



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



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued
Faculté de Sciences et de La Technologies Filière : Génie Électrique
Spécialité : Réseaux électriques

N° d'ordre :

N° de série :

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTERACADEMIQUE

Par : Rachida Ghernoug, Maroua Sadallah , Nour El Houda Dhou

Thème

**Commande MPPT par la logique floue pour les
systèmes Photovoltaïques**

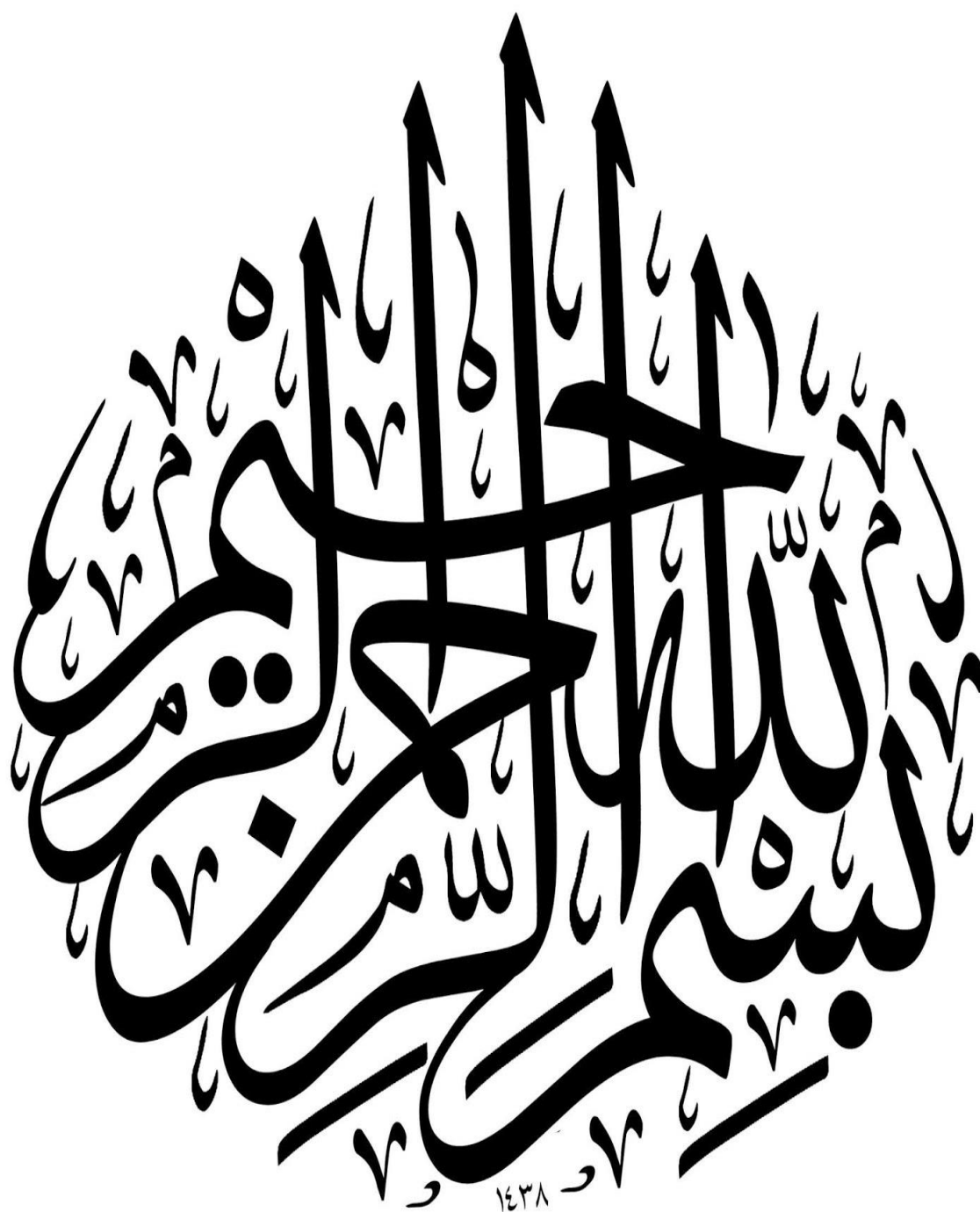
Devant le jury composé de:

Mr.
Mr.
Mr.

Serhoud Hicham
Mida Dris
Mahni tidjani

Encadreur
Président
Examineur

2021-2022



Dédicace

Au propriétaire d'une biographie parfumée et d'une pensée éclairée.

*Ils ont été les premiers à être crédités de notre obtention de l'enseignement
supérieur*

(Nos chers parents), que Dieu leur donne longue vie.

A celui qui nous a mis sur le chemin de la vie et nous a apaisés,

Elle a pris soin de nous jusqu'à ce que nous devenions vieux

(Nos chères mamans), que Dieu les bénisse.

A nos frères et sœurs et à tous nos amis

A tous nos honorables professeurs ;

Qui n'a pas hésité à nous tendre ,la main merci beaucoup.

Remerciements



*Je remercie, en premier ALLAH qui m'a donné ce bien là pour que je vive ce jour, qu'il soit loué. ALLAH qui m'a donné la force et le courage pour que je puisse terminer ce travail, Je tiens tout particulièrement à exprimer mes sincères remerciements à mon encadrant, le Docteur **Hicham Serhoud**, pour l'encadrement qu'il m'a accordé pendant la réalisation de ce travail, notamment sa patience et les conseils avisés qu'il m'a prodigués, qui témoignent de ses qualités scientifiques et humaines.*

*Je tiens également à remercier le doctorant, **AbdELRaouf BEddi**, pour son aide, ses précieux conseils et ses encouragements constants lors de la préparation de ce travail.*

Je tiens à remercier tous les membres du jury qui ont jugé notre travail et leur intérêt pour celui-ci.

Je tiens à remercier les responsables et tous les employés du département de génie électrique pour les facilités qu'ils m'ont accordées pour mener à bien ce travail.

Un grand merci à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation sans exception, que ce soit au cours de la formation diplômante ou postdoctorale.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ma formation et au développement de cette humble formation.

Merci encore à tous

Bonne lecture !



Sommaire

Dédicace.....	i
Remerciement	ii
Sommaire	iii
Liste de figures	iv
Liste des tableaux	v
Liste de symboles et abréviations.....	vi
Introduction Générale	1
<i>Chapitre I:Généralité sur le système de Photovoltaïque</i>	
1.1.Introduction	5
1.2. Ressources des énergies renouvelables.....	5
1.3.Rayonnement solaire.....	5
1.4. Système photovoltaïque	7
1.4.1. Le module (Ou panneau).....	8
1.4.2. Le générateur photovoltaïque	8
1.5. La cellule photovoltaïque	8
1.5.2. Type de cellule photovoltaïque	9
1.5.1.Cellules monocristallines	9
1.5.2.Cellules poly-cristallines.....	9
1.5.3.Cellules amorphes.....	10
1.5.4. Rendement d'une cellule.....	10
1.6.Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque	11
1.6.1. Paramètres d'une cellule photovoltaïque	12
1.6.1.1.Courant de court-circuit (I_{cc})	12
1.6.1.2.Tension de circuit-ouvert (V_{co}).....	12
1.6.1.3.La puissance maximale	13
1.6.1.4. Facteur de forme FF	13
1.6.1.5. L'efficacité (rendement) de la conversion.....	13
1.7. Modèle de simulation.....	13
1.7.1. Influence de l'éclairement.....	15
1.7.2. Influence de la température	16
1.8.Avantages et inconvénients d'énergie photovoltaïque	17
1.9.Conclusion	18
<i>Chapitre II:Techniques de poursuite du point de puissance maximal MPPT</i>	
2.1. Introduction	20
2.2. Convertisseurs DC/DC.....	20

Sommaire

2.2.1.Définition	20
2.2.2. Convertisseurs survolteur (Boost Converter)	21
2.2.3.Modèle mathématique équivalent.....	21
2.2.4. Modèle approximé du convertisseur Boost	22
2.3 . Résultat de simulation d'un convertisseur DC-DC	24
2.3.1. Avantages du convertisseur « BOOST »	26
2.4.Définition de l'MPPT	26
2.4.1.Principe De La Commande MPPT	26
2.4.2. Classification des MPPT	27
2.4.3.Classification Des Commandes MPPT Selon Les Paramètres D'entrée	28
2.5. Classification des commandes MPPT selon le type de recherche.....	28
2.5.1.Méthodes indirectes	28
2.5.2. Méthode directe	29
2.6. Recherche du point de puissance maximale (MPPT):	29
2.6.1. Premières commandes MPPT:	29
2.6.2. Principe	30
2.6.3. Types de commande MPPT	31
2.6.4.Commande MPPT par la méthode « Incrément des conductances »	33
2.6.5.Avantages et inconvénients de IC.....	35
2.8. Conclusion.....	38
Chapitre III: Contrôleur MPPT à base de logique floue	
3.2.1. Principe de la logique floue.....	40
3.3. Algorithmes basés sur la logique floue (LF)	41
3.3.1.La fuzzification.....	42
3.3.2.Inférence floue.....	44
3.3.3.La défuzzification	44
3.4.Résultats de simulation de la méthode MPPT flou	44
3.4.1.Fonctionnement sous les températures et éclairements variable	46
3.5. Comparaison des deux commande MPPT IC et MPPT basée de logique floue	46
3.6. Conclusion.....	48
Conclusion générale	50
Bibliographie.....	50

Liste des figures

Chapitre I:Généralité sur le système de Photovoltaïque

Figure (1.1) : Réponse spectrale d'une cellule (PV).	6
Figure (1.2): Types de rayonnement solaire reçus au sol	7
Figure (1.3):Structure d'une source solaire photovoltaïque (cellule, module et panneau PV)	7
Figure (1.4): Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	9
Figure(1.5):Cellule monocristallin	10
Figure(1.6):Cellule polycristallin	10
Figure (1.7):Cellule amorphes	10
Figure.(1.8) :Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	11
Figure (1.9) : Schéma de simulation du module PV de type «de KC200GT»	14
Figure (1.10) : Effet de l'éclairement sur la caractéristique Courant-Tension	15
Figure (1.11):Effet de l'éclairement sur la caractéristique Puissance-Tension	15
Figure (1.12) : Effet de la température sur la caractéristique Courant-Tension	16
Chapitre II :Techniques de poursuite du point de puissance maximal MPPT	
Figure(2.1): Symbole d'un convertisseur DC-DC	21
Figure(2.3): Circuit électrique de base du hacheur survolteur	21
Figure(2.4): Allure des variables dynamiques IL	23
Figure (2.5): Caractéristique de la tension et du courant du hacheur survolteur	24
Figure (2.6) : Schéma bloc d'un convertisseur DC-DC	24
Figure (2.7) :Caractéristiques $i(t)$ d'un convertisseur DC-DC	24
Figure (2.8) : Caractéristiques $v(t)$ d'un convertisseur DC-DC	25
Figure (2.9) : variation du rapport cyclique d'un convertisseur DC-DC	25
Figure (2.10): Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.	27
Figure(2.11): Principe de la commande MPPT	27
Figure(2.12): Principe de la première commande MPPT numérique	30
Figure(2.13): Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur statique contrôlé par une commande MPPT	31
Figure(2.14) : Relation entre la puissance et le rapport cyclique	32
Figure (2.15):Illustration de la méthode IC	33
Figure(2.16):Technique de MPPT basée de la méthode IC	34

Figure (2.17) : Schéma MATLAB SIMULINK d'un panneau photovoltaïque commandé par IC.....	35
Figure (2.18) : Caractéristiques $E(t)$ d'un panneau solaire pour un éclairement variable (Varié chaque 0.2 seconds).....	36
Figure (2.19) : Caractéristiques Température (t) d'un panneau solaire.....	36
Figure (2.20) : Caractéristiques $P(t)$ d'un système PV.....	37
Figure (2.21) : Caractéristiques $v(t)$ d'un système PV.....	37
Figure (2.22) : Caractéristiques $i(t)$ d'un système PV.....	37
Figure (2.24) : Caractéristiques $i(v)$ d'un système PV.....	38
 Chapitre III: Contrôleur MPPT à base de logique floue avec comparaison Incrément des conductances	
Figure (3.1): Structure de base du contrôleur MPPT à base logique floue.....	41
Figure(3.2): Mise en œuvre du contrôleur MPPT basée sur la logique floue.....	42
Figure (3.3) : Les fonctions d'appartenance des entrées.....	43
Figure (3.4) : Les fonctions d'appartenance de la sortie.....	43
Figure(3.5) : Modèle 'SIMULATION' du contrôleur MPPT flou.....	45
Figure(3.6) : Schéma générale du contrôleur MPPT flou.....	45
Figure(3.7): Variation de la puissance en fonction du temps par logique flou et IC dans PV system.....	46
Figure(3.8): Variation de courant en fonction du temps par logique flou et IC dans PV system.....	46
Figure (3.9): Variation de la tension en fonction du temps par logique flou et IC dans PVsystem.....	47

Liste des tableaux

Chapitre I: Généralité sur le système de Photovoltaïque

Tableau (1.1): Différent types des cellules avec leur rendement..... 10

Tableau(1.2) : caractéristique le modèle photovoltaïque de KC200GT..... 14

Chapitre II: Techniques de poursuite du point de puissance maximal MPPT

Tableau (2.1): Les paramètres du convertisseur..... 36

Chapitre III: Contrôleur MPPT à base de logique floue avec comparaison Incrément des conductance

Tableau(3.1): Règles du contrôleur à logique floue..... 44

Liste des symboles

η_{stc} : Rendement de la cellule photovoltaïque.

Scellule : Surface de la cellule (m^2).

Estc : Éclairement absorbé par la cellule.

I_{pv}: Courant de sortie de la cellule(A).

I_{ph}: Courant photo-générer ou photo-courant (A).

I_{sat}: Courant de saturation de la diode (A).

V_{pv}: Tension de sortie de la cellule(V).

q: Charge d'électron $q = 1.6 \cdot 10^{-19}(c)$.

T: Température absolue de fonctionnement de la jonction (k°).

n: Facteur d'idéalité de la diode ($n \in [1, 3]$).

R_s: Résistance série(Ω).

R_p: Résistance parallèle(Ω).

I_{cc}:Le courant de court-circuit (A).

V_{co}:La tension de circuit ouvert (V).

V_{mpp}:Tension d'un module PV au point de puissance maximale (V).

I_{mpp}: Courant d'un module PV au point de puissance maximale (A).

P_{max}:La puissance maximale produite PV (W).

S: Surface du module photovoltaïque (m^2).

η: Rendement.

a:Le coefficient de courant en fonction de température ($A/^\circ C$).

E_m: Eclairement moyenne (W/m^2).

T_a: Température *ambiante*($^\circ C$).

T_c: température de la cellule($^\circ C$).

TUC:Température d'utilisation de la cellule ($^\circ C$).

I: Courant.

L: Inductance.

R: Résistance de la charge.

C: Capacité.

i_L: Courant dans l'inductance.

ΔV : Changement d'erreur.

Liste des *abréviations*

Liste des abréviations

PV: Photovoltaïque.

MOSFETS: Transistors à effet de champ d'oxyde de métal.

GPV: Générateur Photovoltaïque.

FF: Facteur de forme.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

P&O: Perturbation et Observation.

Inc. Cond: Increment of Conductance.

H.C: Hill Climbing.

DC: Courant Continue.

MPP: Maximum Power Point.

FLC: Fuzzy logic controller.

Introduction Générale

Introduction Générale

La demande sur l'énergie électrique ne cesse d'augmenter ces dernières années ainsi que les contraintes liées à sa production, tels que l'effet de pollution et de réchauffement climatique global, conduisent les recherches vers le développement des sources d'énergie renouvelables. Dans ce contexte, les systèmes photovoltaïques (PV) offrent une solution très concurrentielle [1].

Pour surmonter le problème de rendement des panneaux solaires et obtenir un rendement maximum, il est nécessaire d'optimiser la conception de toutes les parties du système PV[2].

En outre, il est nécessaire d'optimiser les convertisseurs (continu/continu) DC/DC employés comme interface entre le générateur PV et la charge afin d'extraire le maximum de puissance et ainsi faire fonctionner le générateur GPV à son point de puissance maximum (MPP) à l'aide d'un contrôleur MPPT (maximum power point tracking), par conséquent, obtenir un courant électrique maximum sous la variation de la charge et des conditions atmosphériques (luminosité et température) [3].

Un nombre important de technique de commande MPPT ont été élaboré depuis les années 70, commençant par des techniques simples comme les contrôleurs MPPT basés sur le retour d'état de la tension et du courant [4], aux contrôleurs plus performant utilisant des algorithmes pour calculer MPP du GPV, parmi les techniques les plus utilisées :

- Perturbation et Observation (P&O).
- Incrémentation de la Conductance (IC) [5].

Ces dernières années des techniques de commandes plus robuste ont été associées à la commande MPPT telle que la logique floue afin d'augmenter le rendement des panneaux solaires [6].

