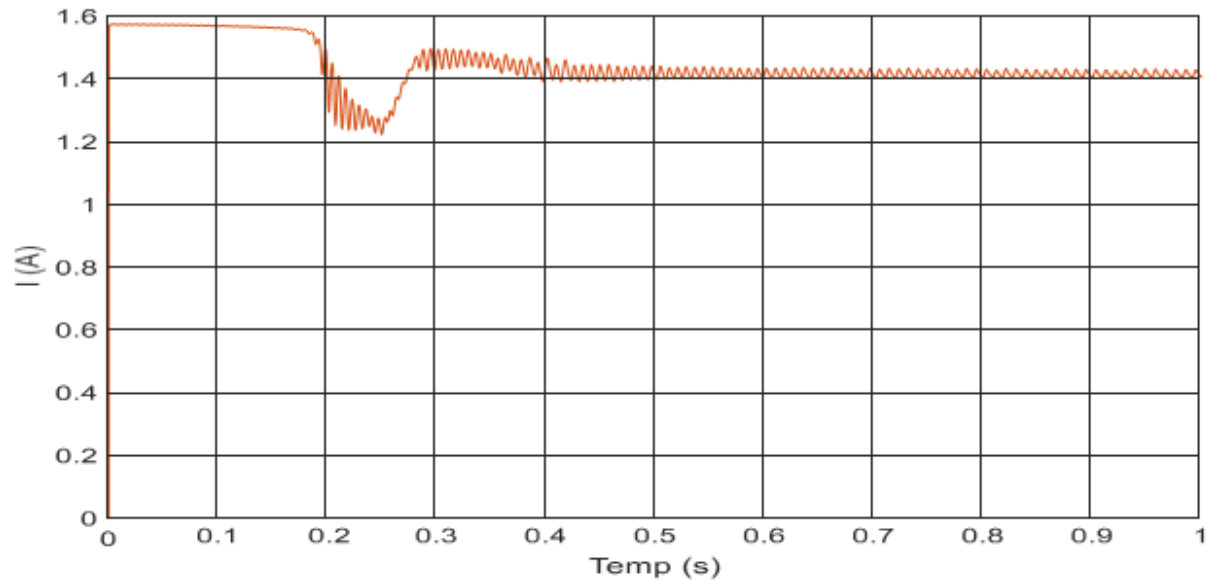


Figure III.8 MPPT basé sur P&O : Profil d'extraction de courant du panneau photovoltaïque.

Les résultats que nous avons observés confirment le bon fonctionnement de l'unité de contrôle (P&O). Le contrôleur P&O présente un temps de réponse rapide.

En raison de sa simplicité et de sa rentabilité, le MPPT P&O peut être facilement implémenté pour suivre le point de puissance maximale d'un système photovoltaïque. Cependant, cette méthode présente certains inconvénients, tels qu'un suivi médiocre, notamment lors de changements soudains d'irradiance, et une convergence lente vers le point de puissance maximale. De plus, cette méthode entraîne des oscillations continues de la puissance de sortie du panneau photovoltaïque autour du point de puissance maximale en régime permanent. [35].

III.5 Algorithme P&O MPPT Basé Sur la Logique Floue Proposé

Comme la méthode P & O conventionnelle fonctionne généralement sur une perturbation de taille de pas fixe, il existe un conflit entre la minimisation de l'oscillation de la puissance de sortie de la matrice PV autour du MPP et la convergence du temps de montée vers le MPP lors de l'utilisation d'un MPPT de taille de pas fixe. Une grande taille de pas garantit une réponse dynamique plus rapide à un changement soudain de l'irradiance solaire, mais entraîne une oscillation excessive en régime permanent de la puissance de sortie du générateur PHOTOVOLTAÏQUE autour du MPP et entraîne une perte de puissance. La petite taille de pas assure moins d'oscillation de la puissance de sortie du

réseau PHOTOVOLTAÏQUE autour du MPP, mais entraîne une réponse dynamique plus lente à un changement soudain de l'irradiance solaire. [35]

