

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Boudiaf -Msila

Faculté de Technologie

Département : Génie Electrique



جامعة محمد بوضياف - المسيلة

كلية التكنولوجيا

قسم : الهندسة الكهربائية

Réf :

**Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de
Master en Électrotechnique**

Option : Réseaux électriques

Présentés par :

BENAOUIRA Haider & SENOUCI Khawla

Thème :

**Modélisation et commande d'un système
photovoltaïque (étude comparative P&O et PID)**

Devant le jury composé de:

Dr. Khaled BELHOUCHET

Président

Université de Msila

Dr. Abderrahim ZEMMIT

Encadreur

Université de Msila

Pr. Sabir MESSALTI

Co-encadreur

Université de Msila

Dr. Salim DJERIOU

Examinateur

Université de Msila

Année Universitaire: 2023/2024

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِيْمِ



Remerciement

Tout d'abord, nous voudrions remercier Dieu tout-puissant, qui nous a donné la force et la patience de faire et de compléter notre humble travail.

Deuxièmement, nous tenons à exprimer notre sincère respect et notre appréciation aux **professeurs Messalti Sabir et Dr.Abderrahim**

ZEMMIT

, en raison de leurs précieux conseils et de leur aide tout au long de la période de travail.

Nous remercions également le jury de l'intérêt qu'il porte à nos recherches en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir de leurs propositions.

Nous remercions également tout le personnel de gestion de la Faculté des sciences et technologie de l'Université Mohammad Boudiaf -M'sila.

Enfin, nous aimerais également remercier tous ceux qui ont contribué à ce travail de près ou de loin.

Haider & Khawla



Dédicace

Tout d'abord, je remercie Dieu Tout-Puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de faire ce travail malgré toutes les difficultés que j'ai rencontrées, sauf que le chemin de Dieu est bon.

A ma chère mère : **Aïcha**, pour les sacrifices de mon enfance jusqu'à aujourd'hui ;

A mon cher père : **saleh**, qui m'a toujours soutenu et aidé à affronter les difficultés et qui a toujours été et continue d'être un exemple pour moi.

À mes sœurs **Amina** et **Bouthayna** pour avoir été un refuge et un sanctuaire des préoccupations et des problèmes de la vie

À toute ma famille, **Benaouira** et **Berrah** ;

A tous mes frères qui ne sont pas nés de ma mère **Habib** ; **Rayan** ; **Riyadh** **Lina** ; **Haythem** ; **Abbad** ; **Chourouk** ; **Isra** ; **Nour** ; **Choukri** pour les soutenir et leur bonne et agréable compagnie dans la vie

Ma collègue dans cette recherche **Khawla**.

Pour tous les enseignants du département de génie électrique ;

A ma promotion de Master Électrotechnique (juin 2024)

A tous les étudiants.

Haider



Dédicace

Tout d'abord, je remercie Dieu Tout-Puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de faire ce travail malgré toutes les difficultés que j'ai rencontrées, sauf que le chemin de Dieu est bon.

A ma chère mère : **Mounira**, pour les sacrifices de mon enfance jusqu'à aujourd'hui,

A mon cher père : **Messaoud**, qui m'a toujours soutenu et aidé à affronter les difficultés et qui a toujours été et continue d'être un exemple pour moi,

A mes chers frères et sœurs,

À toute ma famille,

A ma chère amie **Saoti Safa** pour le soutenir et lui bonne et agréable compagnie dans la vie,

Mon collègue dans cette recherche **Haider**.

Pour tous les enseignants du département de génie électrique,

A ma promotion de Master Électrotechnique (juin 2024)

A tous les étudiants.

Khawla

Table des Matières

Introduction générale.....	01
Chapitre I : Système photovoltaïques	
I.1 Introduction	04
I.2.la cellule photovoltaïque	04
I.2.1.Historique	04
I.2.2.Constitution de la cellule photovoltaïque	05
I.2.3. Principe de fonctionnement	05
I.3. Les différents types des cellules photovoltaïques	06
I.4 Association des modules photovoltaïques	07
I.5.Le module photovoltaïque.....	08
I.6.Caractéristiques d'un module	09
I.7. Influence de l'éclairement	10
I.8. Influence de la Température.....	11
I.9 Les différents types des systèmes photovoltaïques	12
I.10 Avantages et inconvénients d'énergie photovoltaïque.....	14
I.11 Le Potentiel Solaire en Algérie.....	14
I.12 conclusion.....	15
Chapitre II : Modélisation D'un System Photovoltaïques	
II.1Introduction	17
II.2.Générateur Photovoltaïque GPV	17
II.2.1 Modélisation D'un Cellule Photovoltaïque	18
II.2.2Caractéristique D'une Cellule Photovoltaïque	19
II.2.3Groupement de Cellules Photovoltaïques	20
II.2.3.1Association De Cellules Photovoltaïques En Série.....	20
II.2.3.2Association de Cellules Photovoltaïques en Parallèle.....	21
II.2.4Protections D'un Générateur	22
II.2.5Modélisation D'un panneau	23
II.2.6 Caractéristique D'un panneau PV.....	26
II.2.7Influence De La Température Et L'ensoleillement Sur Le GPV	27
II.2.7.1Influence De L'ensoleillement.....	27
II.2.7.2Influence de la température	28

II.3 Les Principes de Conversion dans les Systèmes PV	30
II.3.1 Étage d'Adaptation entre un Générateur PV et une Charge.....	30
II.3.2 Convertisseur DC/DC	31
II.3.3Étage d'Adaptation de Type BOOST	32
II.3.4Modèle mathématique équivalent	33
II.3.5Modèle approximé du convertisseur Boost	33
II.4 Conclusion	34
Chapitre III : IMPLEMENTATION SUR MATLAB ET RESULTATS DE SIMULATION	
III.1.Introduction.....	37
III.2Principe De La Commande MPPT	37
III.3 Classification Des Commandes MPPT	38
III.3.1Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche.....	39
III.4 Les Algorithmes MPPT	40
III.4.1Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe).....	40
III.4.2ConductanceIncrémentale.....	44
III.4.3Autres Méthodes.....	46
III.5 Simulation du système photovoltaïque.....	47
III.5.1 L'algorithme perturbation et observation (P&O).....	47
III.6 Amélioration l'algorithme perturbation et observation (P&O)	52
III.7 Comparaison des résultats des techniques de commande (PID, P&O)	55
III.8 Conclusion	56
Conclusion générale	58
Références Bibliographiques	59
Résume	

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Schéma d'une cellule élémentaire.

Figure I .2: Cellule en silicium monocristallin.

Figure I. 3 : Cellule en silicium poly cristallin.

Figure I .4 : Cellule silicium amorphe.

Figure I .5 : Association des modules photovoltaïques.

Figure I .6 : Un module photovoltaïque.

Figure I -7 : Caractéristique P-V du module PV selon l'éclairement.

Figure I -8 : Caractéristique I-V du module PV selon L'éclairement.

Figure I .9 : Caractéristique P-V du modulePV selon la Température.

Figure I .10 : Caractéristique I-V du module PV selon la Température.

Figure I.11 : Structure d'un système PV autonome.

Figure I.12 : Structure d'un système photovoltaïque connecté au réseau.

Figure I.13 : Structure d'un système hybride.

Chapitre II

Figure II.1 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.

Figure II.2 : Composants d'un GPV.

Figure II.3 : Schéma équivalent de le cellule PV.

Figure.II.4 : Caractéristique P-V d'une cellule.

Figure.II.5 : Caractéristique I-V d'une cellule.

Figure.II.6 : Caractéristique I-V de 2 cellules photovoltaïques raccordées en série.

Figure.II.7 : Caractéristique I-V de 2 cellules photovoltaïques raccordées en parallèle.

Figure.II.8 : Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour.

Figure.II.9 : Caractéristique P/V d'un panneau PV.

Figure.II.10 : Caractéristique I/V d'un panneau PV.

Figure.II.11 : Caractéristique P/V d'un panneau PV pour une température constante de 25°C et un rayonnement variable.

Figure.II.12 : Caractéristique I/V d'un panneau PV Pour une Température constante de 25°C et un rayonnement variable.

Figure.II.13 : Caractéristique P/V d'un panneau PV Pour un rayonnement constant de 1000W/m^2 et une température variable.

Figure.II.14 : Caractéristique I/V d'un panneau PV.

Figure.II.15 : Etage d'adaptation entre un GPV et une charge.

Figure.II.16 : convertisseurs DC-DC.

Figure.II.17 : Exemple de convertisseur statique DC-DC.

Figure II.18 : Allure des variables dynamiques I_L .

Chapitre III

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

Figure III.2 : Principe de la commande MPPT.

Figure III.3 : Recherche du PPM par la méthode (P&O).

Figure III.4 : l'algorithme de P&O classique.

Figure III.5 : Divergence de la méthode P&O.

Figure III.6 : caractéristique de tension-puissance du panneau.

Figure III.7 : l'algorithme IncCond classique.

Figure III.8 : Schéma bloc SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT (P&O).

Figure III.9 : Schéma de simulation de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P&O).

Figure III.10 : Allure de la puissance en fonction de temps pour ($T=25^\circ\text{C}, G=1000\text{W/m}^2$).

Figure III.11 : Allure de la puissance en fonction de tension pour ($T=25^\circ\text{C}, G=1000\text{W/m}^2$).

Figure III.12 : Allure de courant en fonction de la tension ($T=25^\circ\text{C}, G=1000\text{W/m}^2$).

Figure III.13 : Allure de la tension généré en utilisent pas variable en fonction de temps ($T=25^\circ\text{C}, G=500, 800, 1000 \text{ W/m}^2$).

Figure III.14 : Allure de la puissance généré en utilisent pas variable en fonction de temps ($T=25^\circ\text{C}, G=500, 800, 1000 \text{ W/m}^2$).

Figure III.15 : Allure de la puissance en fonction de la tension ($T=25^\circ\text{C}, G=500, 800, 1000 \text{ W/m}^2$).

Figure III.16 : Allure de courant en fonction de la tension ($T=25^\circ\text{C}, G=500, 800, 1000 \text{ W/m}^2$).

Figure III.17 : Schéma de simulation de le régulateur PID.

Figure III.18 : Allure de la puissance généré en utilisent le PID en fonction de temps ($T=25^\circ\text{C}, G=1000\text{W/m}^2$).

Figure III.19 : Allure de comparaison entre la puissance généré en utilisent pas variable et pas fixe en fonction detemps($T=25^\circ\text{C}, G=1000\text{W/m}^2$).

Figure III.20 : Allure de la puissance générée en utilisant le PID en fonction de temps ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=500, 800, 1000 \text{W/m}^2$).

Figure III.21 : Allure de comparaison entre la puissance générée en utilisant pas variable et pas fixe en fonction de temps ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=500, 800, 1000 \text{W/m}^2$), a) Zoom 1, b) Zoom 2.

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie.

Chapitre II

Tableau II.1 : Caractéristiques du module BP SX 150

Tableau II.2 : Caractéristiques électriques du module photovoltaïque BP SX 150.

Tableau II.3 : Complexité de chaque type de convertisseur DC-DC.

Introduction générale

La croissance démographique et l'évolution technologique ont conduit à une augmentation de la demande énergétique, notamment dans le secteur de l'électricité, ces dernières années. Cependant, de nombreuses régions rurales et éloignées, surtout dans les pays en développement, demeurent privées d'accès à l'électricité. Ainsi, pour remédier à ces problèmes, il est impératif d'accroître la production d'électricité.

De plus, une part significative de la production mondiale d'électricité provient de sources d'énergie fossile, mais celles-ci ne pourront pas satisfaire les besoins énergétiques futurs en raison de leurs implications économiques et environnementales. Par conséquent, de nombreux pays se tournent vers les énergies renouvelables telles que les biocarburants, l'énergie éolienne, l'énergie photovoltaïque, les concentrateurs solaires, l'hydroélectricité, la géothermie, l'énergie marémotrice et celle des vagues pour réduire l'exploitation des combustibles fossiles polluants. Les énergies renouvelables sont devenues des alternatives efficaces, mais des défis subsistent, notamment des coûts d'investissement élevés et une sécurité d'approvisionnement limitée en raison de leur caractère intermittent.

Afin de relever ces défis, une nouvelle approche consistant à utiliser des systèmes multi-sources émerge, combinant des sources d'énergie renouvelables et traditionnelles, ainsi que le stockage d'énergie pour répondre à la demande énergétique à la fois connectée au réseau et autonome. L'énergie demeure une préoccupation majeure dans le monde contemporain, et son utilisation future est une question cruciale à résoudre.

Cependant, les énergies renouvelables, telles que l'énergie solaire, marine et éolienne, gagnent en importance en raison de la diminution des réserves mondiales d'hydrocarbures fossiles, de la demande énergétique croissante et des préoccupations environnementales.

L'énergie solaire photovoltaïque est particulièrement prometteuse, permettant de convertir directement le rayonnement électromagnétique en électricité grâce à l'effet photovoltaïque.

Les techniques de recherche du point de puissance maximale (MPPT) peuvent améliorer l'efficacité des systèmes photovoltaïques.

Cette mémoire comporte quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les généralités sur les systèmes photovoltaïques, la construction des cellules photovoltaïques et l'effet photovoltaïque.

Dans le deuxième chapitre, on va étudier la Modélisation d'un système photovoltaïque , Dans le troisième chapitre, nous avons étudié la Simulation et analyse de MPPT par la commande (P&O) d'un système photovoltaïque.

En fin, une conclusion générale couronne ce mémoire pour récapituler nos analyses, nos résultats et nos commentaires.

Chapitre I

Système photovoltaïque

I.1 Introduction

Le soleil représente une source d'énergie pratiquement illimitée, capable de répondre plusieurs milliers de fois à notre demande énergétique mondiale [1]. C'est pourquoi l'humanité s'efforce depuis longtemps d'exploiter cette ressource abondante, répartie sur l'ensemble de la planète, et elle a réussi à atteindre cet objectif grâce à ce que l'on appelle les cellules photovoltaïques.

Le terme "photovoltaïque" trouve son origine dans le grec, se composant de deux éléments :

- "Photos" : Lumière.
- "Volt" : Unité de tension électrique, en l'honneur d'Alessandro Volta.

Ce phénomène a été découvert au 19ème siècle par le physicien Alexandre Edmond Becquerel.

La première cellule photovoltaïque a été développée au début de l'année 1954 pour alimenter en énergie les satellites. Depuis 1958, ces cellules fournissent exclusivement l'énergie aux systèmes des satellites, avant de trouver leurs premières applications terrestres au début des années 70. Le photovoltaïque a été utilisé pour alimenter en énergie de petites habitations isolées ainsi que des équipements de télécommunications.[2]

I.2 la cellule photovoltaïque

I.2.1.Historique

Il est important de citer les dates les plus importantes dans l'histoire du photovoltaïque qui Noté **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 énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000km en Australie.

I.2.2. Constitution de la cellule photovoltaïque

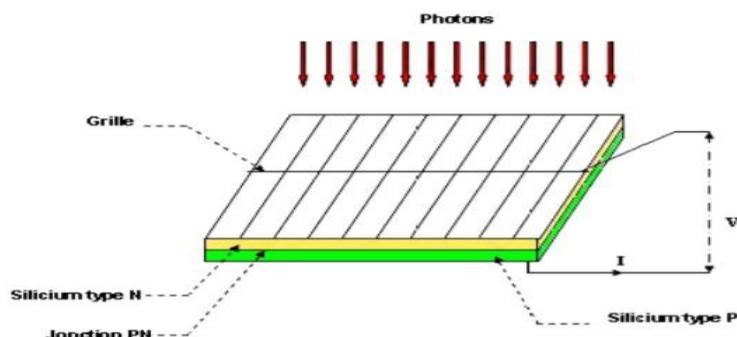
Une cellule solaire photovoltaïque est une plaquette de silicium (semi-conducteur), capable de convertir directement la lumière en électricité. Cet effet est appelé l'effet photovoltaïque. Le courant obtenu est un courant continu et la valeur de la tension obtenue est de l'ordre de 0,5 V. [4]

I.2.3. Principe de fonctionnement

Une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteur qui sont dopées différemment, Figure (I.1). Pour la couche N, c'est un apport d'électrons périphériques et pour La couche P c'est un déficit d'électrons, les deux couches présent ainsi une différence de potentiel.

L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N) leur permet De franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique Continu. Pour effectuer la Collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie Sur les deux couches du semi-Conducteur. L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux. Une Couche anti reflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la Quantité de lumière

Absorbée. [3], [4]



FigureI.1 : Schéma d'une cellule élémentaire.

I.3.Les différents types des cellules photovoltaïques

Il existe trois types principaux des cellules :

a) monocristallin

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme. C'est le matériau le plus répandu, présentant un bon rendement à fort et moyen éclairement (de 12 à 18% voir jusqu'à 24.7% en laboratoire). Cependant, elles coûtent trop chers due à leur fabrication complexe [5].

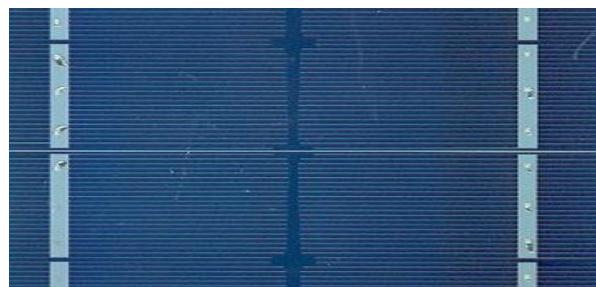


Figure I .2: Cellule en silicium monocristallin [5].

b) Silicium poly cristallin

Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux. Leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important. Cependant leur rendement est plus faible: de 11% à 15% jusqu'à 19.8% en laboratoire) [5].

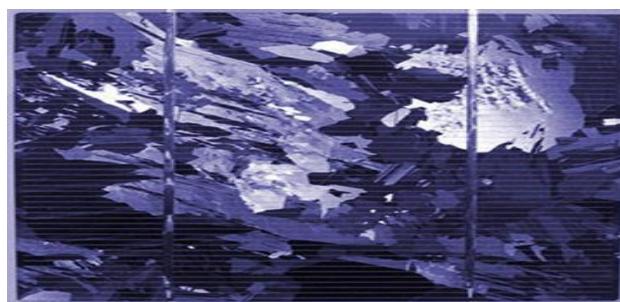


Figure I. 3 : Cellule en silicium poly cristallin [5].

c) Silicium amorphe

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé ou marron. Elles ont un faible rendement (5% à 8%, 13% en

laboratoire), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres. L'avantage de ce dernier type est le fonctionnement avec un éclairement faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment) [5].