Dans cette perspective, nous allons présenter les différentes parties d'un système PV, la commande P&O et IC seront étudiés et comparés à une commande MPPT utilisant un contrôleur flou.

Ce mémoire est divisé en trois chapitres comme suit :

- Dans le premier chapitre, nous présentons des notions générales sur le soleil, l'énergie solaire, l'énergie photovoltaïque et sera consacré à la modélisation d'un système photovoltaïque intégrant le GPV

Introduction Générale

- Le deuxième chapitre, et le convertisseur statistique BOOST qui sera contrôlé par la commande MPPT.

présentera le principe de la recherche de point maximal, les techniques de la commande MPPT et des études théoriques de quelques-unes de ces méthodes;

- Le troisième chapitre, quant à lui sera détaillera la simulation du système photovoltaïque utilisant la théorie des ensembles flous pour améliorer l'efficacité de conversion d'énergie.

Le mémoire se termine par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I :
Généralité sur le système de Photovoltaïque

1.1. Introduction:

Le soleil est une source d'énergie inépuisable pouvant satisfaire nos besoins en consommation énergétique. Alors, il est possible de mettre au profit de la population sa diffusion sur l'ensemble de la planète, en extrayant son énergie importante grâce à l'utilisation des cellules photovoltaïques. Le nom Photovoltaïque vient du Grec, il est composé de deux parties : **Photos** : Lumière ; **Volt** : Unité de tension électrique, du nom Alessandro Volta [7]. L'effet photovoltaïque fut découvert en 1839 par le physicien Alexandre Edmond Becquerel. La première vraie cellule photovoltaïque fut développée au début de l'année 1954.

Toutefois, ce n'est qu'au début des années 70 que les premiers générateurs photovoltaïques furent utilisés pour l'alimentation en énergie les habitations en sites isolés et des équipements de télécommunications [8]. Par la suite, l'avance de la recherche dans le domaine des énergies renouvelables a permis l'amélioration de la fiabilité et de mettre en place des concepts respectueux de l'environnement des systèmes photovoltaïques ce qui leurs a accordé une considération prépondérante dans les systèmes de production d'énergie électrique.

1.2. Ressources des énergies renouvelables:

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20-30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables [9]. Ces énergies satisfont quant à elles 13 % de la demande, dont 10 % pour l'hydraulique. Comparé aux énergies classiques (fossiles et nucléaires), les énergies renouvelables présentent le double avantage.

1.3. Rayonnement solaire :

Malgré la distance considérable qui sépare le soleil de la terre 150.10^6 Km, la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie importante 180.10^6 GW, c'est pour ça que l'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autres sources d'énergie.

Cette quantité d'énergie quittera sa surface sous forme de rayonnement électromagnétique

compris dans une longueur variant de 0.22 à $10 \mu m$ [10], l'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit:

- 9 % dans la bande des ultraviolets ($< 0.4 \mu m$).
- 47 % dans la bande visibles (0.4 à $0.8 \mu m$).

- 44 % dans la bande des infrarouges ($> 0.8\mu\text{m}$).

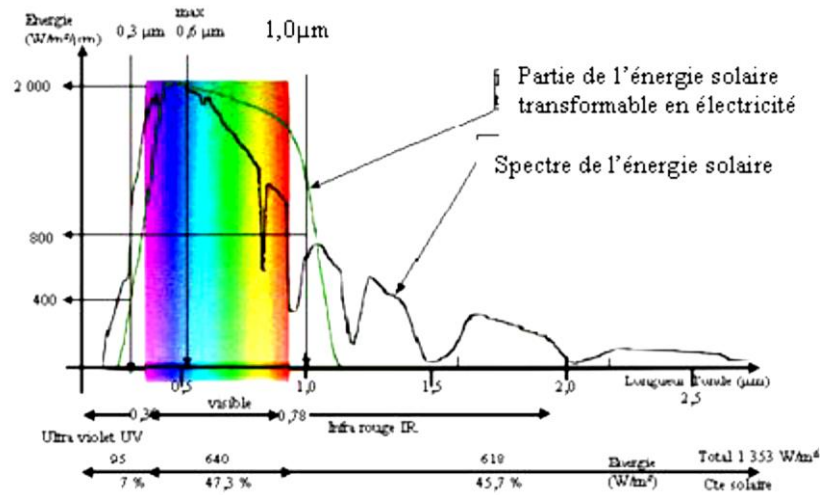


Figure (1.1) : Réponse spectrale d'une cellule (PV) [10].

♦ **Le rayonnement direct** : est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ces rayons sont parallèles entre eux. Il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs. Il peut être mesuré par un Pyranomètre.

♦ **Le rayonnement diffus** : est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent cet (éclatement) des rayons du soleil.

Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques.

♦ **Le rayonnement solaire réfléchi** : ou l'albédo du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

♦ **Le rayonnement global** : est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran.

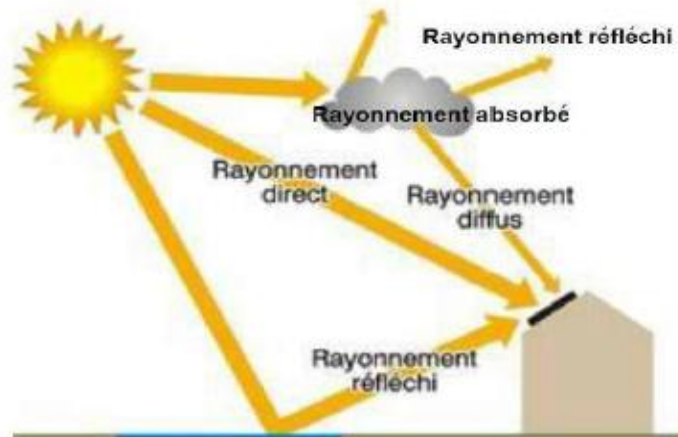


Figure (1.2):Types de rayonnement solaire reçus au sol.

1.4. Système photovoltaïque:

Un système photovoltaïque est un système d'alimentation électrique, constitué principalement d'un générateur photovoltaïque composé d'un seul ou plusieurs panneaux solaires.

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance, la cellule PV fait à peu près 150 cm^2 , produit 2,3 Watt-crête (WC) sous approximativement 0,5 Volt. Cette faible puissance est généralement insuffisante pour la majorité des applications PV domestiques ou industrielles. Afin de fournir au récepteur extérieur une tension et une puissance adéquates, plusieurs cellules PV doivent être connectées entre elles en série, pour former ce qu'on appelle : « un module ». Les modules peuvent être assemblés en série et/ou en parallèle pour former des panneaux (Figure 1.3), eux-mêmes interconnectés pour former un champ PV[36]

La Figure 1.3, représente une cellule, un module et un panneau PV.

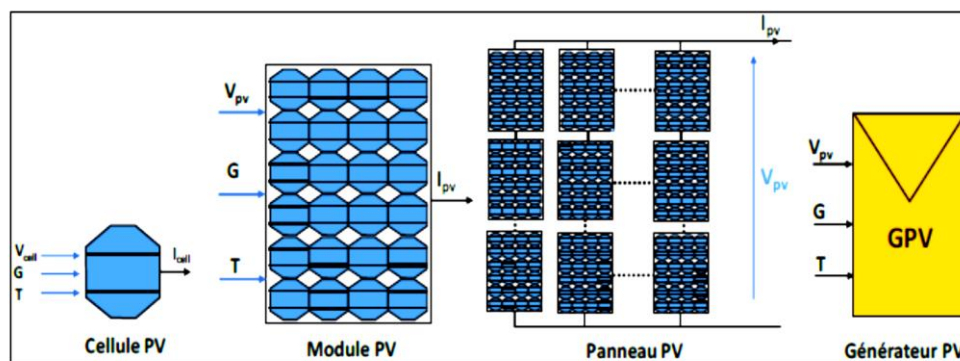


Figure (1.3): Structure d'une source solaire photovoltaïque (cellule, module et panneau PV).

1.4.1. Le module (Ou panneau):

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant,

Tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. La puissance crête, obtenue sous un éclairage maximal sera proportionnelle à la surface du module. La rigidité de la face avant (vitre) et l'étanchéité sous vide offert par la face arrière soudée sous vide confèrent à l'ensemble de sa durabilité [11].

1.4.2. Le générateur photovoltaïque :

L'interconnexion des modules entre eux, parmi bénéficier une puissance mieux grande, définit l'allégorie de génital photovoltaïque. Le générateur photovoltaïque se compose de divers modules et d'un sextuor de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs [12].

1.5. La cellule photovoltaïque :

Si des conducteurs électriques sont alors attachés au côté positif et négatif, formant un circuit électrique, les électrons sont capturés sous la forme de courant électrique I_{ph} [12].

1.5.1. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

Le fonctionnement de la photopile est basé sur les propriétés électroniques acquises par le silicium quand des atomes étrangers en petit nombre (des impuretés) sont substitués dans un réseau cristallin. Cette action est appelée dopage.

D'une part, la couche supérieure de la cellule, qui est composée de Silicium, est appelée la zone N. Dans cette couche, il existe une plus grande quantité d'électrons libres supérieur à la couche de silicium pur: on dit que cette couche est dopée N. En effet, ces derniers est négative, à cause des électrons. Cependant, le matériau reste électriquement neutre: c'est le réseau du cristallin qui supporte une charge positive. D'autre part, la couche inférieure de la cellule, qui est, aussi, composée Silicium, est appelée la zone P. Dans cette couche, il existe une moins grande quantité d'électrons libres par rapport à la couche de silicium pur. Les électrons sont liés au réseau cristallin qui est donc chargé positivement.

Lorsque la lumière arrive sur le panneau solaire, elle dépose des photons. Ces derniers sont à l'origine de la rupture entre les atomes de Silicium et les électrons, ce qui modifie les charges électriques: on appelle ceci l'effet photovoltaïque.

Les atomes qui sont, eux chargé positivement, vont alors dans la zone P et les électrons, chargé négativement vont dans la zone N. Une différence de tension électrique entre les électrons et les protons est alors créée [13].

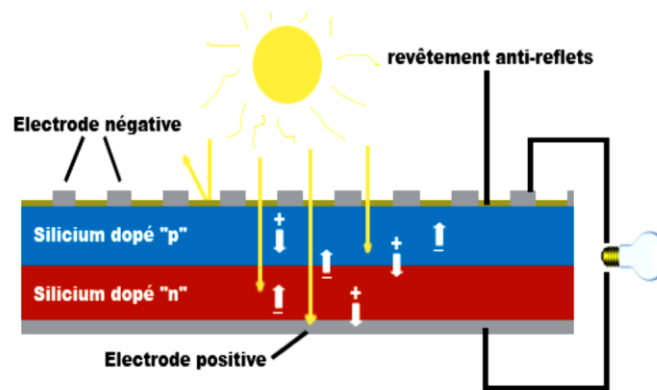


Figure (1.4): Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

Il existe différents types de cellules solaires, qui sont réalisées à base de silicium (c'est principalement le semi-conducteur employé dans la fabrication) [13]. Les cellules sont différenciables par leurs rendements et leurs coûts.

1.5.2. Type de cellule photovoltaïque :

1.5.1. Cellules monocristallines :

Les cellules aux siliciums monocristallins (Figure 1.5) qui représentent le type avec le plus haut pouvoir de conversion, elles sont considérées parmi les cellules ayant le meilleur rendement.

1.5.2. Cellules poly-cristallines :

Des cellules aux siliciums poly-cristallins (Figure 1.6) Leur conception est plus facile, Les composants des cristaux de silicium sont bien visibles, le coût de fabrication est moins important cependant leur rendement est plus faible que les cellules aux siliciums monocristallins.

1.5.3. Cellules amorphes :

Les cellules amorphes (Figure 1.7) ne possèdent pas de structure cristalline. Leur coût de fabrication est inférieur par rapport aux autres types, cependant leur rendement et leur efficacité sont faibles. Elles sont utilisées dans des petits produits de consommation (les calculatrices solaires) [14].



Figure (1.5): Cellule monocristalline.



Figure (1.6): Cellule polycristalline.

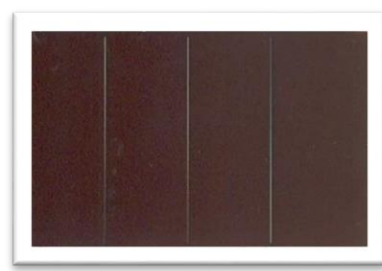


Figure (1.7): Cellule amorphes.

1.5.4. Rendement d'une cellule :

Le tableau suivant (1-1) présente les différents types de cellules avec leur rendement[14].

Technologie de cellules	Rendement en Laboratoire	Rendement Production
Silicium amorphe	13%	5 à 9%
Silicium poly cristallin	19,8%	11 à 15 %
Silicium monocristallin	24,7%	13 à 17%

Tableau (1.1): Différent types des cellules avec leur rendement.

L'expression du rendement est donnée comme suite :

$$\eta_{stc} = \frac{P_m}{E_{stc} * S_{cellule}} \quad (1.1)$$

Où

η_{stc} : Rendement de la cellule photovoltaïque.

P_m: Puissance produite par le générateur PV.

S_{cellule} : Surface de la cellule [m²].

E_{stc}: Éclairement absorbé par la cellule.

Ce rendement dépend de plusieurs facteurs [15].

- Réflexion à la surface.
- Température de jonction des cellules.
- Type de matériau utilisé et technique de fabrication.
- La résistance série et parallèle responsables des pertes par effet Joule.
- Absorption incomplète et excès d'énergie des photons absorbés.

1.6. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque:

La figure (1.8) présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairement.

Il correspond à un générateur de courant I_{ph} monté en parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma.

Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule:

- La résistance série (R_s) est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles [16].
- La résistance shunt (R_p) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

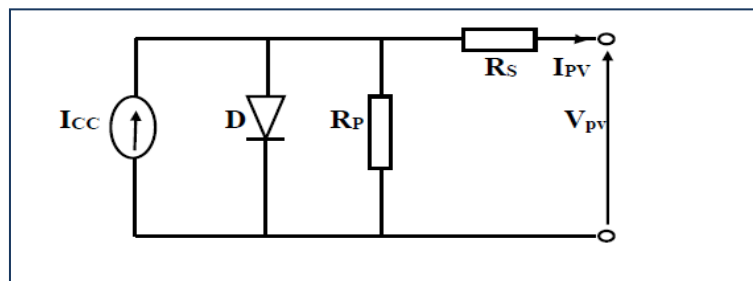


Figure. (1.8): Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension d'une cellule PV est donné par:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q(V_{pv} + (I_{pv} R_s))}{n \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + (I_{pv} R_s)}{R_p} \quad (1.2)$$

Où :

V_{pv} : Tension de sortie de la cellule(V).

I_{pv} : Courant de sortie de la cellule(A).

I_{ph} : Courant photo-générer ou photo-courant (A).

I_{sat} : Courant de saturation de la diode (A).

q : Charge d'électron $q = 1.6 \cdot 10^{-19}$ (c).

K : Constant de Boltzmann ($k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/k).

T : Température absolue de fonctionnement de la jonction (K°).

n : Facteur d'idéalité de la diode ($n \in [1, 3]$).

R_s : Résistance série(Ω).

R_p : Résistance parallèle(Ω).

1.6.1. Paramètres d'une cellule photovoltaïque :

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique.

1.6.1.1 Courant de court-circuit (I_{cc}) :

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_s nulle et R_p infinie), ce courant se confond avec le photoc-courant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (1.3), on obtient:

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q(I_{cc} R_s)}{n \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] - \left(\frac{I_{cc} R_s}{R_p} \right) \quad (1.3)$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le

Terme $I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q(I_{cc} R_s)}{n \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right]$ devant I_{ph} L'expression approchée du courant de courtcircuit

$$\text{est alors: } I_{cc} \approx \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_s}{R_p}}$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule (pratiquement $I_{cc} = I_{ph}$).

1.6.1.2. Tension de circuit-ouvert (V_{co}):

C'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_{cc} - I_{sat} \left[\exp\left(\frac{qV_{pv}}{nkt}\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv}}{R_p} \quad (1.4)$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à

$$V_{co} = VT \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1 \right] \quad (1.5)$$

1.6.1.3. La puissance maximale :

C'est la puissance électrique maximale que peut fournir le module, qui est associé à une tension maximale V_m et à une intensité maximale I_m lorsqu'il est question de puissance maximale dans les conditions normalisées d'ensoleillement **STC** standard (25°) et un éclairement de 1000W/m², on parle alors de puissance crête, mesurée en watts-crête.

1.6.1.4. Facteur de forme FF :

C'est le rapport de la puissance maximale qui peut être délivré à la charge sur le produit de (I_{cc} , V_{co}).

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} = \frac{I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (1.6)$$

Pour les cellules ayant moyen rendement, le **FF** des valeurs d'ordre **0.7** à **0.85**. Le facteur de forme **FF** diminue si la température augmente.