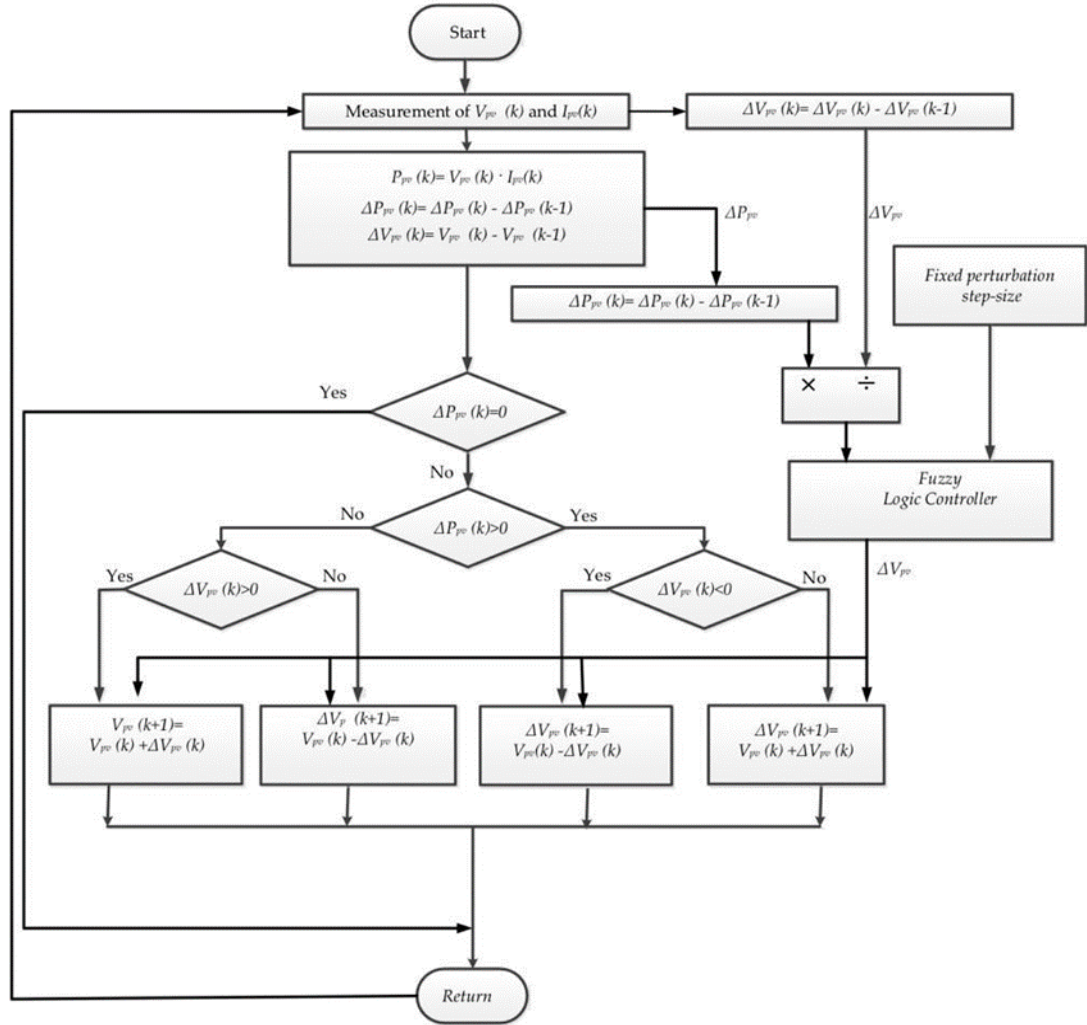


Figure III.9 Algorithme P&O MPPT Basé Sur la Logique Floue. [35]

III.5.1 Modèle SIMULINK du contrôleur MPPT à base de P&O optimiser par logique floue

La figure sur la page suivante montre le contrôle du générateur PV en utilisant l'algorithme P&O optimisé par la logique floue (FLC) qui a été étudié et développé à l'aide des outils de la bibliothèque de logique floue dans l'environnement MATLAB/SIMULINK.

Ce modèle est constitué d'un module de génération photovoltaïque et d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) avec un générateur PWM, qui est connectée à une charge. Le tout a été implémenté dans l'environnement MATLAB/Simulink.

La simulation du générateur photovoltaïque a été réalisée dans l'environnement MATLAB, avec une irradiation de 1000 W/m² et une température de 25°C. L'algorithme MPPT a été implémenté en utilisant le codage de l'organigramme, ce qui a permis de faciliter la compréhension et la mise en œuvre des modifications dans l'algorithme conventionnel.