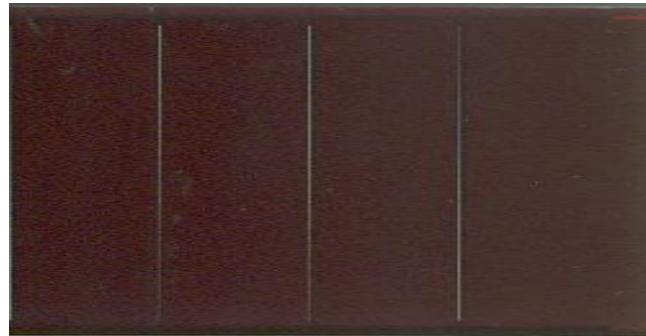


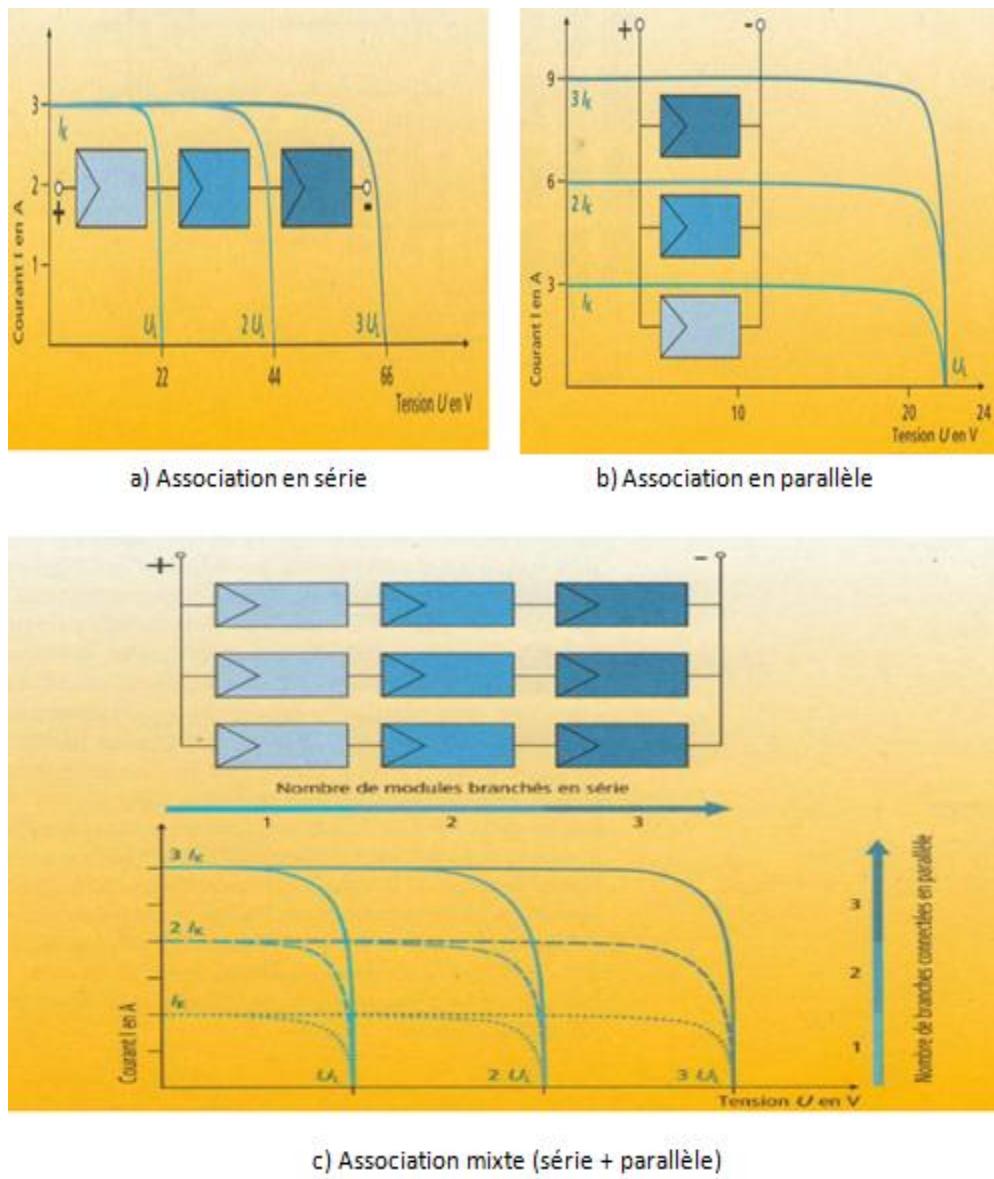
Figure I .4 : Cellule silicium amorphe [5].

I.4.Association des modules photovoltaïques

Un module des cellules connecté en parallèle est suffisant pour augmenter le courant du Générateur en associe “Np” modules en parallèle comme montrer dans la figure (I.5.b).

Pour obtenir une augmentation de la tension du générateur en associe “Ns” modules En série comme Le montrent la figure précédente (I.5.a),

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire D'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque Figure (I.5.c). [6].

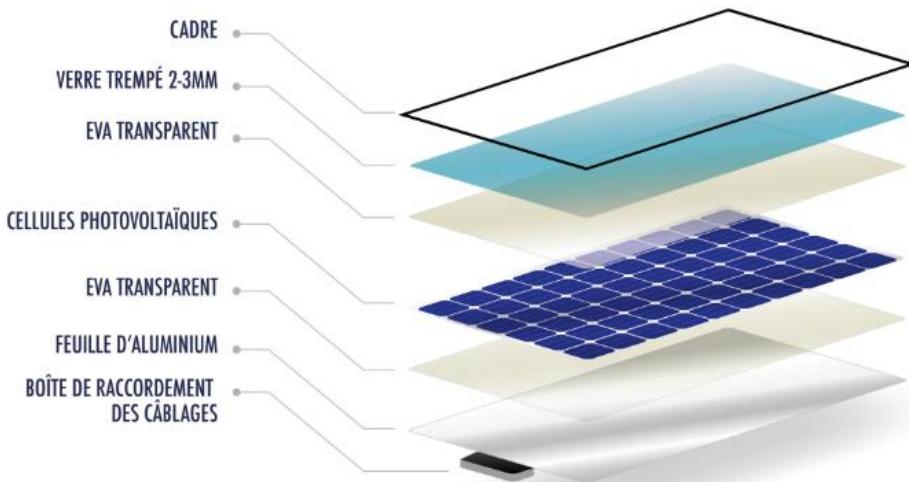
**Figure I .5 :** Association des modules photovoltaïques.

I.5.Le module photovoltaïque :

La cellule individuelle, unité de base d'un system photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique.

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 offerte par la face arrière soudée sous vide confèrent à l'ensemble sa durabilité [7].



FigureI .6 : Un module photovoltaïque [8].

I.6.Caractéristiques d'un module

Voici la description des paramètres d'un module :

- **La puissance crête P_c** : Puissance électrique maximum que peut fournir le module Dans la condition standard (25°C et un éclairement de (1000 W/m^2)).
- **La caractéristique $I(V)$** : Courbe représentant le courant I débité par le module en Fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- **Tension à vide V_{oc}** : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, Pour un éclairement « plein soleil ».
- **Courant de court-circuit I_{cc}** : Courant débité par un module en court-circuit pour Eclairage « plein soleil ».
- **Point de fonctionnement optimum (U_m, I_m)** : Lorsque la puissance de crête est Maximum en plein soleil, $P_m = U_m \cdot I_m$
- **Rendement maximal** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance deRadiation incidente.

- **Facteur de forme :** Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale

Que peut avoir la cellule : V_{oc} , I_{cc} [9].

I.7. Influence de l'éclairement

En faisant varier l'éclairement entre 200 W/m^2 et 1000 W/m^2 , la caractéristique ($I_{pv}=f(V_{pv})$) est donnée par les figures (I. (7-8)). On remarque que la valeur du courant de court-circuit est Directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la Tension en circuit Ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible Éclairement. L'irradiation standard internationalement accepter pour muser la réponse des Panneaux photovoltaïque est une intensité rayonnante de $1000\text{W}/\text{m}^2$ et une température 25°C .

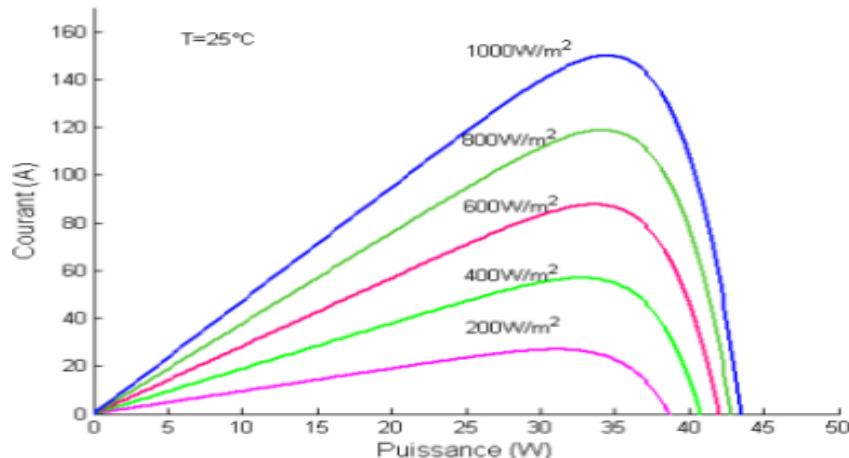


Figure I.7 Caractéristique P-V du module PV selon l'éclairement

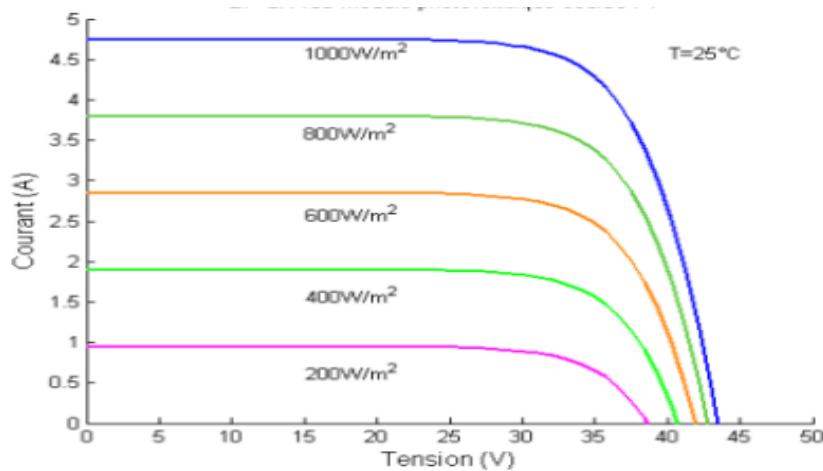


Figure I.8 Caractéristique I-V du module PV selon L'éclairement

I.8.Influence de la Température :

En faisant varier la température de 0°C jusqu'à 75°C, la caractéristique ($I_{pv} = f(V_{pv})$) est donnée par les figures (I. (9-10)). On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte.

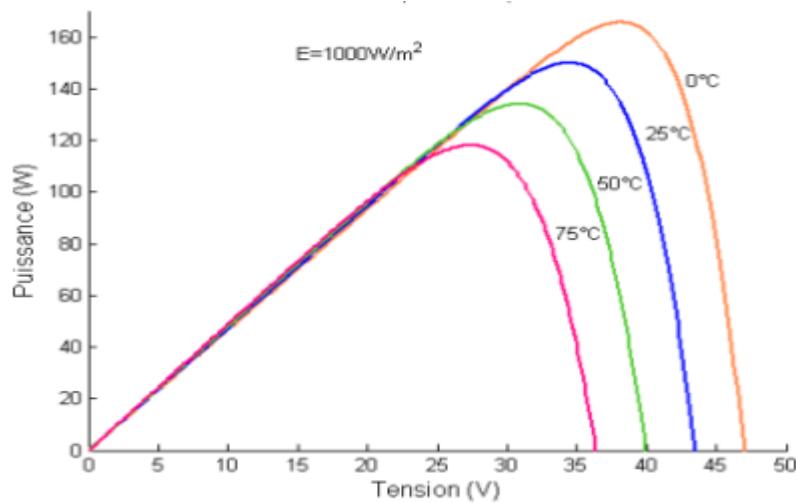


Figure I .9 Caractéristique P-V du module PV selon la Température

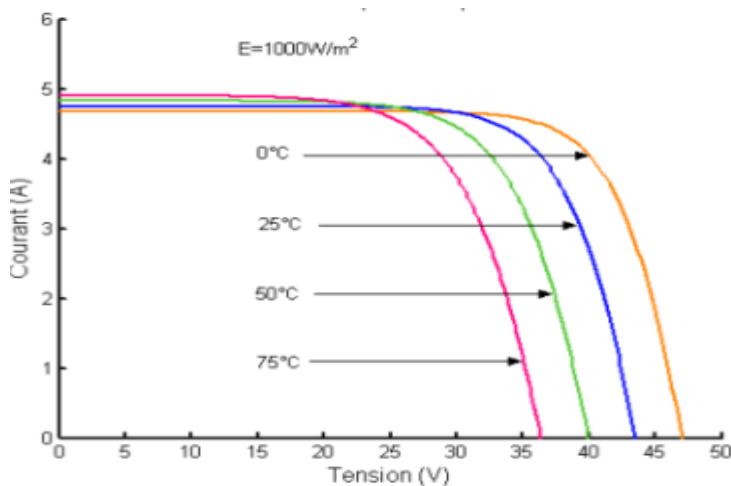


Figure I .10 Caractéristique I-V du module PV selon la Température

I.9 Les différents types des systèmes photovoltaïques :

On distingue trois modes d'exploitation d'un panneau PV :

- Mode autonome.
- Mode connecté au réseau.
- Mode hybride.

Le mode autonome :

Dans une configuration autonome (figure I.11), le générateur photovoltaïque est la seule source d'énergie électrique pour alimenter les récepteurs.

L'alimentation autonome est adoptée dans les cas où le réseau électrique ne pas disponible ou lorsque les appareils dépendent exclusivement de l'énergie solaire (pompage, éclairage, climatisation, chauffage...).[10]

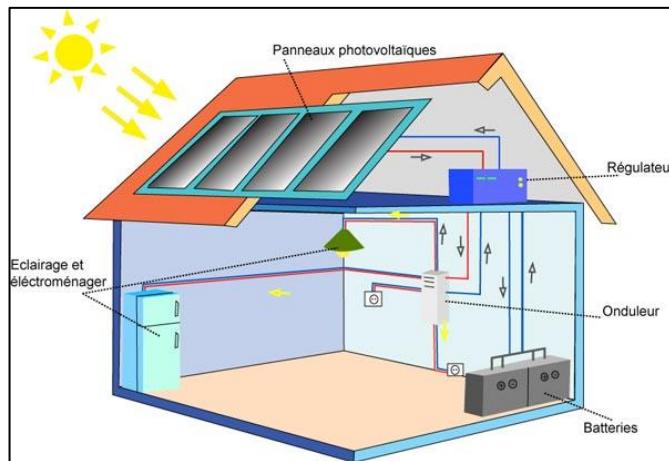


Figure I.11 Structure d'un système PV autonome.

Le mode connecté au réseau :

Un système photovoltaïque connecté au réseau, est un système raccordé directement au réseau électrique à l'aide de convertisseurs. Ce type de système offre beaucoup de facilités pour le (producteur/consommateur) puisque c'est le réseau qui se charge du maintien de l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité. La Figure (I.12) représente un système PV connecté au réseau électrique.[10]

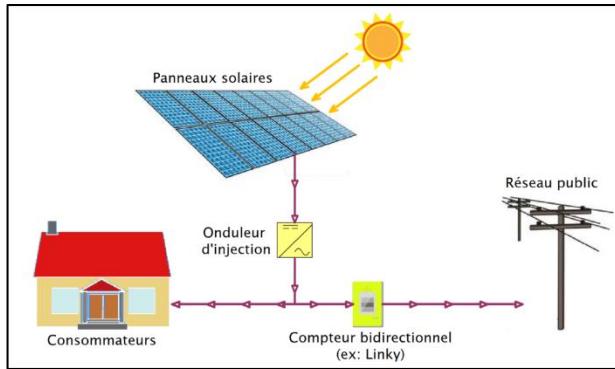


Figure I.12 Structure d'un système photovoltaïque connecté au réseau.

Le mode hybride :

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité. En pratique le générateur photovoltaïque est combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois avec des accumulateurs de stockage de l'énergie.

Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée.

Un système hybride photovoltaïque optimise l'utilisation combiné de plusieurs sources d'énergies renouvelables et, ou fossiles et des moyens de stockage associés.[10]

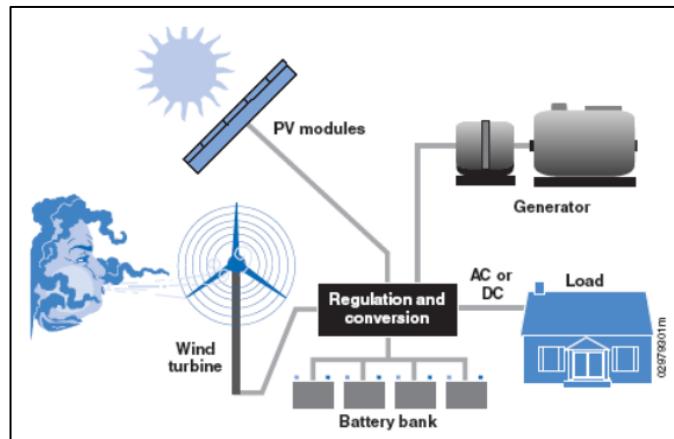


Figure I.13 Structure d'un système hybride.