1.6.1.5. L'efficacité (rendement) de la conversion :

C'est le rapport de la puissance électrique maximale pouvant être extraite, à la puissance de rayonnement incident sur la surface X de la cellule.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{S_{Ga}} = \frac{V_{co} \cdot I_{cc} \cdot FF}{P_{inc}} \quad (1.7)$$

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

1.7. Modèle de simulation :

Pour réaliser cette modélisation, nous avons utilisé MATLAB comme outil de tests et de simulation [17]. Nous avons choisi le modèle photovoltaïque de KC200GT utilisé dans ce travail sont donnés dans le tableau (1.2).

Nombre de cellule en série par panneau (Ns)	54
---	----

Puissance maximale (P_max)	200.143	W
Courant de court-circuit (I_cc)	8.21	A
Tension de circuit ouvert (v_co)	32.9	V
Courant au point de MPP (I_op)	7.61	A
Tension au point de MPP (v_op)	26.3	V

Tableau (1.2) : caractéristique le modèle photovoltaïque de KC200GT.

Pour augmenter la puissance de sortie, les modules PV sont associés dans le panneau. Dans cette structure, les modules peuvent être connectés en série, en parallèle ou les deux ,dans notre cas (NS=2 ,NP=3).

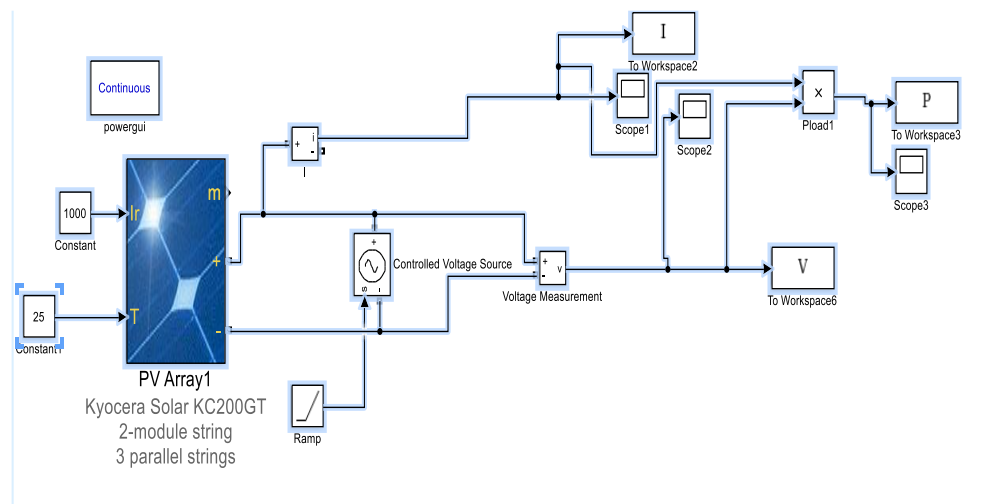


Figure (1.9) : Schéma de simulation du module PV de type «de KC200GT ».

- ✓ Pour visualiser l'influence de l'éclairement, on a fixé la température à $T=25^{\circ}$ et on a fait varier l'éclairement dans une gamme de $[400, 1000]W/m^2$.

Les caractéristiques-V et P-V sont donnés par la figure (1.10) et la figure (1.11).

1.7.1. Influence de l'éclairement:

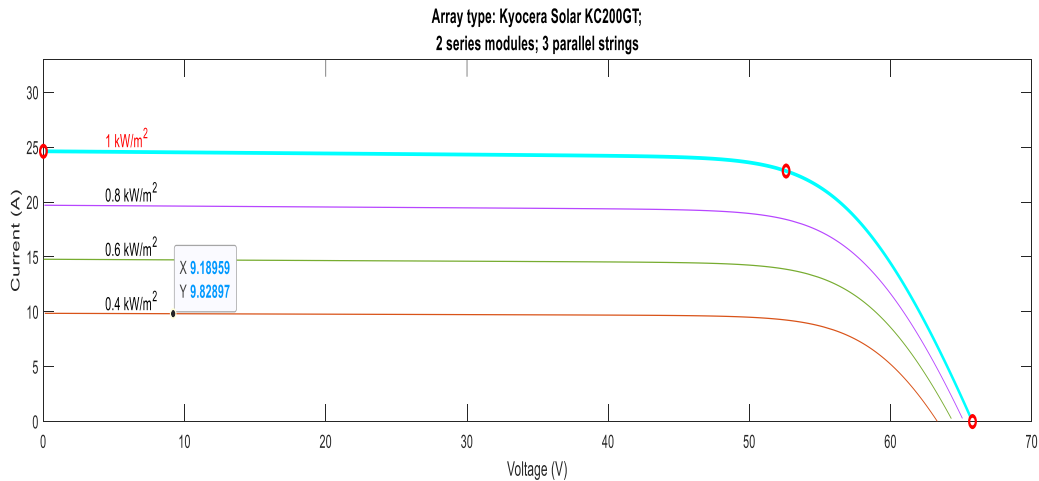


Figure (1.10) : Effet de l'éclairement sur la caractéristique Courant-Tension.

L'énergie électrique produite par une cellule dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface.

La figure (1.10) représente la caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement, à une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constantes. Le courant est directement proportionnel au rayonnement, contrairement à la tension qui ne varie que très peu en fonction de l'éclairement.

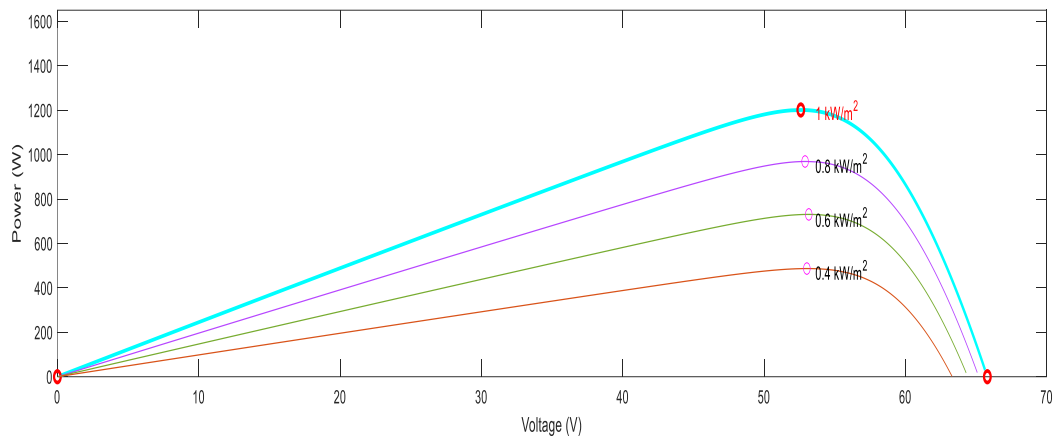


Figure (1.11): Effet de l'éclairement sur la caractéristique Puissance-Tension.

La figure (1.11) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P(V)$.

1.7.2. Influence de la température :

L'influence de la température est importante et a des conséquences pour la conception des panneaux et des systèmes photovoltaïques.

La température est un paramètre essentiel puisque les cellules sont exposées aux rayonnements solaires, susceptibles de les échauffer. De plus, une partie du rayonnement absorbé n'est pas convertie en énergie électrique, il se dissipe sous forme de chaleur ; c'est pourquoi la température de la cellule (T_c) est toujours plus élevée que la température ambiante (T_a).

$$T_c = T_a + \frac{E_m}{800} (T_{UC} - 20) \quad (1.8)$$

Avec

E_m : Eclairement moyenne (W/m^2).

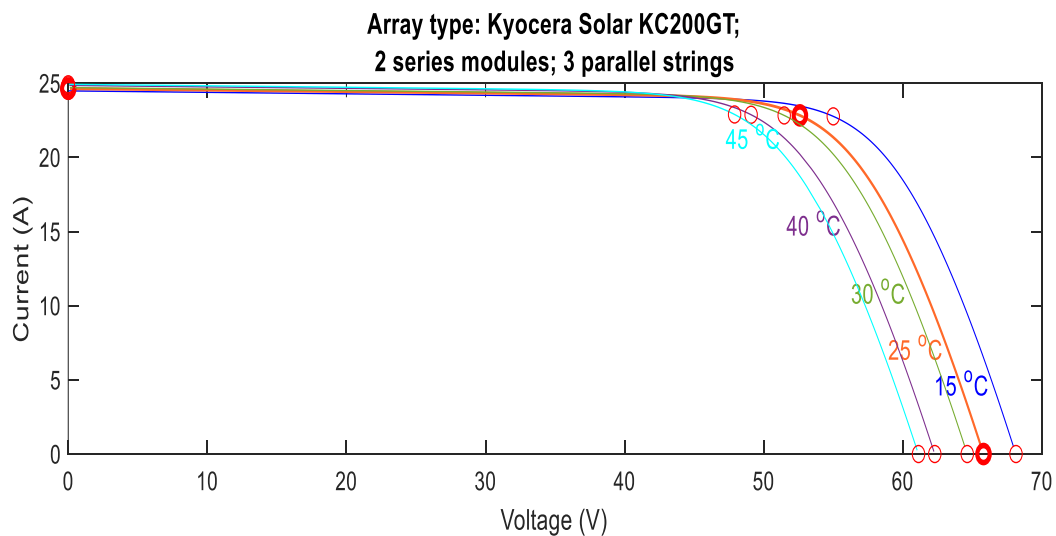
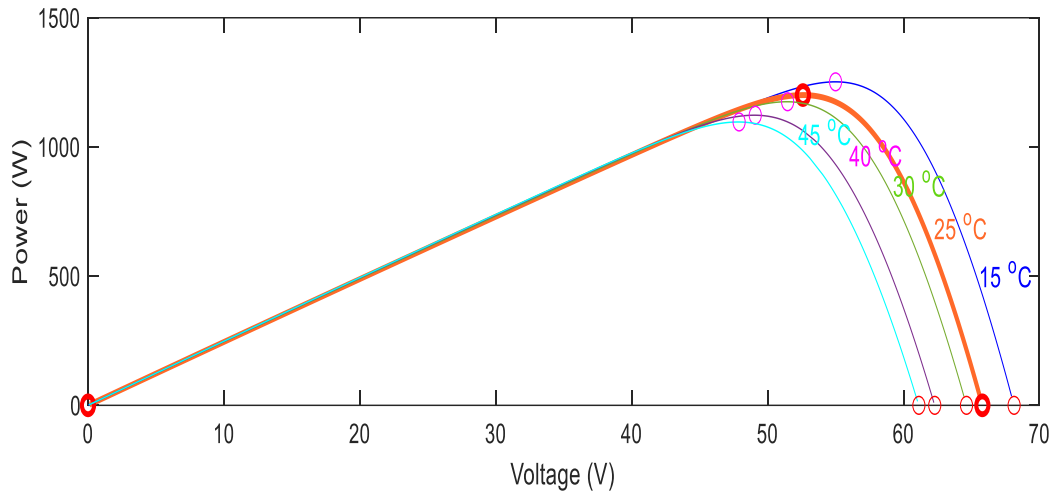


Figure (1.12) : Effet de la température sur la caractéristique Courant-Tension.

La figure (1.12), montre l'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$. Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique $I=f(V)$.

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



Figure(1.13) : Effet de la température sur la caractéristique Puissance-Tension.

La figure (1.13) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température, ce qui nous permet de déduire l'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$.

1.8. Avantages et inconvénients d'énergie photovoltaïque :

Les systèmes photovoltaïques offrent de nombreux avantages tout en ayant quelques inconvénients [18] :

- **Les avantages :**

- ✓ La haute fiabilité.
- ✓ Son potentiel illimité. 5% de la surface des déserts suffiraient pour alimenter la planète entière.
- ✓ le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers.
- ✓ La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- ✓ L'utilisation de l'énergie solaire permet d'éviter l'utilisation d'énergies fossiles ou nucléaires pour fabriquer la même quantité d'électricité et donc de diminuer d'autant les émissions de gaz à effet de serre ou la production de déchets nucléaires.

- **Les inconvénients :**

- ✓ La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologique et requiert des investissements d'un coût élevé.
- ✓ Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).
- ✓ Beaucoup d'appareils vendus dans le marché fonctionnent au 220 à 230 V alternatif. Or, l'énergie issue du générateur PV est unidirectionnelle et de faible voltage (<30V), elle doit donc être transformée par l'intermédiaire d'un onduleur.
- ✓ Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.
- ✓ La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages).

1.9. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur les systèmes photovoltaïques comme la cellule solaire, le module photovoltaïque et le panneau solaire.

Nous avons expliqué le fonctionnement de la cellule photovoltaïque ainsi que ces types. Ensuite nous avons présenté la structure des panneaux photovoltaïques plus les différents types de systèmes photovoltaïques pour l'habitat[19].

Dans le prochain chapitre, nous présenterons les convertisseurs statiques DC/DC qui sont les Hacheurs ainsi que la commande MPPT.

Chapitre II: Techniques de poursuite du point de puissance maximal MPPT

2.1. Introduction:

Pour surmonter le problème de rendement des panneaux solaires et obtenir un rendement maximum, il est nécessaire d'optimiser la conception de toutes les parties du système PV. En outre, il est nécessaire d'optimiser les convertisseurs DC/DC employés comme interface entre le générateur PV et la charge afin d'extraire le maximum de puissance d'une manière permanente et ainsi faire fonctionner le GPV à son point de puissance maximum (PPM) sans perte dans l'énergie transférée à l'aide d'un contrôleur MPPT, par conséquent, obtenir une puissance maximum sous la variation de la charge et des conditions atmosphériques (luminosité et température).

Un nombre important de technique de commande MPPT ont été élaboré depuis les années 70, commençant par des techniques simples comme les contrôleurs MPPT basés sur le retour d'état de la tension et du courant, aux contrôleurs plus performants utilisant des algorithmes pour calculer le PPM du GPV, parmi les techniques les plus utilisées nous avons la méthode Incrément de la conductance (IncCond) [20].

2.2. Convertisseurs DC/DC:**2.2.1. Définition:**

Pour la conversion de puissance, il est essentiel que le rendement soit maintenu élevé pour éviter la dissipation de la puissance et pour éviter les échauffements excessifs dans les composants électroniques. 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. Les commutateurs de puissance utilisés dépendent du niveau de la puissance à convertir ou à commander. Les MOSFETS (transistors à effet de champ d'oxyde de métal) sont habituellement utilisés à la puissance relativement basse (quelques kW) et les IGBTs (transistors bipolaires à commander. Gâchette isolée) à des puissances plus élevées.

Les thyristors ont été généralement utilisés et acceptés dans les plus hauts niveaux de puissance [20].

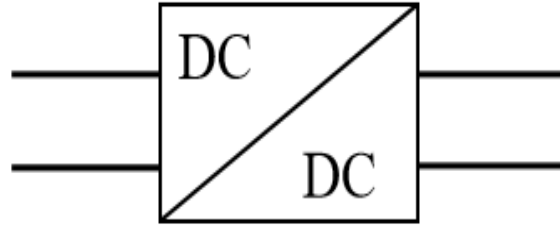


Figure (2.1): Symbole d'un convertisseur DC-DC.

2.2.2. Convertisseurs survolteur (Boost Converter):

Le convertisseur Boost est connu par le nom d'élévateur de tension. Le schéma de la (Fig.2.3), représente le circuit électrique du Boost. Au premier temps (αT), le transistor (S) est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période. Ensuite, le transistor (S) s'ouvre et l'inductance (L) s'opposant à la diminution de courant (I_L), génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge (R) à travers la diode (D). [21]

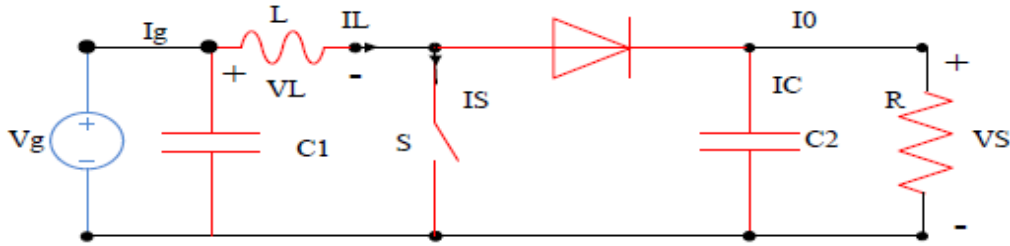


Figure (2.3): Circuit électrique de base du hacheur survolteur.