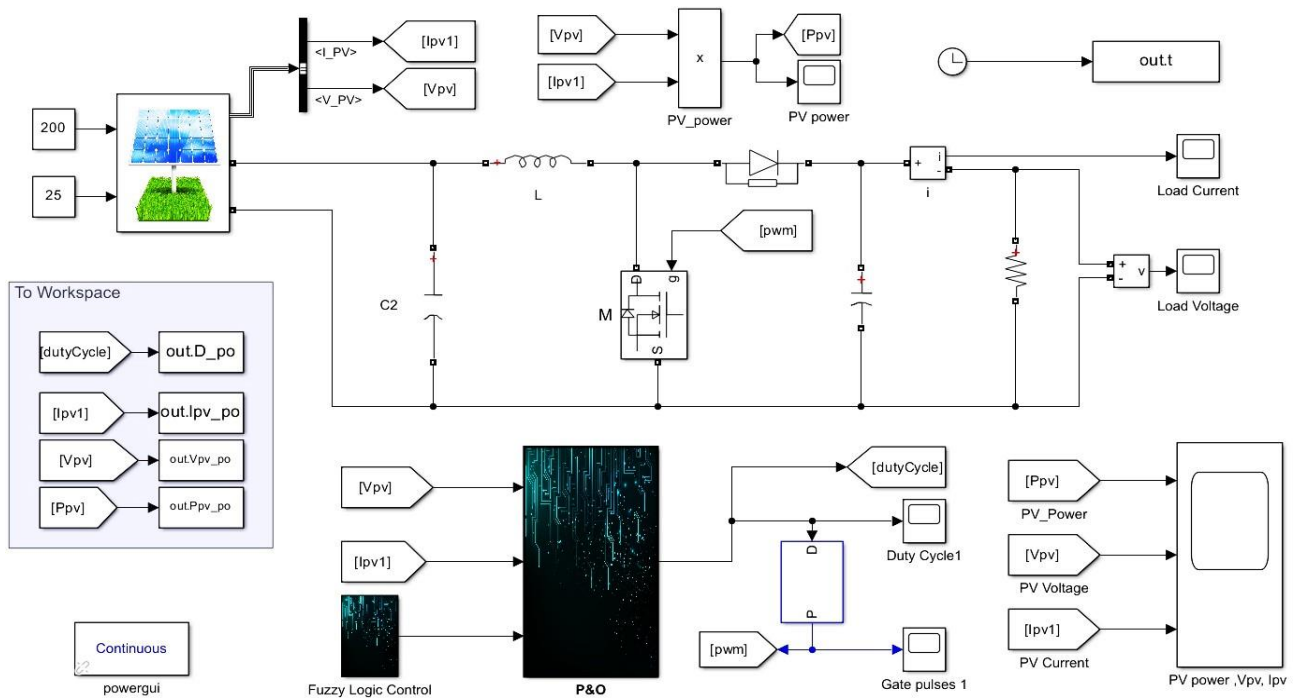


Figure III.10 Conception du système d'optimisation.

La figure IV.15 présente le schéma de blocs (fuzzy logic control) réalisé à l'aide de MATLAB/SIMULINK.

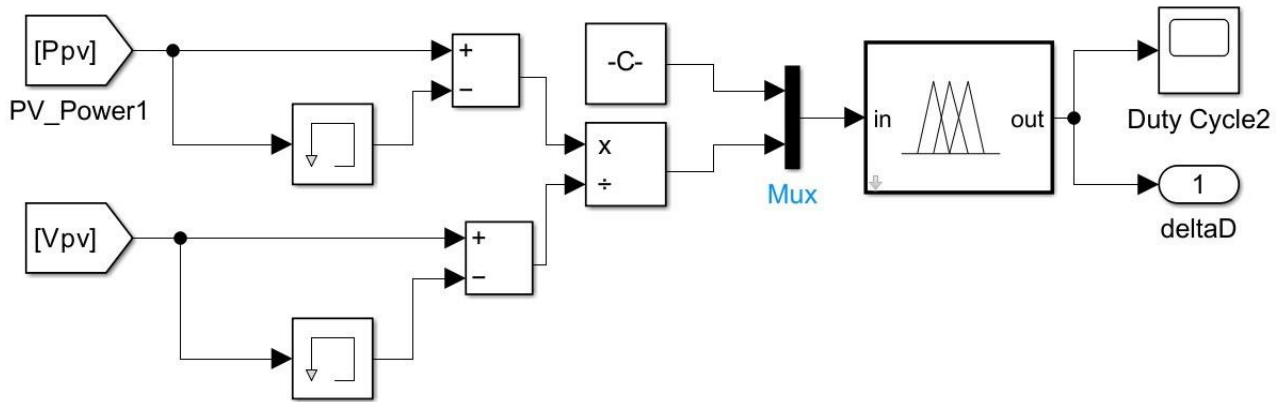


Figure III.11 Fuzzy logic control.

