

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Présenté par :

Baheddi Abdelhamid et Ramdani M^{ed} Choukri

Thème:

**Etude comparative des techniques de
poursuite du point de puissance maximale
D'un module photovoltaïque**

Soutenu publiquement

Le : 07/07/2019

Devant le jury :

M ^r : Belkebir Amel	MAA	Président	UKM Ouargla
M ^r : Rezoug M ^{ed} Redha	MCB	Examineur	UKM Ouargla
M ^{me} . Khadidja Bouali	MCA	Encadreur/rapporteur	UKM Ouargla
M ^{elle} Narimene Khalfaoui	Dr	Co- Encadreur/rapporteur	UKM Ouargla

Année universitaire 2018/2019



Remerciements



Avant tout, nous remercions ALLAH, le tout puissant, de nous a donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail.

*Nous tenons à remercier **M^{me}. Khadidja Bouali** et **M^{lle}. Narimane Khalfaoui**, enseignantes à l'université Kasdi Merbah, qui nous ont encadrés. Qu'elles soient aussi remercié pour leurs gentillesse, leurs disponibilité permanente et pour les nombreux encouragements qu'elles nous ont prodiguée.*

*Nous adressons tous nos remerciements à **M^{me} Amel Belkebir**, ainsi qu'à **M^r. Med Redha Rezoug**, enseignants à l'université Kasdi Merbah, de l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'être jury de ce mémoire.*

*Un grand merci aussi à **M^r. Med Bilal DANONE** pour son aide précieuse.*

Nous remercierons toutes les personnes avec qui nous avons partagé nos études.

Nos derniers remerciements vont à nos parents qui ont tout fait pour nous aider, qui nous ont soutenu et surtout supporté dans tout ce que nous avons entrepris.

Merci à tous et à toutes





Dédicace

Je dédie ce travail :

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

A mes chères sœurs, pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral.

*A mes chers frères, **Kacem** et **Brahim**, pour leur appui et leur encouragement.*

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

A toutes les personnes que j'aime et qui m'aiment.

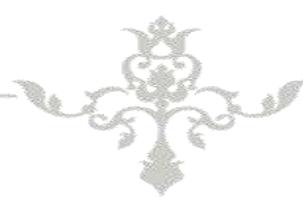
*A mon cher binôme « **Ramdani Med Chokri** » et à toute sa famille.*

A mes enseignants à qui je tiens à leur montrer que je suis et resterais toujours à la hauteur de leur espérance.

A tous mes amis de l'université avec lesquels j'ai passé cinq années inoubliables.

Merci d'être toujours là pour moi

Baheddi A. Hamid





Dédicace

Je dédie ce travail :

À mes très chers parents, que dieu les garde et les protège pour leurs Soutien Inconditionnel, moral et financier, ses encouragements, et pour m'avoir permis de réaliser mes études dans les meilleures conditions.

*À mes frères **Mabrouk** et **Ayoub**, ma petite sœur **Sondousse**.*

À toute la famille Brikeche et Ramdani.

*À mon cher binôme « **Baheddi Abdelhamid** » et à toute sa famille.*

À tout(es) mes cher(es) ami(es) Et toute la promotion 2019

Electrotechnique indesterielle à Ouargla.

Ramdani Med Choukri



Sommaire

Sommaire

Sommaire.....	I
Liste des figures.....	IV
Liste des tableaux.....	VI
Abréviations.....	VII
Introduction générale.....	01

Chapitre I : Généralité sur Les systèmes photovoltaïques

I.1.Introduction.....	03
I.2.Energie Solaire Photovoltaïque.....	03
I.3.Conversion photovoltaïque.....	03
I.3.1.Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	03
a- Avantages.....	03
b- Inconvénients	04
I.3.2.Potentiel solaire en Algérie	04
I.3.3.Evolution historique de la cellule photovoltaïque	04
I.4.Effet photovoltaïque.....	05
I.4.1.La cellule Solaire	05
I.4.2.Principe de fonctionnement.....	06
I.4.3. Caractéristique de la cellule photovoltaïque.....	06
I.5.Types des cellules photovoltaïques.....	07
I.6.Rendement d'un Générateur Photovoltaïque	08
I.7.Protection classique d'un générateur photovoltaïque.....	08
I.8.Système Photovoltaïque	09
I.8.1.Système photovoltaïque avec stockage électrique	09
I.8.2.Système photovoltaïque a couplage direct sans batterie	10
I.9. Secteurs d'application.....	10
I.10.Conclusion.....	10

Chapitre II : Modélisation d'un système de puissance maximale MPPT

II.1. Introduction.....	11
II. 2. Modèle du panneau photovoltaïque.....	11

II.3. Simulation du panneau photovoltaïque	13
II.4. Caractéristique d'un Modèle Solaire.....	15
II.4.1. Le courant de court-circuit (I_{cc}).....	15
II.4.2.La tension de circuit-ouvert (V_{co}).....	16
II.4.3.Le rendement	16
II.4.4.Facteur de forme	16
II.5.Association en parallèle série mixte (série et parallèle)	16
II.5.1.Association des cellules photovoltaïques en parallèle.....	16
II.5.2.Association des cellules photovoltaïques en série.....	17
II.6.Zones de fonctionnement du modèle Solaire	17
II.7.Influence de l'éclairement et la température sur les courbes $I = f(V)$ et $P = f(V)$	18
II.7.1. L'Effet de l'Irradiation Solaire.....	18
II.7.2.L'effet de la température.....	19
II.8. Influence de la résistance série R_s	20
II.9. conclusion.....	20

Chapitre III : Poursuit de Point de puissance maximale MPPT

III.1. Introduction.....	21
III.2. Suivre de la Puissance maximale du générateur photovoltaïque.....	21
III.2.1. Connexion directe source-charge	21
III.2.2. Circuit d'adaptation entre un générateur photovoltaïque et la charge	22
III.3.Convertisseur DC-DC	23
III.4. Les types d'hacheurs.....	23
a) hacheur parallèle (boost)	23
b) Dimensionnement de la capacité C et l'inductance L.....	25
III.5.La Commande de la Puissance maximale du générateur photovoltaïque	25
III.6.La méthode de perturbation et d'observation ($P\&O$).....	26
III.7.Résultats de simulation et interprétations de la méthode $P\&O$	27
III.8.La méthode de l'incrément de la conductance (INC).....	29
III.9.Résultats de simulation et interprétations de la méthode $P\&O$	31
III.10.Conclusion	33

Chapitre IV : Commande MPPT Basée sur L'approche Floue

IV.1.Introduction	34
IV.2.Les principaux domaines de recherche et d'application de la logique floue	34
IV.3. La commande MPPT basée sur la logique floue	34
IV.3.1.Fuzzification	35
IV.3.2.Méthode d'inférence	37
IV.3.3.Déffuzification	38
IV.3.3.1.La méthode du critère maximale MCM	38
IV.3.3.2.Méthode du centre de gravité	38
IV.4.Résultats de simulation et interprétations de la méthode MPPT Floue.....	39
IV.5.Etude comparatif entre MPPT Floue et MPPT classique (P&O-INC).....	41
IV.6.Conclusion	43
Conclusion générale et perspectives.....	44
Référence Bibliographiques	46

Liste des figures

Chapitre I

Fig. (I.1) : Une cellule photovoltaïque.....	06
Fig. (I.2) : Une cellule photovoltaïque constituée de deux semi-conducteurs.....	06
Fig. (I.3) : Caractéristique I-V d'une cellule solaire à l'obscurité et sous éclairage	07
Fig. (I.4) : GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour.....	08
Fig. (I.5) : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec stockage.....	09
Fig. (I.6) : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque à couplage direct.....	10

Chapitre II

Fig. (II.01) : Schéma équivalent de la cellule solaire à une diode.....	11
Fig. (II.02) : cellule photovoltaïque sous MATLAB	14
Fig. (II.03) : Modèle à une diode du panneau photovoltaïque	14
Fig. (II.04) : les caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule PV	15
Fig. (II.05) : Les zones de Caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque.....	15
Fig. (II.06) : les caractéristiques de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle	17
Fig. (II.07) : les caractéristiques de 3 cellules photovoltaïques associées en série.....	17
Fig. (II.08) : Les zones de caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque.....	18
Fig. (II.09) : L'effet de l'irradiation sur les caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$ et $P_{pv} = f(V_{pv})$, $T = 25^{\circ}\text{C}$	19
Fig. (II.10) : L'effet de la température sur les caractéristiques $I_{pv} = f(V_{pv})$ et $P_{pv} = f(V_{pv})$, $1000\text{W}/\text{m}^2$	19
Fig. (II.11) : l'influence de la résistance R_s sur la pente de la courbe V-I	20

Chapitre III

Fig. (III.1) : Principe d'une connexion directe entre en GPV et une charge.....	22
Fig. (III.2) : Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation	22
Fig. (III.3) : Circuit électrique du hacheur « Boost ».....	23
Fig. (III.4) : Hacheur survolteur en régime de fonctionnement continu.....	24
Fig. (III.5) : Diagramme Bloc du système photovoltaïque étudié.....	25
Fig. (III.6) : Algorithme de la méthode P&O	26

Fig. (III.7) : Principe de la commande P&O.....	27
Fig. (III.8) : L'irradiation solaire.....	27
Fig. (III.9) : Variation de la tension PV de sortie.....	28
Fig. (III.10) : Variation du courant PV de sortie.....	28
Fig. (III.11) : La Puissance de sortie panneau PV.....	28
Fig. (III.12) : La Puissance de sortie panneau PV (vision local).....	29
Fig. (III.13) : Principe de la commande INC.....	30
Fig. (III.14) : Algorithme de la méthode <i>INC</i>	31
Fig. (III.15) : la variation de la tension de sortie.....	31
Fig. (III.16) : la variation du courant de sortie.....	32
Fig. (III.17) : La Puissance de panneau solaire.....	32
Fig. (III.18) : La Puissance de panneau solaire (vision local).....	33

Chapitre IV

Fig. (IV.1) : Principe de la commande à logique flou	35
Fig. (IV.2) : Fonctions d'appartenances de : (a) L'entrée <i>E</i> (b) L'entrée <i>CE</i> (c) La sortie <i>dD</i>	36 - 37
Fig. (IV.3) : L'irradiation solaire.....	39
Fig. (IV.4) : la variation de la tension PV de sortie.....	39
Fig. (IV.5) : la variation du courant PV de sortie.....	40
Fig. (IV.6) : La Puissance de sortie du panneau PV.....	40
Fig. (IV.7) : MPPT avec les trois techniques utilisées.....	41
Fig. (IV.8) : MPPT avec les trois techniques utilisées (vision locale).....	41

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau. (I.1) : les différents ensoleillements des régions Algériennes.	04
Tableau. (I.2) : les trois types de technologies de cellule photovoltaïques	07

Chapitre II

Tableau. (II.01) : les paramètres du module photovoltaïque à étudier.....	13
--	----

Chapitre IV

Tableau. (IV.1) : Table de règles floues.....	37
Tableau. (IV.2) :Tableau de comparaison des performances des trois techniques appliquées.....	42
Tableau. (IV.3) : Comparaison des techniques MPPT.....	43

Abréviations

- PV: Photovoltaïque.
- GPV : Générateur Photovoltaïque.
- E : L'ensoleillement ambiant.
- T : Température.
- Icc : courant de court-circuit.
- Vco : tension de circuit ouvert.
- DC: Direct Curant.
- AC : Alternatif Curant.
- P&O : Perturbation et Observation.
- INC : Incrémentation de la conductance.
- MPPT: Maximum Power Point Tracking.
- PPM: Point de puissance maximal.
- STC : Standard Test Conditions.
- FF : Facteur de forme.
- MOSFETS : Transistors à effet de champ d'oxyde de métal.
- PG : Positif Grand.
- PP : Positif Petit.
- ZE : Zéro.
- NP : Négatif Petit.
- NG : Négatif Grand.
- AM : Masse d'aire.

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 anarchique pour les générations futures [1].

On distingue deux types d'énergie : les énergies non renouvelables et les énergies renouvelables. Les premières sont dérivées à partir du pétrole, du gaz, du charbon, et d'uranium... Les secondes de l'hydraulique, la biomasse, l'éolien, le solaire, le géothermique, etc.

Dans ce contexte général, notre étude s'intéresse à la filière photovoltaïque qui semble une des plus prometteuses avec un taux de croissance mondial très élevé.

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Elle peut même se transformer en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. Les panneaux photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques ont la capacité de transformer les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable

En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules photovoltaïques et de leurs associations, le rendement des systèmes photovoltaïques peut être amélioré par des solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale (dites techniques MPPT) [2].

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés essentiellement au développement d'une procédure d'optimisation qui permet la poursuite du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking MPPT) d'un générateur photovoltaïque, pour une bonne exploitation du générateur photovoltaïque quelques soient les conditions météorologiques (température et éclairage). Ceci nécessite l'implémentation d'une technique de poursuite de point maximale de puissance, telle que la méthode de Perturbation-Observation (P&O), incrémentation de la conductance (INC) et l'approche floue [2,3].

D'autre part, la logique floue a reçu une attention particulière de la part d'un certain nombre de chercheurs dans le domaine de l'électronique de puissance. Vu ses performances, nous l'avons appliquée pour développer une technique MPPT floue [4].

Ce travail est constitué de quatre chapitres :

- Des généralités sur les systèmes photovoltaïques seront abordées au premier chapitre,
- Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation du générateur photovoltaïque, et à l'effet du rayonnement et de la température sur le panneau solaire.
- Le troisième chapitre est consacré à la modélisation du convertisseur statique DC-DC de type boost ainsi qu'une simulation du système photovoltaïque commandé par deux méthodes classiques de l'MPPT : Perturbation-Observation (P&O) et incrémentation de la conductance (INC).
- Le quatrième chapitre comportera une simulation du système photovoltaïque commandé par une technique basée sur la logique floue et une étude comparative entre les méthodes utilisées sera faite.
- Le mémoire est clôturé par une conclusion et les perspectives envisagées.

Chapitre I

Généralités Sur Les Systèmes Photovoltaïques

I.1.Introduction

L'utilisation de l'énergie solaire est nécessaire dans le domaine industriel en raison de ses nombreuses caractéristiques, puisque c'est une énergie disponible et renouvelable. Le défi est de développer des techniques pour exploiter ces énergies et remplacer les énergies traditionnelles. L'objectif de ce chapitre est d'introduire les principes de l'énergie solaire et les générateurs photovoltaïques.

I.2.Energie Solaire Photovoltaïque

Le soleil est une source d'énergie. Cela se fait à travers des réactions de fusion nucléaires thermique. Cette réaction donne une énergie transmise sous forme d'ondes électromagnétiques. Ces ondes sont capturées par des capteurs spéciaux et se transforme de l'énergie lumineuse à l'électricité .Ces réactions de fusion sont permanentes donc cette énergie est disponible. La puissance moyenne du rayonnement solaire est estimée à 1367 W/m², une partie de cette puissance est perdue dans l'atmosphère qui peut atteindre une valeur de 1000w /m².

I.3.Conversion photovoltaïque

La conversion photovoltaïque est un phénomène, découvert par E. Becquerel en 1839, qui consiste à convertir l'énergie des photons venant du soleil sous forme d'ondes électromagnétiques en une énergie électrique. Ceci est fait par absorption d'un photon à travers un capteur appelé cellule photovoltaïque. Une partie de cette énergie pénètre dans la cellule pour entrer en collision avec l'électron qui est à un niveau d'énergie faible (l'état de stabilité de l'atome) et le déplacer vers un niveau d'énergie supérieur (l'état d'instabilité d'un atome), dans ce cas, une paire électron-trou libre est formée dans la cellule [5].

I.3.1.Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

a) Avantages

Les panneaux solaires présentent de nombreux avantages récapitulés ci-dessous:

- Une haute fiabilité, donc elle rend particulièrement appropriée aux régions isolées.
- Adaptable à des besoins énergétiques divers.
- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques facilite son installation.
- Les systèmes peuvent alimentés des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- Le coût de fonctionnement est très faible.

La technologie photovoltaïque respectueuse de l'environnement est non polluante et silencieuse [6].

b) Inconvénients

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients :

- Le processus de fabrication d'un panneau photovoltaïque nécessite une haute technologie et des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel d'un panneau photovoltaïque est faible.
- Le problème de la production d'énergie solaire est au stockage dans des batteries chimiques [6].

I.3.2.Potentiel solaire en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur le quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m^2 est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de $1700\text{KWh}/\text{m}^2/\text{an}$ au Nord et $2263\text{ kWh}/\text{m}^2/\text{an}$ au Sud du pays. Le tableau (I.1) regroupe les différents ensoleillements des régions algériennes [7].

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue ($\text{Kwh}/\text{m}^2/\text{an}$)	1700	1900	2650

Tableau (I.1) : les différents ensoleillements des régions Algériennes.

I.3.3.Evolution historique de la cellule photovoltaïque

Le développement de cellule solaire a passé par plusieurs étapes [8]:

- ✓ 1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide : c'est l'effet photovoltaïque ;
- ✓ 1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs, mais jusqu'à la seconde guerre mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire ;

- ✓ 1954 : Trois chercheurs américains, Chapin Pearson et Prince mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites ;
 - ✓ 1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace ;
 - ✓ 1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware ;
- 1983 : La première voiture alimentée par l'énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.

I.4.Effet Photovoltaïque

C'est un phénomène physique traduit la conversion de la lumière solaire en énergie électrique directe, en utilisant les propriétés électroniques de certains matériaux (Silicium ou germanium), qui est classifié dans les SEMI-CONDUCTEURS. La conversion de lumière du soleil à l'électricité est effectuée par des cellules photovoltaïques, lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière, une force électromotrice est établit [9].