2.2.3. Modèle mathématique équivalent:

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

Pour la première période αT_s :

$$\begin{cases} i_{C1}(t) = C_1 \frac{dv_g(t)}{dt} = i_1(t) - i_L(t) \\ i_{C2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = +V_g(t) \end{cases} \quad (2.1)$$

Pour la deuxième période $(1-\alpha)T_s$

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_g(t)}{dt} = i_g(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_g(t) - V_0(t) \end{cases} \quad (2.2)$$

2.2.4. Modèle approximé du convertisseur Boost :

Les systèmes d'équations de base (Equ.2. 1) et (Equ.2.2) Représentent le convertisseur Boost pour une période αT_s et $(1-\alpha) T_s$ respectivement. Le convertisseur oscillant entre ces deux états avec une fréquence élevée, nous devons trouver une représentation dynamique approximée valable pour les deux intervalles de temps. Pour cela nous considérons que la variation des variables dynamiques CI , VL est de forme linéaire, en d'autres termes nous pouvons faire une approche d'exponentielle par un segment ($\epsilon e \approx 1 + \text{si } \epsilon \ll 1$)) et ainsi la dérivée de ces grandeurs sera constante.

Cette approche nous permet de décomposer l'expression de la valeur moyenne de la dérivée de la variable dynamique x sur les deux laps de temps αT_s et $(1-\alpha) T_s$:

$$\left\langle \frac{dx}{dy} \right\rangle T_s = \frac{dx}{dy(\alpha T_s)} \alpha T_s + \frac{dx}{dy(1-\alpha) T_s} (1-\alpha) T_s \quad (2.3)$$

ou $\left\langle \frac{dx}{dy} \right\rangle$ est la valeur moyenne de la dérivée de x sur une période T_s . Cette relation est valide si

$$\frac{dx}{dy(\alpha T_s)} \text{ et } \frac{dx}{dy(1-\alpha) T_s} \quad (2.4)$$

sont constants sur les périodes αT_s et $(1-\alpha) T_s$ respectivement en d'autres termes cette approximation est valable si les périodes αT_s et $(1-\alpha) T_s$ sont très faibles devant la constante de temps du circuit $C1R_g$, $C2 Z$, L/RL [22].

Dans ce cas la forme exponentielle du courant qui parcourt la self et la tension aux bornes de la capacité est de forme linéaire comme le montre la (Fig.2.4)

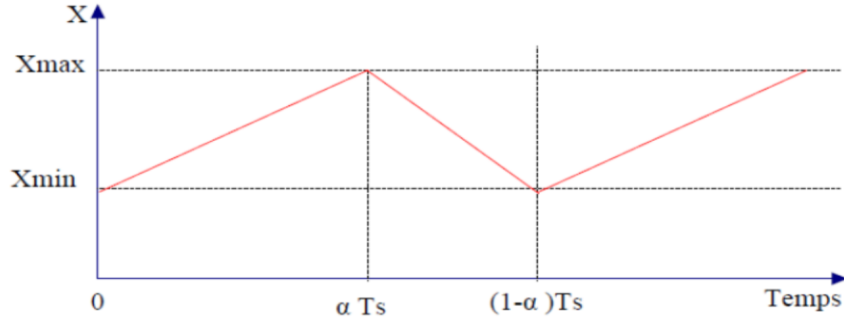


Figure (2.4): Allure des variables dynamiques IL .

En appliquant la relation (2.4) sur les systèmes d'équations (2.2) et (2.3), on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur [22] :

$$\begin{cases} i_L = i_g - C_1 \frac{dv_1(t)}{dt} \\ i_0 = (1 - d)i_L - C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} \\ V_g = L \frac{di_L(t)}{dt} + (1 - d)V_0 \end{cases} \quad (2.5)$$

Comme le présente la (Fig.2.5), lorsque l'interrupteur du transistor (S) est sur la position (on), le courant de l'inductance de l'hacheur augmente linéairement et à cet instant la diode (D) est bloquée (off).

Et lorsque (S) tourne sur la position (off), l'énergie emmagasinée par l'inductance est dissipée dans le circuit (RC) bien que la diode (D) est passante. Les caractéristiques de tension et du courant de charge du convertisseur Boost dans le cas de la conduction continue sont décrites par la (Fig.2.5), comme suit :

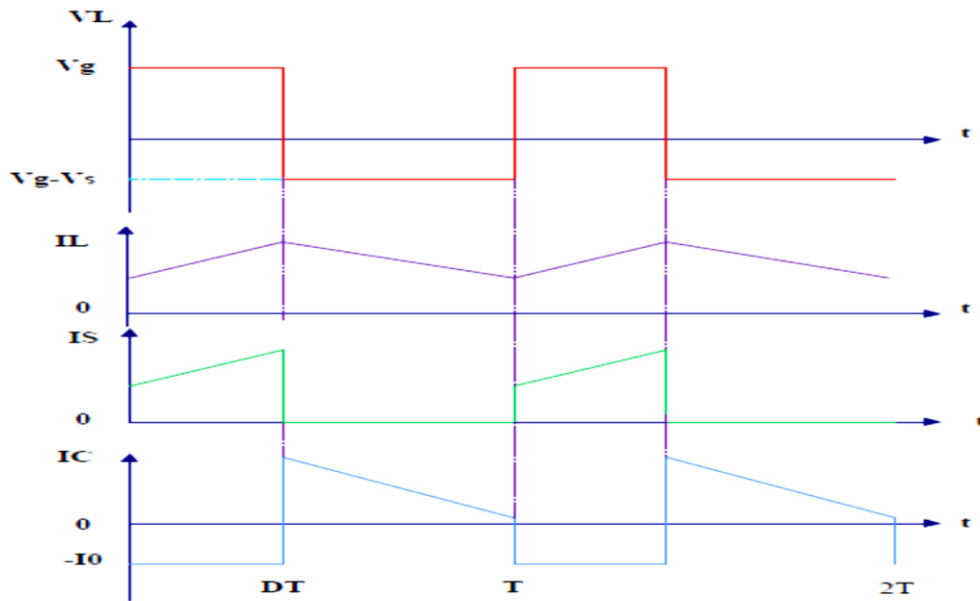


Figure (2.5): Caractéristique de la tension et du courant de le hacheur survolteur.

2.3. Résultat de simulation d'un convertisseur DC-DC :

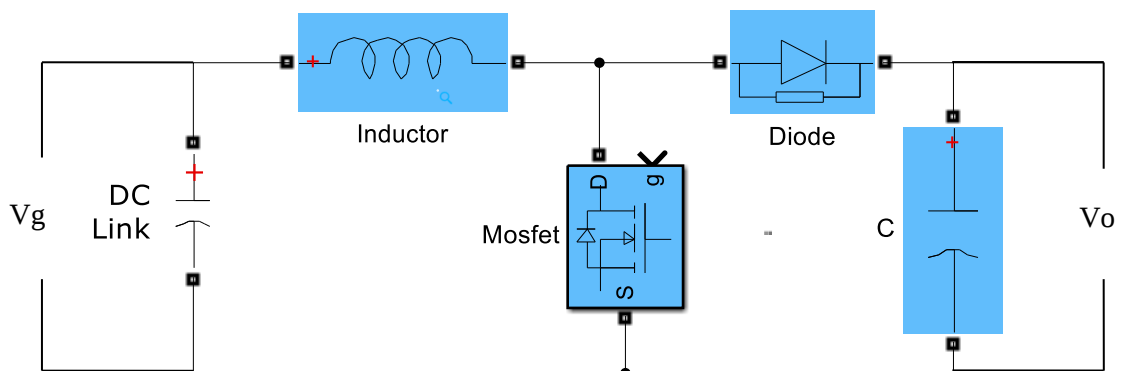


Figure (2.6) : Schéma bloc d'un convertisseur DC-DC.

Les valeurs des paramètres du convertisseur DC-DC: Résistance (R_h) = $1\ \Omega$, Inductance (L_h) = $4\ e-4\ H$, Capacitance (C_h) = $1200\ e-6\ F$, Diode: Résistance (R_{on}) = $0.001\ \Omega$, Tension directe (V_D) = $0.8\ V$, Résistance d'amortissement (R_a) = $500\ \Omega$, Capacité d'amortissement (C_A) = $250\ e-9\ F$, Mosfet : FET Résistance (R_{on}) = $0.1\ \Omega$, Interne diode résistance (R_d) = $0.01\ \Omega$, RLC: Résistance (R) = $120\ \Omega$, Tension nominale $V_n = 50\ V_{rms}$

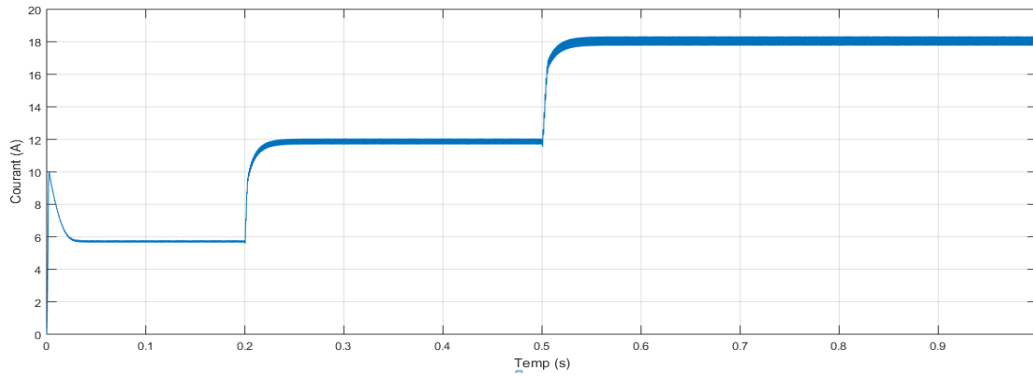


Figure (2.7) : Caractéristiques $i(t)$ d'un convertisseur DC-DC.

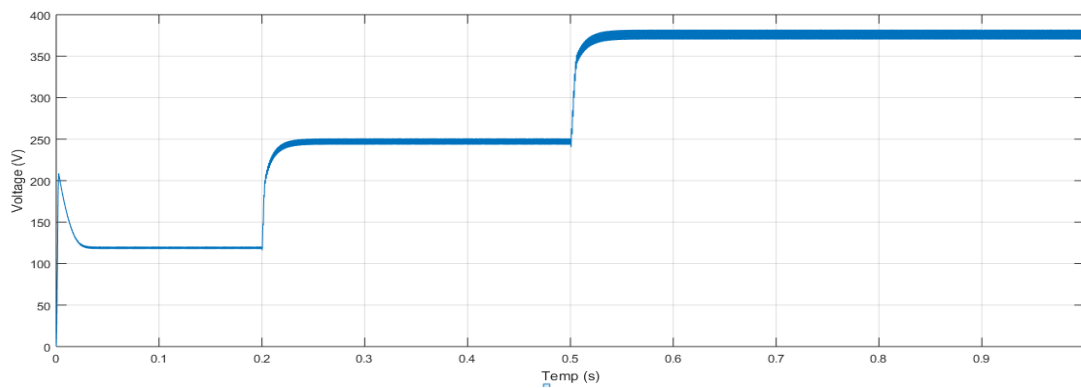


Figure (2.8) : Caractéristiques $v(t)$ d'un convertisseur DC-DC.

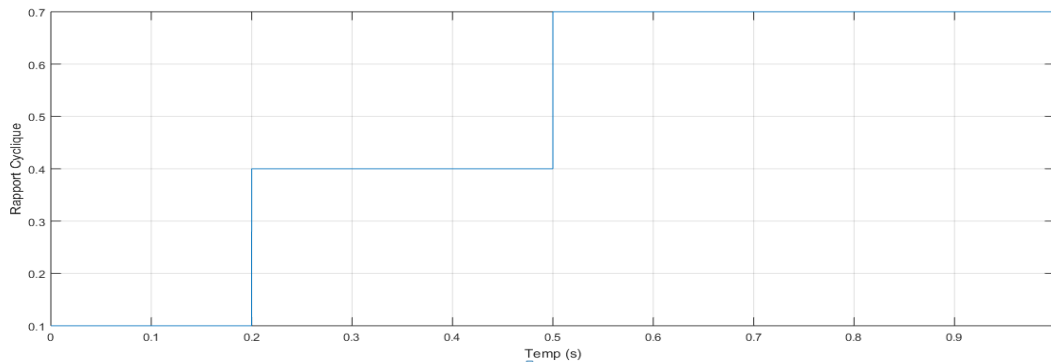


Figure (2.9) : variation du rapport cyclique d'un convertisseur DC-DC.

Les figures (2.7 et 2.8) représentent des Résultats expérimentaux de convertisseurs boost par une variation paramétrique de rapport cyclique comme le montre la Figure (2.9).

Où l'on remarque une légère oscillation au décollage d'environ 0,01 seconde pour revenir à sa valeur et se fixer à une certaine valeur. Il montre également la relation directe entre les changements du rapport cyclique, car son augmentation s'accompagne d'une augmentation du niveau de courant et de tension qui sort.

2.3.1. Avantages du convertisseur « BOOST »:

On utilise un convertisseur boost lorsqu'on désire augmenter la tension disponible d'une source continue. Les systèmes alimentés par batterie d'accumulateurs utilisent souvent plusieurs accumulateurs en série, afin de disposer d'un niveau de tension suffisamment élevé. La place disponible étant souvent limitée, il n'est pas toujours possible de disposer d'un nombre suffisant d'éléments. Un convertisseur boost permet d'augmenter la tension fournie par les batteries et ainsi diminuer le nombre d'éléments nécessaires pour atteindre le niveau de tension désiré. Les systèmes photovoltaïques sont des exemples typiques d'utilisation des convertisseurs boost [21].

2.4. Définition de l'MPPT :

La technique MPPT est une commande associée à un étage d'adaptation permettant de faire fonctionner un générateur électrique non linéaire de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec le générateur photovoltaïque ou encore avec les générateurs éoliens. Un contrôleur MPPT permet alors de piloter le convertisseur statique reliant la charge et le panneau photovoltaïque, de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge [23].

2.4.1. Principe de la commande MPPT :

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un GPV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (VPPM et IPPM). La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT [23]. Il peut être représenté par le schéma de la Figure(2.10) ture.

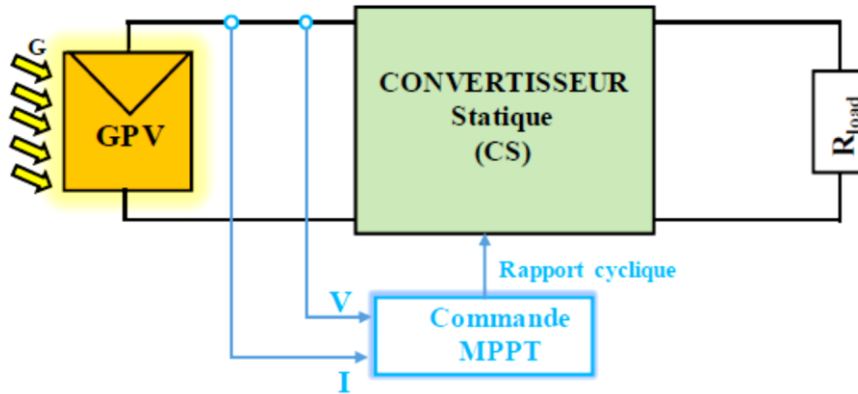


Figure (2.10): Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.

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 MPP figure (2.11).

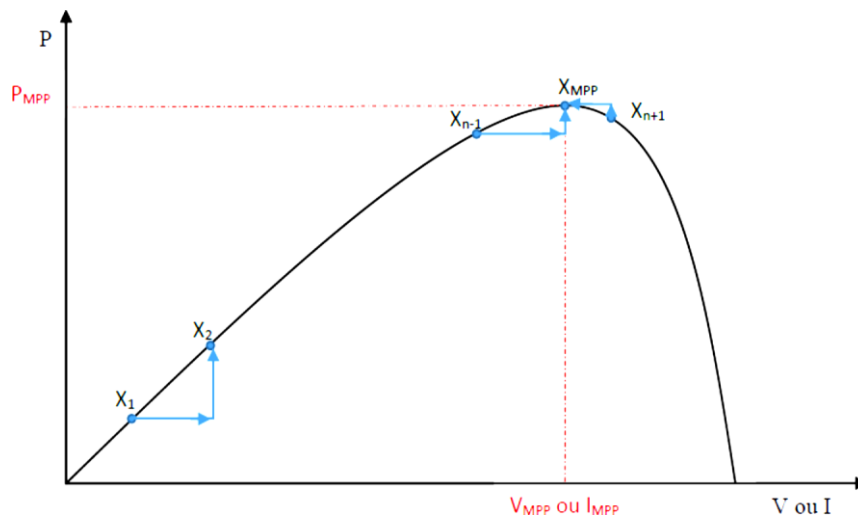


Figure (2.11): Principe de la commande MPPT.

2.4.2. Classification des MPPT:

Il est possible de classer d'une manière générale les commandes MPPT selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus

intéressant de les classer selon le type de recherche qu'elles exécutent et selon les paramètres d'entrée de la commande MPPT [24].

2.4.3. Classification Des Commandes MPPT Selon Les Paramètres D'entrée :

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

Il y a un certain nombre de commandes MPPT qui effectuent 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 basées sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maximal (V_{OPT} et I_{OPT}) et les paramètres caractéristiques du module PV (V_{OC} et I_{CC}). 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 [24].