III.6 Résultats de simulation MPPT P&O

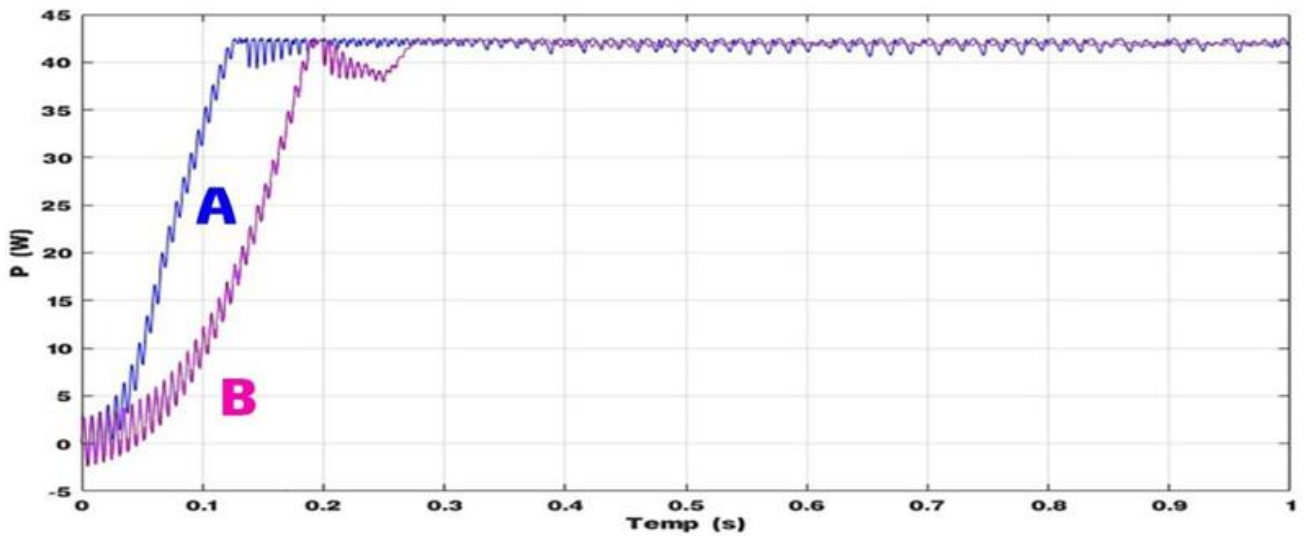


Figure III.12 MPPT basé sur P&O optimisé par FLC : Profil d'extraction de puissance du GPV.

(A) MPPT P&O optimiser par logique floue ; (B) MPPT P&O.