I.4.1.La cellule Solaire

Une cellule photovoltaïque est une capture de petite taille qui convertit directement l'énergie de la lumière en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque (figure I. 1).

La cellule solaire est constituée de deux couches de silicium, une couche inférieure « dopée N » composée de silicium dopé au Phosphore donc la couche N contient plus d'électrons qu'une couche de silicium pur, et une couche supérieure « dopée P » composée de silicium dopé au Bore et la couche P contient plus de trous (moins d'électrons) qu'une couche de silicium pur. Entre ces deux couches, il y a une jonction, qui forme une zone neutre, aucun courant ne peut la traverser.

La tension générée entre les bornes de la cellule peut varier de 0.3 V à 0.7 V et ça change selon :

- la matière de fabrication ;
- la température de la cellule ;
- le vieillissement de la cellule.

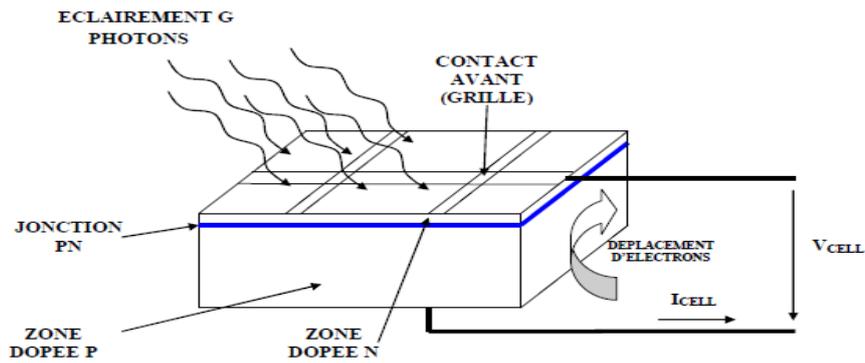


Fig. (I.1): Une cellule photovoltaïque.

I.4.2. Principe de Fonctionnement

Les électrons contenus dans le semi-conducteur ne peuvent circuler que si une énergie apportée peut les libérer de leurs atomes. Quand la lumière pénètre dans un semi-conducteur, ses photons apportent une énergie permettant aux électrons de se libérer et de se déplacer dans la matière, il ya donc un courant électrique sous exposition à la lumière, la figure (I.2).

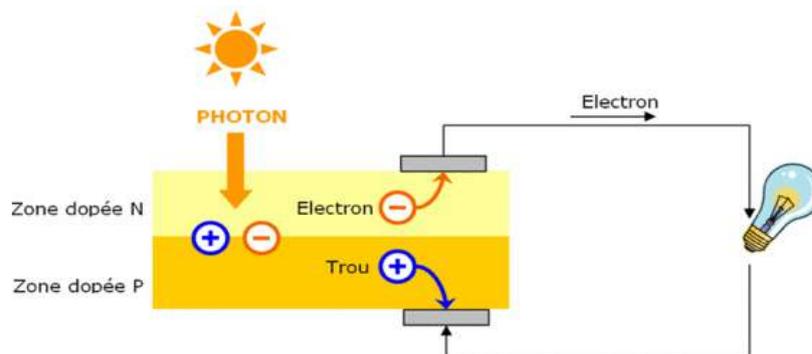


Fig. (I.2) : Une cellule photovoltaïque constituée de deux semi-conducteurs.

I.4.3. Caractéristique de la Cellule Photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est modélisée comme une diode. Après avoir étudié les propriétés électriques d'une cellule solaire en cas d'obscurité et d'éclairement, les résultats étant similaires aux caractéristiques électriques de la diode, qui permet de circuler un courant électrique positif après le dépassement d'une tension du seuil dans cas de l'obscurité, mais dans le cas de l'éclairement un courant électrique négatif (sens inverse) apparaît avant le dépassement d'une tension du seuil. La figure (I.3) schématise la caractéristique (I-V) d'une cellule solaire à l'obscurité et sous éclairement) [10]:

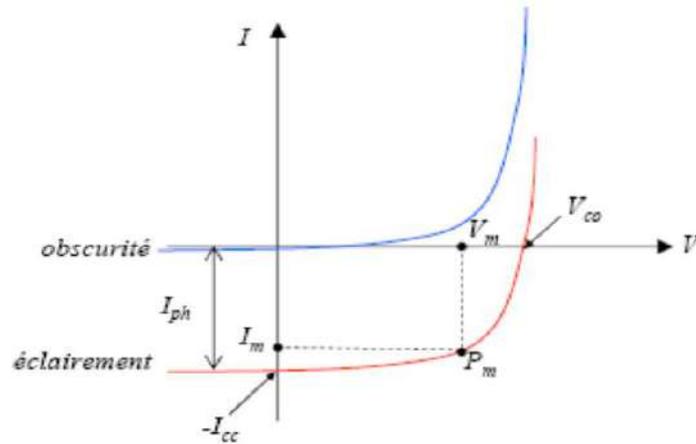


Fig. (I.3) : Caractéristique (I-V) d'une cellule solaire à l'obscurité et sous éclairement

I.5. Types des Cellules Photovoltaïques

Il existe trois types de technologies photovoltaïques qui dominent le marché mondial : le silicium monocristallin, le silicium poly-cristallin et silicium amorphe. Le tableau ci-dessous résume certaines caractéristiques de ces trois types de cellules solaires [11] :

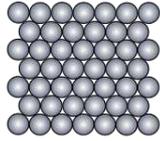
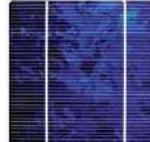
	LE SILICIUM MONOCRISTALLIN	LE SILICIUM POLYCRISTALLIN	LE SILICIUM AMORPHE
Rendement :	15% STC	12 à 14% STC	5 à 7% STC
Puissance des panneaux:	5 à 150Wc	5 à 150Wc	0.5 à 60Wc
Gamme d'éclairement:	100 à 1000W/m ²	200 à 1000W/m ²	de 20lux à 1000W/m ²
Usage:	tous usages extérieurs de forte et moyenne puissance (télécommunication, balisage, relais, habitat.).	même usage que le silicium monocristallin	électronique professionnelle et grand public (montres, calculatrices.), électronique de faible consommation en extérieur
La Structure des atomes			
Les différents types de cellules			

Tableau (I.2) : caractéristiques de ces trois types de cellules solaires

I.6. Rendement d'un Générateur Photovoltaïque

L'expression du rendement est donnée comme suite [12] :

$$\eta_{STC} = \frac{P_m}{E_{STC} S_{cellule}} \quad (I.1)$$

Où :

η_{STC} : Rendement de la cellule photovoltaïque ;

P_m : Puissance produite par le générateur PV ;

E_{STC} : Eclairement absorbé par la cellule ;

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

Ce rendement dépend de plusieurs facteurs [12] :

- 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 effets Joules ;
- Absorption incomplète et excès d'énergie des photons absorbés.

I.7. Protection Classique d'un Générateur Photovoltaïque

La protection des appareils électriques est nécessaire dans le secteur industriel pour obtenir une durée de vie moyenne plus élevée et éviter les défauts qui entraînent une interruption de la production. Dans le cas des générateurs photovoltaïques, ils sont protégés de côté électrique contre les courants de retour, en particulier si ils fonctionnent dans l'obscurité.

Deux types de protection sont utilisés dans les installations des générateurs solaires, voir la figure(I.4).

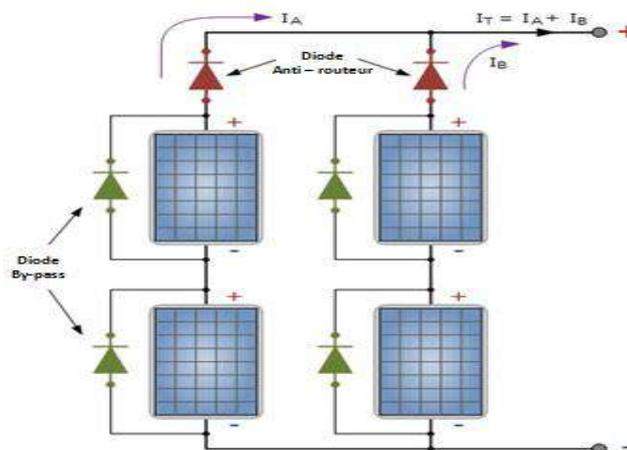


Fig. (I.4) : GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti- retour

- Protection du générateur solaire contre les courants du routeur (diode anti-routeur) lors du raccordement des générateurs photovoltaïques en parallèle.
- Protections de la cellule solaire par des diodes (diode by-pass) en parallèle pour chaque cellule lorsque le rayonnement solaire est hétérogène.

I.8 Système Photovoltaïque

Le module solaire est l'élément de base d'un système photovoltaïque, dont le générateur solaire est composé des modules photovoltaïques connectés en série, en parallèle ou en série et parallèle, cette connexion détermine la puissance du fonctionnement de l'ensemble.

Ce système est relié à un régulateur d'énergie. Il y a deux catégories de ce régulateur PWM ou MPPT, qui contrôlent un convertisseur d'un type différent dépendant de l'impédance de la charge connectée.

Soit un convertisseur DC - AC (onduleur) ou soit un convertisseur DC - DC (hacheur), il existe deux types de système photovoltaïque :

- Système Photovoltaïque avec Stockage Electrique.
- Système Photovoltaïque à Couplage Direct sans Batterie.

I.8.1. Système Photovoltaïque avec Stockage Electrique

L'énergie électrique produite par les panneaux solaires GPV peut être utilisée directement pour l'alimentation électrique ou stockée dans des unités de stockage électriques, qui sont des batteries chimiques. La figure (I.5) montre un schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec stockage.

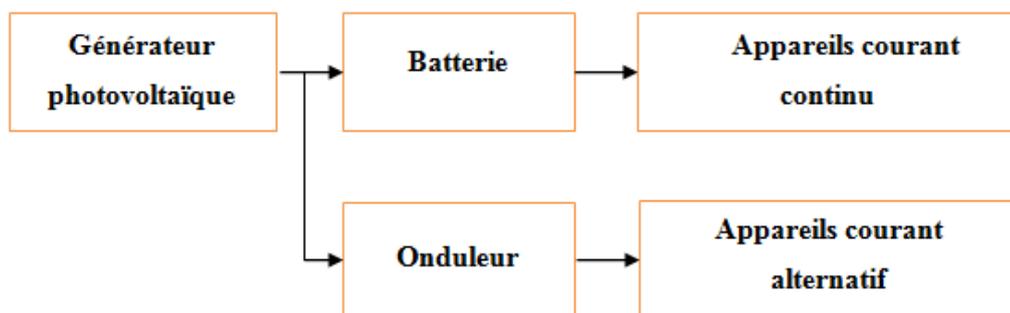


Fig. (I.5) : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec stockage.

I.8.2 Système photovoltaïque a couplage direct sans batterie

L'énergie électrique produite par les panneaux solaires GPV alimente la charge directement seulement, c'est-à-dire que cette énergie n'est pas stockée, voire la figure (I.6).

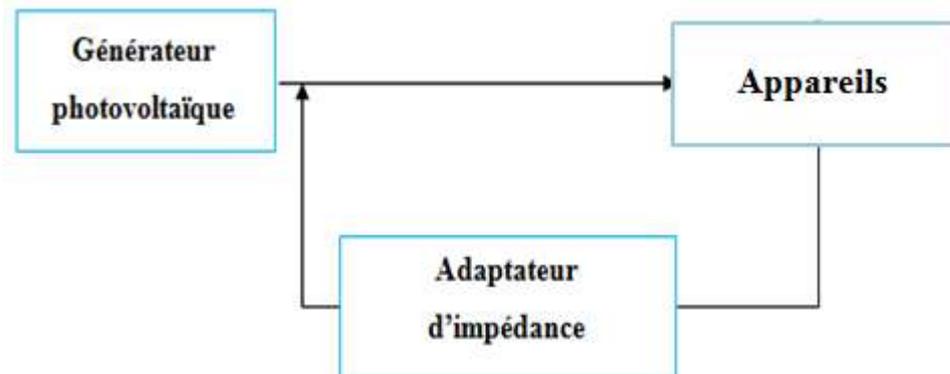


Fig. (I.6) : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque à couplage direct

I.9. Secteurs d'application

Le champ d'utilisation de l'énergie photovoltaïque s'articule sur deux secteurs en fonction du type de connexion :

- **le champ des générateurs photovoltaïques connectés au réseau**

Il existe deux types de champs des générateurs photovoltaïques connectés au réseau:

- Les champs de production photovoltaïques au niveau de la compagnie de production électrique (ex : SONELGAZ) ;
- Des panneaux connectés au réseau mais installés au niveau des consommateurs.

- **le champ de générateur photovoltaïque isolé**

Ça signifie tous les générateurs photovoltaïques non liés au réseau électrique, par exemple:

- L'éclairage public ;
- Utilisation dans le domaine d'agriculture (ex: pompage d'eau) ;
- L'alimentation des casernes militaires dans les zones frontalières ou isolées ;
- Utilisation comme générateur principal dans les satellites.
- Alimente les régions éloignées et montagneuses.

I.10. Conclusion

Lors de ce chapitre, on a pu donner quelques concepts du domaine de l'énergie solaire, le phénomène physique de la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique, et les étapes d'évolution du panneau solaire.

La bonne exploitation du panneau solaire nécessite sa modélisation sous forme d'un modèle mathématique qui fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre II

Modélisation D'un Système Photovoltaïque

II.1. Introduction

Le générateur photovoltaïque (GPV) est constitué d'un groupe de cellules photovoltaïques. Le nombre de cellules, la qualité du matériau utilisé et la manière d'installation (en série et ou parallèle) déterminent les caractéristiques du générateur. Pour étudier ses caractéristiques, il est nécessaire de trouver un modèle mathématique qui simulé le comportement non linéaire de la cellule.

Dans ce chapitre, une étude d'un modèle simple similaire aux cellules constituant le générateur photovoltaïque sera élaboré.

Ce modèle sera réalisé en utilisant l'environnement (MATLAB / SIMULINK).

II.2. Modèle du Panneau Photovoltaïque

- Modèle d'une cellule photovoltaïque à une diode:

Le choix du modèle à une diode, permet d'effectuer une analyse et une évaluation des performances du module photovoltaïque, les plus proches de la réalité. Ce modèle représente la cellule solaire comme source de courant qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique. La résistance montée en série R_S représente la résistance de contact et de connexion, une autre résistance en parallèle dite la résistance shunt R_P représente le courant de fuite et une diode en parallèle qui modélise la jonction PN, voire la figure (II.1)) [13].

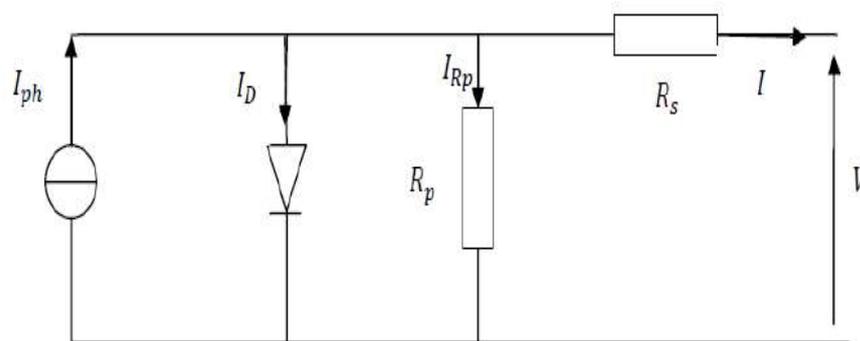


Fig. (II.1) : Schéma équivalent de la cellule solaire à une diode

Remarque : I et V sont le courant et la tension de sortie de la cellule.

En appliquant la loi actuelle de Kirchhoff, on peut obtenir le courant de sortie par l'expression:

$$I = I_{Ph} - I_D - I_{Rp} = N_P * I_{Ph} - N_P * I_D - I_{Rp} \quad (\text{II.1})$$

$$I_{ph} = [I_{Sc} + K_i * \Delta T] * \frac{G}{G_{(stc)}} \quad (\text{II.2})$$

$$I_D = I_S * \left(\exp^{\frac{V+I*R_S}{n*V_t}} - 1 \right) \quad (\text{II.3})$$

$$I_{RP} = \frac{V+I*R_S}{R_P} \quad (\text{II.4})$$

avec :

I_{cc} : le courant de court-circuit.

G_{stc} : irradiation dans les conditions standard (1000 w/m2).

G : irradiation solaire.

K_i : Le coefficient de température de courant I_{cc}.

I_s : courant de saturation de la diode.

n : facteur d'idéalité.

V_t : le potentiel thermique, donné par la formule ci-dessous:

$$V_t = \frac{k*T*N_S}{q} \quad (\text{II.5})$$

N_s : nombre de cellule en série.

K : constante de Boltzmann (1.38 * 10⁻²³ J/K).

q : la charge d'électron (1.6 * 10⁻¹⁹ C).

T : température effective de la cellule en kelvin.

R_p : la résistance parallèle.

R_s : la résistance série, calculé par [14]:

$$R_S = \frac{A*N_S*K*T*\ln(0.54)-V_{PM}}{q*I_{PM}} \quad (\text{II.6})$$

L'expression générale de **I_s** pour toutes les valeurs données de température :

$$I_S = I_{S(stc)} * \left(\frac{T}{T(stc)} \right)^3 * e^{\left[\left(\frac{q*E_g}{n*K} \right) * \left(\frac{1}{T(stc)} - \frac{1}{T} \right) \right]} \quad (\text{II.7})$$

$$I_{S(stc)} = \frac{I_{SC} + k_i * \Delta T}{e \left(\frac{V_{co} + k_v * \Delta T}{n * V_t} \right) - 1} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

T : la température standard (298k).