- **Commandes MPPT fonctionnant 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 résistance.

Dans tous les systèmes utilisant les paramètres de sortie, une approximation de P_{max} 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 [24].

2.5. Classification des commandes MPPT selon le type de recherche:

2.5.1. Méthodes indirectes :

Dans les méthodes indirectes, les bases de données regroupant les valeurs physiques du panneau PV sont généralement utilisées pour générer les signaux de contrôle dans différentes conditions climatiques (température, ensoleillement). Ces méthodes, utilisées uniquement pour les systèmes PV sont la méthode de tension en circuit ouvert (V_{co}), la méthode du

courant de court-circuit (I_{cc}), ainsi que la méthode MPPT basée sur l'intelligence artificielle (IA).

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 [25].

2.5.2. Méthode directe :

Les valeurs instantanées de la tension ou du courant de sortie PV sont généralement utilisées pour générer les signaux de commande et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures. L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des panneaux PV. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du PV. 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 [25].

2.6. Recherche du point de puissance maximale (MPPT):

2.6.1. Premières commandes MPPT:

En Janvier 1968, A.F. Boehringer a publié la première loi de commande MPPT adaptée à une source d'énergie renouvelable de type photovoltaïque. La commande, basée sur un algorithme de contrôle adaptatif, permet de maintenir le fonctionnement du système à son point de puissance maximale. A partir des mesures du courant délivré par le panneau photovoltaïque I_{ph} et de la tension V_{ph} , la méthode consiste à calculer la puissance à l'instant t_i et la comparer à la valeur mémorisée à l'instant t_{i-1} . Par la suite, un nouveau rapport [26].

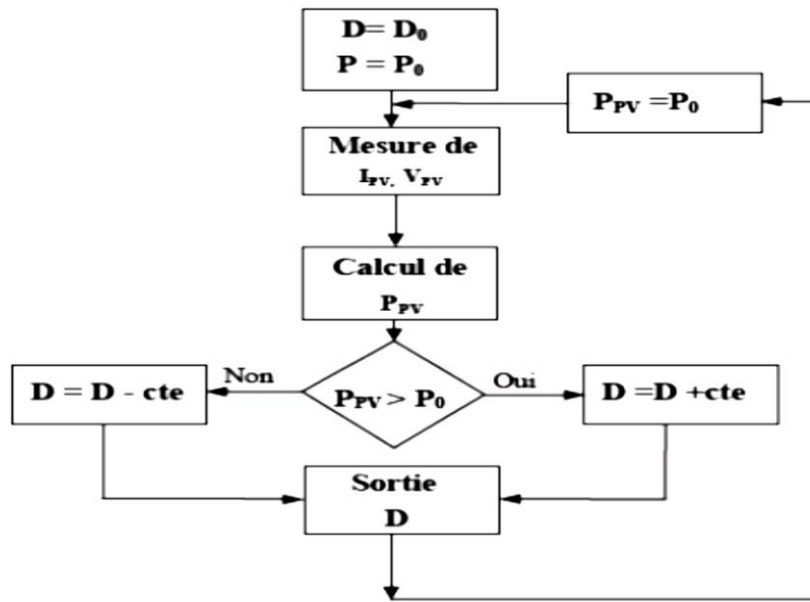


Figure (2.12): Principe de la première commande MPPT numérique.

2.6.2. Principe:

Pour que le système photovoltaïque fonctionne à des points de puissance maximums de leurs caractéristiques, il existe des lois de commande spécifiques qui répondent à ce besoin. Cette commande est nommée dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou « Maximum Power Point Tracking » en Anglais (MPPT). Le principe de ces commandes est de chercher le point de puissance maximale (PPM) en gardant une bonne adaptation entre le générateur et sa charge pour assurer le transfert de la puissance maximale.

La figure (2.13) représente une chaîne de conversion photovoltaïque élémentaire associée à une commande MPPT. La commande MPPT est associée à un convertisseur statique permettant.

De faire une adaptation entre le GPV et la charge de telle sorte que la puissance générée correspond à sa valeur maximale et qu'elle soit transférée directement à la charge.

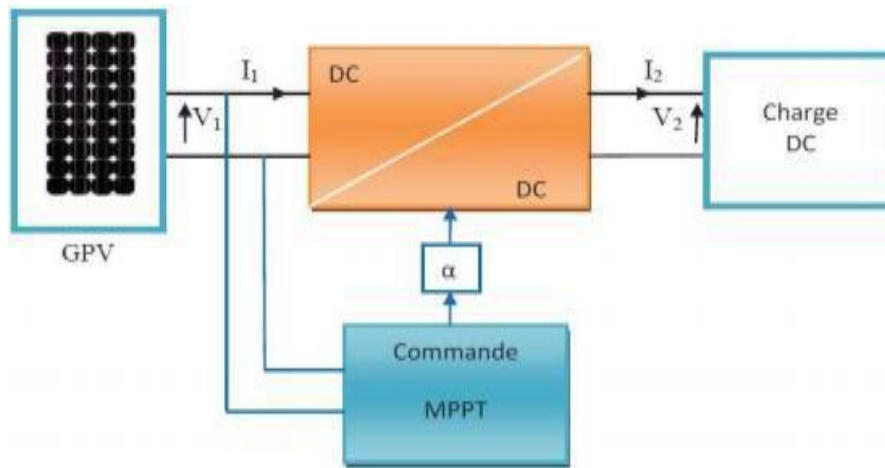


Figure (2.13): Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur statique contrôlé par une commande MPPT.

La technique de contrôle consiste donc à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le point de fonctionnement du générateur à sa valeur optimale quelque soient les instabilités météorologiques ou les variations brutales de la charge [27].

2.6.3. Types de commande MPPT:

Dans la littérature, il existe plusieurs méthodes de recherche du point de puissance maximale, on présente dans ce qui suit les trois méthodes les plus utilisées dans la littérature.

- **Principe de la méthode Hill Climbing:**

La technique de la commande 'Hill Climbing' consiste à perturber le rapport cyclique tout en perturbant la tension. Cette perturbation se traduit par un déplacement du point de fonctionnement le long de la caractéristique puissance-rapport cyclique du générateur photovoltaïque [28], comme le montre la figure (2,14).

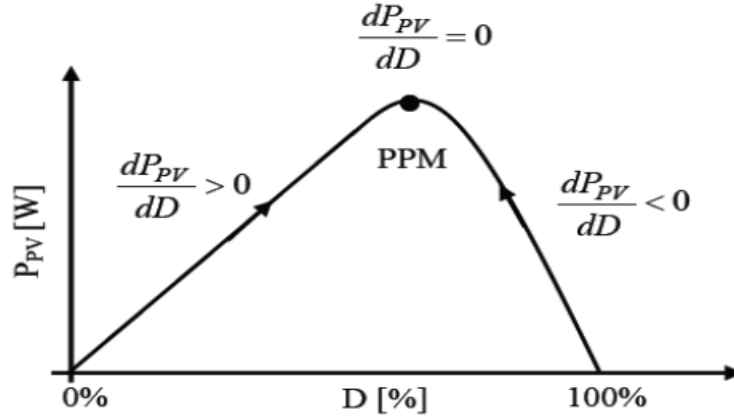


Figure (2.14) : Relation entre la puissance et le rapport cyclique [28].

Si avec une incrémentation positive du rapport cyclique on obtient une augmentation de la puissance, on en déduit que le point de fonctionnement se situe à gauche du PPM et que le Sens de la perturbation doit être maintenu [28].

Dans le cas contraire, le point de fonctionnement se situe à droite du PPM et que le sens de la perturbation doit être inversé [28].

La variable 'sloop' prend une valeur de (1) ou (-1) suivant la direction de recherche pour augmenter la puissance et 'a' est la variable d'incrément du rapport cyclique [28].

L'avantage de cette méthode est le fait qu'on a pas besoin de connaître la caractéristique réelle du courant et de la tension du générateur photovoltaïque.

- **Principe de la méthode 'Perturb and Observe:**

La méthode Perturb and Observe (P&O) est une approche largement répandue dans la recherche du point de puissance maximale grâce à sa simplicité [26].

Comme son nom l'indique la méthode (P&O) consiste à perturber avec une amplitude faible la tension à la sortie du panneau autour de sa valeur initiale, ensuite analyser ou observer l'impact de ce changement sur la puissance obtenue du panneau [26].

- **Principe des commandes « Incrément des conductances » (IncCond) :**

Cette technique est basée sur la variation de la conductance du GPV et son influence sur la position du point de fonctionnement. La conductance et la variation élémentaire de la conductance (incrément) du module photovoltaïque sont définies respectivement par :

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (2.6)$$

$$dG = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (2.7)$$

La caractéristique puissance-tension du GPV, permet d'écrire les conditions suivantes :

- Si $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0$, le point de fonctionnement est à gauche du PPM.
- Si $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$, le point de fonctionnement est sur le PPM.
- Si $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0$, le point de fonctionnement est à droite du PPM.

En utilisant la relation (2.8), la dérivée de la puissance peut s'écrire sous la forme

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = \frac{d(V_{pv} \cdot I_{pv})}{dV_{pv}} = I_{pv} \cdot \frac{dV_{pv}}{dV_{pv}} + V_{pv} \cdot \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \cdot \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (2.8)$$

Pratiquement, comme la méthode P&O, cette technique présente des oscillations autour du PPM car il est difficile de remplir la condition.

$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$, ce qui fait que le système reste toujours en train de la chercher. L'algorithme IncCond est plus complexe que celui du P&O, ce qui engendre un temps d'exécution plus long [28].

2.6.4 Commande MPPT par la méthode « Incrément des conductances » :

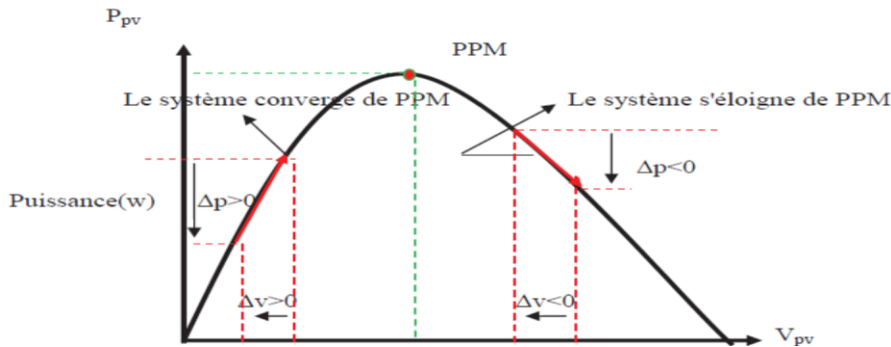


Figure (2.15): Illustration de la méthode IC .

La perturbation de la tension déplace le point de fonctionnement vers un point plus proche du MPP et on continue à perturber la tension dans la même direction. Ceci va déplacer le point de fonctionnement jusqu'à atteindre le MPP.

Si au contraire, la puissance décroît, $\Delta P < 0$, le point de fonctionnement s'éloigne du MPP. Alors, on doit perturber la tension avec un signe algébrique contraire au signe précédent pour déplacer le point de fonctionnement jusqu'à atteindre le MPP.

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. En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV

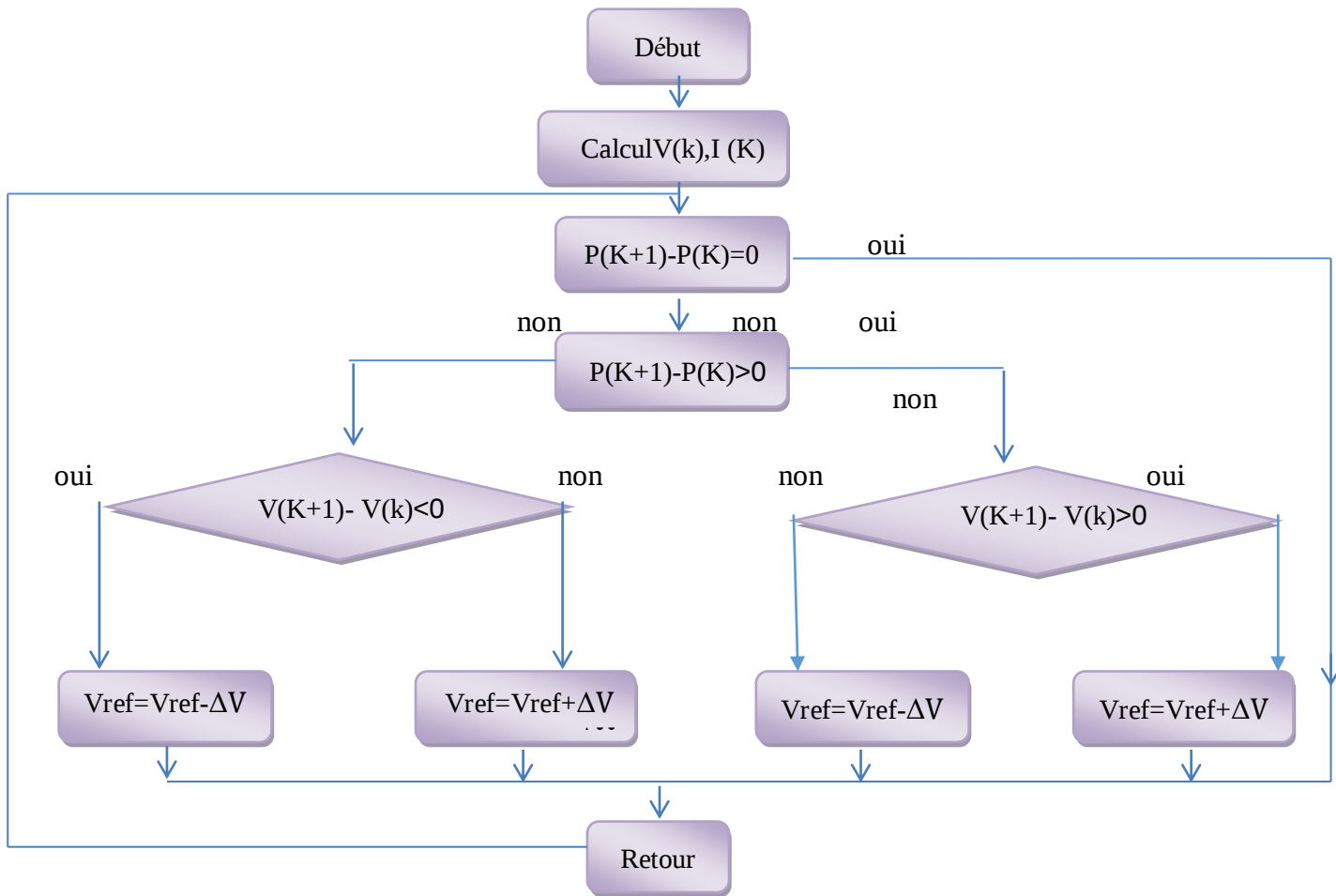
augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau MPP [23] [24].

La figure (II.16) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.

Selon cet algorithme, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à des instants successifs d'échantillonnage, et pouvoir calculer l'erreur de tension et de puissance :

$$\Delta V = V_{pvk} - V_{pvk-1} \quad (2.9)$$

$$\Delta P = P_{pvk} - P_{pvk-1} \quad (2.10)$$



Figure(2.16):Technique de MPPT basée de la méthode IC.

La méthode IC est aujourd'hui largement utilisée à cause sa simplicité, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi. Cette procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint. Ces oscillations

peuvent être minimisées en réduisant la perturbation. Il faut noter que si la valeur incrémentée est faible on doit avoir un ralentissement dans la recherche du PPM. Autrement dit, il faut trouver un compromis entre la précision et la rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser [29].

2.6.5 Avantages et inconvénients de IC:

- **Avantage :**

- Structure de régulation simple.
- Nombre des paramètres mesures réduit.

- **Inconvénients :**

- Dépassement du point maximum optimal en cas de changement rapide des conditions atmosphériques [29].