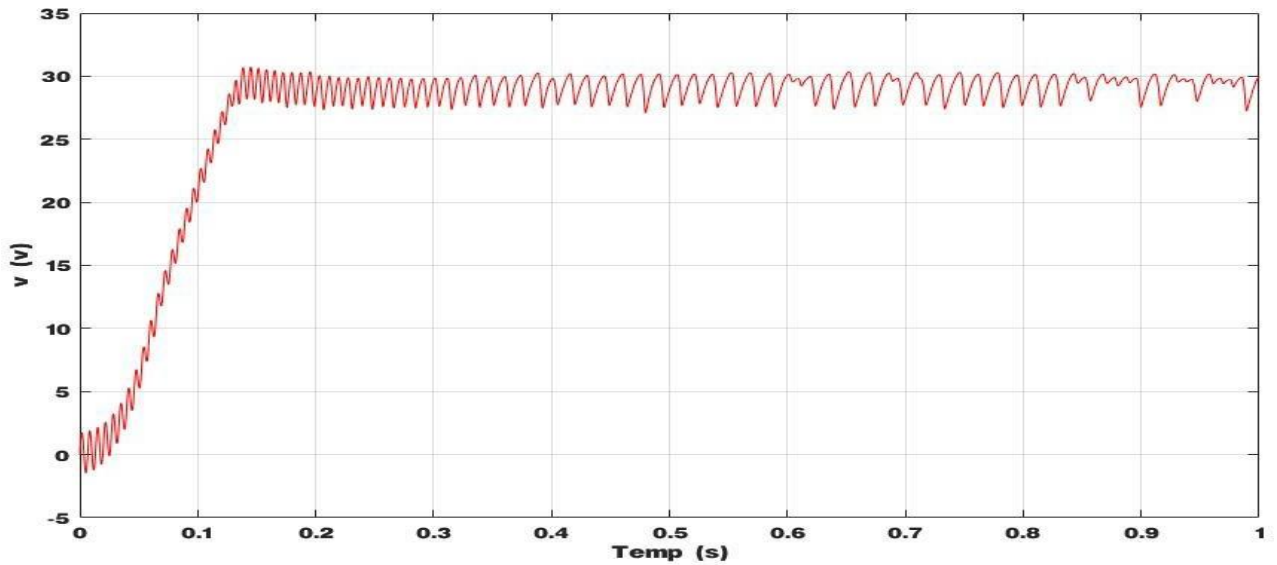


Figure III.13 MPPT basé sur P&O optimisé par FLC: Profil d'extraction de tension du GPV.

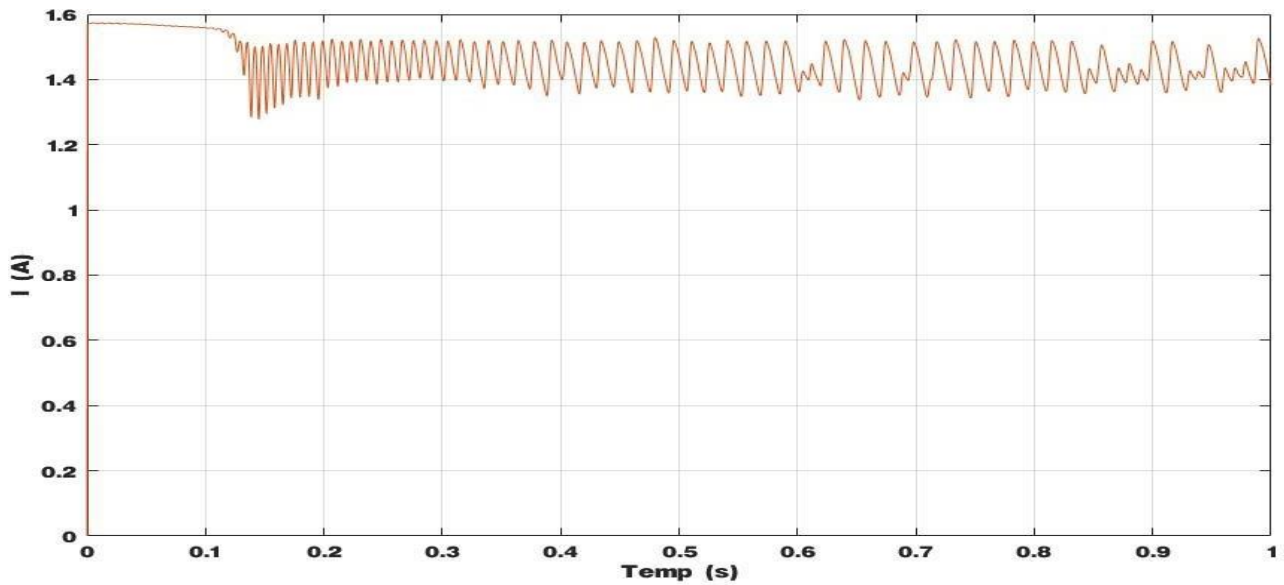


Figure III.14 MPPT basé sur P&O optimisé par FLC: Profil d'extraction de courant du GPV.

En observant les figures précédentes, il est clair que la commande MPPT à base de p&o optimisé par la logique floue présente de nombreux avantages. Cette commande MPPT se distingue par sa

robustesse, sa rapidité accrue en termes de temps de réponse et une précision supérieure, ce qui se traduit par une erreur très faible en régime stationnaire.

Les résultats obtenus grâce à la technique P&O optimisée par la logique floue proposée surpassent ceux obtenus avec les méthodes traditionnelles de P&O. Par conséquent, la commande basée sur la logique floue peut être considérée comme un moyen de rapprocher le contrôle mathématique précis et la prise de décision humaine. De plus, ces résultats confirment le bon fonctionnement de P&O, mais ils démontrent également une amélioration significative grâce à la commande floue. Lorsque ces deux méthodes sont combinées, les résultats obtenus confirment des performances supérieures, notamment une réponse rapide, une erreur très faible à l'état stationnaire et une quasi-absence de dépassement.