E_g : l'énergie de gap de la jonction P-N.

K_v : le coefficient de température de la tension V_{co}.

V_{co} : la tension de circuit ouvert.

II.3. Simulation du panneau photovoltaïque

Pour analyser le fonctionnement du panneau photovoltaïque choisis, qui est basé sur le modèle précédemment cité, on procède à une série de simulations. Ainsi les résultats obtenus seront présentés comme suit.

On utilise pour la simulation d'un tel panneau photovoltaïque le logiciel de simulation MATLAB – SIMULINK.

- Les paramètres de simulation sont regroupés dans le tableau (II.1) pour les conditions standard [T= 25°C ; G= 1000w/m² ; AM= 1.5]:

Les paramètres du module		La valeur de chaque paramètre
La puissance maximale	P_{max}	220 w
La tension maximale	V_{max}	27.54 v
Le courant maximale	I_{max}	8.08 A
La tension de circuit ouvert	V_{co}	33.77 v
Le courant de court-circuit	I_{cc}	8.62 A
Nombre de cellule en série	N_s	54
Nombre de cellule en parallèle	N_p	1
Le coefficient de température	k_i	0.0017
Le coefficient de température	K_v	-0.0017
La valeur de résistance série	R_s	0.175 Ω
La valeur de résistance parallèle	R_p	1000 Ω

Tableau. (II.01): les paramètres du module photovoltaïque à étudier.

La figure (II.2) montre le schéma global d'une cellule solaire utilisant le logiciel MATLAB :

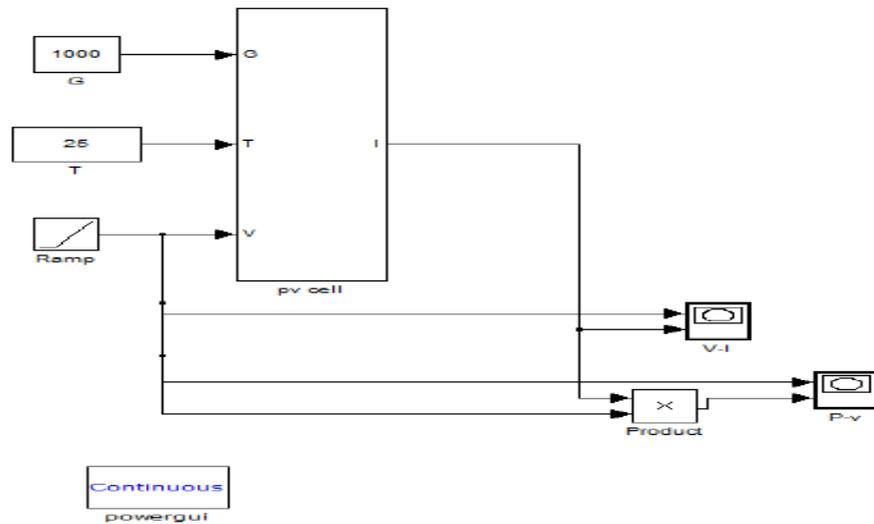


Fig. (II.2) : cellule photovoltaïque sous MATLAB

On déduit du bloc de PV cell (cellule photovoltaïque) le modèle à une diode du panneau solaire :

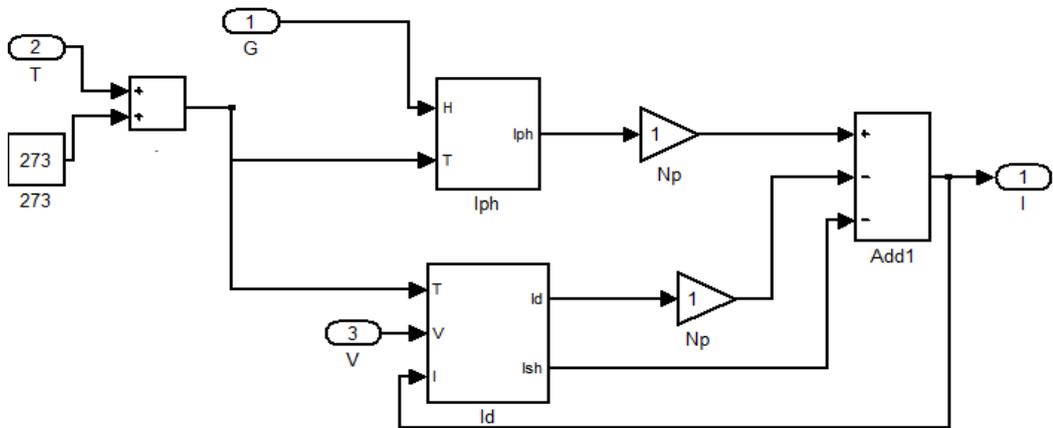


Fig. (II.3) : Modèle à une diode du panneau photovoltaïque

La figure (II.4) montre les résultats de simulation obtenus $P = f(V)$ et $I = f(V)$ pour une température de $25C^\circ$ et une radiance de $1000W/m^2$ (les conditions standard).

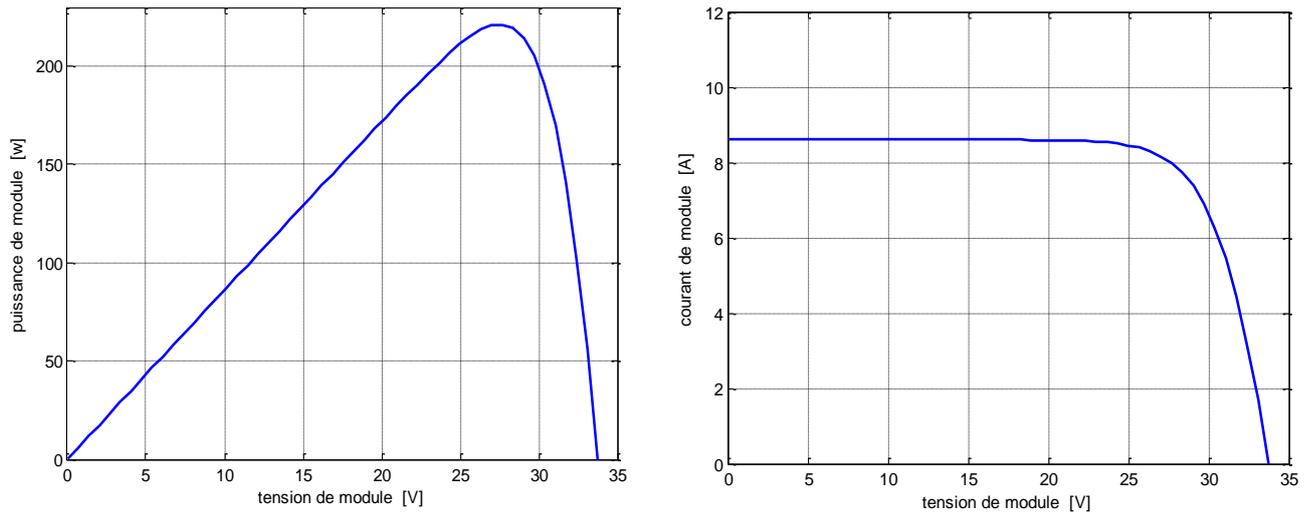


Fig. (II.4) : les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule PV à STC ($E = 1000 \text{ w/m}^2$; $T=25^{\circ}\text{c}$).

II.4. Caractéristiques d'un modèle solaire

Dans ce modèle, on présente deux caractéristiques de panneau PV. Le courant de court-circuit I_{cc} pour une tension nulle et V_{co} pour un courant nul, voire la Figure (II.05) :

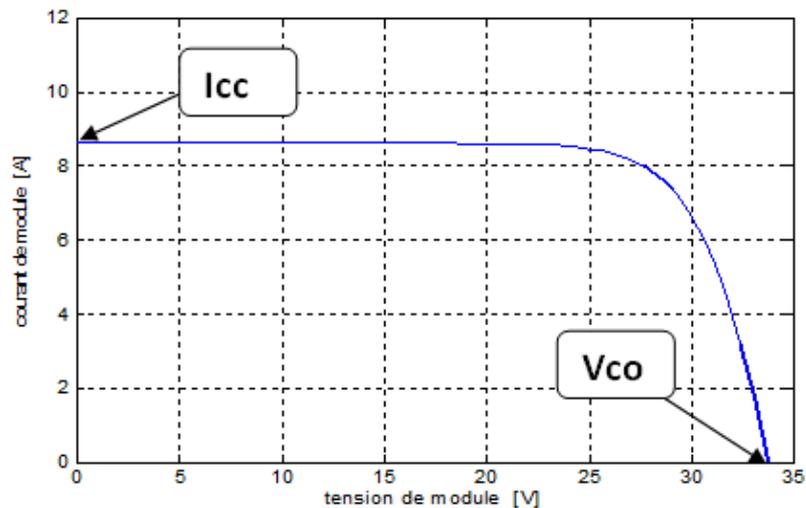


Fig. (II.5) : Les zones de Caractéristique $I(V)$ d'un générateur photovoltaïque

II.4.1. Le courant de court-circuit (I_{cc})

C'est le courant généré lors d'application d'une tension nulle aux bornes d'une cellule solaire. Ce courant électrique a une valeur maximale que la cellule peut générer. La valeur de ce courant dépend de l'éclairement.

II.4.2. La tension de circuit-ouvert (V_{co})

C'est la tension lorsque la cellule est connectée à une charge d'une valeur infinie, donc le courant est nul. La tension de circuit-ouvert dépend essentiellement du type de la cellule solaire et de la température.

II.4.3. Le rendement

Ce facteur définit le taux de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique, il représente le rapport de la puissance fournie rapportée à celle du rayonnement incident :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{I_{PM}V_{PM}}{S.E} = \frac{V_{co}I_{cc}FF}{P_{in}} \quad (II.9)$$

Où :

S: La surface de la cellule; **E**: L'ensoleillement ambiant; **FF**: Facteur de forme.

Ce rendement varie généralement entre 8 à 13% pour le silicium monocristallin, entre 7 à 11% pour le poly-cristallin et entre 4 et 9% pour la cellule au silicium amorphe [12].

II.4.4. Facteur de forme

Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_m (puissance maximale de sortie) et la puissance formée par le rectangle, donné par : $V_{co} * i_{cc}$.

Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} * i_{cc}} \quad (II.10)$$

II.5. Association des cellules solaires

Les cellules solaires dans les générateurs photovoltaïque sont associées en série ou/et en parallèle. Les deux paragraphes suivants détaillent les caractéristiques de chaque association.

II.5.1. Association des cellules photovoltaïques en parallèle

Le groupement des cellules connectées en parallèle est soumis à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée [13].

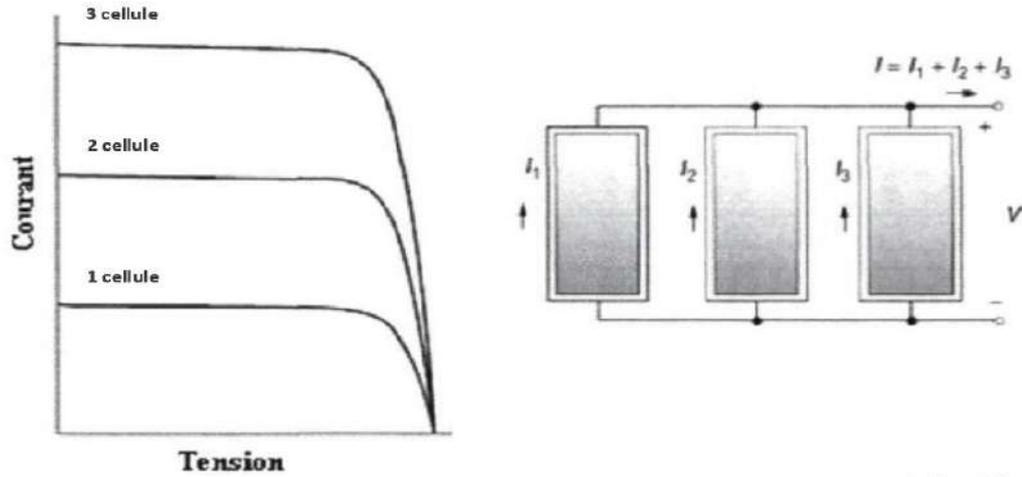


Fig. (II.6) : les caractéristiques de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle.

II.5.2. Association des cellules photovoltaïques en série

Le groupement des cellules connectées en série est soumise au même courant et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des tensions à courant donné. Obtenues par l'association des cellules PV en série [13]:

$$I_{SCC} = I_{CC} \text{ et } V_{SCO} = N_S * V_{CO}$$

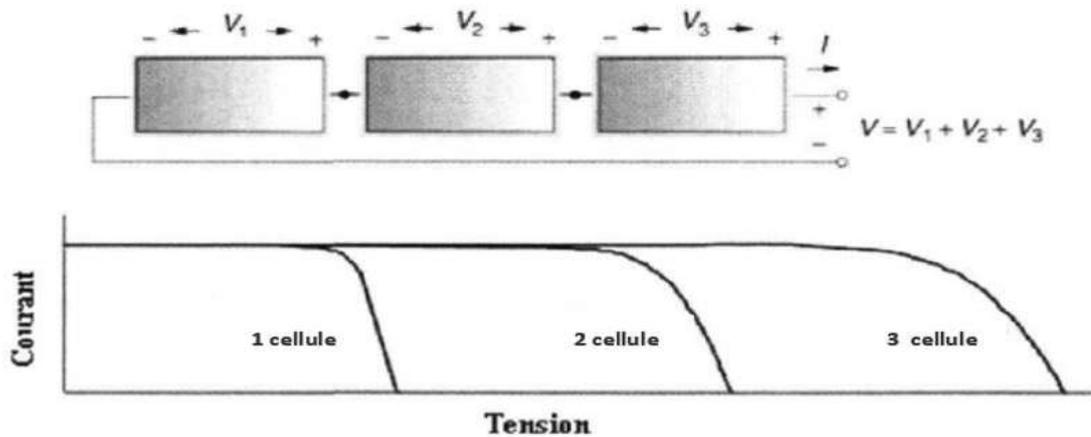


Fig. (II.7) : les caractéristiques de 3 cellules photovoltaïques associées en série.

II.6. Les zones de fonctionnement du modèle solaire

Sachant que la caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement, seule la courbe $I = f(V)$ est fixée.

La valeur de la charge aux bornes du générateur est responsable à la détermination du point de fonctionnement du système photovoltaïque. La figure ci-dessous représente trois zones essentielles [15] :

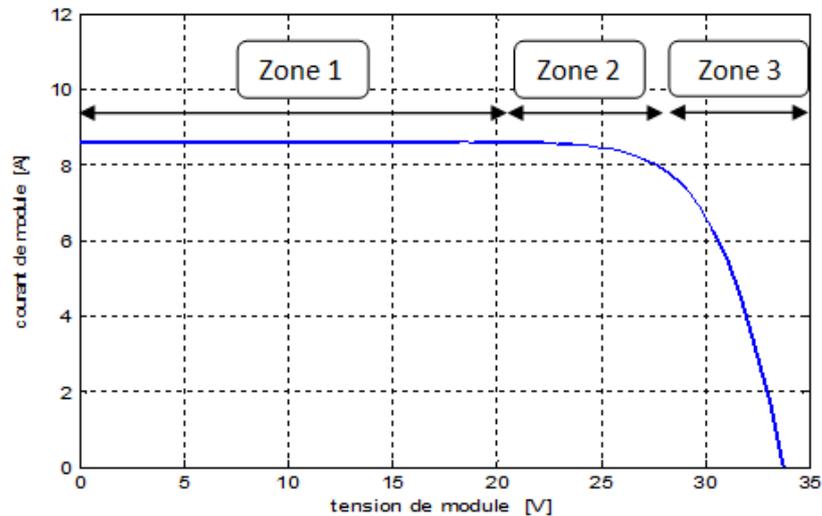


Fig. (II.8) : Les zones de caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque

- Zone (1): Dans cette zone, le courant reste constant quelle que soit la valeur de tension, et le générateur solaire fonctionne comme un générateur de courant.
- Zone (2) : dans cette zone qui est comprise entre la zone 1 et la zone 3, le panneau solaire génère l'énergie et fonctionne en mode nominal, aussi dans cette zone, il existe un point où la puissance générée est maximale.
- Zone (3): Dans cette zone, une décroissance du courant correspondant à une tension presque constante, et le générateur solaire fonctionne comme un générateur de tension.

II.7. Influence de l'éclairement et de la température sur les courbes

$$I = f(V) \text{ et } P = f(V)$$

II.7.1. L'Effet de l'Irradiation Solaire

On varie la valeur de l'éclairement solaire entre 400 w/m² à 1000 w/m² avec un pas de 200 w/m², et on fixe la température à T = 25°C. Les caractéristiques $I_{pv} = f(V_{pv})$ et $P_{pv} = f(V_{pv})$ sont illustrées dans la figure (II.9)

La figure (II.9.a) présente l'évolution de la puissance du module en fonction de la tension à une température fixe et éclairement variable entre [400w/m² à 1000w/m²].

La figure (II.9.b) présente l'évolution du courant généré du module en fonction de la tension de sortie à température fixe et éclairement variable entre $[400\text{w/m}^2 \text{ à } 1000\text{w/m}^2]$.