I.10 Avantages et inconvénients d'énergie photovoltaïque :

(a) *Les Avantages:*

- Le soleil est une source d'énergie propre et renouvelable, qui ne produit ni de gaz ni de déchet toxique par son utilisation.
- Le processus photovoltaïque est complètement à semi-conducteurs et d'un seul bloc. Il n'y a aucune pièce mobile et aucun matériau n'est consommé ou émis.
- Pas de pollution, ni émissions ou odeurs discernables.
- Ils peuvent être des systèmes autonomes qui actionnent sûrement sans surveillance pendant de longues périodes.
- Grande fiabilité.
- Ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergies pour augmenter la fiabilité du système.
- Ils n'exigent aucun raccordement à une source d'énergie ou à un approvisionnement en carburant existant [11]

(b) *Les inconvénients :*

- Le coût d'investissement des panneaux photovoltaïques est élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique par des batteries est nécessaire, le coût du système photovoltaïque augmente.
- Les panneaux contiennent des produits toxiques et la filière de recyclage n'existe pas encore.
- Le rendement électrique diminue avec le temps. [11]

I.11 Le 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 la 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 1m² est de l'ordre de 5KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/m²/ans au nord et 2263kwh/m²/ans au sud du

pays. Au Sahara, ce potentiel peut constituer un facteur important de développement durable s'il est exploité de manière économique. Le tableau suivant indique le taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie [12].

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie	4%	10%	86%
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/ans)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /ans)	1700	1900	2650

Tableau I.1 : Taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie.

I.12.conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases indispensables à la compréhension du Sujet. Nous avons aussi expliqué la constitution de cellules photovoltaïques et leurs types Rappelé aussi les Modules photovoltaïques et leurs associations, exposé Les principales Caractéristiques d'un module PV. Afin de faciliter la conception, nous avons aussi mis en valeur les avantages, les inconvénients des systèmes photovoltaïques et leurs modes d'exploitation. Puis nous avons montré les deux effets températures et rayonnement sur un panneau photovoltaïque.

Dans la suite de notre travail nous allons étudier le système, effet, modélisation de photovoltaïque, et détaillé le modèle du convertisseur Boost , puis en va exposer le système MPPT.

Chapitre II

**Modélisation d'un
system photovoltaïque**

II.1Introduction

Un système photovoltaïque est constitué de plusieurs éléments interconnectés, chacun ayant pour objectif de réaliser une tâche spécifique, telle que fournir de l'électricité au réseau public, pomper de l'eau d'un puits, alimenter une petite calculatrice, ou d'autres usages de l'énergie solaire. En général, ce système comprend un module photovoltaïque, un régulateur, une batterie, un récepteur à courant continu et, si un récepteur à courant alternatif est présent, un onduleur.

La figure suivante décrit le système qui nous sera utilisé dans notre travail

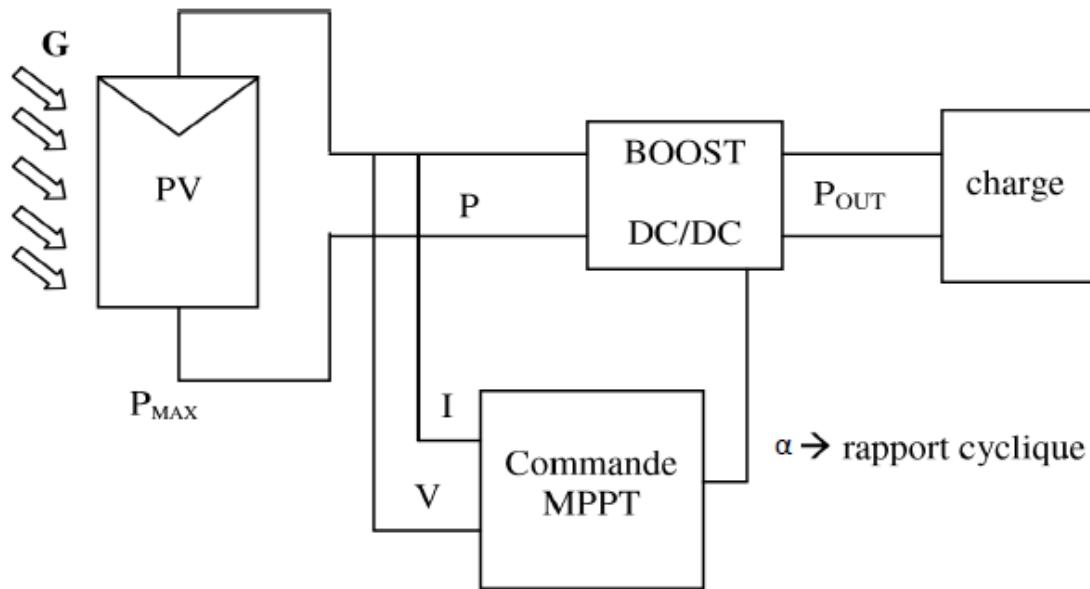


Figure II.1 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.

II.2.Générateur Photovoltaïque GPV

Les cellules solaires sont généralement connectées en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre pour former un module photovoltaïque. Un générateur photovoltaïque est composé de modules interconnectés pour créer une unité capable de produire une puissance continue élevée, compatible avec les équipements électriques standard (voir figure II.2). Les modules photovoltaïques sont généralement branchés en série et en parallèle pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur. Ces modules interconnectés sont montés sur des supports métalliques et inclinés selon l'angle optimal en fonction de l'emplacement, formant ce que l'on appelle souvent un champ de modules [13].

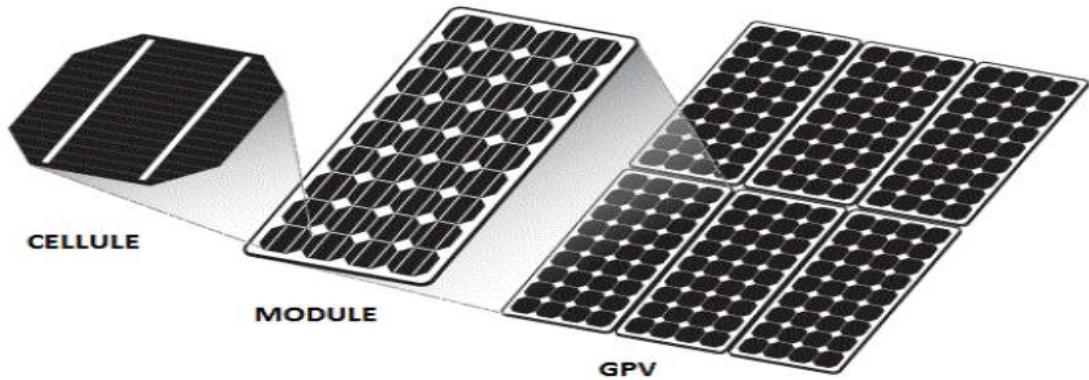


Figure II.2 : Composants d'un GPV

II.2.1 Modélisation D'un Cellule Photovoltaïque

Une cellule PV peut se modéliser à partir de l'équation définissant le comportement statique de la jonction PN d'une diode classique. Ainsi, la figure (II.3) illustre le schéma électrique équivalent d'une cellule PV réelle.

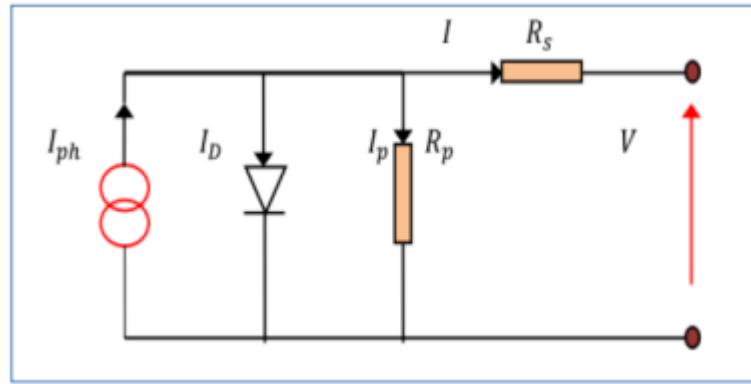


Figure II.3 Schéma équivalent de le cellule PV.

Dans cette équation, on prend en compte le courant de court-circuit et les différentes résistances modélisant les pertes dues à la connectique. En statique, le comportement d'une cellule PV constituée d'une jonction PN à base de silicium peut être décrit par l'équation suivante [14].

$$I = I_{ph} - I_D - I_p \quad (\text{II.1})$$

I= le courant fourni par la cellule

$I_{sc}=I_{scr} \left(\frac{G}{1000}\right)$: ou I_{scr} le courant de court-circuit de référence.

$$I_p = \frac{V+I.R_s}{R_p} \quad (\text{II.2})$$

: le courant délivré par la résistance parallèle.

$$I_D = I_0 \left(e^{\left(\frac{V+I.R_s}{nV_T}\right)} - 1\right)$$

: le courant traversant la diode.

I_0 = le courant de saturation inverse d'une diode.

n : facteur non idéalité de la jonction comprise entre 1 et 5 dans la pratique.

$$V_T = \frac{kT}{e} \quad (\text{II.3})$$

: la tension thermique

Ou :

e : charge d'électron (1.602×10^{-19} C).

K : constante de Boltzman (1.381×10^{-23} J/K).

T : la température effective de la cellule en kelvin.

En utilisant les équations ci-dessus on peut en déduire l'expression de courant délivré par la cellule photovoltaïque

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\left(\frac{V+I.R_s}{nV_T}\right)} - 1\right) - \frac{V+I.R_s}{R_p} \quad (\text{II.4})$$

II.2.2 Caractéristique D'une Cellule Photovoltaïque

On prend par exemple une cellule de module BP SX 150 Ce module possède les caractéristiques suivantes à 1000 (w/m²) et 25°C.

Puissance max	Tension optimale	Courant optimale	Tension a circuit ouvert	Courant de court-circuit
150W	17.8V	8.43A	21.3V	9.1A

Tableau II.1 Caractéristiques du module BP SX 150 [15].

Les figures suivantes représentent les caractéristiques d'une cellule PV pour un rayonnement constant de 1000W/m^2 et une température de 25°C .

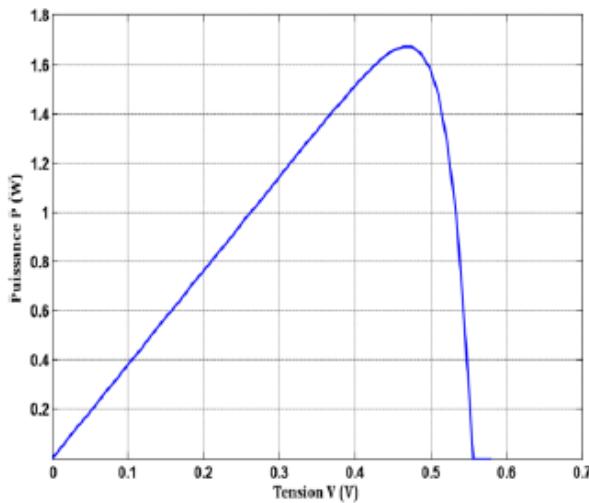


Figure.II.4 Caractéristique P-V d'une cellule

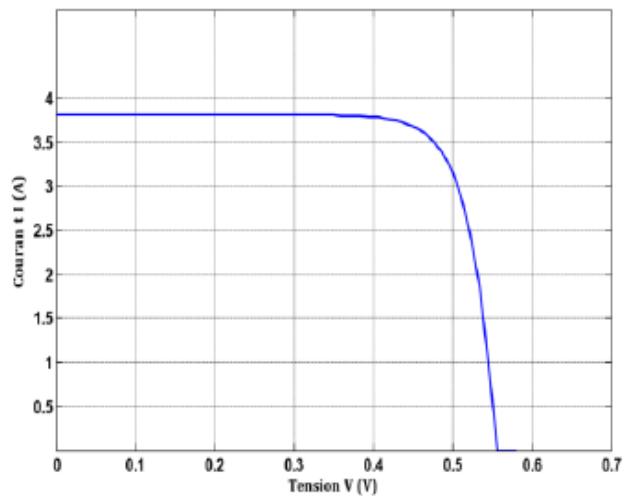


Figure.II.5 Caractéristique I-V d'une cellule

II.2.3 Groupement de Cellules Photovoltaïques

La puissance fournie par une seule cellule solaire étant très faible, plusieurs cellules dont les caractéristiques sont semblables doivent être électriquement associées et encapsulées dans un plastique pour former un GPV pratique. Étant donné que la puissance fournie par une seule cellule solaire est très faible, plusieurs cellules aux caractéristiques similaires doivent être connectées électriquement et encapsulées dans un plastique pour créer un module photovoltaïque pratique.

II.2.3.1 Association De Cellules Photovoltaïques En Série

Dans une configuration série, le même courant traverse toutes les cellules, et la caractéristique résultante de ce groupement est obtenue en additionnant les tensions pour un courant donné. La figure II.6 présente la caractéristique résultante (ICS, VOC) obtenue en connectant en série NS cellules identiques (IC, VC). [16].

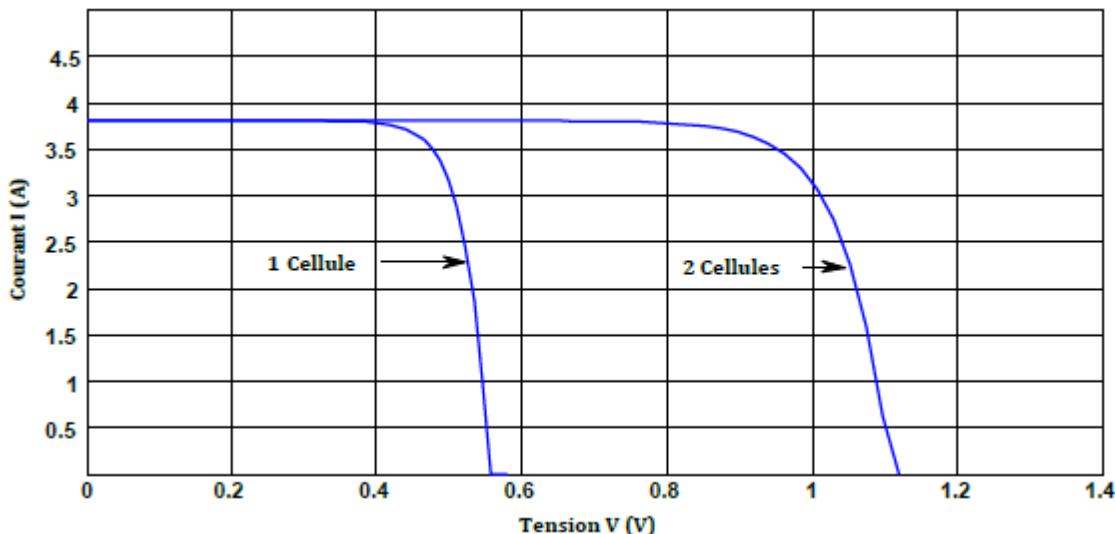


Figure.II.6 Caractéristique I-V de 2 cellules photovoltaïques raccordées en série.

$$I_{CS} = I_C \quad (\text{II-5})$$

Et

$$V_{OC} = N_S V_C \quad (\text{II-6})$$

II.2.3.2 Association de Cellules Photovoltaïques en Parallèle

Les propriétés des cellules connectées en parallèle sont l'inverse de celles des cellules connectées en série. Ainsi, dans une configuration parallèle, les cellules sont soumises à la même tension, et la caractéristique résultante est obtenue en additionnant les courants pour une tension donnée. La figure II.7 illustre la caractéristique résultante (ICP, VCP) obtenue en connectant en parallèle NP cellules identiques (IC, VC) [16] :

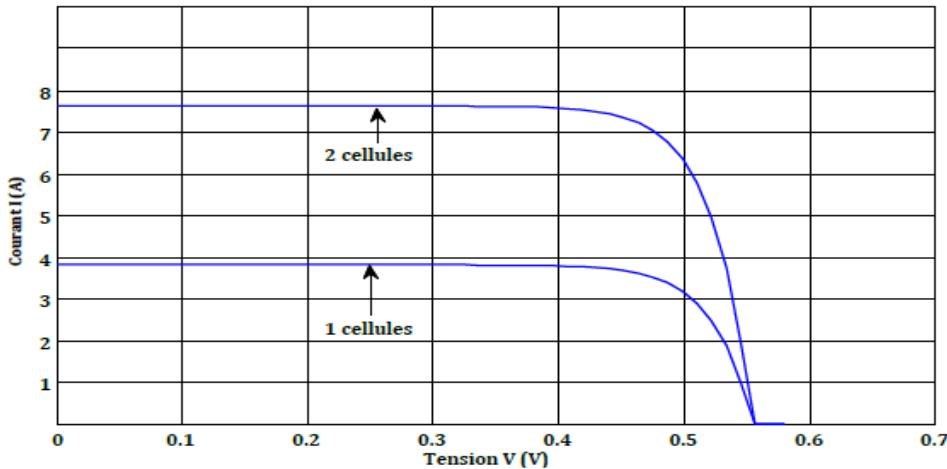


Figure.II.7 Caractéristique I-V de 2 cellules photovoltaïques raccordées en parallèle.

$$I_{CP} = N_P I_C \quad (\text{II-7})$$

Et

$$V_{CP} = V_C \quad (\text{II-8})$$

II.2.4 Protections D'un Générateur

Le groupement des cellules photovoltaïques présente un effet indésirable lorsqu'une partie du module est ombragée ou lorsque les cellules ne sont pas éclairées de manière uniforme (éclairage non homogène). Pour résoudre ce problème et garantir une longue durée de vie à une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique pendant des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules pour éviter les pannes destructrices liées à l'association de cellules en série et de panneaux en parallèle [17] [18].

Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés dans les installations actuelles (FigureII.8)

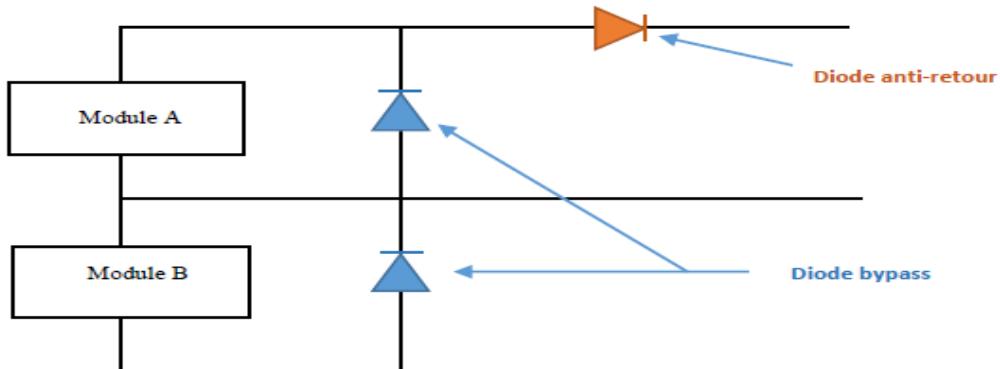


Figure.II.8 Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour

- la diode anti-retour empêchant un courant négatif dans les PV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit.
- les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène (effet d'ombrage) évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées.