2.7. SIMULINK d'un panneau photovoltaïque commandé par IC :

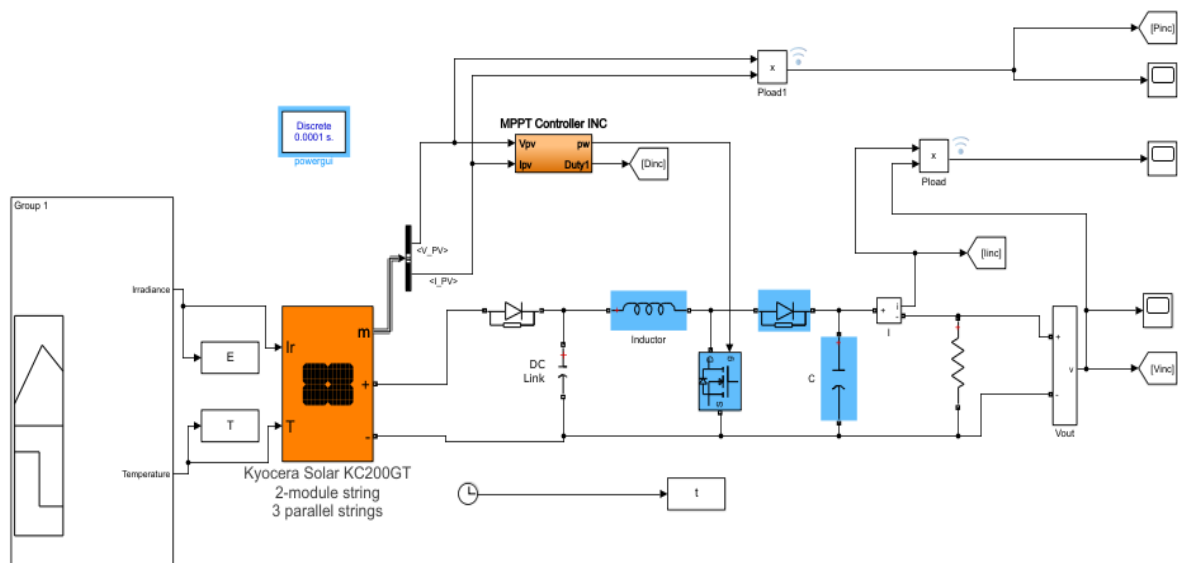


Figure (2.17) : Schéma MATLAB SIMULINK d'un panneau photovoltaïque commandé par IC.

Les paramètres du convertisseur électrique Boost sont donnés par le tableau suivant :

Paramètre	Nom	Valeur
L_i	Inductance du convertisseur	4 mH
C_i	Capacité d'entrée	4700 uF
C_o	Capacité de sortie	470 UF
R	Resistance de charge	200Ω

Tableau(2.1):Les paramètres du convertisseur.

➤ **Commentaire :**

La figure suivante présente allure de puissance en fonction de tension d'un système photovoltaïque (panneau 200w) commandé par un contrôleur IC dans une température et éclairements variable.

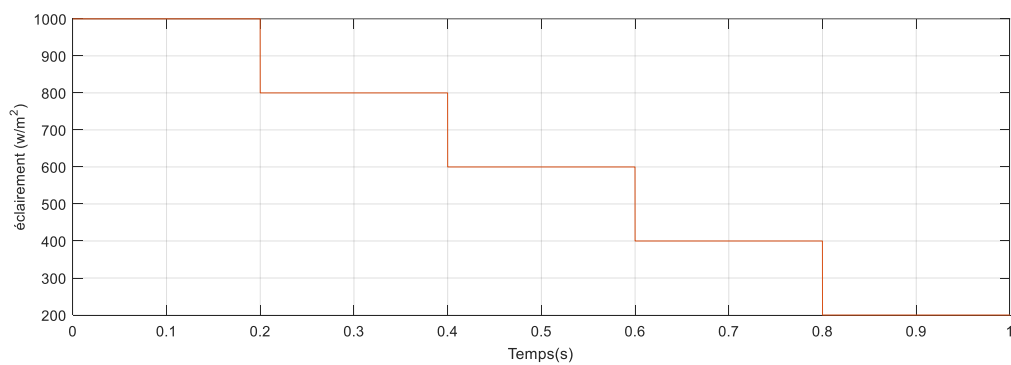


Figure (2.18) : Variation de l'éclairement .

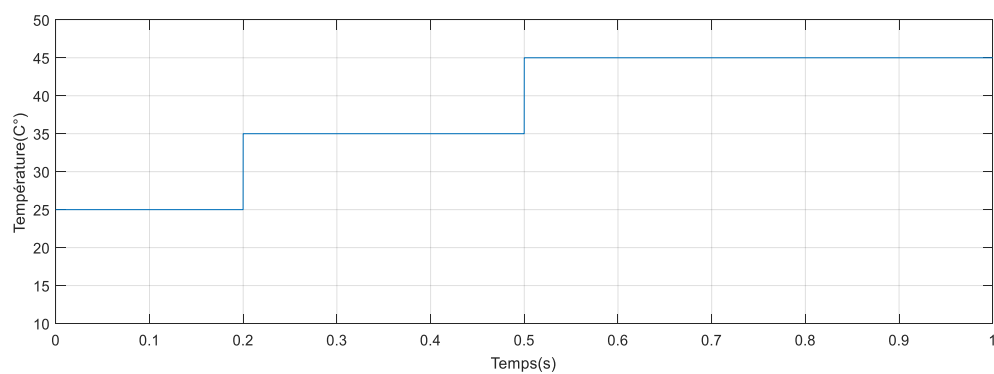


Figure (2.19) : Variation de la température.

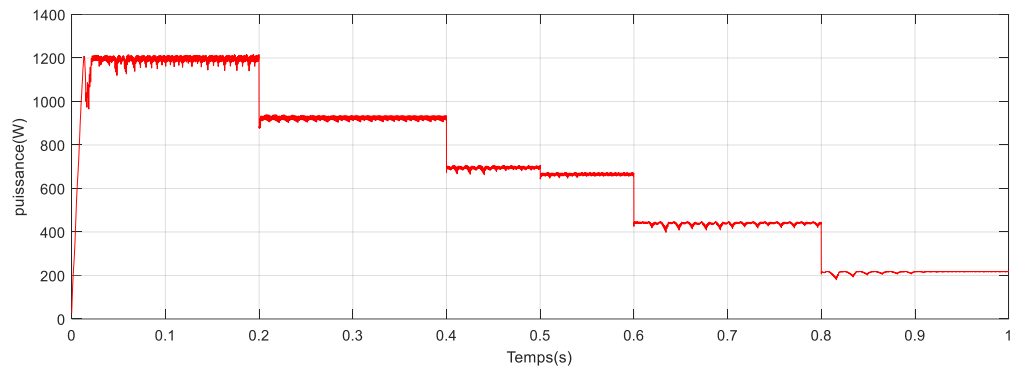


Figure (2.20) : Caractéristiques $P(t)$ d'un système PV.

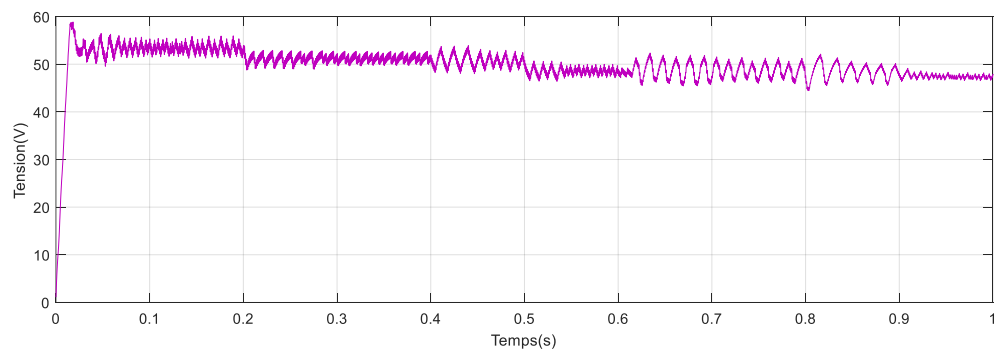


Figure (2.21) : Caractéristiques $v(t)$ d'un système PV.

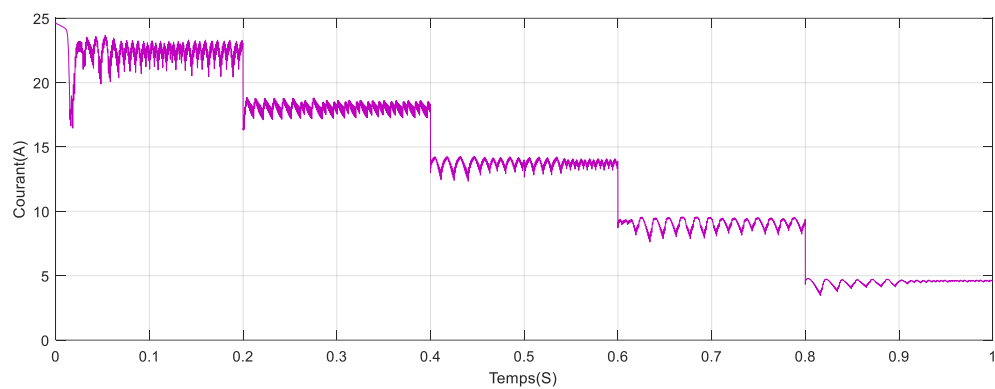


Figure (2.22) : Caractéristiques $i(t)$ d'un système PV.

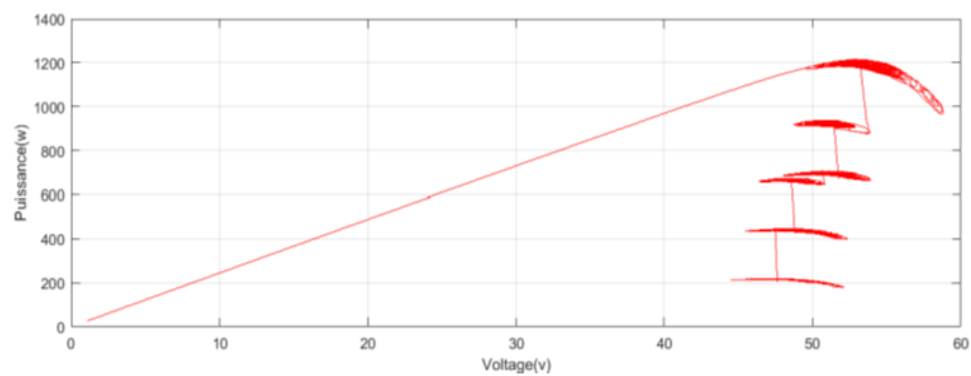


Figure (2.23) : Caractéristiques $p(v)$ d'un système PV.

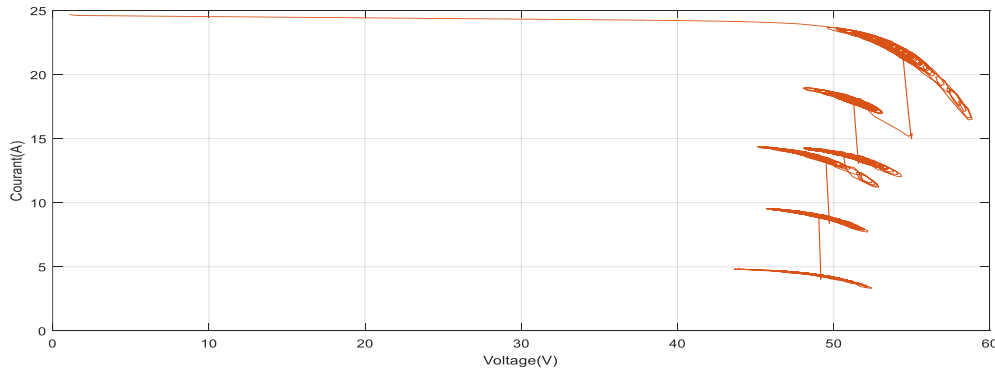


Figure (2.24) :Caractéristiques $i(v)$ d'un système PV.

Comment sur les figures:

- ✓ La figure (2.20) présente allure de puissance en fonction de temps d'un système photovoltaïque commandé par un contrôleur IC dans une température et éclairements variable, on remarque que la puissance met un temps d'oscillation de (0.01s) pour se stabiliser à la valeur maximale de la puissance (1200W) .
- ✓ Les figures (2.20), (2.21),(2.22) présentent allure de puissance et la tension en fonction de temps d'un système photovoltaïque commandé par un contrôleur IC dans une température Variable et différentes éclairements :
- ✓ Dans un premier temps, nous avons soumis le système à une variation de luminosité $E=200, 400, 600, 800, 1000 \text{ W/m}^2$). À l'instant $t=1s$ avec une température variable($25, 35, 45^\circ\text{C}$). Par conséquent, nous constatons dans les figures (2.20, 2.21), une augmentation de la tension qui induit une diminution de la puissance, le point de fonctionnement du système s'éloigne du MPP, après 0.01s. La commande remonte le Point de fonctionnement est le stabilise au tour du MPP avec une certaine oscillation qui est causée par l'algorithme de commande [17].

2.8. Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons effectué une étude par simulation MPPT par méthode d'Incrémental Conductance (IC). qui basées sur contreclé de la réaction de puissance, Cette commande MPPT utilise directement la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour chercher le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale.

Dans le prochain chapitre, nous présente une approche intelligente (MPPT-floue).pour l'amélioration des performances de contrôle d'un système photovoltaïque.

Chapitre III:
Contrôleur MPPT à base de logique
floue

3.1. Introduction:

Créé en 1965 par Lotfi Zadeh en se basant sur sa théorie mathématique des ensembles flous. La logique floue est une extension de la logique classique qui permet la modélisation des imperfections des données, elle se rapproche dans une certaine mesure de la flexibilité du raisonnement humain, et récemment la commande à base de logique floue a été introduite dans les systèmes de poursuite de point de puissance maximal.

En 1973, le professeur Zadeh publie un article, il y mentionne pour la première fois le terme de variables linguistiques dont la valeur est un mot et non un nombre. En 1974, Mamdani réalise un contrôleur flou expérimental pour commander un moteur à vapeur. Dans les années 80, plusieurs applications commencent à émerger notamment au Japon. Elle a été utilisée dans plusieurs domaines variés de contrôle et de régulation.

Dans ce chapitre nous allons présenter la logique floue, son principe, les étapes, les constituants, aussi le principe de fonctionnement d'un régulateur flou et l'application de la logique floue dans une commande MPPT photovoltaïque [35].

3.2. Définition à la logique floue :

La logique floue est une extension de la logique booléenne, une méthode de traitement de connaissances imprécises basées sur des termes linguistiques, elle donne le moyen de convertir une commande linguistique basée sur le raisonnement humain, en une commande automatique, tout cela en introduisant la notion de degré dans la vérification d'une condition ainsi permettant à une condition d'être dans différents états, que vrai ou faux, de ce fait la logique floue procure une sorte de flexibilité ce qui donne la possibilité de prendre en compte certaines incertitudes est imprécisions, ce qui nous permet de commander des systèmes complexes dont les informations sont exprimées d'une façon vague et imprécise.

Un des intérêts de la logique floue pour formaliser le raisonnement humain est que les règles sont énoncées en langage naturel [30].

3.2.1. Principe de la logique floue:

La théorie de base de la logique floue est la description d'un phénomène qui contient en général des expressions floues comme : Chaude, froid. Rapide, lent. Grand, moyen, petit. Max, min. Positive, nulle, négative...etc. Les éléments constituant la théorie de base de la

logique floue sont : Les variables linguistiques, les ensembles flous et les fonctions d'appartenance.

Le principe d'une commande floue se base sur deux variables d'entrées qui sont l'erreur E et le changement d'erreur ΔE et une variable de sortie $\Delta\alpha$ (variation du rapport cyclique). La valeur de la variable de sortie, qui pilote le convertisseur statique pour rechercher le PPM, il est déterminé à l'aide d'une table de vérité et de l'évolution des paramètres d'entrée [31].

3.3. Algorithmes basés sur la logique floue (LF) [32,33] :

Des techniques de contrôle MPPT basées sur la logique floue ont récemment été introduites car elles offrent l'avantage d'un contrôle robuste et ne nécessitent pas une connaissance exacte du modèle mathématique du système. De plus, ces techniques basées sur la logique floue améliorent les performances (vitesse de convergence, précision, facilité de mise en œuvre et faible coût).

De manière générale, le principe du contrôleur utilisant la logique floue se base sur deux variables d'entrées (figure 3.1) qui sont l'erreur (E), sa variation (ΔE) et une variable en sortie (ΔD), correspondant à la variation du rapport cyclique qui pilote le signal de commande du convertisseur statique pour la recherche du PPM [32].



Figure(3.1): Structure de base du contrôleur MPPT à base logique floue.

La figure (3.2) ci-dessous illustre l'implémentation du contrôleur MPPT à base de logique floue.

Le contrôleur flou se compose de trois blocs de traitement consécutifs : le premier bloc est celui de la fuzzification qui permet le passage du domaine réel au domaine flou ; le deuxième est consacré aux règles d'inférences alors que le dernier est réservé à l'opération de defuzzification permettant le retour au domaine réel [33].