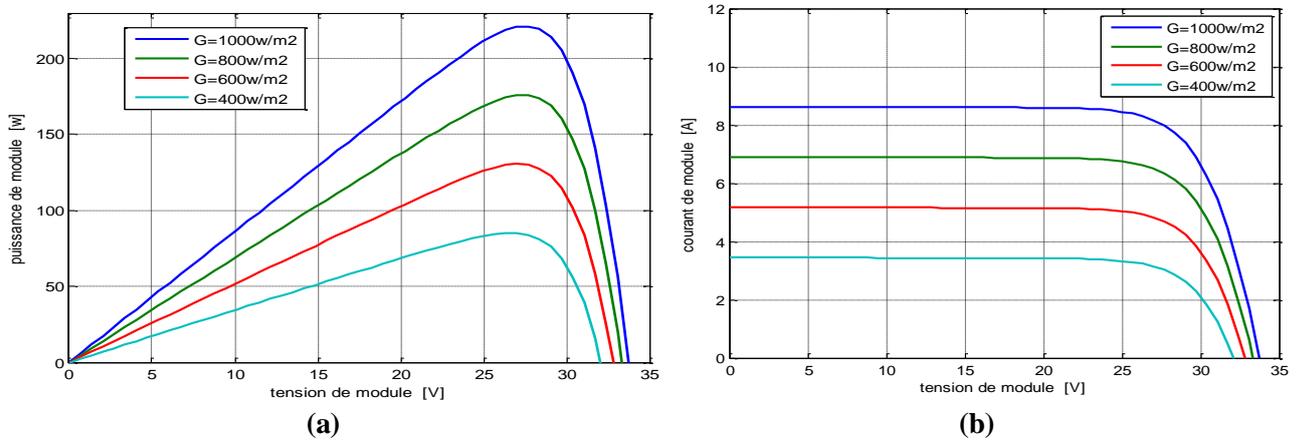


Fig. (II.9) : L'effet de l'irradiation sur les caractéristique I-V et P-V , $T = 25^\circ\text{C}$

On remarque que la valeur du courant de court-circuit I_{cc} est proportionnelle à l'éclairement solaire. Par contre, la tension de circuit ouvert V_{co} ne varie pas, elle reste généralement constante.

II.7.2. L'effet de la Température

On varie la température entre 25°C à 55°C avec un pas de changement égale à 10°C . Les courbes $I_{pv} = f(V_{pv})$ et $P_{pv} = f(V_{pv})$ sont illustrées dans la figure (II.10).

La figure (II.10.a) présente l'évolution de la puissance générée par le module en fonction de la tension à éclairement fixe et à température variable entre $[25^\circ\text{C} \text{ à } 55^\circ\text{C}]$.

La figure (II.10.b) présente l'évolution du courant généré du module en fonction de la tension à éclairement fixe et à température variable entre $[25^\circ\text{C} \text{ à } 55^\circ\text{C}]$.

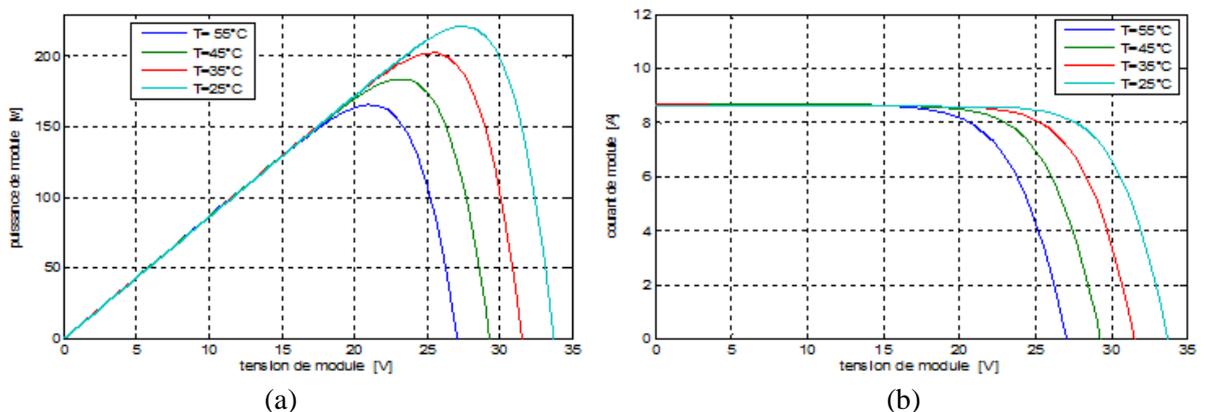


Fig. (II.10) : L'effet de la température sur les caractéristiques $I_{pv} = f(V_{pv})$ et $P_{pv} = f(V_{pv})$, 1000W/m^2

On remarque que la température n'influe pas sur le courant de court-circuit I_{cc} , mais la tension de circuit ouvert V_{co} change en fonction de la variation de la température.

II.8. Influence de la résistance série R_s

La figure (II.11) montre l'impact de la résistance série R_s sur la caractéristique (I-V) de la cellule photovoltaïque, qui correspond à la pente de la courbe de puissance P-V dans la zone où la cellule fonctionne comme générateur de tension.

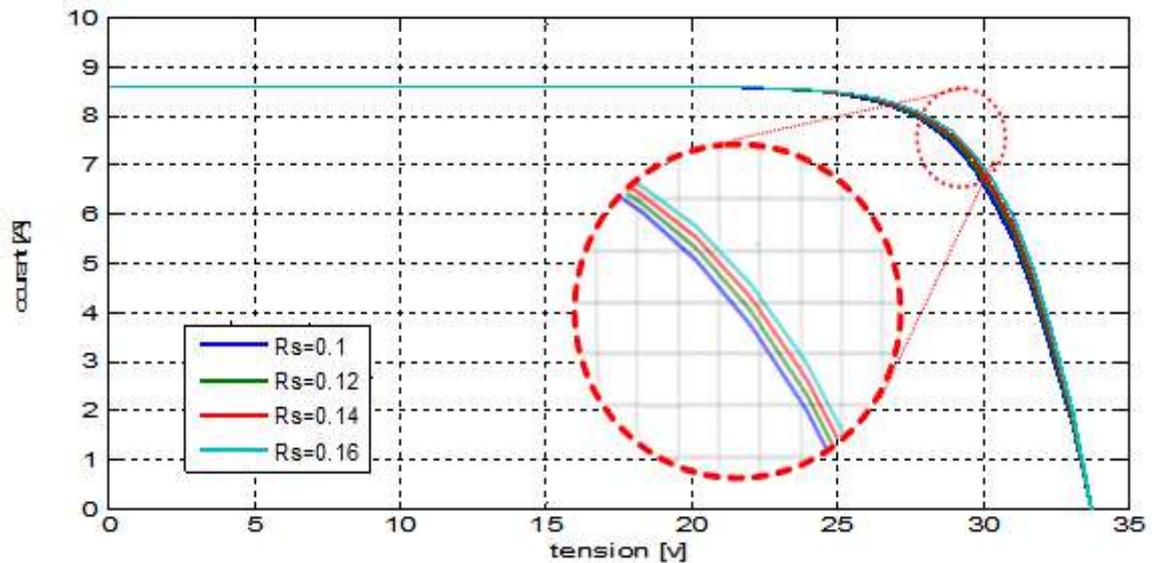


Fig. (II.11) : l'influence de la résistance R_s sur la pente de la courbe (V-I)

II.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation d'une cellule photovoltaïque et les caractéristiques du GPV avec ses performances. Ainsi, l'influence de quelques paramètres sur ses performances.

Pour le fonctionnement optimal d'un système photovoltaïque, il est nécessaire d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge qui fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre III

Poursuite Du Point De Puissance Maximale MPPT

III.1. Introduction

Les générateurs photovoltaïques sont utilisés pour délivrer une énergie électrique dans plusieurs d'applications électriques.

Pour exploiter la puissance maximale d'un générateur photovoltaïque, il faut une adaptation permanente de la charge avec le générateur. Cette adaptation pourra être réalisée par l'insertion d'un convertisseur DC-DC (Hacheur) contrôlé par un mécanisme de poursuite "Maximum Power Point Tracking" MPPT.

Dans ce chapitre ,nous présentons tout d'abord ,des définitions et notions de base sur le convertisseur DC-DC ainsi que les modèles mathématiques nécessaires à l'étude de leur comportement lors de la simulation du système PV global ,nous traitons en suite ,en détail , la technique MPPT par la méthode de perturbation et observation

III.2. Suivre de la puissance maximale du générateur photovoltaïque

La poursuite du point maximum de la puissance MPPT est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïques .Plusieurs technique sont développées depuis 1968 date de publication de la première loi de commande de ce type adaptées à une source d'énergie renouvelable de type PV. Ces techniques se différencient entre elles par leur complexité, nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d'application [12].

III.2.1. Connexion directe source-charge

Le système de production d'énergie solaire le plus simple consiste principalement en un générateur photovoltaïque et une charge qui utilise directement l'énergie produite. Ce lien direct est utilisé pour sa simplicité et son faible coût, car il n'existe aucun élément électronique intermédiaire entre la charge et le générateur solaire figure (III.1). Lorsque le module n'est pas éclairé celui-ci pourrait donc se décharger sur le générateur photovoltaïque et en plus l'endommager irréversiblement ,ainsi que éviter cette tension, la connexion doit être assurée à l'aide d'une diode Anti-retour placée entre le GPV et la charge .Cette configuration est illustrée à la figure .L'inconvénient de cette configuration ,c'est qu'elle n'offre aucune type de limitation et/ou réglage de la tension de la batterie ,le transfert de puissance maximale disponible aux bornes du générateur photovoltaïque vers la charge n'est pas non plus garanti [16]

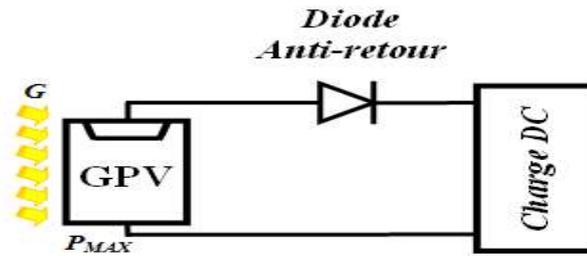


Fig. (III.1) : Principe d'une connexion directe entre en GPV et une charge

III.2.2. Circuit d'adaptation entre un générateur photovoltaïque et la charge

À la connexion directe entre le générateur et la charge, on note qu'il existe un écart entre l'énergie produite et celle réellement transférée à la charge. Cela est dû aux variations de la température et d'intensité de l'éclairement.

Afin d'extraire la puissance maximale disponible à chaque instant du GPV et de la transféré à la charge, la méthode utilisée consiste à utiliser un étage d'adaptation entre le GPV et la charge, cet étage d'adaptation garantit un bon contrôle de l'énergie transférée à la charge.

L'adaptation fréquemment utilisée en PV est un convertisseur statique (DC-DC), le circuit de conversion est choisi en fonction de la charge à alimenter, Il peut être survolteur au dévolteur. Si par exemple la charge est une batterie au plomb, ce sont ces plages de tension de charge et de décharge qui vent permettre d'établir la structure la plus adéquate figure (III.2).

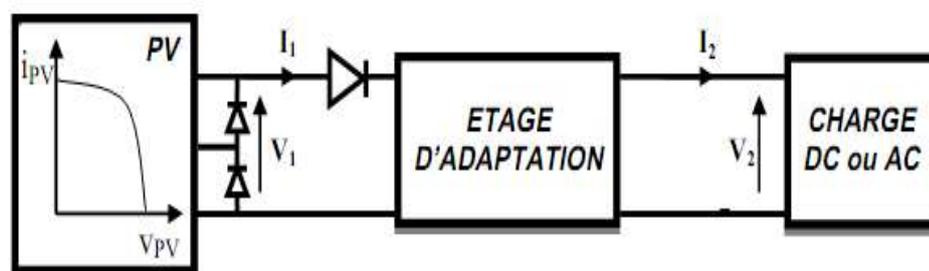


Fig. (III.2) : Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation

III.3. Convertisseur DC-DC

L'hacheur est un convertisseur statique utilisé comme un adaptateur de source-charge par la variation du rapport cyclique α lorsque la charge a besoin d'une tension supérieure à celle du générateur PV, ainsi il assure la poursuite du point de puissance maximale selon des techniques différentes de la commande MPPT [17].

III.4. Les types d'hacheurs

Il existe plusieurs types de convertisseurs DC-DC, ils sont différents dans leurs conceptions et dans leurs fonctions, on trouve trois types :

- Hacheur série (Buck)
- Hacheur parallèle (boost)
- Hacheur série-parallèle (Buck-boost)

Dans notre travail, on a utilisé le hacheur boost.

a) Hacheur parallèle (boost)

Le hacheur parallèle appelé Boost est un convertisseur élévateur, il a la capacité de fournir une tension plus élevée que celle appliquée à son entrée [17].

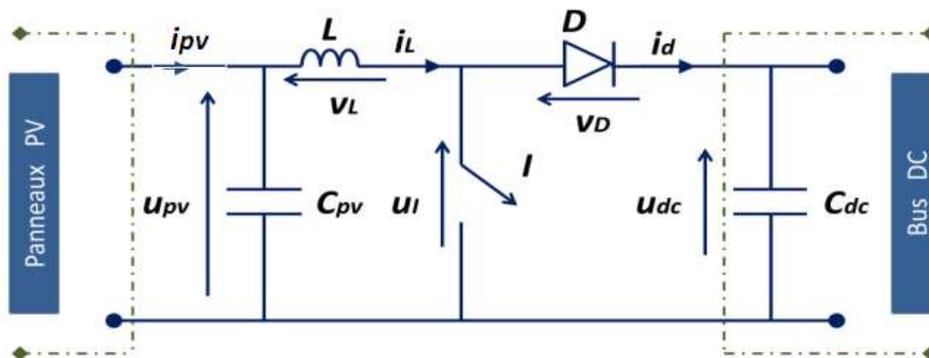


Fig. (III.3) : Circuit électrique de l'hacheur « Boost »

- L'inductance permet de lisser le courant appelé sur la source.
- La capacité C permet de limiter l'ondulation de tension en sortie.

Son principe de fonctionnement est comme suit:

Au premier temps (αT), l'interrupteur (I) 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. L'interrupteur (I) s'ouvre et l'inductance (L) s'oppose à la diminution de courant (i_L) et génère une tension qui s'ajoutera à la tension de source. Elle sera appliquée sur

la charge (R) à travers la diode (D), les équations de l'hacheur sont données par :[17].

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(u_{pv} - R_L i_L) \\ \frac{du_{pv}}{dt} = \frac{1}{C_{pv}}(i_{pv} - i_L) \end{cases} \quad (\text{III. 1})$$

Et quand l'interrupteur I est ouvert :

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(u_{pv} - R_L i_L - U_{dc}) \\ \frac{du_{pv}}{dt} = \frac{1}{C_{pv}}(i_{pv} - i_L) \end{cases} \quad (\text{III. 2})$$

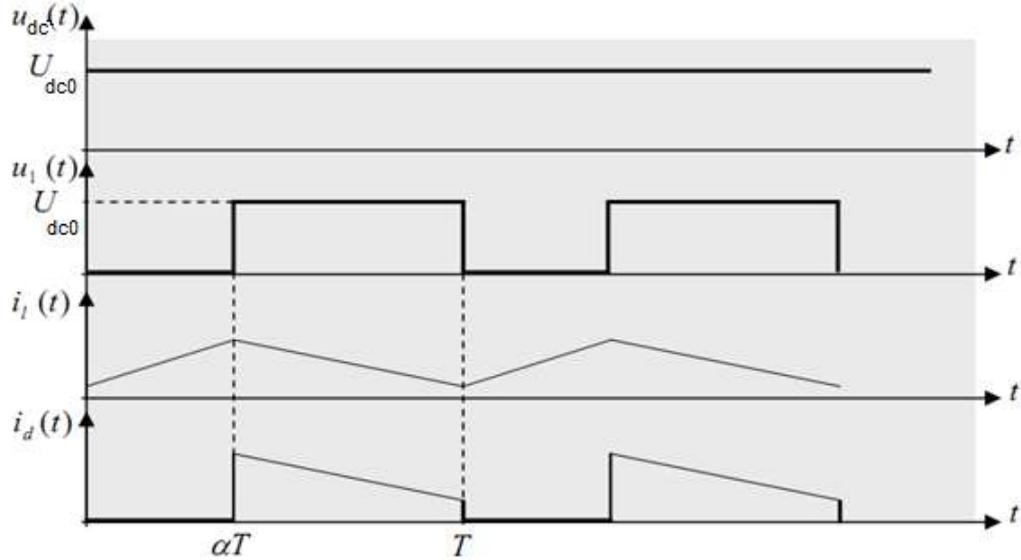


Fig. (III.4) : Hacheur survolteur en régime de fonctionnement continu

Le modèle moyen de ce convertisseur sur une période de découpage est donc :

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(u_{pv} - R_L i_L - (1 - D_{pv})U_{dc}) \\ \frac{du_{pv}}{dt} = \frac{1}{C_{pv}}(i_{pv} - i_L) \end{cases} \quad (\text{III. 3})$$

b). Dimensionnement de la capacité C et l'inductance L

La tension et le courant de sortie en fonction des entrées sont exprimés par les relations suivantes [18] :

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1-\alpha} \quad (\text{III.4})$$

$$I_{out} = I_{in} (1 - \alpha) \quad (III.5)$$

Pour déterminer les valeurs des éléments passives, on utilise les relations suivantes [18] :

$$l > \frac{\alpha(1-\alpha)^2 * R}{2 * f} \quad (III.6)$$

$$C > \frac{V_{out} * \alpha}{R * \Delta V * f} \quad (III.7)$$

On trouve : $l = 8 \text{ e}^{-4} \text{H}$, $C = 5.8 \text{ e}^{-4} \text{F}$

III.5. La commande de la puissance maximale du générateur photovoltaïque

Le changement des conditions climatiques va affecter la puissance de sortie du générateur photovoltaïque. L'utilisation des algorithmes MPPT, permet d'assurer une puissance de sortie maximale sous des conditions environnementales données par variation du rapport cyclique du convertisseur statique.