II.2.5 Modélisation D'un panneau

Pour réaliser cette simulation, nous avons choisi le module photovoltaïque BP SX 150 de BP Solaire. La série SX de BP Solaire fournit une puissance photovoltaïque rentable destinée à un usage général par exploitation directe des charges à courant continu, ou des charges à courant alternatif sur les systèmes munis d'onduleur. Le module est composé de 72 cellules solaires multi cristallines en silicium connectées en série pour produire une puissance maximale de 150W. Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque sont données dans le tableau (II.2) [14] :

Puissance (P_{max})	150W
Tension à $P_{max}(V_{pmax})$	34.5V
Courant à $P_{max}(I_{pmax})$	4.35A
Tension à circuit ouvert (V_{co})	43.5V
Courant de court-circuit de référence (I_{ccr})	4.75A
Coefficient de la température de V_{co}	-160±20Mv/°C
Coefficient de la température de I_{cc}	0.065±0.015%/°C
Coefficient de la température de la puissance	-0.5±0.05% °C
Température nominale d'opération de la cellule(NOCT)	47±2°C

Tableau II.2 : Caractéristiques électriques du module photovoltaïque BP SX 150.

Plusieurs modèles mathématiques sont utilisés pour simuler le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque. Ces modèles se différencient par la méthode de calcul et le nombre des paramètres intervenants dans la caractéristique courant - tension. Dans notre cas, nous avons choisi un modèle simple nécessitant que les paramètres donnés par le fabricant, la caractéristique I-V de ce modèle est illustrée ci-dessous :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\left(\frac{V+I.R_s}{nV_T} \right)} - 1 \right) - \frac{V+I.R_s}{R_p} \quad (\text{II.9})$$

Où, le courant de diode, est donné par l'équation :

$$I_D = I_0 \left(e^{\left(\frac{V+I.R_s}{nV_T} \right)} - 1 \right) \quad (\text{II.10})$$

Le courant de saturation inverse d'une diode est donné par :

$$I_0 = \frac{I_{sc}}{\frac{V_{oc}}{(e^{\frac{V_{oc}}{nV_T}} - 1)}} \quad (\text{II.11})$$

Si l'on suppose que la résistance parallèle est infinie ($R_s = \infty$) l'équation (I.1) devienne :

$$I = I_{sc} - I_0 \left(e^{\left(\frac{V+I.R_s}{nV_T} \right)} - 1 \right) \quad (\text{II.12})$$

Avec:

I : Le courant fourni par la cellule.

V : La tension à la borne de cellule.

Calcul de la résistance série dans le point V_{oc} .

$$dI = I_0 - I_s \left(\frac{dV + R_s dI}{nV_T} \right) * e^{\left(\frac{V+I.R_s}{nV_T} \right)} \quad (\text{II.13})$$

La résistance série influe largement sur la pente de la courbe des caractéristique I-V au voisinage de V. Elle peut être calculée par la formule suivante :

$$R_S = - \frac{dV}{dI} - \left(\frac{nVT}{I_0 \cdot e^{\left(\frac{V+I.R_S}{nVT}\right)}} \right) \quad (\text{II.14})$$

$$R_S = - \frac{dV}{dI} |_{V=0} - \left(\frac{nVT}{I_0 \cdot e^{\left(\frac{V_{oc}+I.R_S}{nVT}\right)}} \right) \quad (\text{II.15})$$

Enfin, pour résoudre l'équation de caractéristique non linéaire, on utilise la méthode de Newton décrite par :

$$X_{n+1} = \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (\text{II.16})$$

$f'(x_n)$: Le dérivé de la fonction $f(x_n)$.

: La présente itération.

x_{n+1} : L'itération suivante.

Ainsi, on récrit l'équation (II.10) sous la forme suivante :

$$f(I) = I_{SC} - I - I_0 \left(e^{\left(\frac{V+I.R_S}{nVT}\right)} - 1 \right) \quad (\text{II.17})$$

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{SC} - I - I_0 \left(e^{\left(\frac{V+I.R_S}{nVT}\right)} - 1 \right)}{-1 - I_0 \left(\frac{R_S}{nVT} \right) \left(e^{\left(\frac{V+I_n.R_S}{nVT}\right)} \right)} \quad (\text{II.18})$$

Les équations précédentes ne sont valables que pour un mode de fonctionnement optimal. Pour généraliser notre calcul pour différentes éclairages et températures, nous utilisons le modèle qui déplace la courbe de référence à de nouveaux emplacements.

$$I_{SC}(T) = I_{SC}(T_{ref}) * [1 + \alpha(T - T_{ref})] \quad (\text{II.19})$$

$$I_{sc} = I_{scr} \left(\frac{G}{1000} \right) \quad (\text{II.20})$$

Où (I_{scr}) courant de court-circuit de référence.

$$I_0(T) = I_0(T_{ref}) \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^{\frac{3}{n}} * [(e^{\left(\frac{-qEg}{nK}\right)}) \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)] \quad (\text{II.21})$$

Où :

: Le coefficient de variation du courant en fonction de la température.

T : La température de référence, 298°k (25°C).

: L'irradiation solaire.

II.2.6 Caractéristique D'un panneau PV

Les figures suivantes présentent les Caractéristique d'un générateur PV pour un rayonnement constant de 1000W/m² et une température de 25°C.

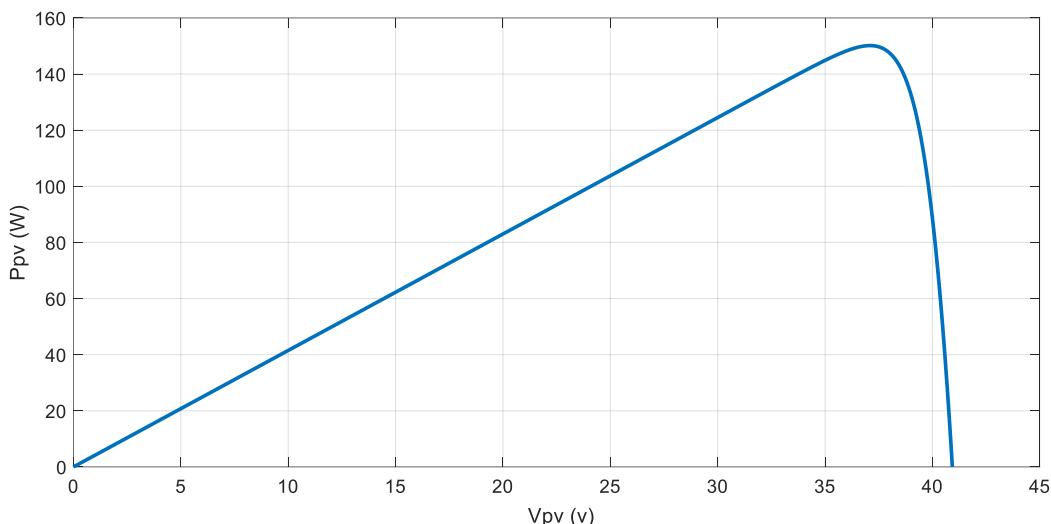


Figure II.9 Caractéristique P/V d'un panneau PV

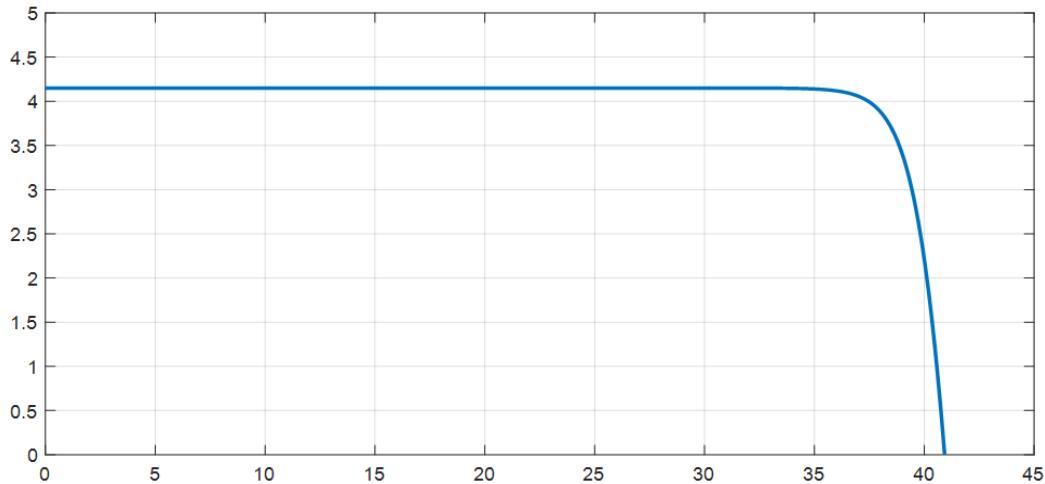


Figure II.10 Caractéristique I/V d'un panneau PV

II.2.7 Influence de la température et l'ensoleillement sur le GPV

II.2.7.1 Influence de l'ensoleillement

Une réduction de l'ensoleillement entraîne une diminution de la génération de paires électron-trou, tandis que le courant de diode en obscurité reste inchangé. Le courant du panneau solaire, étant la différence entre le photo-courant et le courant de diode en obscurité, diminue proportionnellement à la réduction de l'ensoleillement. Cela provoque une baisse du courant solaire I_{CCM} , accompagnée d'une très légère diminution de la tension V_{COM} , déplaçant ainsi le point Pmax du panneau solaire vers des puissances inférieures.

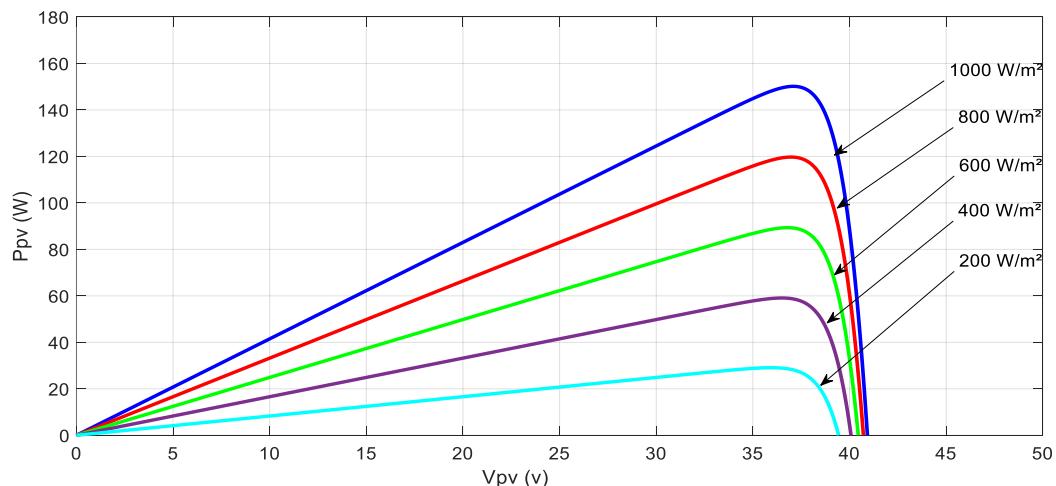


Figure II.11 Caractéristique P/V d'un panneau PV

pour une température constante de 25°C et un rayonnement variable.

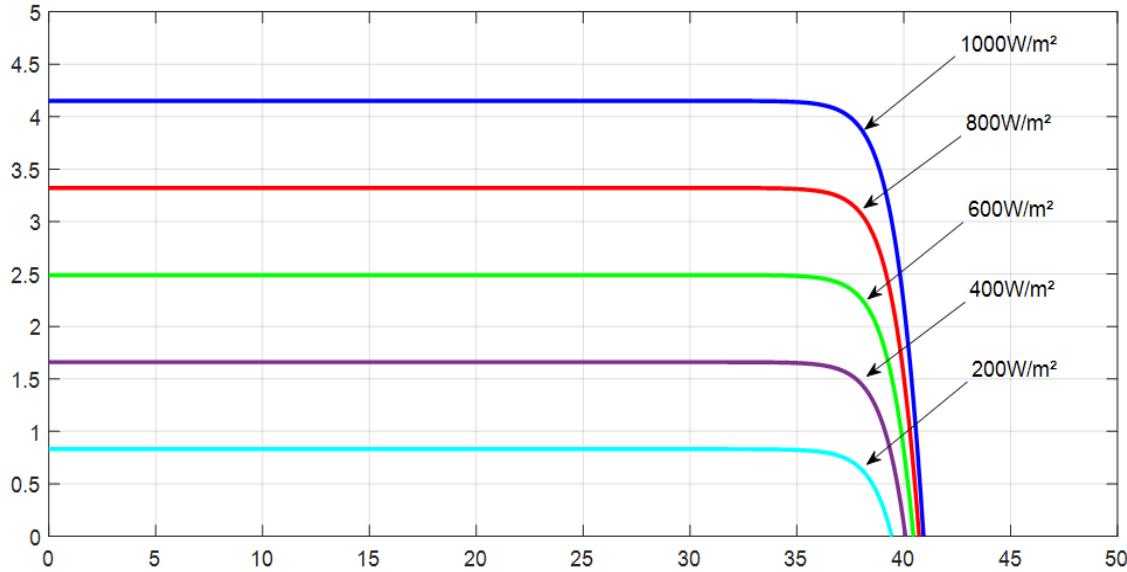


Figure II.12 Caractéristique I/V d'un panneau PV

Pour une Température constante de 25°C et un rayonnement variable.

Les figures précédentes illustrent l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension. À température constante, il est évident que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. En revanche, la tension en circuit ouvert ne varie pas de manière proportionnelle et reste presque identique même à faible éclairement. Cela implique que la puissance optimale de la cellule (P_{max}) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement. Ainsi, les points de puissance maximale se trouvent à peu près à la même tension.

II.2.7.2 Influence de la température

Nous observons que le courant fourni par chaque cellule est influencé par la température interne de la jonction PN qui compose la cellule photovoltaïque. En considérant l'élévation de température d'un module photovoltaïque de 25°C à 50°C, et en supposant initialement que la température à l'arrière de chaque cellule est similaire à celle de la jonction PN, on peut alors constater l'impact de la température. On remarque que la tension en circuit ouvert diminue avec l'augmentation de la température, entraînant ainsi une perte de puissance disponible aux bornes du module photovoltaïque. Les figures suivantes présentent les caractéristiques Courant-Tension et Puissance-Tension pour un rayonnement constant et différentes températures.

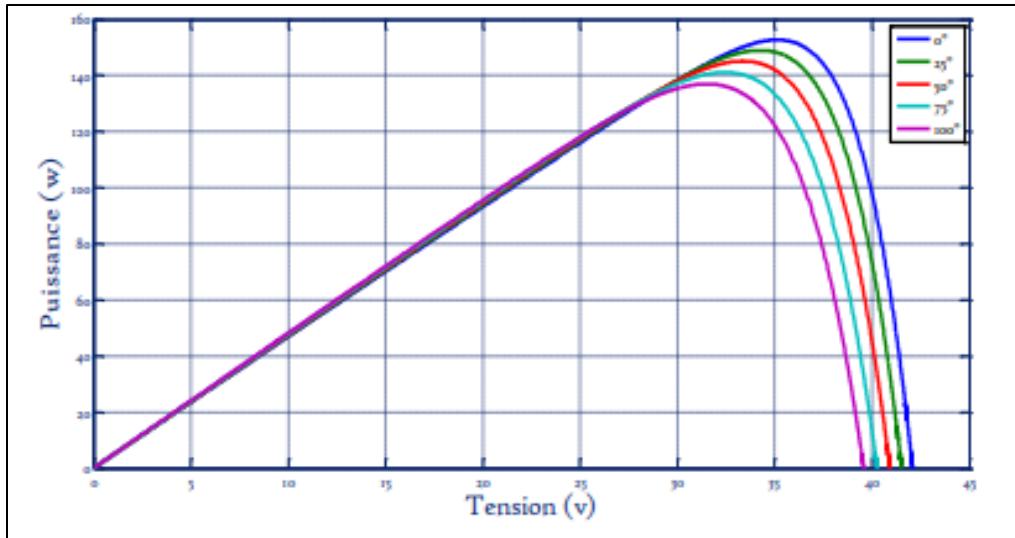


Figure II.13 Caractéristique P/V d'un panneau PV Pour un rayonnement constant de 1000W/m^2 et une température variable.

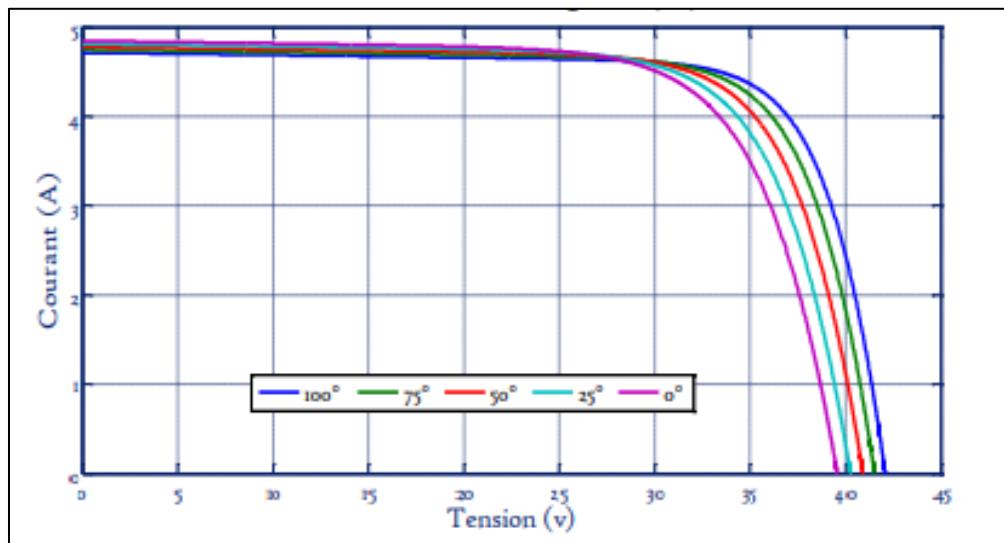


Figure II.14 Caractéristique I/V d'un panneau PV
Pour un rayonnement constant de 1000W/m^2 et une température variable.