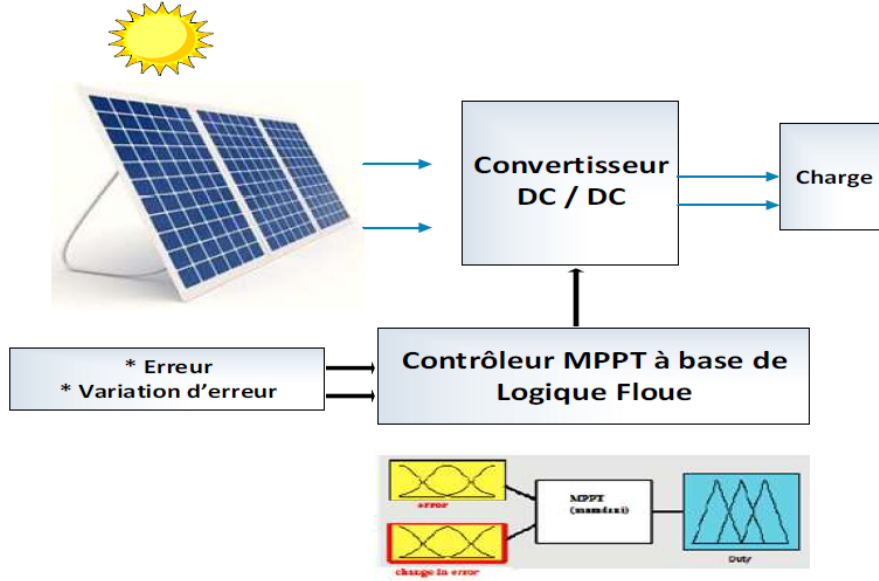


Figure (3.2) : Mise en œuvre du contrôleur MPPT basée sur la logique floue.

3.3.1. La fuzzification:

La fuzzification permet de transformer les variables réelles en variables floues. La tension (V) et le courant (I) réels du générateur PV peuvent être mesurés en continu et la puissance peut être calculée ($P = V \times I$).

Les variables d'entrée du régulateur flou proposée sont : l'erreur (E) et la variation de l'erreur (CE). À un instant d'échantillonnage k , ces variables sont exprimées comme suit: [34,35]

$$E(k) = P(k) - P(k - 1) \quad (3.1)$$

$$CE(k) = E(k) - E(k - 1) \quad (3.2)$$

Où $P(k)$ sont respectivement la puissance du générateur PV. La variation du rapport cyclique (AD) d'un convertisseur DC-DC est utilisée comme une sortie du régulateur proposé. Comme illustré en Figure (3.3), les variables d'entrée du régulateur flou (E , CE) sont déterminées à partir des signaux réels (E , CE) en multipliant par les gains (ou facteurs) d'échelle correspondants (SE , SCE), puis converties en variables linguistiques tels que SP ((Small positive), BP (big positive), ZE (zéro), SN (Small négative), BN (big négative) en utilisant des sous-ensembles flous de base.

La Figure (3.3) et (3.4) montre les fonctions d'appartenance des cinq sous-ensembles flous pour les variables d'entrée et de sortie. Toutes ces fonctions sont de forme triangulaire afin de simplifier le traitement informatique.

L'entrée $E(k)$ montre si le point de fonctionnement à l'instant k se trouve sur la gauche ou sur la droite du MPP dans la caractéristique $P-I$ de générateur PV, tandis que l'entrée $CE(k)$ exprime le sens de déplacement de ce point. Par conséquent, la commande est effectuée en modifiant le rapport cyclique (AD) en fonction de la pente $E(k)$ afin de ramener le point de fonctionnement au point maximum où la pente est nulle.

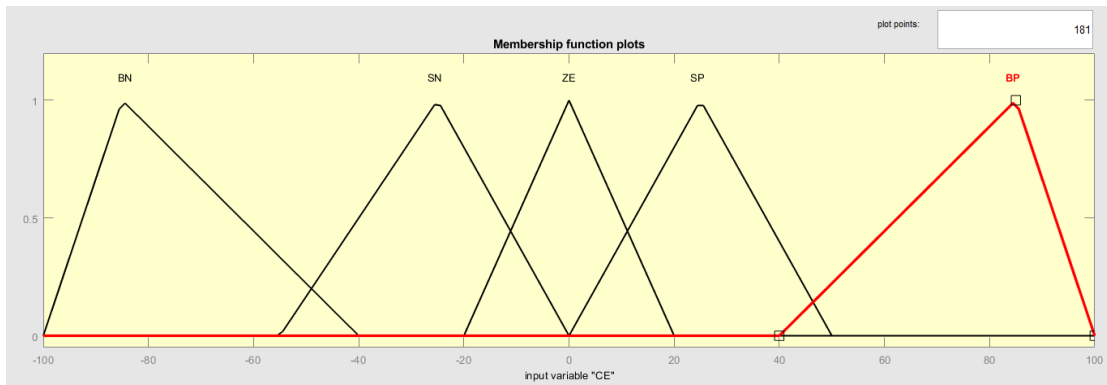
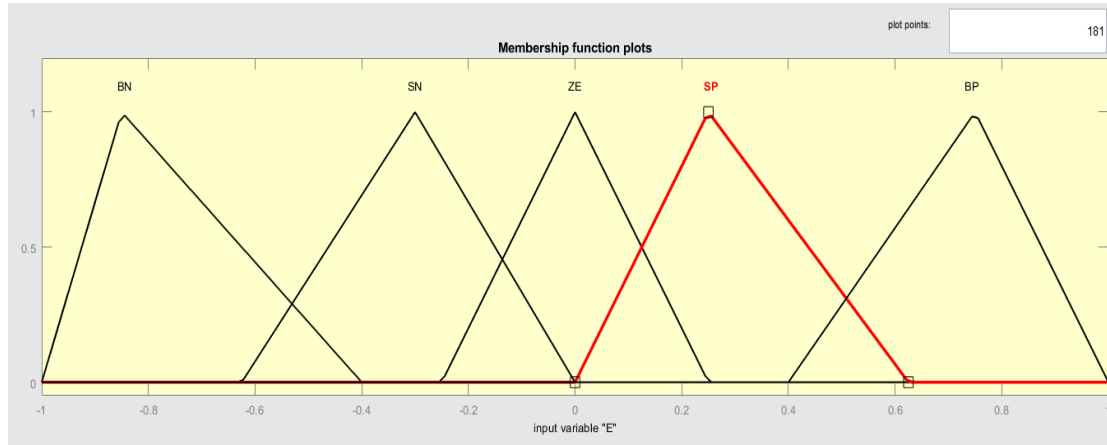


Figure (3.3) : Les fonctions d'appartenance des entrées.

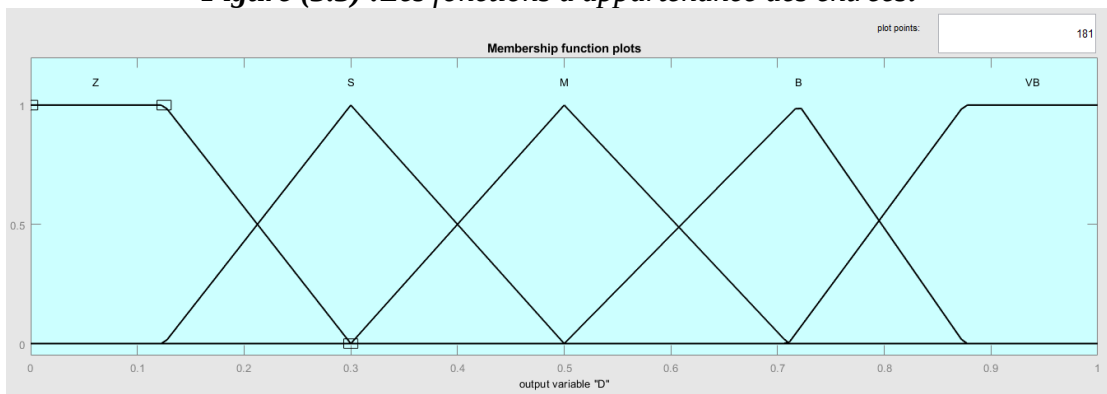


Figure (3.4) : Les fonctions d'appartenance de la sortie.

3.3.2. Inférence floue:

Dans l'étape d'inférence, on prend des décisions. En effet, on établit des relations logiques entre les entrées et la sortie tout en définissant les règles d'appartenance. Par la suite, on dresse le tableau de règles d'inférence (Tableau (3.1)). Finalement, en defuzzification, on convertit les sous-ensembles flous de sortie en une valeur numérique [36].

CE	E				
	NB	NS	Z	PS	PB
NB	Z	Z	Z	B	M
NS	Z	Z	S	M	B
Z	Z	S	M	B	VB
PS	S	M	B	VB	VB
PB	M	B	VB	VB	VB

Tableau (3.1): Règles du contrôleur à logique floue.

3.3.3. La défuzzification:

C'est la dernière étape de la logique floue. Après l'opération d'inférence, la sortie du contrôleur est exprimée sous la forme de courbes de variables linguistiques. Les méthodes de défuzzification sont ensuite utilisées pour calculer et décoder les variables linguistiques en une valeur numérique. Dans ce travail, nous utilisons la méthode cent roide [37], qui détermine la sortie du contrôleur en tant que valeur du centre de gravité du dernier sous-ensemble flou combiné.

3.4. 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.

Nous allons utiliser le même modèle Simulation que celui utilisé avec la MPPT IC, nous avons réalisé quelque modification pour le calcul de E et CE, ainsi que l'adaptation de la sortie du contrôleur qui est la variation du rapport cyclique.

La Figure (3.5) illustre le schéma bloc de la commande MPPT flou sous Simulation.

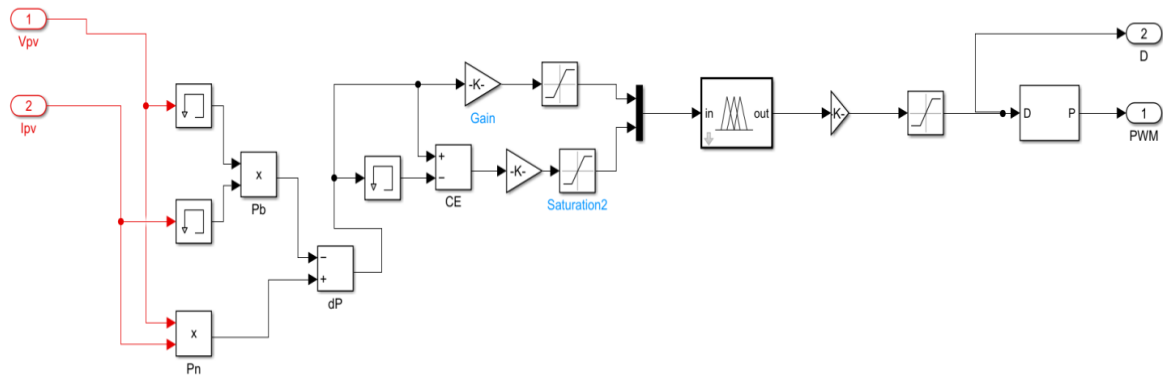


Figure (3.5) :Modèle 'SIMULATION 'du contrôleur MPPT flou.

Après avoir dimensionné tous les éléments du contrôleur flou nous allons l'intégrer dans notre système grâce à la toolbox Fuzzy de Simulation (Figure 3.6).

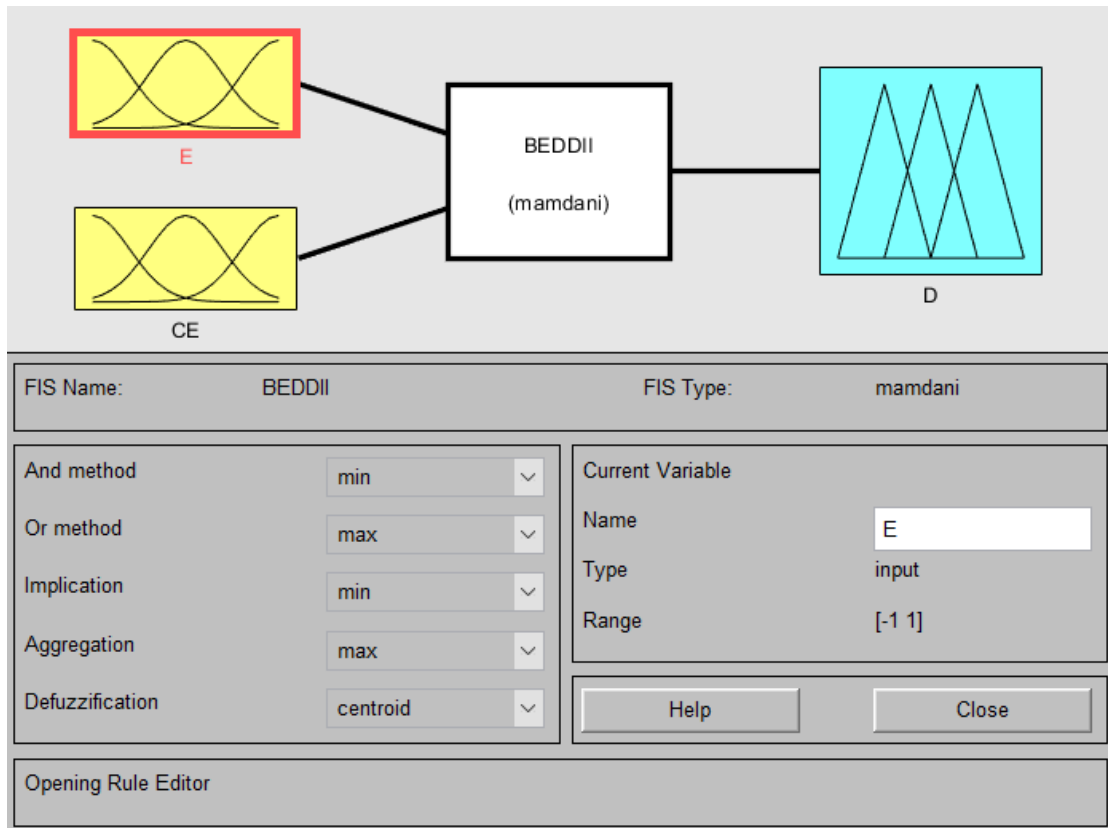


Figure (3.6) : Schéma générale du contrôleur MPPT flou.

Pour faire une étude de la robustesse de contrôleur MPPT Flou des différentes conditions environnementales on effectue les mêmes tests utilisés dans la méthode IC.

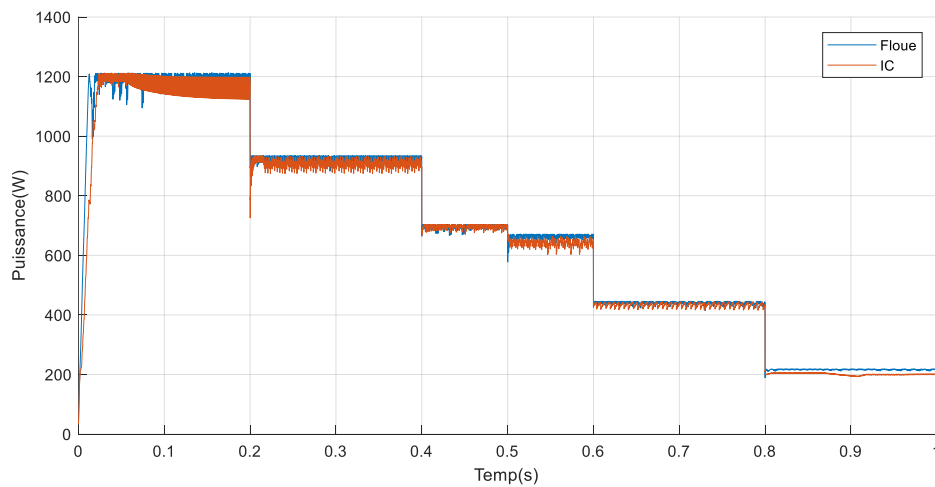
3.4.1 Fonctionnement sous les températures et éclairements variable:

Nous avons utilisé le même profil de la température et éclairement utilisé précédemment dans Figure ((2.18),(2.19)) pour faire une comparaison entre les deux techniques proposés on fait maintenir l'ensoleillement à une valeur différent température et éclairement.

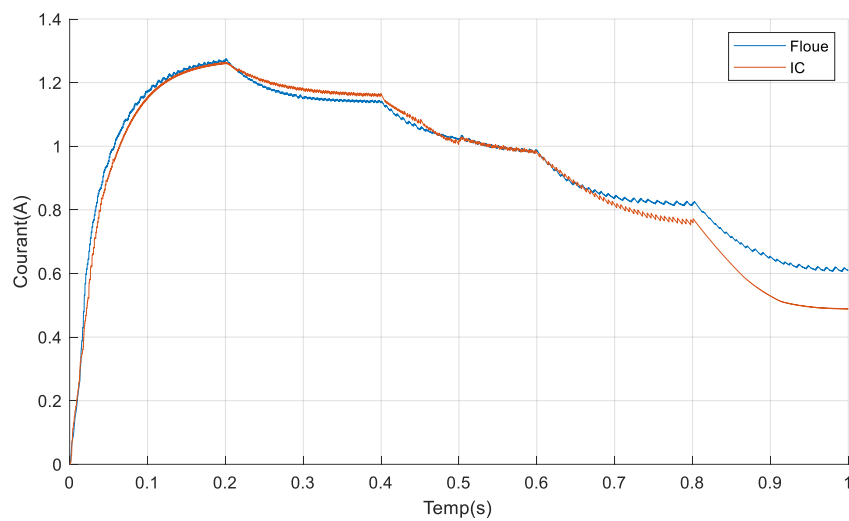
3.5. Comparaison des deux commande MPPT IC et MPPT basée de logique floue :

Pour une diminution d'ensoleillement qui va de 1000w/m^2 jusqu'à 200w/m^2 et pour les deux commandes.