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit deux approches de commande pour le suivi du point de puissance maximal (MPPT). Nous avons présenté la méthode traditionnelle, à savoir l'algorithme P&O, ainsi que la méthode intelligente de commande MPPT floue. Pour mener nos expérimentations, nous avons mis en place les différents blocs de simulation nécessaires à l'aide du MATLAB /Simulink.

En utilisant des valeurs constantes d'ensoleillement et de température, nous avons obtenu des résultats comparatifs pour les deux approches : la commande MPPT p&o optimisée par logique floue et l'algorithme MPPT P&O. Ces résultats confirment le bon fonctionnement de l'algorithme MPPT P&O, mais ils révèlent également une amélioration notable grâce à la méthode P&O optimisée par la logique floue.

La simulation de la commande MPPT P&O optimisée par la logique floue a démontré des performances supérieures, notamment un temps de réponse rapide et une erreur très faible en régime stationnaire.

Conclusion Général

Conclusion Général

Cette étude concerne l'amélioration des performances et du rendement d'un système photovoltaïque. Il s'agit d'utiliser une commande MPPT à base de logique floue (contrôleur flou) en vue d'améliorer les performances du mécanisme de poursuite du point de puissance maximale en termes de temps de réponse et de robustesse vis-à-vis aux variations des conditions climatiques.

Pour atteindre un tel objectif, nous avons commencé par donner le modèle mathématique de la cellule photovoltaïque, élément principal dans un générateur photovoltaïque. Cette modélisation a été ensuite appuyée par simulation sous Matlab/Simulink, sous des conditions atmosphériques standards. Cette simulation nous a permis d'une part de valider le modèle du panneau et d'autre part d'étudier l'effet du changement des conditions climatiques (ensoleillement et température) sur les caractéristiques électriques (I-V et P-V) du panneau.

Après l'étape de la modélisation, nous avons abordé le problème de poursuite du point de puissance maximale dans les systèmes de conversion photovoltaïque. Plusieurs techniques de commande MPPT ont été utilisées dans la littérature. Nous nous sommes intéressés à la commande MPPT floue utilisé dans le processus de recherche du point MPP.

Les résultats obtenus par simulation ont montré que la commande MPPT floue est plus robuste par rapport à une commande MPPT conventionnelle.

Ainsi, les perspectives futures sont d'améliorer les performances d'une commande MPPT floue on optimiser les paramètres du contrôleur flou par les métaheuristiques pour maximiser la puissance du générateur photovoltaïque.

Bibliographies

Bibliographies

- [1]: TOUIL Nacer Eddine '« Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque » Mémoire de Master, Université Echahid Hama Lakhderd El-Oued, 2015.
- [2]: M.Z.F.Z.Zerhoun, « Optimisation d'un système à énergie verte avec validation pratique » Revue des énergies renouvelables, vol. 11 , N°1, p. 41–49, 2008.
- [3]: Havared breysnes Vika « modelling of photovoltaïque modulees with battry energy storage in simulink/matlab ».June2014.
- [4]: M.Z.F.Z.Zerhoun, « Optimisation d'un système à énergie verte avec validation pratique » Revue des énergies renouvelables, vol. 11 , N°1, p. 41–49, 2008.
- [5]: A.Saadi, « Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque » Mémoire de Magister, Université de Biskra, 2000.
- [6]: RUPESH Patel Roll « Design and Implementation of an Isolated Solar photovoltaic power generation system » Memoire Master, Department of Electrical Engineering National Institute of Technology, Rourkela, June 2014.
- [7] M.Boukli-Hacene Omar, « Conception et Réalisation d'un Générateure Photovoltaïque Muni d'un Convertisseur MPPT pour une Meilleure Gestion Energétique »,These de Magister, Universite Abou Bakr Belkaid-Tlemcen, 2010.
- [8] O. Bingöl, B. Özkaya, and S. PAÇACI, “Comparison of fuzzy logic and perturb&observe control in maximum power point tracking for photovoltaic system using buck converter,” *Mugla Journal of Science and Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 51–57, 2017.
- [9] D. Choudhary and A. R. Saxena, “Dc-dc buck-converter for mppt of pv system,” *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 4, no. 7, pp. 813–821, 2014.
- [10] S. R. Rex and D. M. S. R. Praba, “Design of pwm with four transistor comparators for dc–dc boost converters,” *Microprocessors and Microsystems*, vol. 72, p. 102844, 2020.