Nous remarquons que la tension à vide d'un module photovoltaïque (ou d'une cellule solaire) diminue avec l'élévation de la température du module PV (ou de la cellule). En revanche, le courant de court-circuit augmente légèrement avec l'augmentation de la température du module PV (ou de la cellule solaire). De plus, on constate que l'augmentation de la température entraîne une diminution de la puissance maximale disponible.

II.3 Les Principes de Conversion dans les Systèmes PV

Le générateur photovoltaïque constitue la pièce maîtresse d'un système photovoltaïque. Cependant, pour une utilisation pratique, d'autres composants sont indispensables, tels que des dispositifs de stockage d'énergie, des régulateurs pour gérer le flux énergétique, ou encore des dispositifs permettant l'interconnexion avec le réseau alternatif. Ces éléments supplémentaires représentent une part significative des coûts, réduisent le rendement et ont un impact important sur le comportement et les performances de l'ensemble du système.

II.3.1 Étage d'Adaptation entre un Générateur PV et une Charge

Un générateur photovoltaïque (GPV) affiche des caractéristiques $I(V)$ non linéaires, présentant des points de puissance maximale (PPM) qui varient en fonction du niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon la charge connectée au GPV, il peut exister une différence considérable entre la puissance potentielle du générateur et celle effectivement transférée à la charge en mode de connexion directe. Pour maximiser la puissance disponible aux bornes du GPV et la transférer à la charge, la méthode couramment utilisée consiste à intégrer un étage d'adaptation entre le GPV et la charge, tel que décrit dans la figure (II.15). Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments, assurant par le biais d'une action de contrôle, le transfert de la puissance maximale fournie par le générateur pour qu'elle soit aussi proche que possible de la valeur de PMAX disponible. [16].

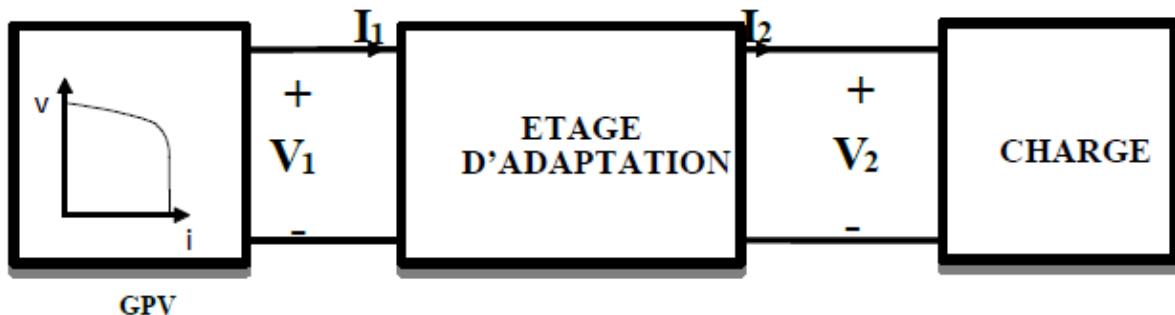


Figure II.15 Etage d'adaptation entre un GPV et une charge

L'adaptateur communément utilisé en PV est un convertisseur statique (convertisseur de puissance DC/DC).

II.3.2 Convertisseur DC/DC

La figure (II.16) montre la représentation d'un convertisseur DC/DC, qui peut être utilisé comme interface entre la source et la charge.

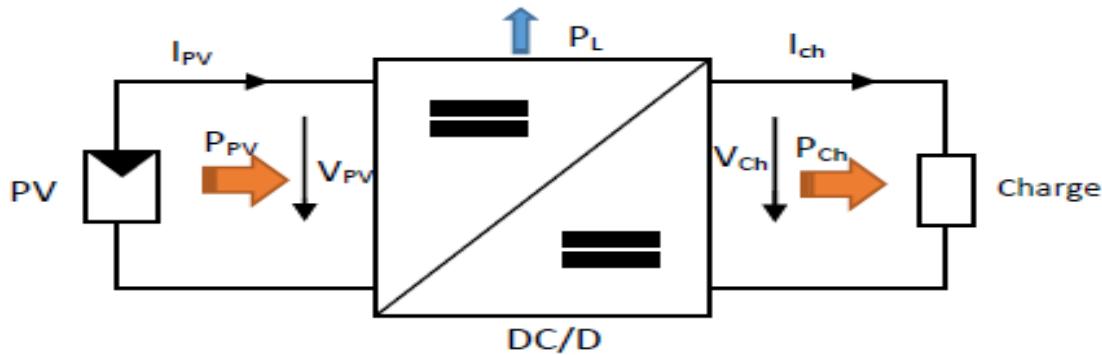


Figure II.16 convertisseurs DC-DC

L'utilisation des convertisseurs DC-DC permet de contrôler la puissance électrique dans les circuits en courant continu avec une grande souplesse et un rendement élevé. Les circuits de hacheurs sont composés de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Dans des conditions idéales, ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, ce qui explique les bons rendements obtenus. Le commutateur est généralement constitué d'un dispositif semi-conducteur, tel qu'un transistor MOSFET ou un IGBT, fonctionnant en mode bloqué ou saturé. Lorsque le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est nul, ce qui entraîne une dissipation de puissance nulle. Lorsque le dispositif est saturé, la chute de tension à ses bornes est presque nulle, ce qui limite la perte de puissance.

Il existe différents types de convertisseurs DC-DC, et le tableau suivant donne un aperçu de la complexité de chaque type de convertisseur.

Type	Fonction	Interrupteur	Diode	Transformateur	Complexité
Buck	Abaisseur	1	1	Non	Faible
Boost	Elévateur	1	1	Non	Faible
Buck-Boost	Abaisseur/ Elévateur	1	1	Non	Faible
Flyback	Abaisseur/ Elévateur	1	1	Oui	Moyen
Half Forward	Abaisseur/ Elévateur	1	1	Oui	Moyen
Push Pull	Abaisseur/ Elévateur	2	2	Oui	Forte
Half Bridge	Abaisseur/ Elévateur	2	2	Oui	Forte
Full Bridge	Abaisseur/ Elévateur	4	4	Oui	Très Forte

Tableau II.3 Complexité de chaque type de convertisseur DC-DC.

Dans notre analyse, nous exposons le fonctionnement d'un convertisseur DC/DC de type Boost, largement utilisé dans les systèmes photovoltaïques pour produire les tensions et les courants nécessaires. Ce type de convertisseur se compose uniquement d'éléments réactifs (selfs, capacités) qui, dans des conditions idéales, ne consomment aucune énergie. C'est pourquoi ils sont reconnus pour leur rendement élevé [19].

II.3.3 Étage d'Adaptation de Type BOOST

Considérons l'exemple de la figure II.17 correspondant à un convertisseur DC-DC élévateur (boost). Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source charge lorsque la charge a besoin d'une tension supérieure à celle du générateur PV [22]:

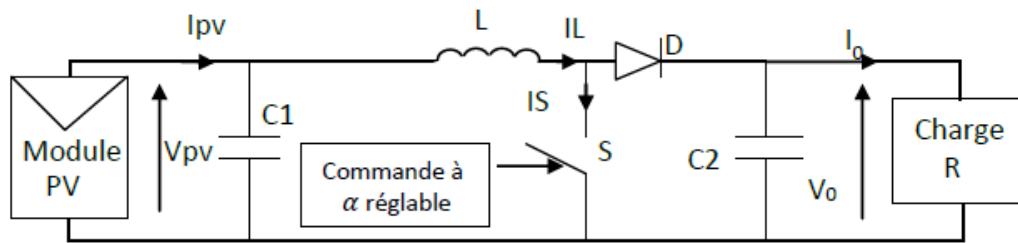


Figure II.17 Exemple de convertisseur statique DC-DC

Pouvant être utilisé comme adaptateur entre un générateur PV et une charge

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 du premier intervalle. Ensuite, le transistor (S) s'ouvre et l'inductance (L) s'opposant à la diminution de courant (IL), génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge (R) à travers la diode (D) [20].

II.3.4 Modèle mathématique équivalent

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

Pour le premier intervalle αTs :

$$I_{C1} = C_1 \frac{dV_{PV}}{dt} = I_{PV} - I_L \quad (\text{II-22})$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dV_0}{dt} = -I_0 \quad (\text{II-23})$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_{PV} - R_L I_L \quad (\text{II-24})$$

Pour le deuxième intervalle $(1 - \alpha) Ts$:

$$I_{C1} = C_1 \frac{dV_{PV}}{dt} = I_{PV} - I_L \quad (\text{II-25})$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dV_0}{dt} = I_L - I_0 \quad (\text{II-26})$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_{PV} - V_0 - R_L I_L \quad (\text{II-27})$$

II.3.5 Modèle approximé du convertisseur Boost

Les systèmes d'équations de base (II-29 à II-31) représentent le convertisseur Boost pour un intervalle du temps αTs et $(1 - \alpha) Ts$ 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 C_1 , V_L est de forme linéaire, en d'autres termes nous pouvons faire une approche exponentielle par un segment ($e^\xi \approx 1 + \xi$ si $\xi \ll 1$) 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 intervalles du temps αTs et $(1 - \alpha) Ts$:

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)_{Ts} = \frac{dx}{dt(\alpha Ts)} \alpha Ts + \frac{dx}{dt((1-\alpha)Ts)} (1 - \alpha) Ts \quad (\text{II-28})$$

Où $\left(\frac{dx}{dt}\right)_{Ts}$ est la valeur moyenne de la dérivée de x sur un intervalle Ts . Cette relation est valide si :

$\frac{dx}{dt(\alpha Ts)}$ et $\frac{dx}{dt((1-\alpha)Ts)}$ sont constants sur les intervalles αTs et $(1 - \alpha) Ts$ respectivement

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 figure II.18.

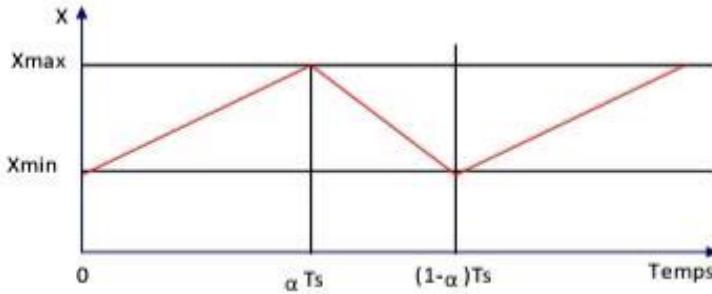


Figure II.18 Allure des variables dynamiques I_L .

En appliquant la relation (II-28) sur les systèmes d'équations (II-22 à II-27) obtient les équations qui régissent le système sur un intervalle entier :

$$I_{C1} = C_1 \frac{dV_{PV}}{dt} \alpha Ts = (I_{PV} - I_L) \alpha Ts + (1 - \alpha) Ts (I_{PV} - I_L) \quad (\text{II-29})$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dV_0}{dt} \alpha Ts = -\alpha Ts I_0 (1 - \alpha) Ts (I_L - I_0) \quad (\text{II-30})$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} \alpha Ts = (V_{PV} - R_L I_L) \alpha Ts + (1 - \alpha) Ts (V_{PV} - R_L I_L - V_0) \quad (\text{II-31})$$

En arrangeant les termes des équations précédentes, (pour qu'on puisse interconnecter le Boost avec les autres blocs de simulation), on obtient la modélisation dynamique du convertisseur Boost

$$I_L = I_{PV} - C_1 \frac{dV_{PV}}{dt} \quad (\text{II-32})$$

$$I_0 = (1 - \alpha) I_L - C_2 \frac{dV_0}{dt} \quad (\text{II-33})$$

$$V_{PV} = (1 - \alpha) V_0 + L \frac{dI_L}{dt} + R_L I_L \quad (\text{II-34})$$

II.4 Conclusion

Ce chapitre a abordé la modélisation d'un système photovoltaïque, en commençant par le générateur photovoltaïque, en examinant les caractéristiques du GPV ainsi que ses performances sous l'influence de divers paramètres atmosphériques tels que la température et l'ensoleillement. Ensuite, nous avons examiné en détail le modèle du convertisseur Boost, qui représente l'étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge.

Dans la suite de notre étude, nous allons nous pencher sur la méthode d'extraction de la puissance maximale (MPPT) en utilisant l'approche P&O, tout en cherchant un moyen d'améliorer cette méthode.

Chapitre III

**Implémentation Sur Matlab
Et Résultats De Simulation**

III.1.Introduction

Il existe des lois de commande spécifiques conçues pour amener les dispositifs à fonctionner à leurs points maximum de performance, même lorsque ces points ne sont pas connus à l'avance et que les variations et les raisons de ces changements ne sont pas clairement définies. Pour les sources d'énergie, cela se traduit généralement par des points de puissance maximale. Ce type de commande est couramment désigné dans la littérature sous les termes de "Recherche du Point de Puissance Maximum" ou "Maximum Power Point Tracking" en anglais (MPPT). Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximale (PPM) tout en garantissant une adaptation optimale entre le générateur et sa charge, afin de transférer le maximum de puissance disponible.

III.2Principe de la commande MPPT

En termes simples, une commande MPPT, en tandem avec un étage intermédiaire d'adaptation, assure que le GPV fonctionne en produisant continuellement sa puissance maximale. Par conséquent, quelles que soient les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur positionne le système au point de fonctionnement optimal (VPPM et IPPM). La chaîne de conversion photovoltaïque sera ainsi optimisée via un convertisseur statique (CS) contrôlé par une commande MPPT. [20]. Il peut être représenté par le schéma de la Figure III.1

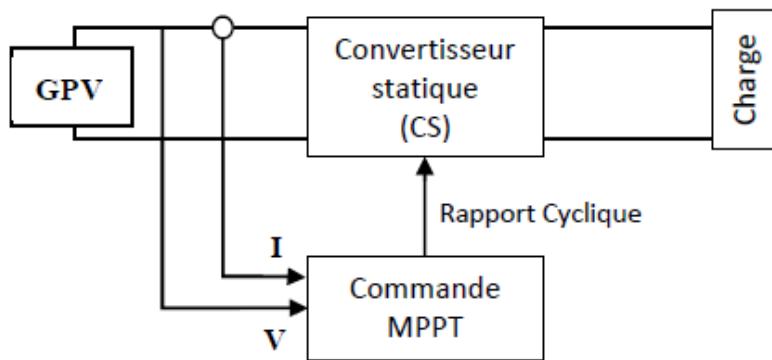


Figure III.1 Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant Un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.

La commande MPPT ajuste le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) à l'aide d'un signal électrique approprié, afin d'exploiter au maximum la puissance que le GPV peut fournir.

La complexité de l'algorithme MPPT peut varier selon la méthode utilisée pour rechercher le MPP. En général, cette méthode repose sur l'ajustement du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée (I et V) et, par conséquent, de la puissance du GPV, jusqu'à atteindre le MPPT.

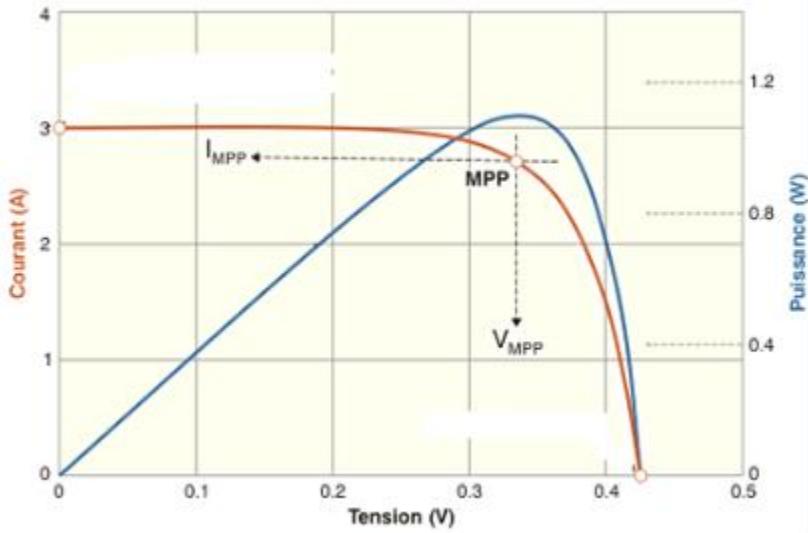


Figure III.2 Principe de la commande MPPT

III.3 Classification Des Commandes MPPT

De manière générale, les commandes MPPT peuvent être classées en fonction du type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Cependant, il est plus pertinent de les classifier selon le type de recherche effectuée et les paramètres d'entrée de la commande MPPT [22].

A) Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du CS

Plusieurs méthodes de commande MPPT recherchent le PPM en fonction de l'évolution de la puissance fournie par le GPV. Par exemple, des approches telles que Perturb & Observe ou les algorithmes d'incrément de conductance utilisent la valeur de la puissance fournie par le GPV pour appliquer une action de contrôle appropriée afin de suivre le PPM. D'autres méthodes reposent sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maximal (VOPT et IOPT) et les paramètres caractéristiques du module PV (VOC et ICC), tandis que certaines utilisent des techniques inspirées des réseaux de neurones. Dans ces approches, soit des systèmes à mémoire importante stockent tous les cas possibles, soit les

commandes sont basées sur des approximations. Toutes ces méthodes présentent l'avantage de leur précision et de leur réactivité. [22].

B) Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur

Dans la littérature, on trouve également des algorithmes basés sur les paramètres de sortie des convertisseurs statiques (CS). Par exemple, les commandes MPPT axées sur la maximisation du courant de sortie sont principalement utilisées lorsque la charge est une batterie.

Dans tous les systèmes utilisant les paramètres de sortie, une estimation de Pmax est réalisée en tenant compte du rendement du convertisseur. En résumé, plus le rendement de la conversion est élevé, plus cette estimation est fiable. Cependant, en général, tous les systèmes utilisant un seul capteur sont intrinsèquement moins précis. La plupart de ces systèmes ont été initialement conçus pour des applications spatiales.

[22].