Il existe plusieurs algorithmes MPPT présentés dans les littératures. Dans cette section, nous intéressons à la méthode de perturbation et d'observation et à la méthode incrémentation de la conductance.

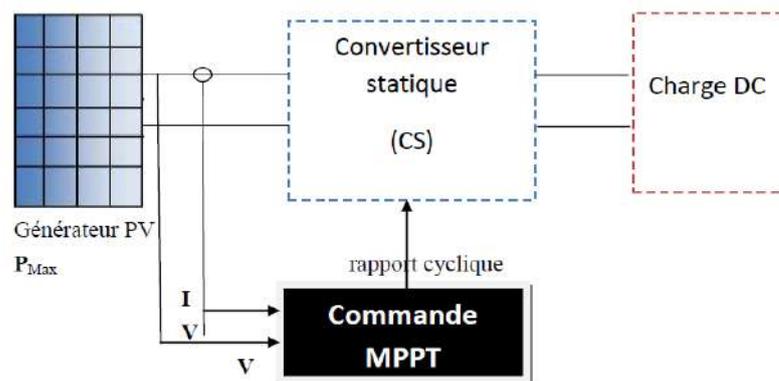


Fig. (III.5) : Diagramme du système photovoltaïque étudié

III.6. La méthode de perturbation et d'observation (P&O)

La méthode de perturbation et observation (P&O) est une approche largement répandue dans la recherche de MPPT, parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension V_{PV} et de courant du générateur Photovoltaïque I_{PV} , elle peut dépister le point maximum de puissance même lors des variations de l'éclairement et de la température.

Le principe de cet algorithme est d'effectuer une perturbation sur la tension et le courant du panneau PV, ensuite on calcule la puissance fournie par ce panneau PV à l'instant (k) $P_{pv}(k)$. Cette valeur $P_{pv}(k)$ est comparée à la valeur $P_{pv}(k-1)$ de la dernière mesure. Si la puissance de sortie a augmenté, la perturbation continuera dans la même direction. Si la puissance a diminué de puis la dernière mesure, la perturbation de la tension de sortie sera renversée en direction opposée du dernier cycle [19].

La figure (III.8) montre l'organigramme de l'algorithme de la méthode 'P&O' tel qu'il doit être implémenté. D'après la figure, la tension et le courant V et I , sont mesurés pour calculer la puissance de sortie courante $P(k)$.

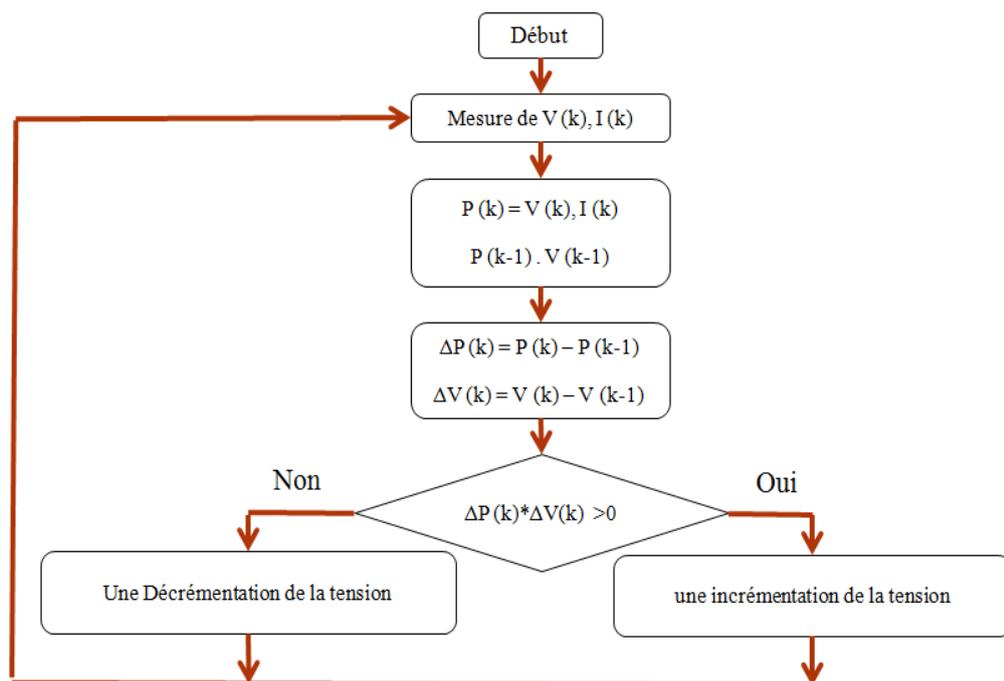


Fig. (III.6) : Algorithme de la méthode P&O

- Si $\Delta P * \Delta V$ est positif, ça-veut-dire qu'on s'approche du PPM Ainsi, d'autres perturbations dans la même direction vont déplacer le point de fonctionnement vers le PPM.

- Si $\Delta P * \Delta V$ est négatif le point de fonctionnement est déplacé loin du PPM, et la direction de la perturbation doit être inversée pour avancer vers le PPM.

La figure (III.7) illustre le principe de l'algorithme dans la courbe de P-V

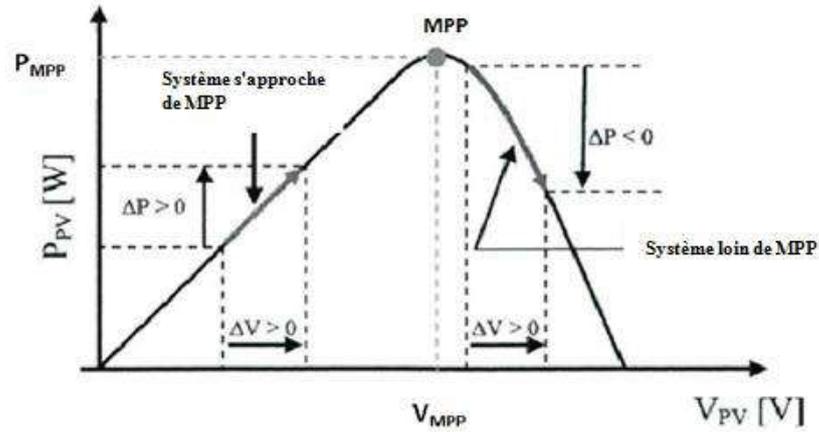


Fig. (III.7) : Principe de la commande P&O

III.7. Résultats de simulation et interprétations de la méthode P&O

Les conditions prise en compte lors de l'application de la méthode et la vérification du comportement de l'algorithme P&O sont :

- la température ambiante est constante 25°C ;

Le teste est réalisé en appliquant un changement brusque de l'irradiation solaire qui passe de 300 W /m² à 1000 W /m² à l'instant 1s, puis elle revient brusquement à 600 W /m² à l'instant 2 s.

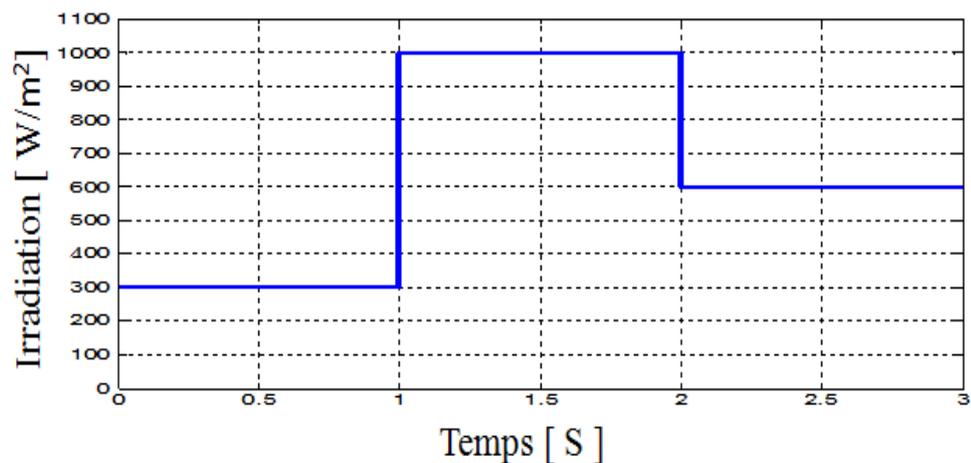


Fig. (III.8) : L'irradiation solaire

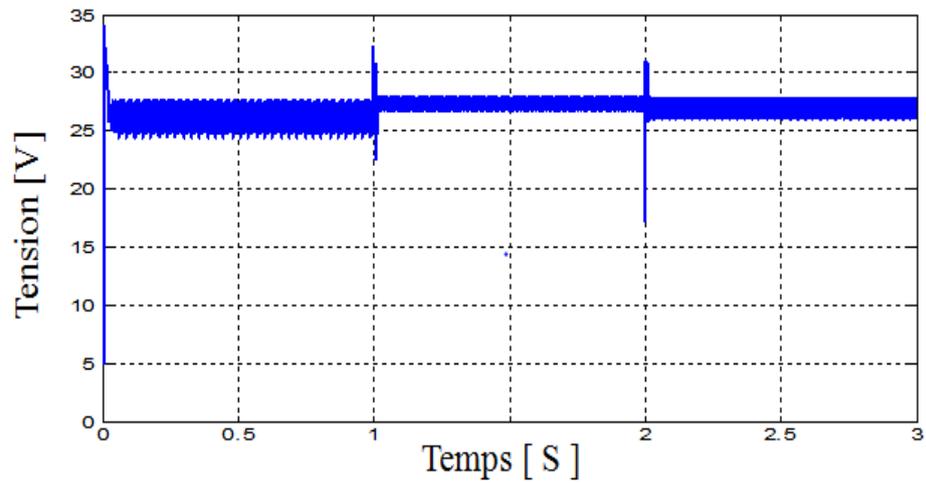


Fig. (III.9) : Variation de la tension PV de sortie

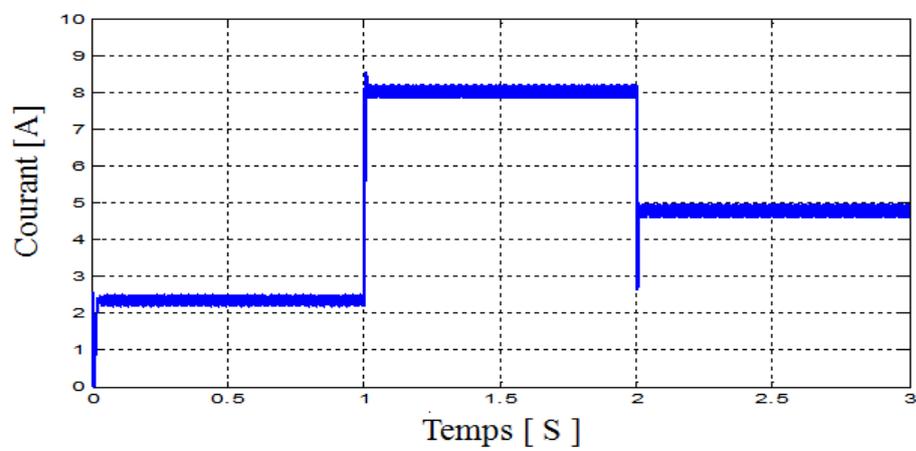


Fig. (III.10) : Variation du courant PV de sortie

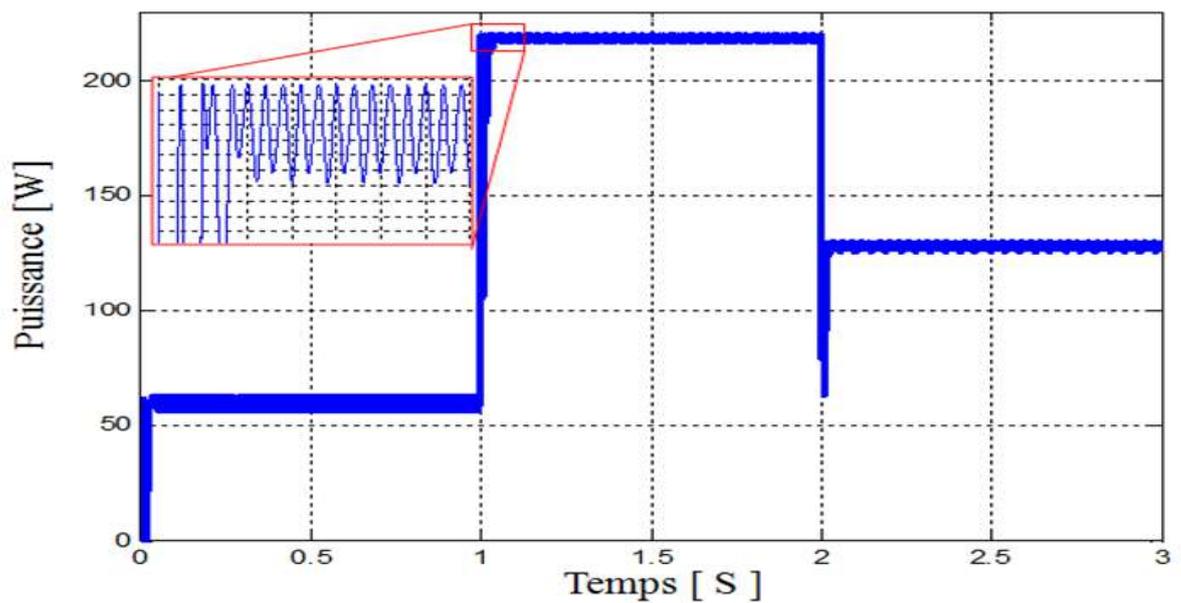


Fig. (III.11) : La Puissance de sortie panneau PV

L'application de la méthode P&O, nous a permis de tirer les remarques suivantes :

- on observe une relation proportionnelle entre les changements de la puissance et les changements de rayonnement,
- la même remarque est faite pour le courant,
- en ce qui concerne la tension, on note une fluctuation durant le changement du rayonnement.

En effet, de par le fonctionnement de l'algorithme P&O, même lorsque le point de puissance maximale est atteint, le système est sans cesse de nouveau perturbé. Ces oscillations ont pour principale conséquence une perte de puissance. La réduction des pertes oscillations rend l'algorithme P&O trop lent à retrouver le nouveau point de fonctionnement optimal.

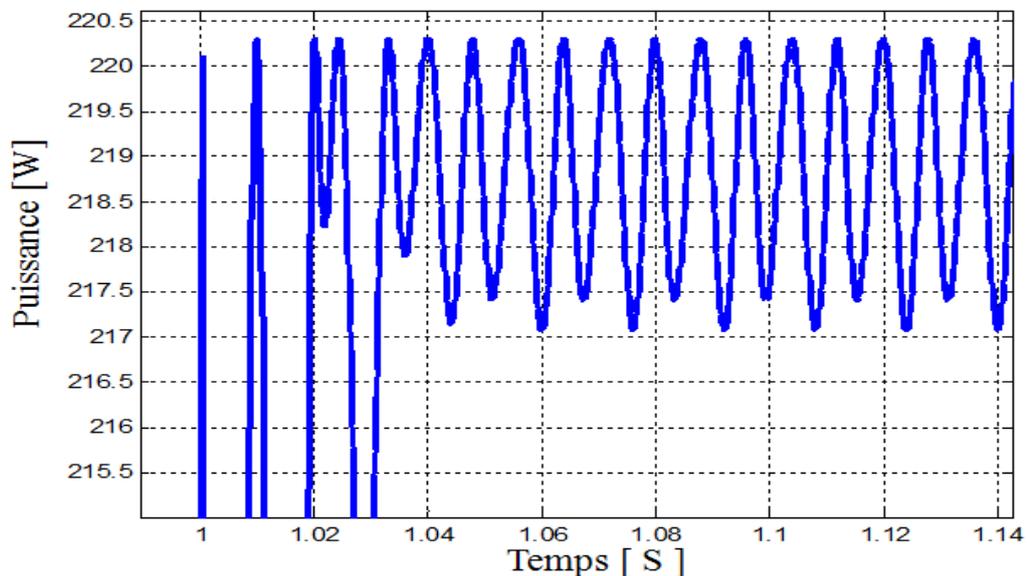


Fig. (III.12) : La Puissance de sortie panneau PV (Vision local)

III.8. La méthode incrémentation de la conductance (*INC*)

L'incrément de la conductance est un algorithme d'escalade, Il se caractérise par une réponse rapide lors d'un changement brusque du rayonnement solaire. L'incrément de la conductance est basée sur le fait que le point de puissance maximale (MPP) n'est atteint que si la dérivée de la puissance est nulle. Selon le signe de la dérivée, on détermine la position du point de fonctionnement par rapport au point de fonctionnement optimal MPPT [20].

Le principe de la commande INC est illustré par la figure(III.13)

- si la dérivée est positive le point de fonctionnement est à gauche du MPPT ;

- si la dérivée est négative le point de fonctionnement est à droite du MPPT.