- [11] B. M. Hasaneen and A. A. Elbaset Mohammed, "Design and simulation of dc/dc boost converter," in *2008 12th International Middle-East Power System Conference*, pp. 335–340, 2008.
- [12] T. Eswam and P. L. Chapman, "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques," *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 439–449, 2007.
- [13] T.-Y. Kim, H.-G. Ahn, S. K. Park, and Y.-K. Lee, "A novel maximum power point tracking control for photovoltaic power system under rapidly changing solar radiation," in *ISIE 2001. 2001 IEEE International Symposium on Industrial Electronics Proceedings (Cat. No. 01TH8570)*, vol. 2, pp. 1011–1014, IEEE, 2001.
- [14] W. Xiao and W. G. Dunford, "Evaluating maximum power point tracking performance by using artificial lights," in *30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2004. IECON 2004*, vol. 3, pp. 2883–2887, IEEE, 2004.
- [15] A. Mohapatra, B. Nayak, P. Das, and K. B. Mohanty, "A review on mppt techniques of pv system under partial shading condition," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 80, pp. 854–867, 2017.
- [16] M. A. Eltawil and Z. Zhao, "Mppt techniques for photovoltaic applications," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 25, pp. 793–813, 2013.
- [17] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, "Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 20, no. 4, pp. 963–973, 2005.
- [18] N. Khaehintung, T. Wiangtong, and P. Sirisuk, "Fpga implementation of mppt using variable step-size p&o algorithm for pv applications," in *2006 International Symposium on Communications and Information Technologies*, pp. 212–215, IEEE, 2006.
- [19] J. H. Lee, H. Bae, and B. H. Cho, "Advanced incremental conductance mppt algorithm with a variable step size," in *2006 12th International Power Electronics and Motion Control Conference*, pp. 603–607, IEEE, 2006.

- [20] M. Al-Dhaifallah, A. M. Nassef, H. Rezk, and K. S. Nisar, "Optimal parameter design of fractional order control based inc-mppt for pv system," *Solar Energy*, vol. 159, pp. 650–664, 2018.
- [21] T. J. Ross, "Fuzzy logic with engineering applications," *Journal of the Korean Steel Structural Society*, vol. 25, no. 4, pp. 71–71, 2013.
- [22] Q. Xia, "Solar photovoltaic system modeling and control," 2012.
- [23] H. M. Farh, A. M. Eltamaly, and M. F. Othman, "Hybrid pso-flc for dynamic global peak extraction of the partially shaded photovoltaic system," *PloS one*, vol. 13, no. 11, p. e0206171, 2018.
- [24] A. Ibnelouad, A. El Kari, H. Ayad, and M. Mjahed, "A comprehensive comparison of two behavior mppt techniques, the conventional (incremental conductance (inc)) and intelligent (fuzzy logic controller (flc)) for photovoltaic systems," in *Modeling, Identification and Control Methods in Renewable Energy Systems*, pp. 47–84, Springer, 2019.
- [25] R. M. Hilloowala and A. M. Sharaf, "A rule-based fuzzy logic controller for a pwm inverter in photo-voltaic energy conversion scheme," in *Conference Record of the 1992 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, pp. 762–769, IEEE, 1992.
- [26] N. Khaehintung, K. Pramotung, B. Tuvirat, and P. Sirisuk, "Risc-microcontroller built-in fuzzy logic controller of maximum power point tracking for solarpowered light-flasher applications," in *30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2004. IECON 2004*, vol. 3, pp. 2673–2678, Ieee, 2004.
- [27] A. Saadi, «Etude comparative entre les techniques d’optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque» Mémoire de Magister, Université de Biskra, 2000.
- [28] R. Algerienne, D. Et, F. D. E. Technologie, D. D. E. G. Electrique, D. E. M. En, and G. Electrique, "Etude Et Simulation D’une Commande MPPT Pour Système PV," pp. 2015–2016, 2016.
- [29] J. Ferrieux, f. Forest, « alimentations a découpage convertisseurs a résonance: principes composants modélisation ». Paris, france: dunod, 1999.
- [30] M. Angel Cid Pastor, « conception et realisation de modules photovoltaiques electroniques », docteur de l’institut national des sciences appliquées de toulouse, 2006

[31] M. Boukli-Hacene Omar « conception et réalisation d'une generation photovoltaïque muni d'un convertisseur mppt pour une meilleure gestion énergétique» magister en automatique productique informatique 2010/2011.