III.3.1 Classification des commandes MPPT selon le type de recherche

a. MPPT Indirect

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées (Isc ou Voc), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur .Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques [22].

b. MPPT Direct

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV. Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la

direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPP. Ce principe de base peut être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation. Ces erreurs peuvent survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction de recherche, résultant d'une hausse de puissance qui est due à une augmentation rapide du niveau de rayonnement. La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV, indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du Courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables. D'autres algorithmes se basent sur l'introduction de variations sinusoïdales en petit signal sur la fréquence de découpage du convertisseur pour comparer la composante alternative et la composante continue de la tension du GPV et pour ainsi placer le point de fonctionnement du GPV le plus près possible du MPP. L'avantage de ce type de commandes est leurs précisions et leur rapidité de réaction [22]

III.4 Les Algorithmes MPPT

Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV. Une synthèse des principaux modes de recherche du PPM existants dans ce chapitre nous a permis de bien identifier l'existant et les points qu'il restait à améliorer. Ceci a constitué la base théorique pour nos travaux concernant les simulations dans le chapitre suivant.

III.4.1 Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe)

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode repose sur la perturbation (une augmentation ou une diminution) de la tension V_{PV}, ou du courant I_{PV}, et l'observation de la conséquence de cette perturbation sur la puissance mesurée ($P=VI$) [25]. Cependant, la variable idéale qui caractérise le MPP est celle qui varie peu lors d'un changement climatique. La variation du rayonnement affecte davantage le courant que la tension photovoltaïque. Par contre, la variation de la température modifie plus la tension du GPV. Néanmoins, la dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV [26].

Le principe de commande P&O consiste à provoquer une perturbation de faible valeur sur la tension VPV, ce qui engendre une variation de la puissance [27]. Figure III.5 montre qu'on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension VPV engendre un accroissement de la

puissance PPV, cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P(V)$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié

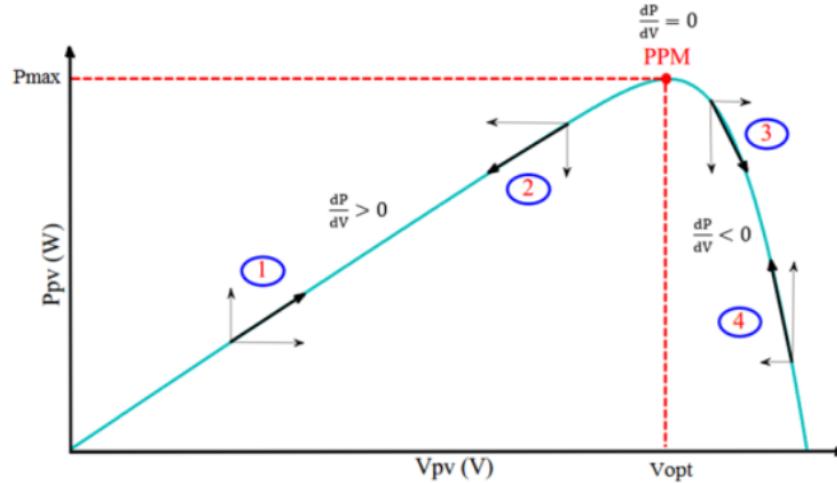


Figure III.3 Recherche du PPM par la méthode (P&O)

D'après la figure si la puissance de sortie a augmenté, V_{pv} est ajustée dans la même direction que dans l'instant précédent. Si la puissance de sortie a diminué, V_{pv} est ajustée dans la direction opposée que dans le cycle précédent.

Lorsque le point de puissance maximale est atteint, V_{pv} oscille autour de la valeur optimale V_{op} . Ceci cause une perte de puissance qui augmente avec le pas de l'incrémentation de la perturbation. On cas du le pas d'incrémentation est grande, l'algorithme du MPPT répond rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement

D'un autre côté si le pas est petit, les pertes lors des conditions de changements atmosphériques lents ou stables, seront inférieures mais le système ne pourra pas répondre rapidement aux changements rapides de la température ou de l'éclairement. Le pas idéal est déterminé expérimentalement en fonction des besoins [24].

La Figure III.6 représente l'algorithme classique d'une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.

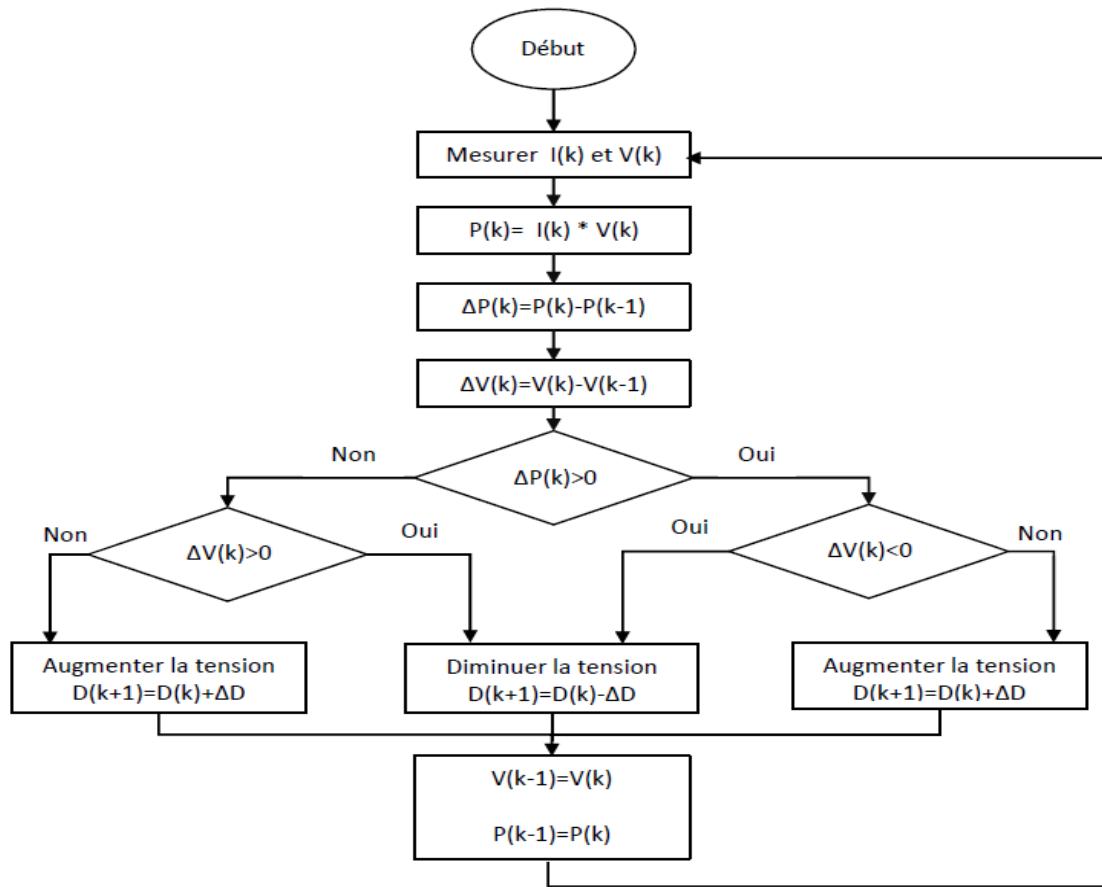


Figure III.4 l'algorithme de P&O classique

La méthode P&O est largement utilisée en raison de sa simplicité d'implémentation, mais elle présente certains problèmes liés aux oscillations qu'elle engendre autour du PPM une fois qu'il est atteint, en régime permanent. Cette oscillation dépend de la largeur du pas de la perturbation :[25] [28]

- Si la largeur du pas est grande, l'algorithme MPPT réagira rapidement aux changements brusques des conditions de fonctionnement, mais cela entraînera une augmentation des pertes dans des conditions stables ou à changement lent.
- Si la largeur du pas est très petite, les pertes dans des conditions stables ou à changement lent seront réduites, mais le système ne pourra pas suivre les changements rapides de température ou d'insolation.

Il est donc nécessaire de trouver un compromis entre précision et rapidité, ce qui rend cette commande difficile à optimiser. Un autre inconvénient de la méthode P&O se manifeste lors de changements rapides des conditions atmosphériques. Par exemple, si les conditions climatiques restent constantes, une perturbation ΔV dans la tension V déplacera le point de fonctionnement d'un point A à un point B, et le sens de la perturbation sera inversé en raison de la diminution de la puissance. Cependant, si l'éclairage augmente et déplace la courbe de puissance de P1 à P2 sur un cycle du MPPT, le point de fonctionnement sera déplacé de A vers C, ce qui représente une augmentation de la puissance. L'algorithme P&O réagira comme si cette augmentation est due à la perturbation précédente, continuant ainsi dans la même direction qui s'avère être incorrecte, éloignant du vrai point de puissance maximale. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que la stabilité de l'ensoleillement soit atteinte, où il revient au vrai point de puissance maximale, entraînant ainsi un retard de réponse lors des changements brusques des conditions de fonctionnement et des pertes de puissance [24].

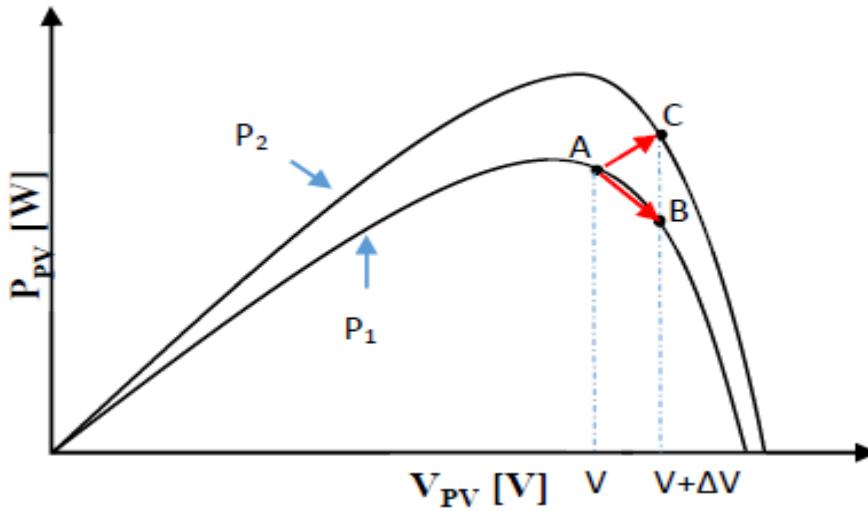


Figure III.5 Divergence de la méthode P&O

Pour remédier à l'inconvénient de la méthode P&O simple, des versions améliorées de l'algorithme P&O sont proposées :

On pourra ajouter le poids d'un troisième point et le comparer aux deux autres avant de prendre une décision sur le sens de la perturbation. L'algorithme de cette méthode (the three-point weight comparison) a été présenté dans la Figure III.5 avec les trois points sont point actuel A, un point B perturbé d'un point A et un point C doublement perturbée dans le sens opposé du point B [29].

$$\alpha(k) = \alpha(k-1) \pm N \times \left| \frac{P(k)-p(k-1)}{V(k)-V(k-1)} \right| \quad (\text{III-1})$$

La recherche dans ce domaine est toujours en cours.

III.4.4 ConductanceIncrémentale

Cette méthode est basée sur le fait que la pente de la courbe caractéristique de puissance du panneau est nulle au MPP, positive à gauche et négative à droite. Figure III.6

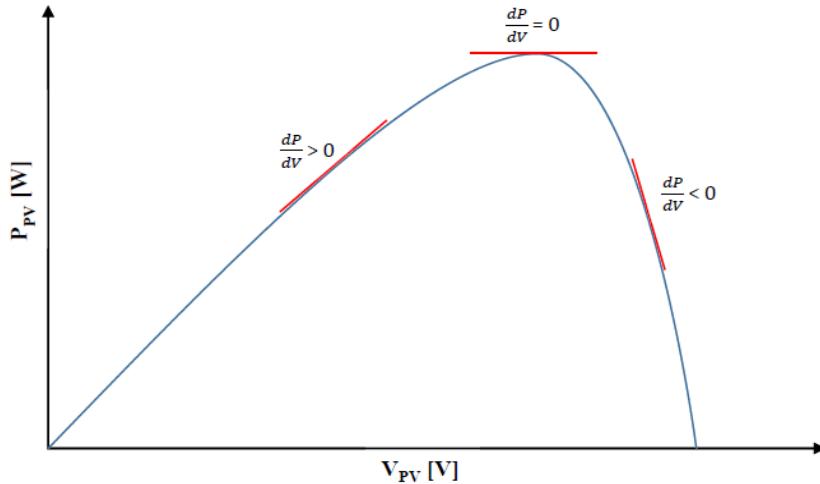


Figure III.6 caractéristique de tension-puissance du panneau

On observer que :

$$dP/dV = 0 \text{ au PPM}$$

$$dP/dV > 0 \text{ à gauche du PPM} \quad (\text{III-2})$$

$$dP/dV < 0 \text{ à droite du PPM}$$

Puisque :

La puissance du panneau solaire est donnée par :

$$P = V \times I \quad (\text{III-3})$$

Et sa dérivée partielle est donnée par :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \cong I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (\text{III-4})$$

Donc, l'équation (III-4) peut être écrite comme suit :

$$\Delta I / \Delta V = -I/V \quad \text{le point de fonctionnement est sur le PPM}$$

$$\Delta I / \Delta V > -I/V \quad \text{le point de fonctionnement est à gauche du PPM} \quad (\text{III-5})$$

$$\Delta I / \Delta V < -I/V \quad \text{le point de fonctionnement est sur la droite du PPM}$$

Le PPM peut être atteinte en comparant à chaque instant la valeur de la conductance (IPV/VPV) avec celle de l'incrément de conductance ($d\text{IPV}/d\text{VPV}$). Si l'incrément de conductance (dG) est supérieur à l'opposé de la conductance ($-G$), on diminue le rapport cyclique. Par contre, si l'incrément de conductance est inférieur à l'opposé de la conductance, on augmente le rapport cyclique. Ce processus est répété jusqu'à atteindre le PPM.

Pratiquement, comme la méthode P&O, cette technique présente des oscillations autour du MPP car il est difficile de remplir la condition $dP/dv = 0$, 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.

Cette méthode peut être améliorée en amenant le point de fonctionnement près du MPP dans une première étape, puis d'utiliser l'algorithme IncCond pour suivre exactement le MPP dans une deuxième étape. Généralement, le point de fonctionnement initial est réglé pour correspondre à une charge résistive proportionnelle au rapport de la tension de circuit ouvert Voc sur le courant de court-circuit Isc . Ces deux solutions assurent que le vrai MPP est poursuivi s'il existe plusieurs maxima locaux. Une manière moins évidente pour effectuer la méthode IncCond est d'utiliser la conductance instantanée et l'incrémentation de la conductance pour générer un signal d'erreur [26]

$$e = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} \quad (\text{III-6})$$

D'après l'équation (III-6), l'erreur est nulle au MPP. Un régulateur PI peut donc être utilisé pour annuler cette erreur. La mesure de la tension et du courant instantanés du panneau PV nécessite deux capteurs. La méthode IncCond se prête parfaitement à la commande par DSP ou microcontrôleur, qui peut garder en mémoire les valeurs précédentes de la tension et du courant.

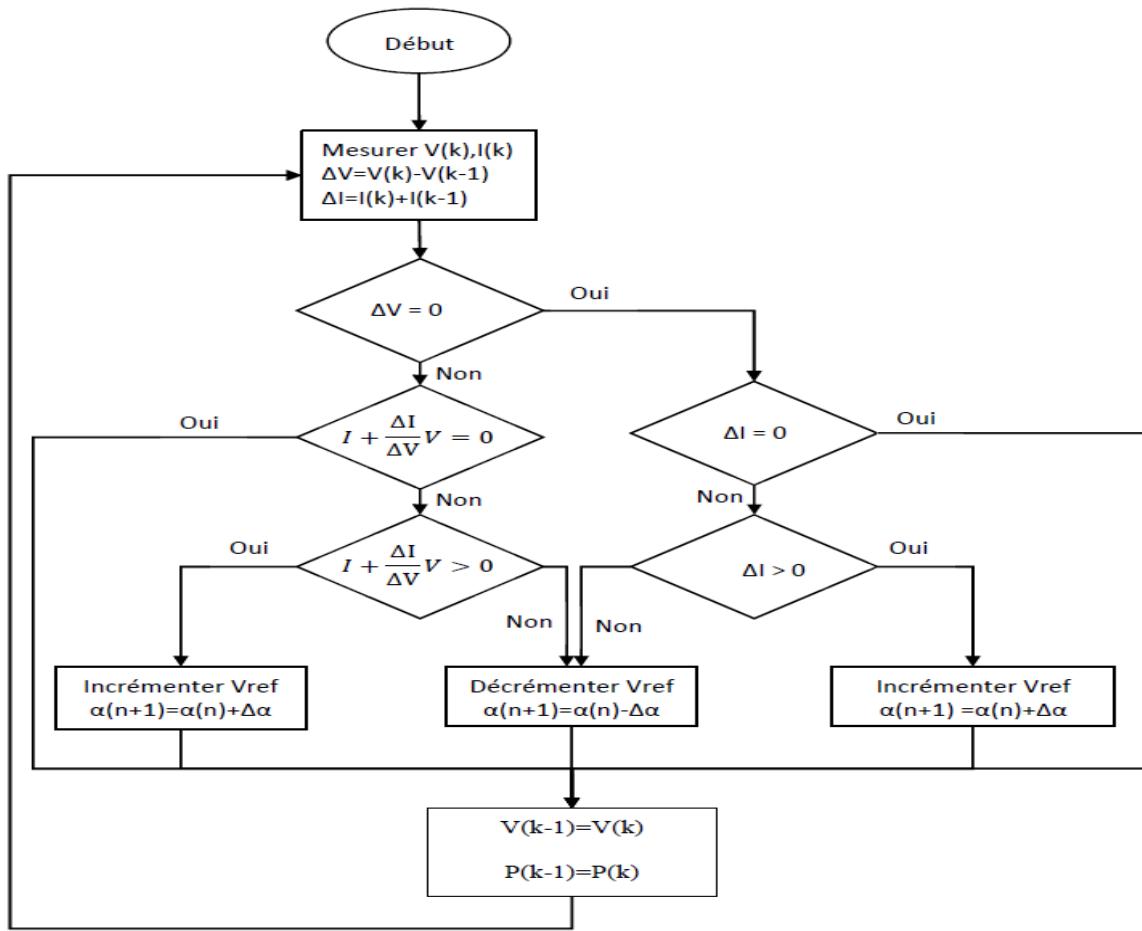


Figure III.7 l'algorithme IncCond classique

Une autre solution est possible encoure comme la méthode de p&o .c'est aussi de garder le même algorithme de la méthode IncCond classique ou le pas de perturbation est variable le pas propose est [30] :

$$\alpha(k) = \alpha(k-1) \pm N \times \left| \frac{p(k)-P(k-1)}{V(k)-V(k-1)} \right| \quad (\text{III-7})$$

III.4.5 Autres Méthodes

Il existe dans la littérature d'autres algorithmes MPPT plus complexes qui font parfois appel à des techniques nouvelles. On peut citer [31] [32] :

- les algorithmes à base de réseau de neurones
- méthode de look-up table
- les algorithmes d'identification en temps réel du MPP
- Méthode de β
- l'algorithme de la capacité parasite (Parasitic Capacitance)

- La méthode de balayage du courant (Current Sweep)

III.5 Simulation du système photovoltaïque

III.5.1 L'algorithme perturbation et observation (P&O)

La figure(III.8): présente Schéma bloc SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT (P&O), composé avec un module PV avec un hacheur commandé en MPPT qui a pointées la tension et le courant de sortie du module.