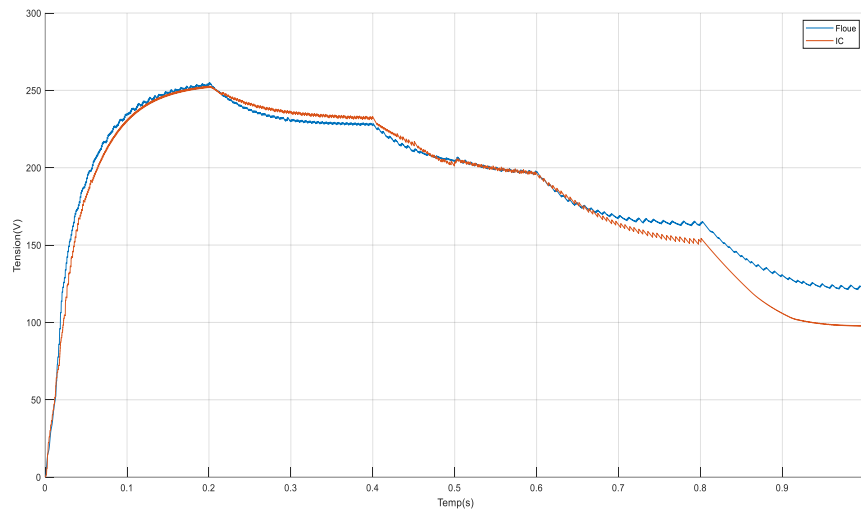
MPPT IC et Flou, on obtient les résultats lustrées dans la figure (3.7),(3.8),(3.9).



Figure(3.7): Variation de la puissance en fonction du temps par logique flou et IC dans PV system.



Figure(3.8): Variation de courant en fonction du temps par logique flou et IC dans PVsystem.



Figure(3.9): Variation de la tension en fonction du temps par logique floue et IC dans PV system.

- ✓ A partir de la figure précédente on constate bien les avantages de la commande MPPT à base de logique floue, la commande MPPT floue (en bleu) est robuste et présente une plus grande rapidité en terme de temps de repense, et une précision plus accru, donc une erreur très faible en régime stationnaire, par rapport à la commande MPPT IC, pour mieux voir la différence entre les deux commandes dans les figures ((3.7), (3.8), (3.9)).
- ✓ Les résultats obtenus avec le technique de commande floue proposée sont meilleurs que ceux obtenus avec des méthodes de contrôle conventionnels IC classique. Ainsi, le commande par logique floue peut être vu comme un pas vers un rapprochement entre le contrôle mathématique précis et la prise de décision humaine. Aussi, ces résultats confirment le bon fonctionnement du contrôleur (IC) mais montrent un meilleur fonctionnement de la commande floue. Ce que démontrent les résultats obtenus après combiner ces deux méthodes. Ce dernier a prouvé qu'il a de meilleures performances, temps de réponse rapide, erreur à l'état permanent très faible et presque zéro dépassement.
- ✓ Une étude comparative des deux commandes proposées (classiques et modernes) a montré que le contrôleur basé sur la commande par logique floue optimise mieux la puissance de fonctionnement du système.

3.6. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous présentons les deux commandes pour le suivi du point de puissance maximal, nous avons ainsi présenté la méthode classique IC et la méthode intelligente de commande MPPT floue [38]. Nous avons implémenté les différents blocs de simulation nécessaire en utilisant le logiciel Simulation.

Différents résultats sont obtenus pour différentes valeurs d'ensoleillement et de température, ceci pour les commandes MPPT flou et avec l'algorithme MPPT IC.

Ces résultats confirment le bon fonctionnement du MPPT IC mais montrent un meilleur fonctionnement de la commande flou.

La simulation de la commande MPPT floue a montré 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

Conclusion générale

Une grande partie de la puissance générée par un générateur photovoltaïque reste inexploitée, cela est dû aux perturbations interne ou bien externe, externe tel que les variations de températures ou d'ensoleillement, interne du aux perturbations de la charge, tout cela provoque des perturbations dans le point de puissance maximale du générateur PV, et pour y remédier on a recouru à une commande MPPT qui ajuste le point de fonctionnement du générateur PV selon les conditions de fonctionnement. La commande MPPT fonctionne en agissant sur la gâchette d'un convertisseur DC/DC qui sert d'interface entre le générateur photovoltaïque et la charge.

Il existe une palette très importante de commande MPPT. Dans notre travail on a choisi de mettre en avant deux d'entre elles, la commande à base d'algorithme P&O (perturber et observer) et la commande à base de logique floue. Nous avons simulé deux systèmes, l'un équipé d'une commande MPPT IC et l'autre d'une commande MPPT logique floue. Après quoi on a établi une comparaison entre les deux méthodes face à des variations de températures et d'ensoleillements, pour étudier la différence de comportement entre elles.

Après simulation et analyse des différents résultats on arrive à plusieurs conclusions :

- ✓ Un générateur photovoltaïque face à une diminution d'ensoleillement ou bien une augmentation de température a tendance à perdre de la puissance
- ✓ La commande MPPT IC permet la poursuite du point de puissance maximum malgré un manque de précision et de rapidité
- ✓ La commande MPPT à base de logique floue permet une poursuite du point de puissance maximum avec beaucoup plus de rapidité et de précision que la commande IC ce qui la rend plus avantageuse.

D'après les résultats énumérés on constate bien que la méthode à base de logique floue est une méthode qui offre un très bon suivi du point de puissance maximum avec un rendement optimal.

Néanmoins ces résultats sont le fruit de simulation théorique et il faudrait appliquer cette méthode sur le terrain pour avoir des résultats définitifs.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] BOUALEM, DENDIB, « Technique conventionnelles et avancée de poursuite MPPT pour des applications photovoltaïque : étude comparative », mémoire de magister, Université Ferhat Abbas-Sétif, 2007
- [2] S. NAOUAL, « Modélisation et extraction automatique des paramètres d'un générateur », mémoire de magister, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2010.
- [3] M. SLAMA Fateh, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïque interconnectés au réseau électrique », mémoire de magister, Université Ferhat Abbas –Sétif, 2012.
- [4] <http://www.outilesolaires.com/glossaire/images/azimut.gif>.
- [5] Ogbi Zoulikha, « Mesure automatisée du spectre d'absorption optique des cellules solaires »,
- [6] M. Dietschy, « Les cellules photovoltaïques », cours classes préparatoires CPE, Institution des Chartreux Année 2004-2005.
- [7] BELHADJ MOHAMED, « modélisation d'un système de captage photovoltaïque
- [8] Électricité photovoltaïque <http://www.outilesolaires.com/pv/default.htm>
- [9] Baroud kendo li, « état de l'art et modélisation des microcentrales », magister en électrotechnique de l'université mentouri de Constantine 2007.
- [10] N. Chandrasekaran, K. Thyagarajah, « *Modeling and matlab simulation of pumping system using motor powered by solar system* » European Journal of Scientific Research, 6-13, 2011
- [11] Y. Lasmi, « Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque par les techniques intelligentes. » 2018.
- [12] S. A. Tadjer, A. Idir, and F. Chekired, « Comparative performance evaluation of four photovoltaic technologies in saharan climates of Algeria: Ghardaïa pilot station, » Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science (IJECS), vol. 18, no. 2, 2020.
- [13] M. Omar et F. Sliman, « Etude et Réalisation d'un Hacheur Boost Commandé par le μ C ARDUINO en vue d'Implémenter des Commandes MPPT », Université Ahmed Draia Adrar, 2019.
- [14] O. Guenounou et H. Lehouche, « Etude et simulation des techniques MPPT d'un système photovoltaïque », Université A. MIRA-BEJAIA, 2019.
- [15] Y. Lasmi, « Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque par les techniques intelligentes. » 2018.

Bibliographie

- [16] M.boukli Hacene Omar, «Conception et réalisation d'un système photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique », mémoire de magister, Université de Tlemcen, 2011.
- [17] BENADEL Faiza. Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour Système PV. UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF –M'SILA.
- [18] Agence d'études et de promotion de l'isère, rapport sur « la filière photovoltaïque - enjeux et perspectives » septembre 2010 .
- [19] M. Kara Abdelfattah « dimensionnement et analyse du coût d'un système hybride de production d'énergie renouvelable pour des sites isolés en algérie » l'université de sétif, 2014.
- [20] S. ABBOUDA, « Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques », thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne et université de Sfax, 2015.
- [21] Chihab Reguig, Youcef Omane, Youcef Aliat, , “Commande MPPT par mode glissant pour les systèmes Photovoltaïques ”, mémoire de master, Département Génie Electrique, Univ .El-Oued 2021.
- [22] AIT-CHEIKH, SALAH MOHAMED, "Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques," Ecole Nationale Polytechnique
- [23] Amarouayache Mohamed, « Contribution À L'optimisation D'une Chaîne De Conversion D'énergie Photovoltaïque », Doctorat En Sciences En Electrotechnique Option ,2014.
- [24] Belkacem M., “ Etude Et Optimisation Du Transfert D'énergie Électrique En Conversion Photovoltaïque Par La Recherche Du Point De Puissance Maximale (Mppt) “, Mémoire De Master, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2015.
- [25] M. Moulay-Amar et M. Loghouini, « Etude et réalisation d'un système de poursuite de point de puissance maximale à base de microcontrôleur destiné à une installation photovoltaïque », Mémoire d'ingénieur, université de Ouargla, Algérie, 2005.
- [26] K. Sobaihi “ étude et réalisation d'un hacheur de Tracking du point de puissance Maximale (MPPT) à contre réaction “ Mémoire de Magister Ecole Nationale polytechnique 10, Avenue Hassen Badi El –Harrach Alger.
- [27] Yassine LASMI. Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) Système photovoltaïque par les techniques intelligentes. Université Sétif -1 (ALGERIE)

Bibliographie

- [28]Aamarouayache Mohamed, « Contribution À L'optimisation D'une Chaîne DeConversion D'énergie Photovoltaïque », Doctorat En Sciences En Electrotechnique, Option ,2014.
- [29]S. AISSOU, « Caractérisation et optimisation de puissance des systèmes photovoltaïques », Thèse de doctorat, Université Abd Arrehmane MIRA de Bejaia, 2016.
- [30]Mezaache Hatem, " Poursuite Du Point Maximale D'un SystèmePhotovoltaïque Par Les Méthodes Intelligentes", Mémoire De Master,UniversiteMohamed Boudiaf - M'sila,2016.
- [31]Wassila Issaadi “Control of a photovoltaic system by fuzzy logic, Comparative studies with conventional controls: results, improvements andperspectives” Int. J. Intelligent Engineering
- [32]TATI Fethallah et BEN LAMOUDI Oussama << Etude et Réalisation d'un Système Photovoltaïque Optimisé par Logique Floue>> , Mémoire MASTER ACADEMIQUE, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2018.
- [33]ALLATAIFEH, Areen Abdallah. BATAINEH, Khaled et AL-KHEDER, Mohamed.Maximum power pointtracking using fuzzy logic controller under partial conditions. SmartGrid and Renewable Energy. 2015, 6(01): p. 1. Disponible à l'adresse : Maximum PowerPoint Tracking Using Fuzzy Logic Controller under Partial Conditions (scirp.org)
- [34]maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque par techniques intelligentes, Mémoire de Magister Université Setif ,09/12/2013.
- [35]Hamal Chikh , Commande MPPT par logique floue d'un générateur photovoltaïque ,Univ Saida –Dr.Tahar Moulay, 2014.
- [36]Ressa,N. Omeiri,A., Merabet, L.:Optimization of the energy efficiency of a photovoltaic systemby a fuzzy MPPT algorithm. In: The 3rd International Conference on Electromechanical Engineering ICEE 2018, 21–22 November, Skikda (2018).
- [37]RAI, Anourag. AWATSHI, Bhoomika. SINGH, Shweta. DWIVEDI, C.K. A Review of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system. International Journal of Engineering Research, 2016. 5(6).
- [38]BENSALAH Belqassim, FILALI Mohammed, “ Etude et réalisation d'un circuit de commande avec MPPT d'un hacheur pour système photovoltaïque”, mémoire de master, Département Génie Electrique, U.A.B Tlemcen,2015.

Résumé :

La stratégie MPPT (Maximum Power Point Tracking) est couramment utilisée pour maximiser la puissance produite par les générateurs photovoltaïques. Dans ce travail, nous avons proposé une méthode de contrôle avec l'approche de logique floue dans sa base la plus simple offrant des performances très élevées pour obtenir un suivi maximal de la puissance de sortie, ce qui donne une vitesse maximale de la poursuite de la puissance maximale, une bonne stabilité et une grande robustesse. Nous utilisons un contrôleur Flou basé sur un choix spécial d'une combinaison d'entrées et de sorties. Le choix des entrées et des sorties, ainsi que des règles floues, était basé sur les principes de l'analyse mathématique des fonctions dérivées (la pente) dans le but de trouver l'optimum. En outre, nous avons prouvé que nous pouvions obtenir les meilleurs résultats et réponses du système photovoltaïque (PV).

avec le modèle flou le plus simple possible en utilisant seulement 3 ensembles de variables linguistiques pour décomposer les fonctions d'appartenance des entrées et des sorties du contrôleur flou. Nous comparons ce puissant contrôleur avec le contrôleur conventionnel Incrémentation de la Conductance(IncCond). Nous utilisons ensuite Matlab-Simulink® pour simuler le comportement du modèle de générateur PV et du convertisseur de puissance, de la tension et du courant, en utilisant à la fois P & O et notre contrôleur basé sur la logique floue. Les performances relatives sont analysées et comparées selon différents scénarios pour des conditions climatiques fixes ou variées.

Mots-clés : commande par logique floue; MPPT: suivi du point de puissance maximale(MPPT); système photovoltaïque; convertisseur Boost.

الخلاصة: تستخدم إستراتيجية تتبع نقطة الحد الأقصى للقوة MPPT بشكل عام لتعظيم القدرة التي تنتجها المولدات الكهروضوئية.

في هذا العمل، اقترحنا طريقة تحكم بواسطة أسلوب المنطق الضبابي في أبسط قاعدتها والذي قدم أداءاً عالياً جداً للحصول على أقصى قدر من التتبع لطاقة المخرج، وقد اعطي سرعة قصوى للسعي لاستخراج أقصى طاقة، استقرار جيد ومتانة. استخدمنا وحدة تحكم ضبابي على أساس اختيار خاص لمجموعة من المداخل والمخارج. يستند اختيار المداخل والمخارج، بالإضافة إلى القواعد الغامضة، إلى مبادئ التحليل الرياضي لخصائص المشتق من أجل إيجاد الذروة. بالإضافة إلى ذلك، أظهرنا أنه يمكننا الحصول على أفضل النتائج والاستجابات للوحدة الكهروضوئية باستعمال أبسط نموذج ضبابي ممكن باستخدام 3 مجموعات فقط من المتغيرات اللغوية المركبة لدوال المجموعات التحتية الضبابية للمداخل والمخارج للنظام الكهروضوئي. ثم نقارن هذه الوحدة قوية التحكم مع وحدة التحكم التقليدية (زيادة وتوصيل). باستخدام RSimulink-Matlab لمحاكاة سلوك النموذجين، يتم التحليل حسب سيناريوهات مختلفة لظروف مناخية ثابتة أو متغيرة.

كلمات البحث: تحكم المنطق الضبابي، MPPT : تتبع نقطة الطاقة القصوى، النظام الكهروضوئي، محول مستمر مستمر.

Abstract:

The Maximum Power Point Tracking (MPPT) strategy is commonly used to maximize the produced power from photovoltaic generators. In this work, we proposed a control method with a fuzzy logic approach in its simplest base that offers significantly high performance to get a maximum power output tracking, which entails a maximum speed of power achievement, a good stability, and a high robustness. We use a fuzzy controller, which is based on a special choice of a combination of inputs and outputs. The choice of inputs and outputs, as well as fuzzy rules, was based on the principles of mathematical analysis of the derived functions (slope) for the purpose of finding the optimum. Also, we have proved that we can achieve the best results and answers from the system photovoltaic (PV) with the simplest fuzzy model possible by using only 3 sets of linguistic variables to decompose the membership functions of the inputs and outputs of the fuzzy controller. We compare this powerful controller with conventional « conductance Increment » (Inc Cond) controllers. Then, we make use of a Matlab-Simulink® model to simulate the behavior of the PV generator and power converter, voltage, and current, using both the « (IncCond) and our fuzzy logic-based controller.

Relative performances are analyzed and compared under different scenarios for fixed or varied climatic conditions.

Keywords: Fuzzy logic controller; maximum power point tracking MPPT;; photovoltaic system; boost converter.