[32] Dalia Al Maamoury, Muhamad Bin Mansor, Ali Assim Al Obaidi “active power control for a single-phase grid connected pv system”, international journal of scientific & technology research vol 2, issue 3, 2013.

[33] Akihiro Oi, “design and simulation of photovoltaic water pumping system”, faculty of california polytechnic state university, 2005

[34] Aamarouayache Mohamed, « contribution à l'optimisation d'une chaine de conversion d'énergie photovoltaïque », doctorat en sciences en electro technique option, 2014

[35] J. Macaulay and Z. Zhou, “A fuzzy logical-based variable step size P&O MPPT algorithm for photovoltaic system,” *Energies*, vol. 11, no. 6, 2018, doi: 10.3390/en11061340.

Résumé

La puissance de sortie d'un générateur PV dépend d'un quelques-uns nombre de paramètres parmi lesquels l'intensité du rayonnement solaire, la température des cellules, etc. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules PV et de leurs associations, le rendement des systèmes PV peut être amélioré par des solutions à base des méthodes MPPT. Il existe des techniques MPPT conventionnelles souvent utilisées, à savoir la méthode de perturbation et d'observation (P&O) et les techniques avancées, telle que la MPPT floue. Ce mémoire présente une étude comparative entre ces différentes techniques MPPT afin d'analyser, simuler, et évaluer le système global d'alimentation PV sous des conditions de fonctionnement variables. Pour ce faire les modèles mathématiques des composants du système PV (GPV, convertisseur DC/DC, charge) ont été développés. Les résultats de simulation, obtenus à l'aide de l'outil Matlab/Simulink, ont prouvé en général que les performances du contrôleur MPPT flou sont bien meilleures que ceux du contrôleur MPPT P&O.

Mots clés : PV, convertisseur DC-DC, MPPT. P&O, logique floue.

Abstract :

The output power of a generator PV depends on a some of parameters including the intensity of solar radiation, cell temperature, etc. Because of the highly nonlinear electrical characteristics of PV cells and their associations, the system performance can be improved by PV based solutions MPPT methods. There are techniques MPPT classical commonly used, namely the perturbation and observation (P&O) and the techniques called advanced, such as fuzzy MPPT. This thesis presents a comparative study of different techniques MPPT to analyze, simulate, and evaluate the overall system PV power under varying operating conditions. To do the mathematical models of system components PV (GPV, DC-DC converter, load) have been developed. Simulation results, obtained using Matlab Simulink tool, showed that in general the performances of fuzzy controller in maximum power tracking of PV array is much better than the P&O MPPT controller.

Key words: PV, converter DC-DC, MPPT, P&O, fuzzy logic.

ملخص

ان الاستطاعة الناتجة من المولد الكهروضوئي تتعلق ببعض المتغيرات من بينها الاشعاع الشمسي ودرجة حرارة الخلايا الكهروضوئية، نظرا للخصائص الكهربائية اللاخطية لهذه الخلايا فإن مردود النظام الكهروضوئي يمكن تحسينه باستعمال تقنيات MPPT التي تتبع نقطة الاستطاعة الاعظمية التي ينتجها المولد الكهروضوئي من بين هذه طرق ومن اكثرها استعمال تقنية الاضطراب والمراقبة ومنها تقنيات حديثة تعتمد على الذكاء الاصطناعي منها تقنية المنطق الغامض. هذه المذكرة تقدم مقارنة بين مختلف هذه التقنيات لغرض تحليل وتمثيل وتقديم النظام الكهروضوئي الاجمالي، وذلك تحت ظروف العمل المتغيرة ولذلك فقد قمنا بتقديم نماذج رياضية لمكونات النظام (المولد الكهروضوئي، محول تيار مستمر/ تيار مستمر، حمولة ...) النتائج المتحصل عليها باستخدام لغة البرمجة Matlab / Simulink اثبتت على العموم ان الفعالية السكونية والديناميكية للمنطق الغامض في اتباع نقطة الاستطاعة الاعظمية للمولد الكهروضوئي احسن من الطريقة التقليدية (الاضطراب والمراقبة)

كلمات مفتاحية: مولد الكهروضوئي، محول تيار مستمر تيار، مستمر، اتباع نقطة الاستطاعة الاعظمية، طريقة الاضطراب والمراقبة، المنطق الغامض.