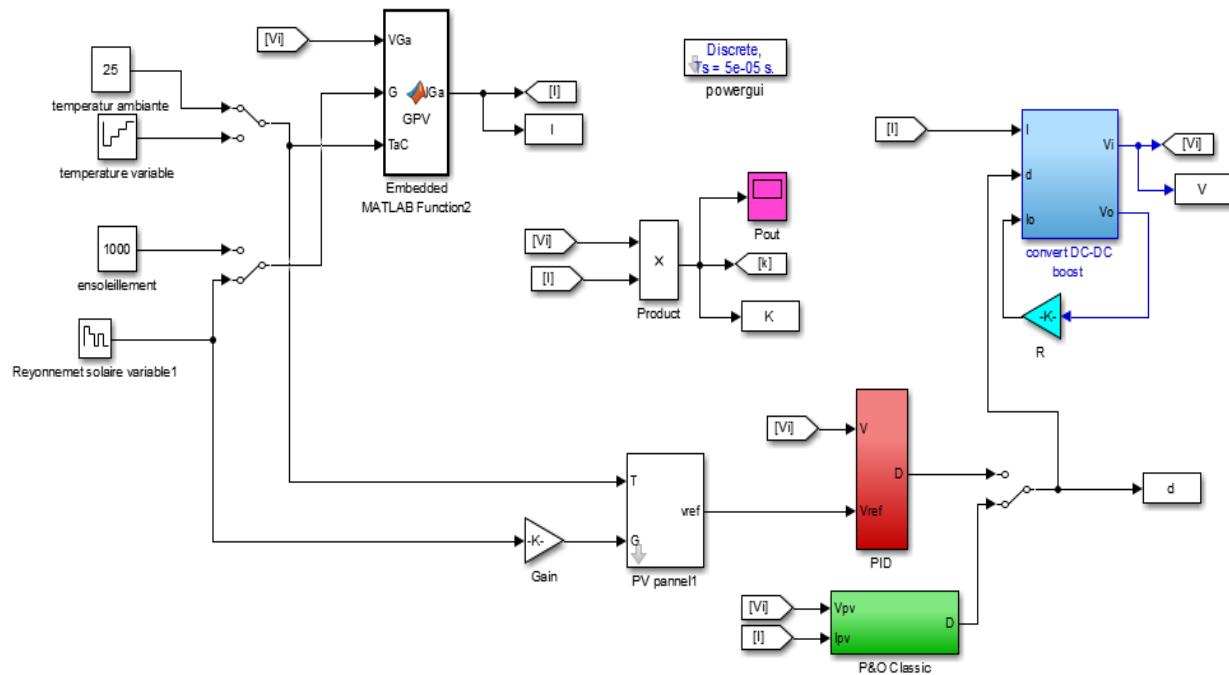


Figure III.8 Schéma bloc SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT (P&O)

Dans cette simulation on a utilisé un Module photovoltaïque BP SX 150W de BP, un hacheur Boost caractérisé par : $C_1 = 560\text{e-}6\text{F}$, $C_2 = 350\text{e-}6\text{F}$, $L = 850\text{e-}6\text{H}$, $R = 0.05\text{ohm}$, on a utilisé aussi une commande MPPT de type P&O.

On représente le modèle mathématique de l'Algorithme (P&O) sous MATLAB Comme suit.

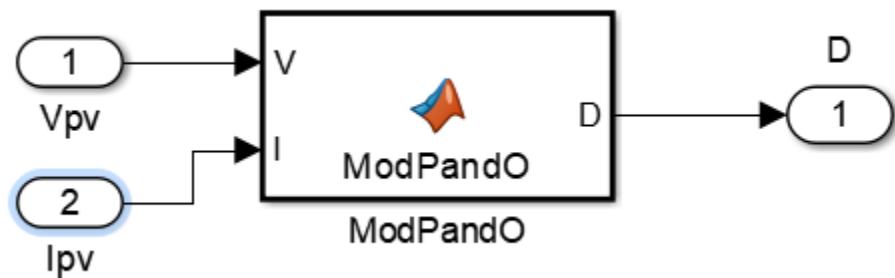


Figure III.9 Schéma de simulation de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P&O)

Les résultats de la simulation du système PV utilisant l'algorithme de perturbation et d'observation sont présentés à les figures ci-dessus.

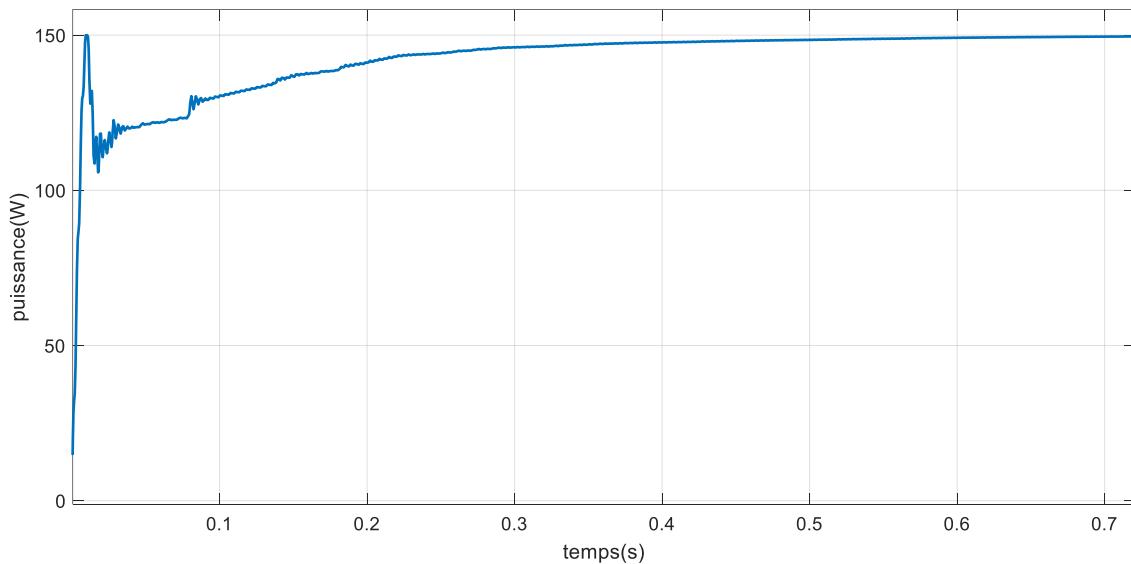


Figure III.10 Allure de la puissance en fonction de temps pour ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{W/m}^2$).

De la figure (III.10), On remarque que la puissance met un temps d'oscillation de (0.6s) pour se stabiliser à la valeur maximale de la puissance (150W).

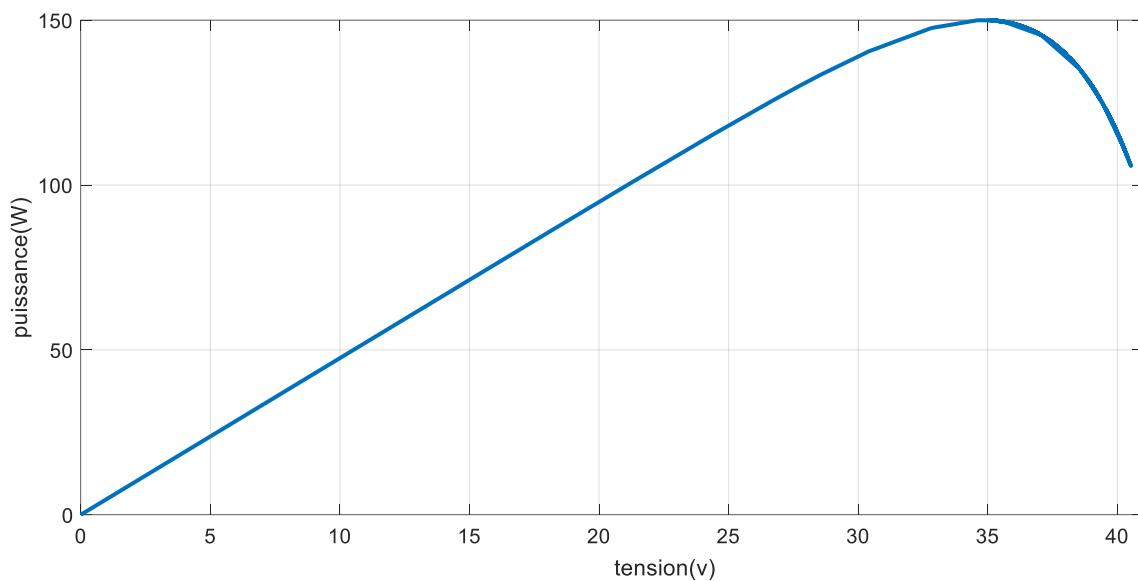


Figure III.11 Allure de la puissance en fonction de tension pour ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{W/m}^2$)

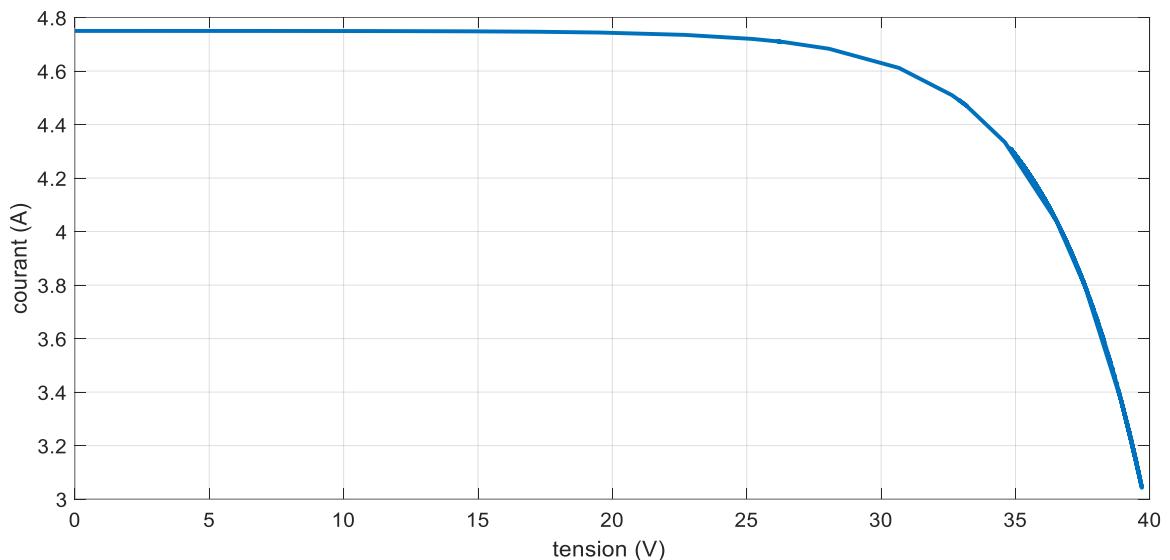


Figure III.12 Allure de courant en fonction de la tension ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{W/m}^2$).

D'après les figures obtenus on remarque pour un rayonnement fixe la puissance oscille au tour de point maximale (PPM), c'est pareille pour la courbe de courant. Cela prouve de l'efficacité de la commande (MPPT).

Les figures(III.13) (III.14) suivants présente allure de puissance et de tension en fonction de temps d'un système photovoltaïque (panneau 150W) commandé par un contrôleur P&O dans une température constante et éclairements variable ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=300, 800, 1000 \text{ W/m}^2$) :

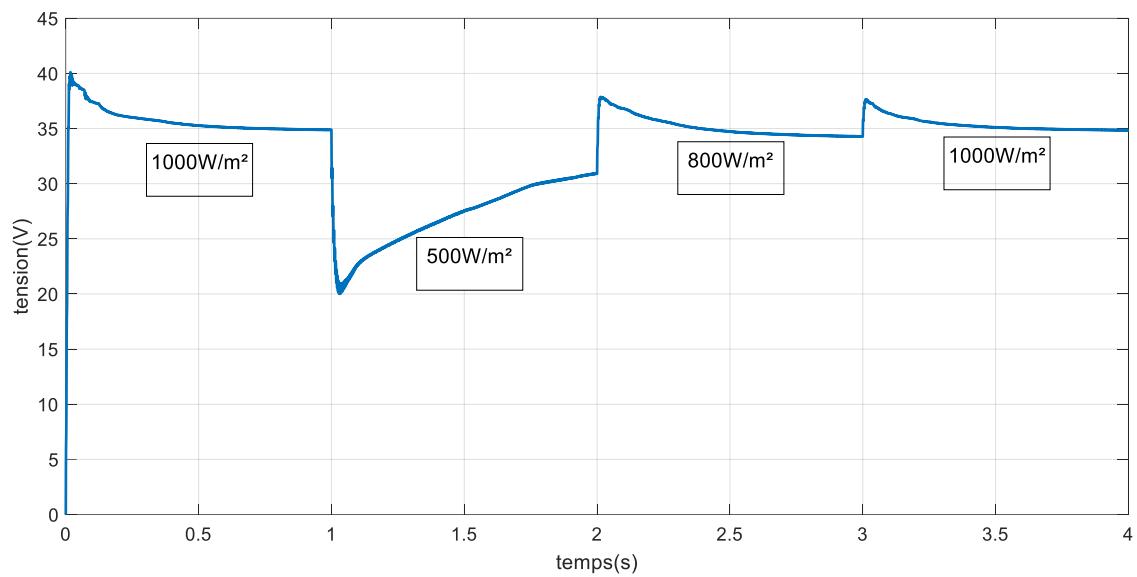


Figure III.13 Allure de la tension générée en utilisant pas variable en fonction de temps ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=500, 800, 1000 \text{ W/m}^2$)

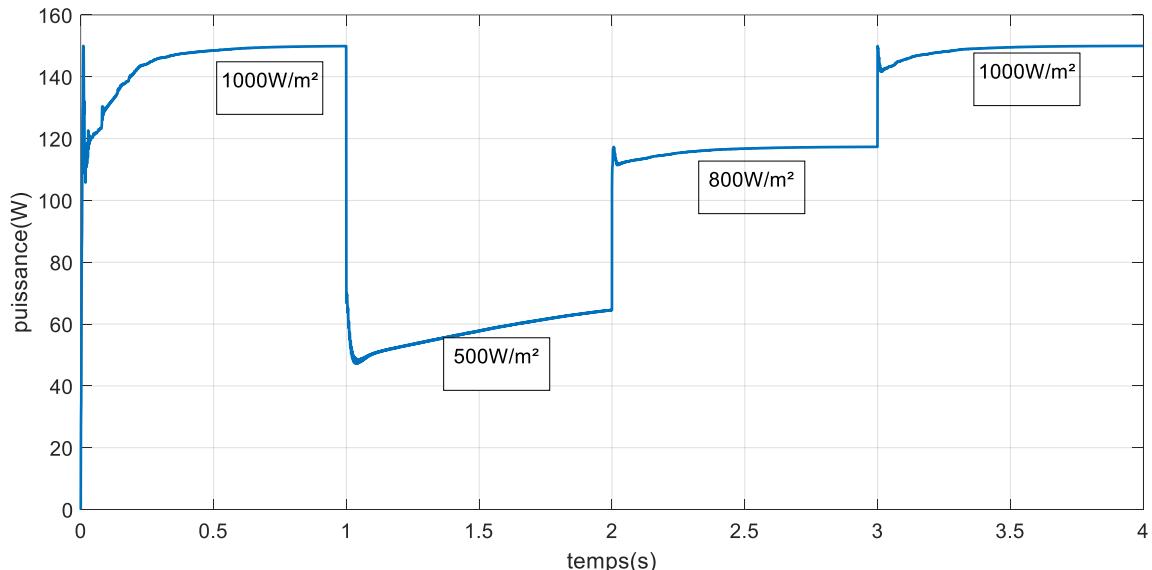


Figure III.14 Allure de la puissance générée en utilisant pas variable en fonction de temps ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=500, 800, 1000 \text{ W/m}^2$)

Dans un premier temps, nous avons soumis le système à une variation de luminosité de 300, 800 à 1000 W/m^2 à l'instant $t=1\text{s}$ et $t=2\text{s}$. Par conséquent, nous constatons dans les Figures une augmentation de la tension qui induit une diminution de la puissance, le point de fonctionnement du système s'éloigne. Les figures(III.15) (III.16) suivantes présente allure de puissance et le

courant en fonction de la tension d'un système photovoltaïque (panneau 150W) commandé par un contrôleur P&O dans une température constante et différentes éclairements ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=300, 800, 1000 \text{ W/m}^2$):