Ceci mène à l'ensemble d'équations suivantes. [20]

$$\frac{dp}{dv} = 0 \text{ au MPP} \quad (\text{III.8})$$

$$\frac{dp}{dv} > 0 \text{ à gauche du MPP} \quad (\text{III.9})$$

$$\frac{dp}{dv} < 0 \text{ à droite du MPP} \quad (\text{III.10})$$

Sachant que la dérivée de la puissance $P=V*I$ donne la relation suivant:

$$\frac{dp}{dv} = \frac{d(I*V)}{dv} = I + V * \frac{dI}{dv} \cong I + V * \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (\text{III.11})$$

Donc on peut écrire :

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \text{ au MPP} \quad (\text{III.12})$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} \text{ à gauche du MPP} \quad (\text{III.13})$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} \text{ à droite du MPP} \quad (\text{III.14})$$

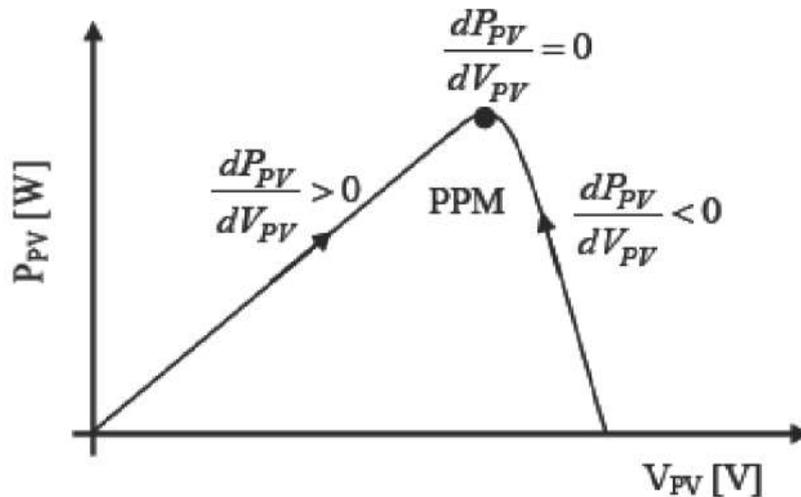


Fig. (III.13) : Principe de la commande INC

L'organigramme (figure(III.14) résume les étapes de la commande MPPT par INC

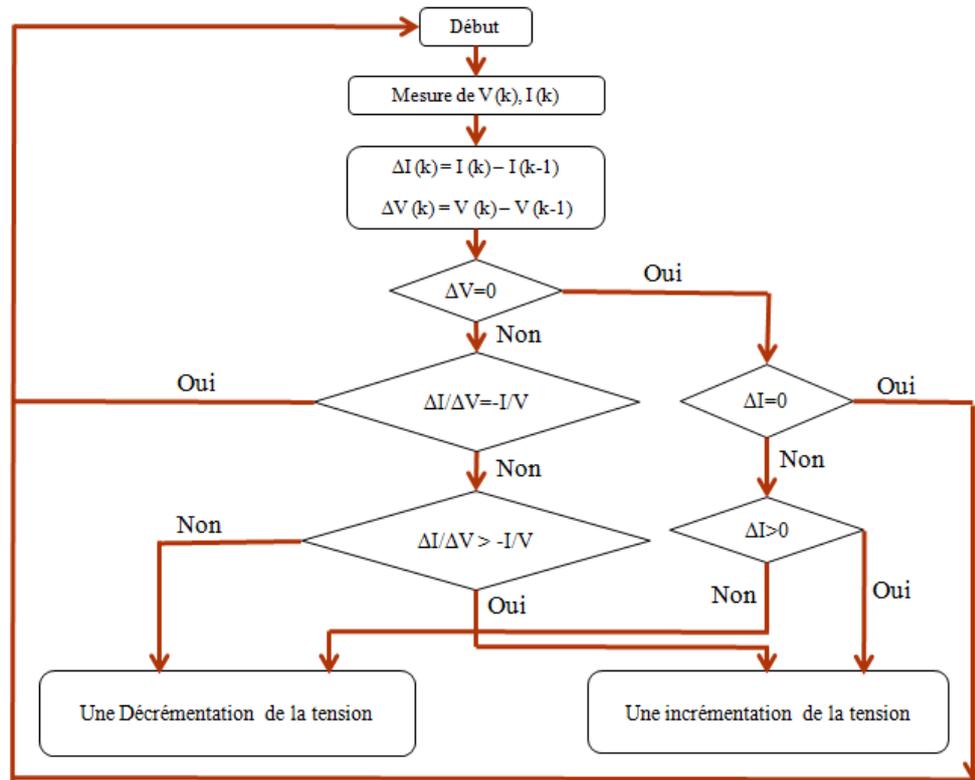


Fig. (III.14) : Algorithme de la méthode *INC*

III.9. Résultats de simulation et interprétations de la méthode *INC*

Les résultats de simulation issus de cette méthode avec les mêmes conditions citées pour la méthode P&O sont récapitulés dans les figures suivantes:

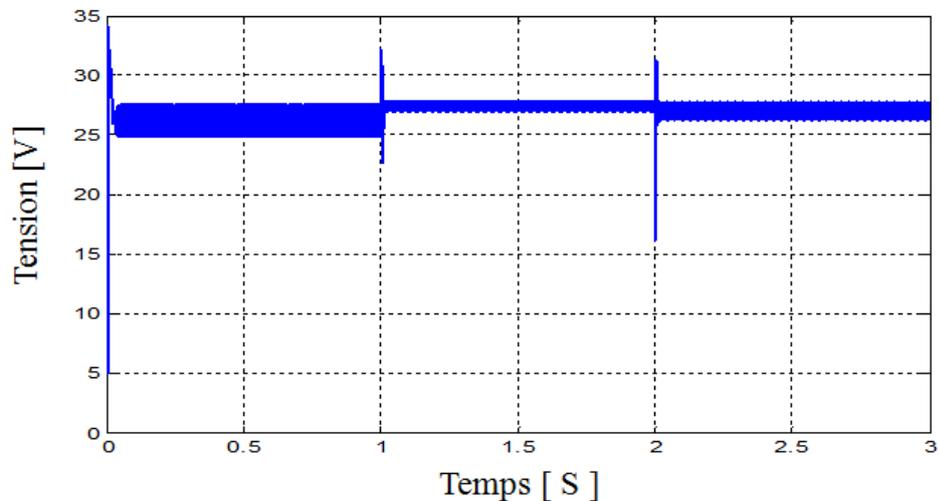


Fig. (III.15) : la variation de la tension de sortie

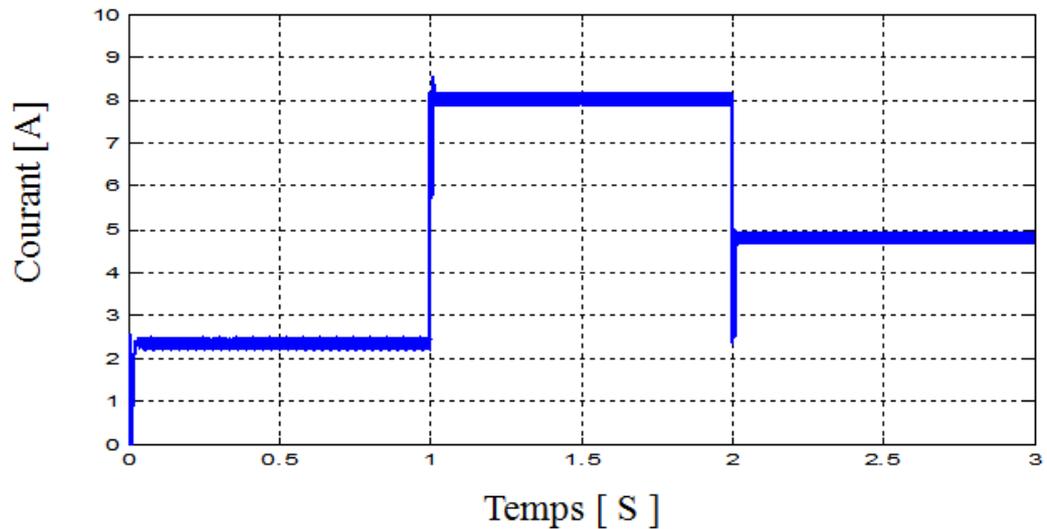


Fig. (III.16) : la variation du courant de sortie

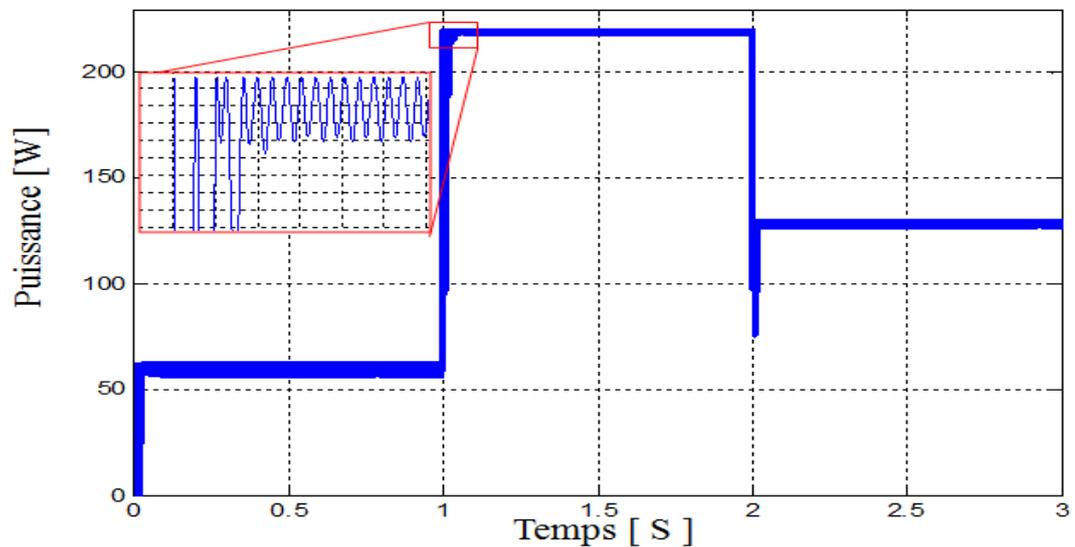


Fig. (III.17) : La Puissance de panneau solaire

L'implémentation de la méthode incrément de la conductance et le suivi du comportement des courbes de la puissance, du courant et de la tension, permet de dire qu'elle est similaire au comportement de la méthode de P&O et ces courbes sont en relation proportionnelle avec la courbe de rayonnement.

Dans les conditions standard (la valeur du rayonnement 1000 w/m^2), on note que la courbe de puissance prend 0,028 seconde pour faire dépasser le régime transitoire, la valeur de la puissance dans le régime permanent oscille entre 220,3 W et 218,5 W.

Par contre la méthode P&O prend 0,0295 seconde pour faire dépasser le régime transitoire, la valeur de la puissance dans le régime permanent oscille entre 220,3 W et 217,2 W.

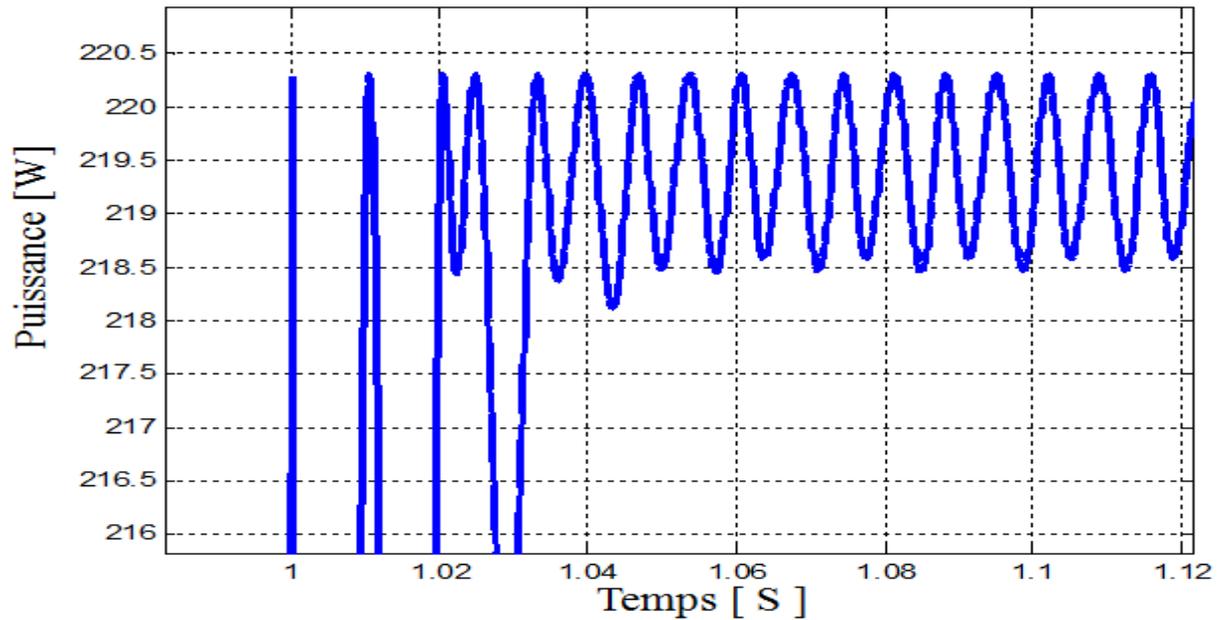


Fig. III.18 : La Puissance de panneau solaire (Vision local)

III.10. Conclusion

Ce chapitre est consacré à l'étude des techniques MPPT les plus populaires qui sont Perturbation et Observation (P&O) et incrément de la conductance (INC). Ces techniques de suivie de point à maximum de puissance (MPPT) sont utilisées dans les systèmes photovoltaïques pour extraire le maximum de puissance.

Dans le but de faire une étude comparative entre les méthodes classiques et les méthodes récentes qui se basent sur l'intelligence artificielle, on opte à l'application de la technique basée sur la logique floue ; qui sera traité dans le chapitre suivant.

Chapitre IV

Commande MPPT

Basée Sur

L'Approche Floue

IV.1. Introduction

Plusieurs applications industrielles nécessitent l'utilisation des méthodes modernes de contrôle, permettant d'avoir une réponse rapide et des performances dynamiques élevées. Parmi ces méthodes, on cite le réglage par la logique floue (RLF) laquelle est caractérisée par sa robustesse et son insensibilité à la variation des paramètres.

La logique Floue constitue aujourd'hui une approche alternative. Elle présente plusieurs avantages tels que le raisonnement proche de celui de l'homme .Sa capacité à contrôler des performances dynamique et ses qualités intéressantes de robustesse.

L'intelligence artificielle fait partie des techniques informatiques modernes qui recherchent des méthodes avancées pour effectuer le travail et aboutir à des conclusions similaires à celles de l'intelligence humaine.

L'utilisation de la logique floue s'est répandue dans de nombreux domaines, et le plus important le contrôle de certaines propriétés physiques telles que la température et la tension électrique, ainsi la commande des machines industrielle et optimisait leurs performances.

En vue d'examiner les améliorations que présente cette méthode floue, une étude comparative avec la méthode dite conventionnelle a été effectuée .Pour ce faire le système MPPT floue proposé est étudié par simulation en utilisant MATLAB/SIMULINK.

IV.2. Les principaux domaines de recherche et d'application de la logique floue

Parmi les domaines d'application de la logique floue, on peut citer:

- L'automatisation : Production de fer et de l'acier, purification de l'eau, chaînes et robots de fabrication ;
- L'instrumentation : Capteurs, instruments de mesure ;
- La conception/Jugement : Consultation, investissement et développement, horaires de train ;
- Les ordinateurs : Opérateurs, unités arithmétique micro-ordinateurs ;
- Le traitement d'information : Base de données, recherche d'information, modélisation de système [12].

IV.3.La commande MPPT basée sur la logique floue

Récemment, la commande par logique floue a été utilisée dans les systèmes de poursuite du point maximum de puissance MPPT, cette commande offre l'avantage d'être une commande robuste et relativement simple à élaborer et elle ne nécessite pas la connaissance

exacte du modèle à réguler. La mise en place d'un contrôleur flou se réalise en trois étapes, qui sont: la fuzzification, l'inférence et la défuzzification figure (IV.1).

Le principe d'une commande floue se base sur deux variables d'entrées qui sont l'erreur E et le changement d'erreur CE et une variable de sortie dD (variation du rapport cyclique)

La valeur de la variable de sortie qui pilote le convertisseur statique pour rechercher le PPM est déterminé à l'aide d'une table vérité et de l'évolution des paramètres d'entrée [21].

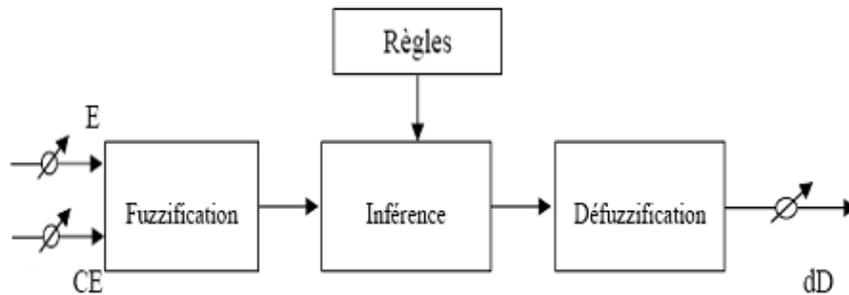


Fig. (IV.1) : Principe de la commande à logique floue.

IV.3.1. Fuzzification

La fuzzification permet de rendre flou les variable d'entrée. Une étape préliminaire consiste à définir un intervalle de variation maximale autorisée pour les variables d'entrées. Le but de la fuzzification est de transformer les variables d'entrée en variables linguistiques ou variables floues. Dans notre cas, on a deux variables d'entrées qui sont l'erreur $E(k)$ et la variation d'erreur CE à l'instant k qui sont définies comme suit : [21]

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

$$CE(k) = E(k) - E(k - 1) \quad (IV.2)$$

Où $P(k)$ et $V(k)$ sont respectivement la puissance et la tension du GPV.

- D'après l'entrée $E(k)$ on peut savoir si le point de fonctionnement de la charge est situé à gauche ou à droite du point de puissance maximale de la courbe puissance-tension, cette valeur joue un rôle de la réduction du temps de montée [12].

Donc :

- Si $E(k)$ est positif, le point de fonctionnement est à gauche du point de puissance maximale.
- Si $E(k)$ est négatif, le point de fonctionnement est à droite du point de puissance maximale.
- $E(k)$ est Zéro au point de puissance maximale.

- D'après l'entrée $CE(k)$ on peut déterminer la valeur de la variation de l'erreur de l'entrée du contrôleur flou qui représente la direction du point de fonctionnement. Cette valeur réduit le dépassement de la réponse du système. Dans ce cas, pour atteindre le point de puissance maximale on doit :
- Pousser vers la droite le point de fonctionnement qui se situe à gauche du point de puissance maximale, ce qui veut dire qu'on doit augmenter la tension.
 - Pousser vers la gauche le point de fonctionnement qui se situe à droite du point de puissance maximale, ce qui veut dire qu'on doit diminuer la tension.

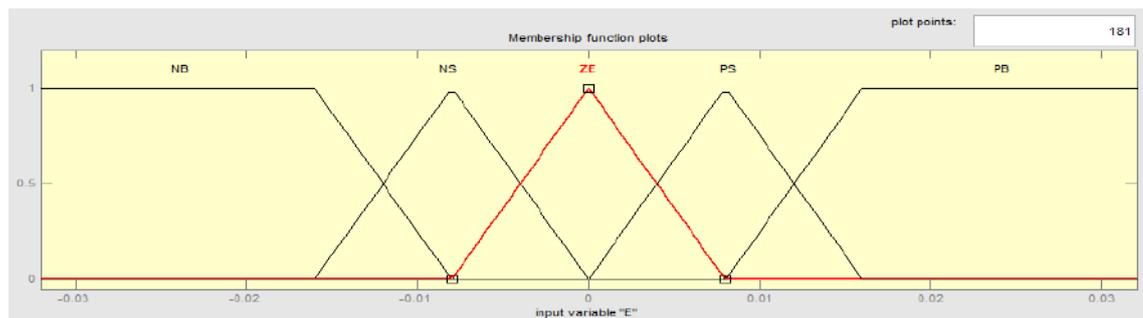
On signale que l'augmentation du rapport cyclique dD_{pv} provoque l'augmentation de la tension et vice versa.

En utilisant les bases des sous ensemble flou on peut exprimer les variables d'entrées et de sortie en termes de variable linguistique. Ainsi ses variables seront qualifiées :

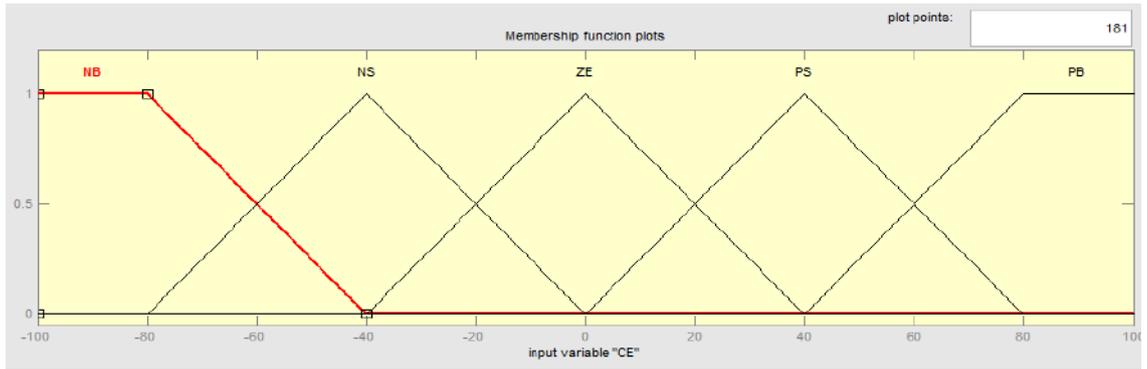
- Négatif Grand (NG).
- Négatif Petit (NP).
- Erreur nul ou bien zéro (EZ).
- Positif Petit (PP).
- Positif Grant (PG).

Donc, on choisit des variable linguistique pour savoir si le point de fonctionnement est loin ou proche du PPM, afin d'arriver le plus vite possible à ce point-là [21].

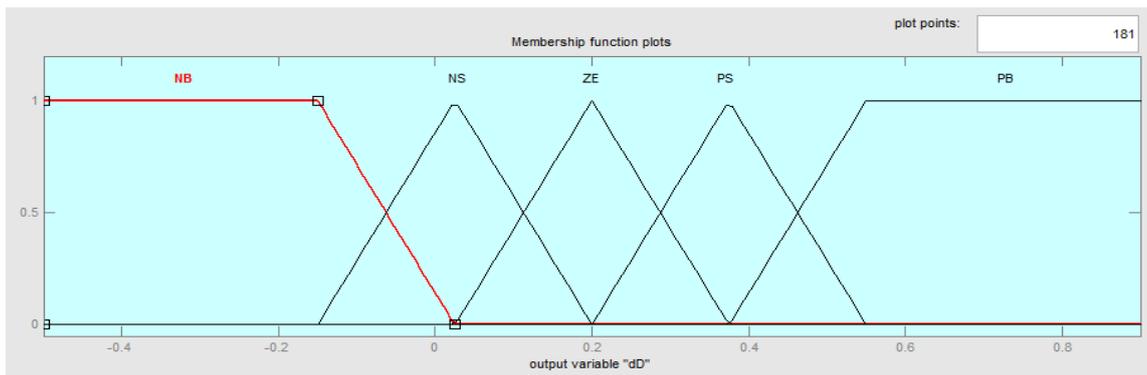
La figure (IV.2) montre les fonctions d'appartenances des 5 sous ensemble flous des variables d'entrées ainsi que la variable de sortie.



(a)



(b)



(c)

Fig. (IV.2) : Fonctions d'appartenances de :
(a) L'entrée E ; (b) L'entrée CE (c) ; La sortie dD .

IV.3.2.Méthode d'inférence

Un tableau d'inférence anti-diagonale classique est dressé grâce à l'étude de MacVicar-Whelon, ce système flou ayant des ensembles flous qui sont l'erreur E et le changement de l'erreur CE . La sortie de cette table de règles est le changement du rapport cyclique dD [21].

	CE	NG	NP	ZE	PP	PG
E						
NG		NG	NG	NP	NP	ZE
NP		NG	NP	NP	ZE	PP
ZE		NP	NP	ZE	PP	PP
PP		NP	ZE	PP	PP	PG
PG		ZE	PP	PP	PG	PG

Tableau. (IV.1) : Table de règles floues.

On utilise la méthode Mamdani comme une méthode floue (opération MAX-MIN).

On prend un exemple de règle d'après la table (IV.1) :

❖ Si E est PG et CE est ZE Alors dD alors set PP

Ce qui veut dire :

Si le point de fonctionnement est loin du point de puissance maximale PPM vers le côté gauche, et le changement de la pente de la courbe ($P_{PV} = f(V_{PV})$) est environ Zéro. Alors diminuer le rapport cyclique dD largement.

On a choisi la méthode Mamdani comme une méthode floue avec (opération MAX-MIN).

Elle consiste à utiliser l'opérateur MIN pour le ET et l'opérateur MAX pour le OU.

IV.3.3. Défuzzification

En fin, il nous faut réaliser l'opération inverse de la fuzzification, ici nous devons calculer une valeur numérique compréhensible par l'environnement extérieur à partir d'une définition floue est c'est le but de la défuzzification [22].

La défuzzification peut fonctionner selon deux algorithmes :

- La méthode du critère maximale MCM.
- La méthode du centre de gravité.

IV.3.3.1. La méthode du critère maximale MCM :

Cette stratégie génère une commande qui représente la valeur moyenne de toutes les actions de contrôle locales ayant des fonctions d'appartenance maximales.

IV.3.3.2. Méthode du centre de gravité

La méthode de défuzzification la plus utilisée est celle de la détermination du centre de gravité du dernier ensemble floue combiné, la dernier ensemble floue combiné est défini par l'union de tous les ensembles en utilisant la méthode d'agrégation maximale. Pour une représentation de données échantillonnées, le centre de gravité dD est calculé comme suit [23] :

$$dD = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(D_j) \cdot D_j}{\sum_{j=1}^n \mu(D_j)} \quad (\text{IV.3})$$

Les valeurs de sorties sont défuzzifiées et multipliées par le facteur d'échelle pour construire le signal de contrôle. Son rôle est réglé le contrôleur floue pour obtenir la poursuite du PPM.

IV.4. Résultats de simulation et interprétations de la méthode MPPT Floue

Nous supposons pour l'algorithme testé que la température ambiante est constante 25°C et que la tension du bus continu reste constante à 33.77 V . L'objectif est vérifier le comportement de l'algorithme de la commande floue en présence d'un changement de l'irradiation, et ainsi sa capacité à maintenir le fonctionnement au point de puissance maximale. Le teste est réalisé en appliquant les mêmes conditions citées dans le chapitre précédent. Les résultats trouvés sont illustrés dans les figures suivantes :

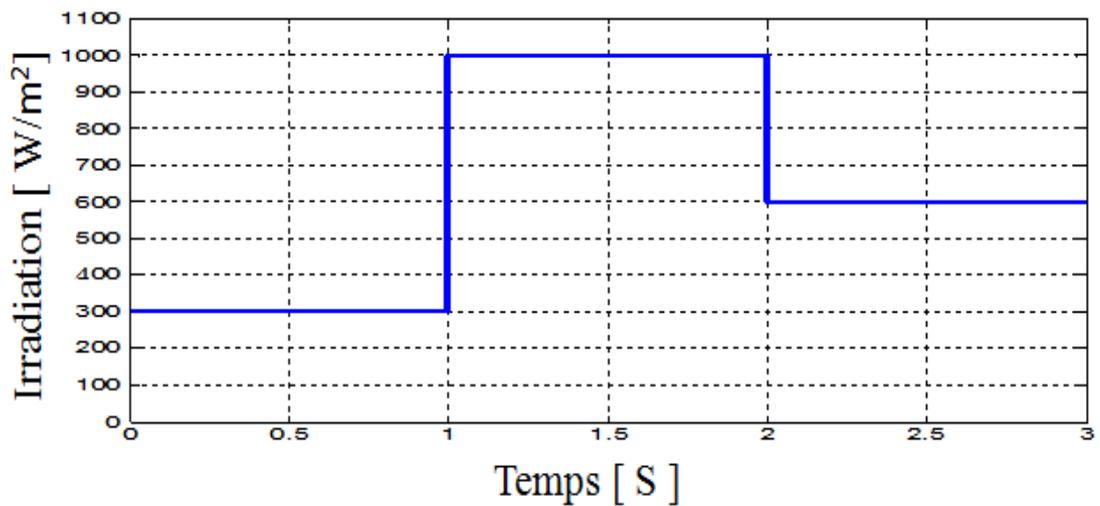


Fig. (IV.3):L'irradiation solaire.

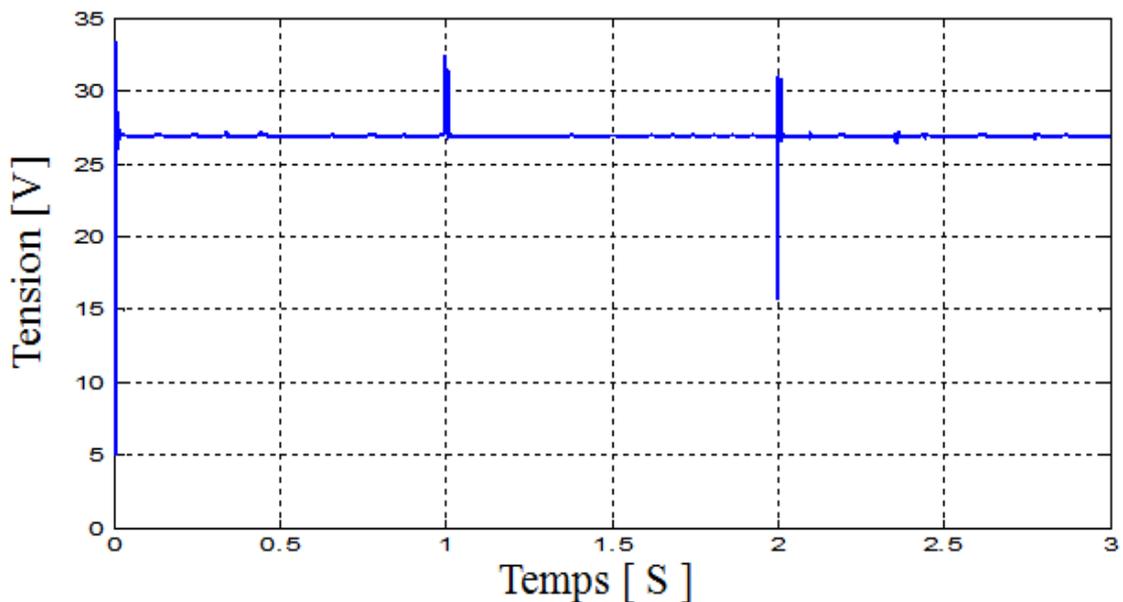


Fig. (IV.4): Variation de la tension PV de sortie.

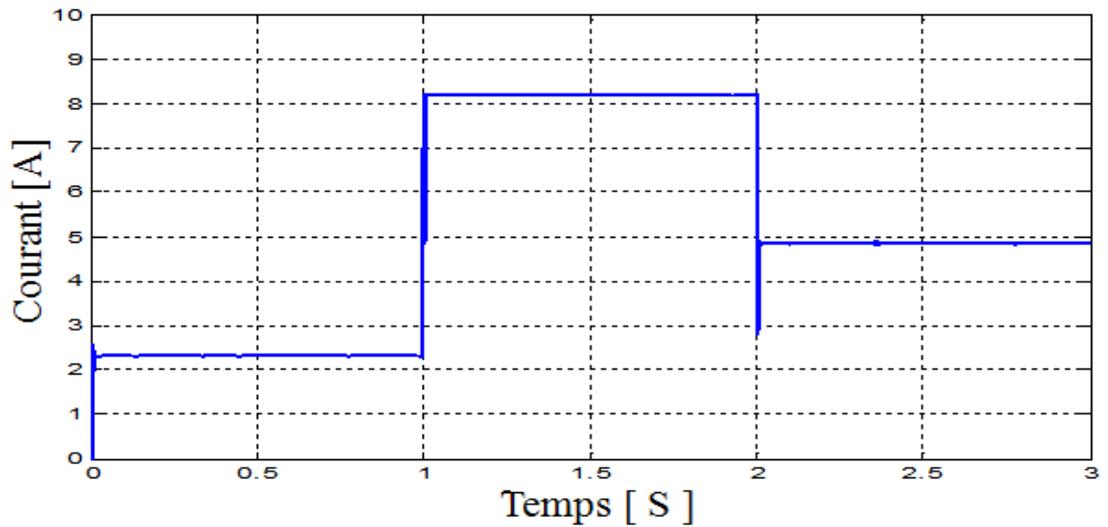


Fig. (IV.5):Variation du courant PV de sortie.

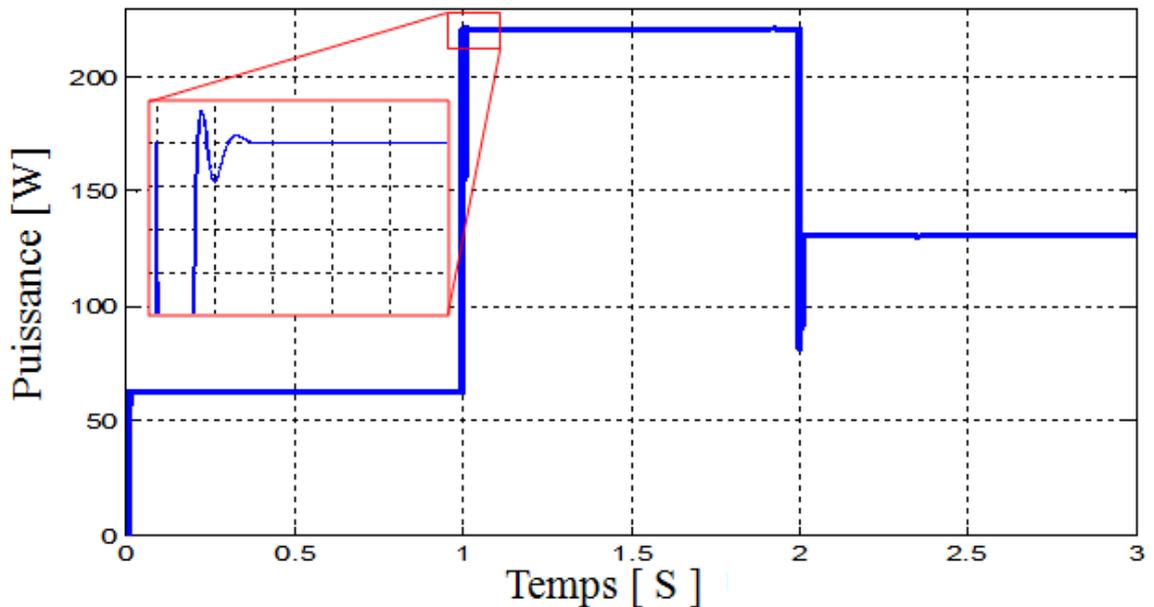


Fig. (IV.6):Puissance de sortie du panneau PV.

L'analyse des résultats trouvés ; nous a permet de conclure:

- Pour la tension de sortie figure (IV.4), on constate que cette dernière reste presque constant (27V valeur de tension optimale).
- Par contre, le courant de sortie du PV (figure (IV.5)) varie d'une manière importante avec l'irradiation solaire.
- Finalement ; pour la courbe de puissance ; la figure (IV.6) montre bien que l'algorithme Floue possède une bonne poursuite de la puissance de référence (220W) et une relation de proportionnalité entre cette dernière et l'éclairement.

D'après les résultats de simulation obtenus, on remarque l'absence des oscillations dans les courbes de la puissance ; de la tension et du courant dans le régime permanent avec un temps de réponse plus court.

IV.5. Etude comparative entre MPPT Floue et MPPT classiques (P&O, INC)

Pour montrer l'intérêt de la commande floue par rapport aux commandes classiques, une étude comparative a été faite (figure VI.7).

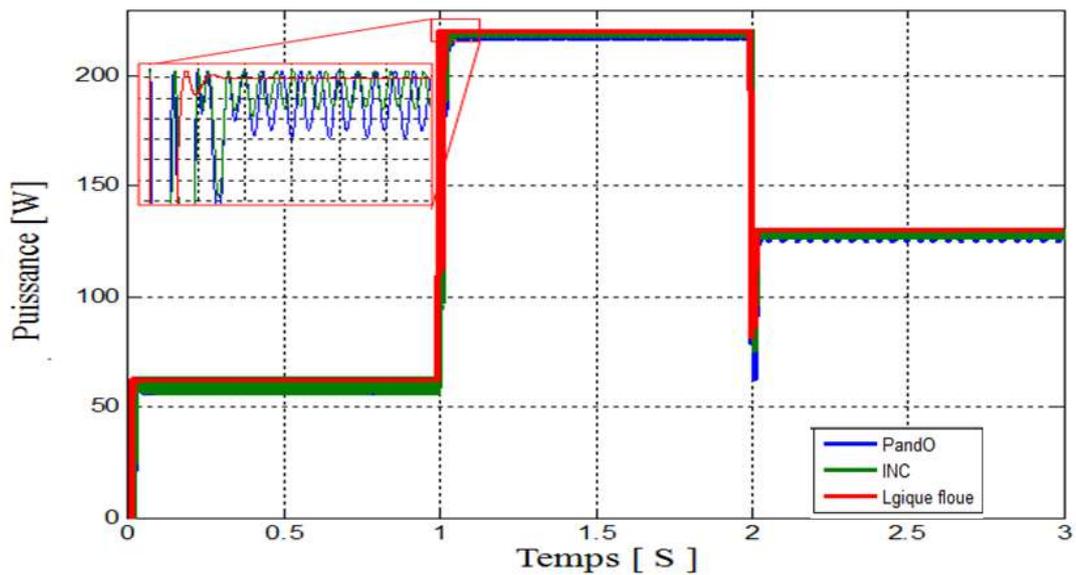


Fig. (IV.7) : MPPT avec les trois techniques utilisées

Dans le but de montrer l'efficacité de telle méthode, on a fait recourt au calcul de l'erreur relative (E), l'erreur quadratique moyenne (RMSE%) et le rendement (η) pour les trois méthodes utilisées dans la détermination de la MPPT.

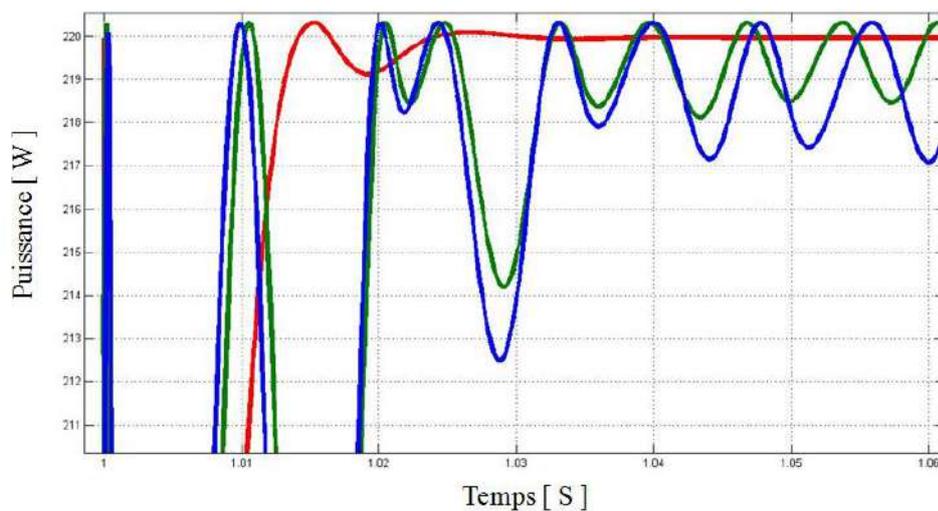


Fig. (IV.8) : MPPT avec les trois techniques utilisées (vision locale)

On détermine les valeurs de l'Erreur, RMSE%, η à partir les relations suivantes [19]:

$$Erreur = \frac{\sum (la\ puissance\ theorique - la\ puissance\ calculé)}{\sum la\ puissance\ theorique} \quad (IV.4)$$

$$RMSE(\%) = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum (la\ puissance\ theorique - la\ puissance\ calculé)^2}}{\frac{1}{n} \sum la\ puissance\ theorique} \quad (IV.5)$$

$$\eta = \frac{\frac{1}{n} \sum la\ puissance\ calculé}{\frac{1}{n} \sum la\ puissance\ theorique} \quad (IV.6)$$

Les résultats obtenus sont regroupées dans le tableau (IV.2)

Méthode	Erreur	RMSE(%)	η
P&O	0.0178	0.0144	0.971
INC	0.01686	0.0110	0.978
Logique Floue	0.00325	0.00034	0.9938

Tableau. (IV.2) : Tableau de comparaison des performances des trois techniques appliquées

En analysant le tableau ; on remarque que l'algorithme floue montre de meilleures performances par rapport aux méthodes (P&o et INC) ; ceci s'explique par les faibles valeurs de l'erreur et un rendement de 99.38%.

Le coût de la mise en œuvre matérielle des algorithmes varie en fonction des besoins de l'utilisateur (numérique ou analogique, avec ou sans système d'enregistrement des données, taille de l'installation PV et conditions de fonctionnement, etc.).

Le tableau IV.3 résume les principales spécifications des différents algorithmes MPPT précédemment étudiés. Nous avons évalué et comparé ces algorithmes en termes de connaissance technique des paramètres du panneau PV, complexité, rapidité et précision [12].

Algo. MPPT	Type de capteur	Identification des paramètres de panneau PV	Complexité	Vitesse de convergence
P & O	Tension Courant	Non nécessaire	Basse	Moyenne
INC	Tension Courant	Non nécessaire	Moyenne	Moyenne
LF	Courant	Oui nécessaire	Haute	Très rapide

Tableau. (IV.3) : Comparaison des techniques MPPT

IV.6.Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté brièvement la logique floue, appliqué dans la poursuite de la MPPT d'un générateur solaire.

- Cette méthode a donné des résultats plus précis dans un temps de réponse court.
- MPPT basée sur la logique floue est plus adaptatif au changement brusque du rayonnement solaire.

En se basant sur les résultats trouvés, on peut conclure que la technique MPPT basée sur la logique floue est meilleure que les deux autres techniques classiques P&O et INC.

*Conclusion
Générale*

Conclusion Générale

L'énergie solaire est considérée comme l'énergie de l'avenir. L'exploitation de cette énergie se fait par des générateurs solaires qui transforment l'énergie venant du soleil en énergie électrique.

L'énergie électrique produite par des panneaux solaires est caractérisée par un certain point de fonctionnement où la puissance générée est maximale. Ce générateur solaire est soumis aux conditions atmosphériques y compris le rayonnement solaire et la température qui influe sur la position du point de fonctionnement du générateur. Par conséquent, il existe un mécanisme indispensable dans les systèmes de l'énergie solaire permettant de suivre le point de puissance maximale. Ce mécanisme de suivi est une unité de contrôle qui suit le comportement du générateur photovoltaïque, en conséquence, il génère un signal pour commander l'hacheur intercalé entre le générateur photovoltaïque et la charge, afin d'améliorer le comportement et d'optimiser le rendement du générateur solaire.

Le présent travail est une tentative pour étudier et discuter différents types de techniques MPPT. Les techniques MPPT les plus populaires sont étudiées, telles que: Perturbation et Observation et Incrémentation de la Conductance ainsi qu'une technique récente: le contrôle à base de la logique floue.

La méthode Perturbation et Observation (P&O) a été utilisée dans ce travail à cause de sa simplicité, mais elle présente quelques problèmes tels que :

- Le choix de la période d'échantillonnage
- Le Problème de dérivation du vrai point MPPT lors d'une augmentation brusque de l'ensoleillement, ce qui cause des pertes de puissance.

L'incrément de conductance est la deuxième technique utilisée dans la détermination de la MPPT. Les résultats de la simulation ont montré que l'algorithme INC est plus précis et son temps de réponse est très court que l'algorithme P&O.

On a introduit un étage d'adaptation, un convertisseur de type "élevateur" boost qui nous a permis d'augmenter la tension de sortie de GPV pour l'extraction de la puissance maximale sous différentes conditions de fonctionnement.

Finalement, On a implémenté la logique floue, pour commander le point de puissance maximale d'un système photovoltaïque, qui se base sur l'expérience de l'opérateur. Cette technique a donné de très bonnes performances telles que l'amélioration de la réponse du système photovoltaïque, elle réduit non seulement le temps de réponse dans le suivi du point de puissance maximale ; mais elle a aussi éliminé les fluctuations autour de ce point. Ce qui montre l'efficacité de ce contrôleur floue pour les systèmes photovoltaïques dans des

Conclusion Générale

conditions d'environnement stables et instables (Ou la température et l'éclairement varient au cours du temps). Les résultats obtenus pour la conversion d'énergie prouvent qu'avec le contrôleur MPPT flou, il y a une existence d'un compromis entre rapidité en transitoire et stabilité en régime permanent.

Comme perspectives, on propose l'approche de certains points tels que :

L'application de d'autres techniques basées sur les méthodes d'optimisations

- Algorithmes génétiques;
- PSO;
- Recuit simulé;
- on recommande une réalisation pratique de ce contrôleur flou.

Références et bibliographiques

- [1] **C.Cabal**, "Optimisation Energétique De L'étage D'adaptation Electronique Dédie A La Conversion Photovoltaïque", Université De Toulouse, 2003.
- [2] **Trishanesram, Patridl ET L.Chapman**, "Comparison Of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking", Ieee, 2007.
- [3] **G.F.Tchokcth**, "Commande Des Hacheurs Mppt Par La Logique Floue", Memoire De Magister, Enp, 2006.
- [4] **M. E.Elhawary**, "Electric Power Application Of Fuzzy Systems", Ieee Press, 1998.
- [5] **Belhadj Mohammed**, "Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome ", Centre Universitaire De Bechar, Institut Des Sciences Exactes.
- [6] **Salaheddine Mansour**, " Etude De Dimensionnement Optimal D'une Station Solaire Autonome En Site Isole ", Mémoire De Master, Université De Tlemcen, Année Universitaire 2013-2014.
- [7] [Http://Www.Energy.Gov.Dz/Francais/Index.Php?Page=Potentiels](http://Www.Energy.Gov.Dz/Francais/Index.Php?Page=Potentiels).
- [8] **Clarence Semassou**, "Aide A La Décision Pour Le Choix De Sites Et Systèmes Energétiques Adaptes Aux Besoins Du Benin", Mémoire De Doctorat, Ecole Doctorale De L'université Bordeaux, 1 Ed209-2011.
- [9] **Arslane M**, " Energie Renouvelable ", Université De Msila, 2018/2019.
- [10] **Aoun Nouar**, " Etude Et Modélisation Des Différents Modèles De La Cellule Photovoltaïque Etablis Sur Base De Valeurs Nominales ", Mémoire De Magister, Universite Mentouri, Constantine, 2010.
- [11] **Bouziane Afaf**, "Evaluation Du Rayonnement Solaire En Algérie Pour Des Applications Photovoltaïques ", Mémoire De Master, Université Mohamed Boudiaf, Msila, 2017/2018.
- [12] **Abid Abderahmane**, "Application De La Logique Floue Pour La Poursuite De Point De Puissance Maximale D'un Système Photovoltaïque", Mémoire De Master, Universite Kasdi Merbah, Ouargla, 2014/2015.
- [13] **Djeriou Salim**, "Simulation D'un Système Photovoltaïque Alimentant Une Machine Asynchrone", Mémoire De Magister, Université Ferhat Abbas, Setif, 2011.
- [14] **Mohammed Bilal Danoune, Ahmed Djafour, Abdelmoumen Gougui, Narimane Khelfaoui, Halima Boutli**, "caractérisation de panneaux photovoltaïques utilisant diode unique et les modèles à double diode une étude comparative avec Validation expérimentale", Le 5ème Séminaire international sur les énergies nouvelles et renouvelables, Ghardaïa, Algérie, 24-25,2018 octobre.
- [15] **Bensalah Belqassim Et Filali Mohammed**, " Etude Et Réalisation D'un Circuit De Commande Avec MPPT D'un Hacheur Pour Système Photovoltaïque ", Mémoire De Master, Université De Tlemcen, 2014/2015.
- [16] **Zenakhi Asma**, "Etude Par Simulation Du Fonctionnement D'un Système Photovoltaïque Menu D'une Commande MPPT ", Mémoire de Master, Université AbouBekr belkaïd , Tlemcen, 2016.
- [17] **F.Tazerart Et R.Abdelli**, "Gestion D'un Système Photovoltaïque Avec Stockage", Mémoire De Master, Université Abdelrahmane Mira, Bejaïa, 2015/2016.

- [18] **M.Bilal Danoune**, Ahmed Djafour, A.Gougui, N.Khelfaoui, H.Boutelli, "Study And Performance Analysis Of Three Conventional Mppt Algorithms Used In Photovoltaic Applications", International Conference On Communications And Electrical Engineering Iccce'18 El Oued (Algeria), December 18-19, 2018.
- [19] **Sedrati Youcef** et **Nouar Hatem**, "Implémentation De L'algorithm P&O Pour Un Système Photovoltaïque", Mémoire De Master, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2015/2016.
- [20] **N. Aouchiche, M.S. Aït Cheikh** Et **A. Malek** " Poursuite Du Point De Puissance Maximale D'un Système Photovoltaïque Par Les Méthodes De L'incrémentation De Conductance Et La Perturbation & Observation ", Article, Centre De Développement Des Energies Renouvelables, Cder B.P. 62, Algiers.
- [21] **Tahar Laamayad**, "Intelligence Artificielle", Cours E-Learn, Université Kasdi Merbah, Ouargla.
- [22] **Y.Lasmi**, " Optimisation De La Poursuite Du Point De Puissance Maximale (MPPT) D'un Système Photovoltaïque Par Les Techniques Intelligents", Mémoire De Magister Université De Setif, 2013.
- [23] **Zerguine Bilal**, "Modélisation Système De Production Electrique Par La Cellule Photovoltaïque", Mémoire De Magister, Université Badji Mokhtar, Annaba, Année 2010.

الملخص

يتكون نظام توليد الكهرباء بالطاقة الشمسية من وحدات أساسية وهي كالتالي (اللوح الشمسي, المحول و وحدة تحكم في المحول), يتأثر إنتاج اللوح الشمسي بالاضطرابات التي تحدث لشدة الإشعاع ودرجة الحرارة. ومن اجل استغلال الطاقة القصوى المنتجة من طرف اللوح الشمسي يتم الاستعانة بخوارزميات تعمل على تتبع النقطة العظمى للاستطاعة و لتصدر إشارات تحكم للمحول لمقاربة نقطة التشغيل بالنقطة العظمى. يهدف هذا العمل إلى دراسة ثلاث خوارزميات تعمل على تتبع النقطة العظمى للاستطاعة وهي الارتياح والمراقبة: الزيادة في الناقلية. تقنية تعتمد على المنطق الضبابي. تتم نمذجة نظام التوليد بالطاقة الشمسية باستعمال برنامج المحاكاة SIMULINK/ MATLAB.

الكلمات المفتاحية: الإشعاع الشمسي, درجة الحرارة, اللوح الشمسي, المحول, النقطة العظمى للاستطاعة, الارتياح والمراقبة, الزيادة في الناقلية, المنطق الضبابية, النمذجة, المحاكاة

Résumé

Le système de production d'énergie solaire est composé des unités principales suivantes: (panneau solaire, convertisseur et contrôleur du convertisseur). La production du panneau solaire est affectée par les perturbations du rayonnement et de la température. Pour exploiter le maximum d'énergie produite par le panneau solaire, des techniques sont utilisées, pour suivre le point de puissance maximale. Le but de ce travail est d'étudier trois techniques de poursuite du point de puissance maximale, perturbation et observation, incrémentation de la conductance et une technique basée sur la logique floue. Le système du générateur solaire est modélisé à l'aide du simulateur MATLAB / SIMULINK.

Mots-clés: panneau solaire; convertisseur; rayonnement; température; point de puissance maximal; perturbation et observation; incrémentation de la conductance; la logique floue; modélisation; simulation.

Abstract

The solar power generation system consists of the following main units: (solar panel, converter and converter controller). The production of the solar panel is affected by the disturbances of radiation and temperature. To exploit the maximum energy produced by the solar panel, techniques are used to follow the point of maximum power. The purpose of this work is to study three techniques of tracking the point of maximum power, perturbation and

observation, incrementation of conductance and a technique based on fuzzy logic. The solar generator system is modeled using the MATLAB / SIMULINK simulator.

Keywords: converter; irradiation; temperature; the point of maximum power; Perturbation and observation; incrementation of conductance; fuzzy logic; modelization; simulation.