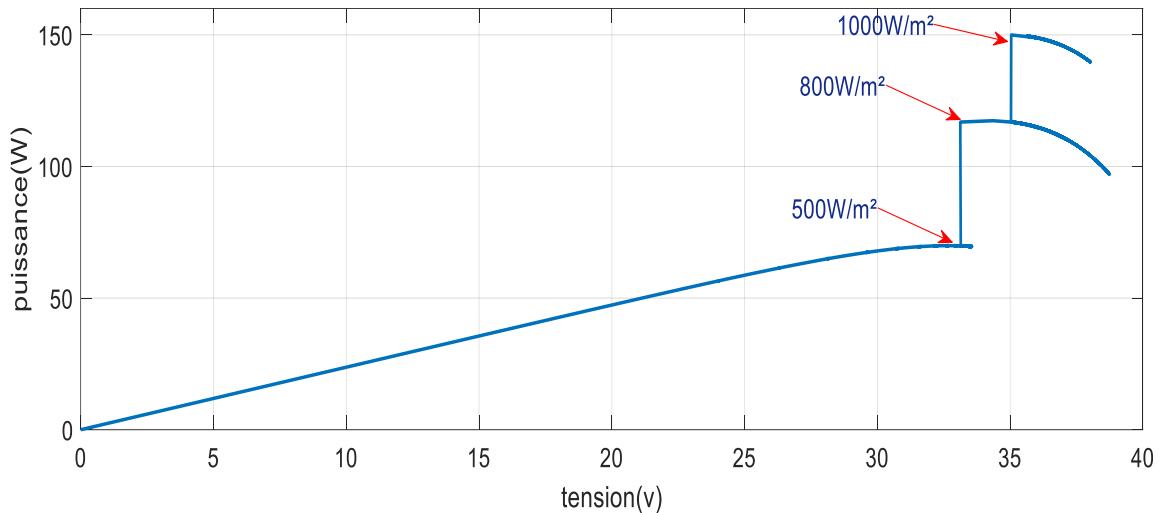


Figure III.15 Allure de la puissance en fonction de la tension ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=500, 800, 1000 \text{ W/m}^2$)

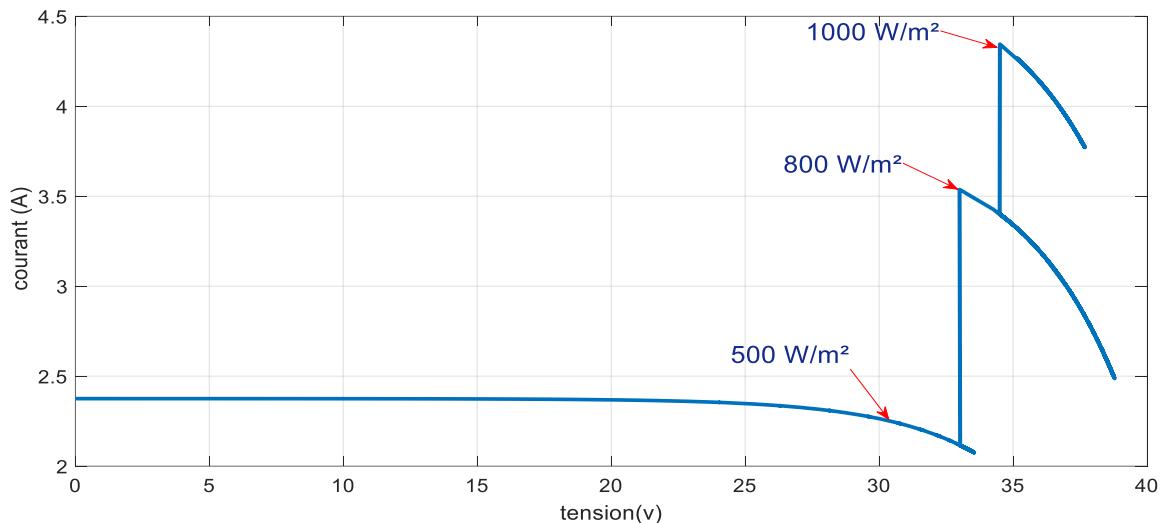


Figure III.16 Allure de courant en fonction de la tension ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=500, 800, 1000 \text{ W/m}^2$)

D'après les figures obtenues on remarque que la puissance réagit en fonction de l'éclairement et ce fixe toujours à la puissance maximale et la même pour la courbe de courant.

III.6 Amélioration l'algorithme perturbation et observation (P&O) :

On remarque que l'inconvénient majeur de l'algorithme P&O d'ors de recherche de PPM, les pertes de puissance au démarrage qui influente sur le rendement de système.

Pour remédier à ce problème une nouvelle technique utiliser un pas variable, cette nouvelle variation est optimisé en pilotant un régulateur PID ajusté par optimisation par essaim de particules. La sélection des paramètres K_p , K_i et K_d du PID qui optimisent le transfert de puissance à travers le convertisseur DC-DC sont choisies partentative.

On représente le modèle mathématique de le régulateur PID sous le programme MATLAB Comme suit :

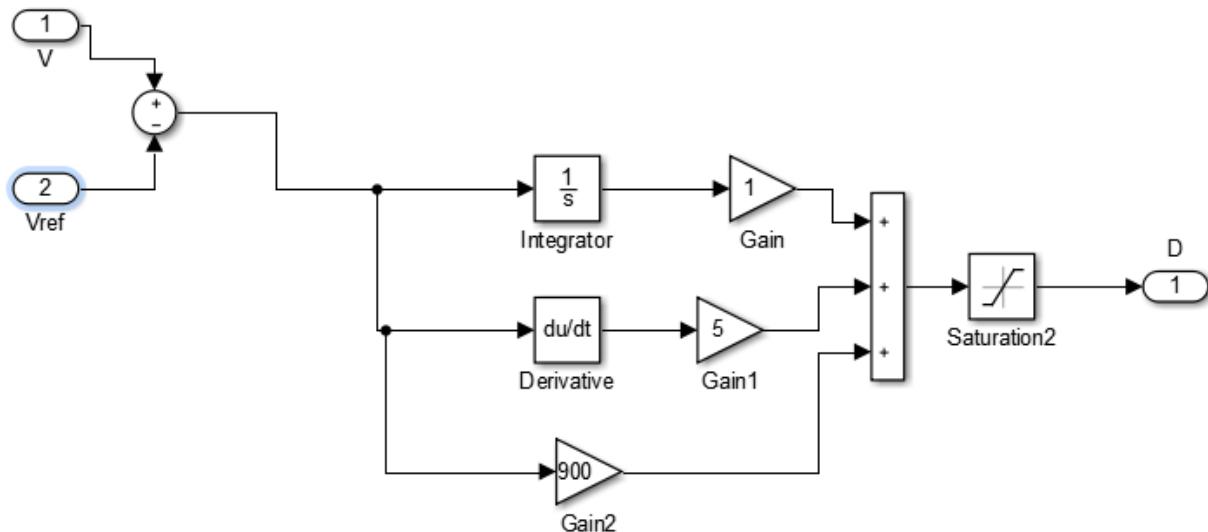


Figure III.17 Schéma de simulation de le régulateur PID.

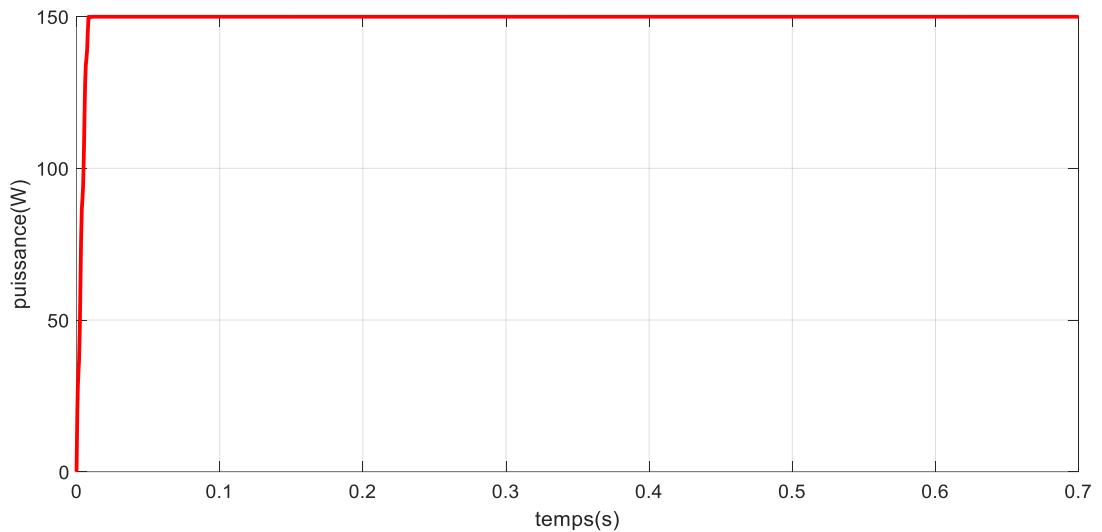


Figure III.18 Allure de la puissance générée en utilisant le PID en fonction de temps ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{W/m}^2$).

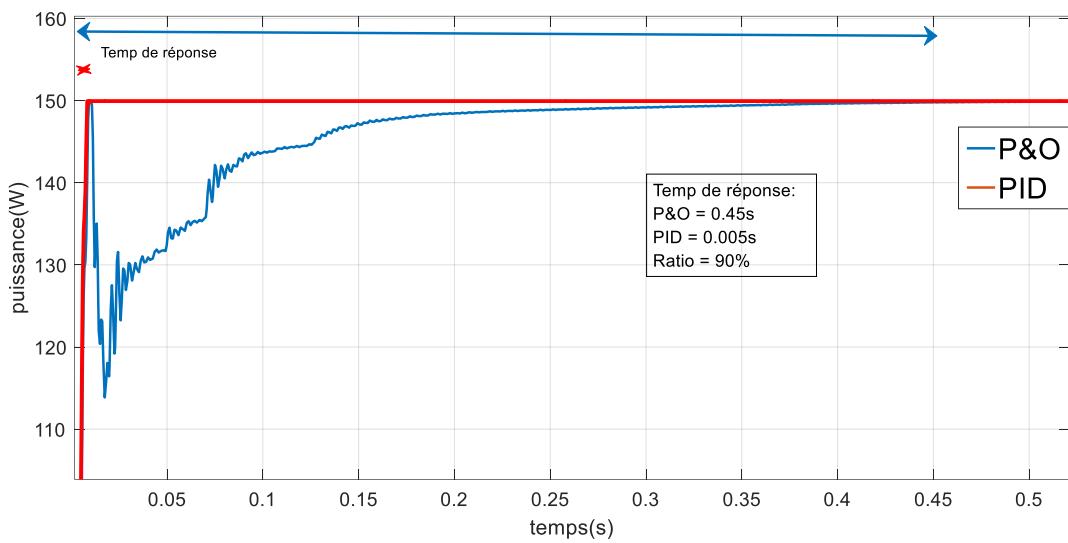


Figure III.19 Allure de comparaison entre la puissance générée en utilisant pas variable et pas fixe en fonction de temps ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{W/m}^2$).

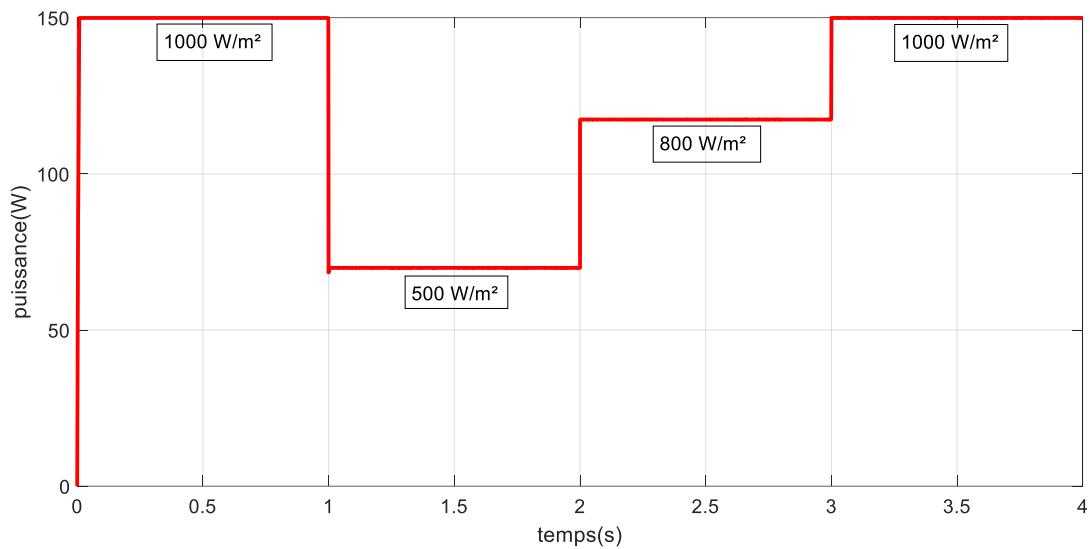


Figure III.20 Allure de la puissance générée en utilisant le PID en fonction de temps ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=500, 800, 1000 \text{W/m}^2$).

III.7 Comparaison des résultats des techniques de commande (PID, P&O) :

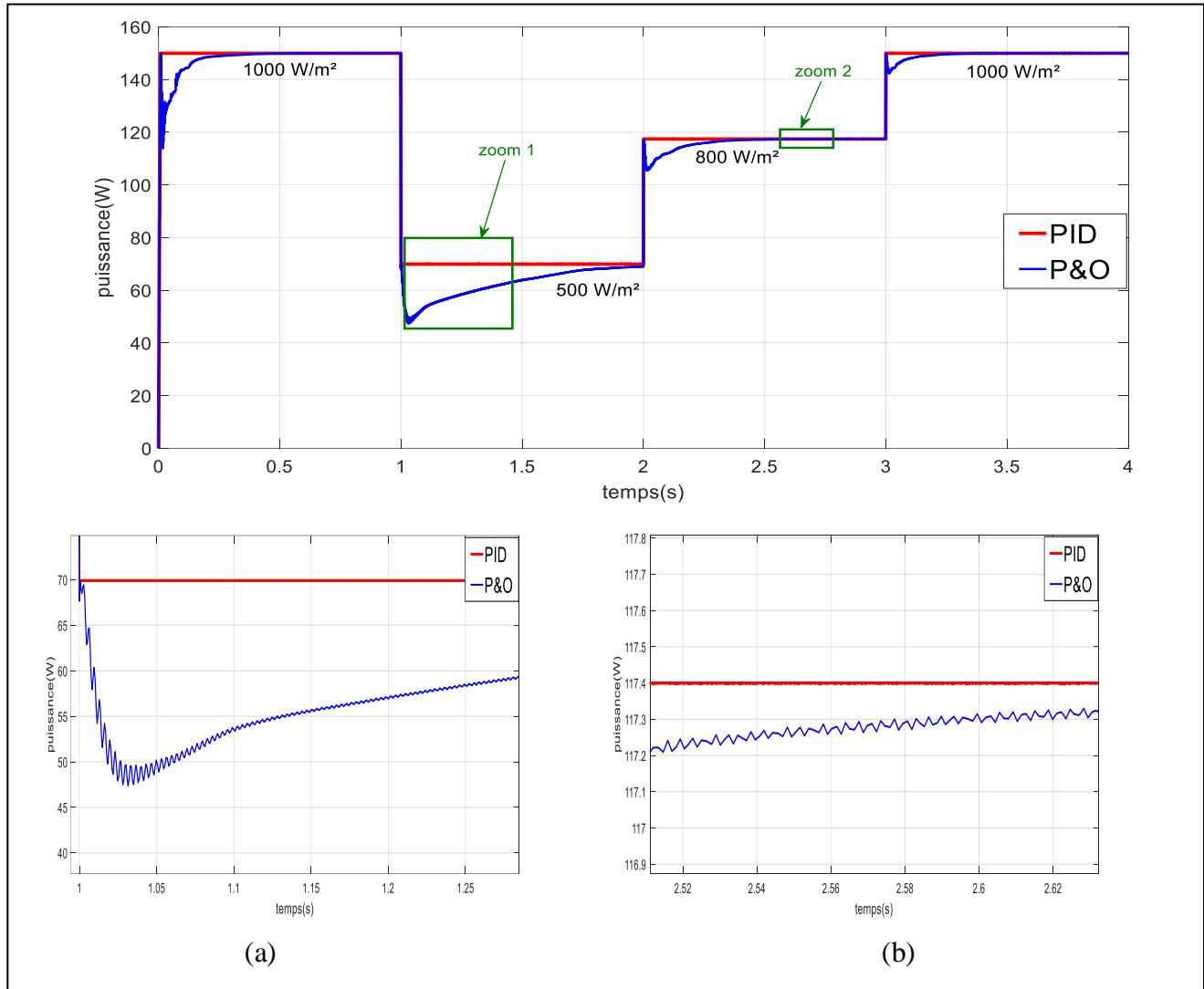


Figure III.23 Allure de comparaison entre la puissance générée en utilisant pas variable et pas fixe en fonction de temps ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=500, 800, 1000 \text{ W/m}^2$), a) Zoom 1, b) Zoom 2

Ces résultats confirment le bon fonctionnement du contrôleur P&O mais montrent également un meilleur fonctionnement du contrôleur PID. Ce dernier a prouvé qu'il a de meilleures performances, temps de réponse rapide et erreur à l'état permanent très faible, et qu'il est robuste aux différentes variations des conditions atmosphériques.

III.8 Conclusion

Ce chapitre a examiné plusieurs méthodes MPPT qui reposent sur la rétroaction de puissance, notamment l'algorithme d'incrémentation de l'inductance (Inc.CoN) et la méthode de perturbation et observation (P&O). L'accent a été mis sur l'amélioration des performances et du rendement des systèmes photovoltaïques. L'objectif principal était de trouver un algorithme efficace et optimal pour extraire la puissance maximale disponible du générateur photovoltaïque. Une nouvelle technique, basée sur le principe du PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé) à pas variable, a été proposée

Conclusion générale

Conclusion Générale

La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles telles que l'uranium, le gaz et le pétrole se font de plus en plus rares en raison de l'expansion considérable de l'industrie ces dernières années. Pour répondre à ces besoins en énergie, des recherches sont menées dans le domaine des énergies renouvelables. L'une de ces alternatives est l'énergie solaire photovoltaïque, une source d'énergie propre, silencieuse, abondante et gratuite. C'est pourquoi son utilisation connaît une croissance significative à l'échelle mondiale. [32]

L'énergie solaire photovoltaïque présente de nombreux avantages, notamment son caractère inépuisable et non polluant grâce à son absence d'émissions de gaz à effet de serre, ainsi que sa disponibilité locale et pratique.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté une description générale sur des systèmes photovoltaïques, en mettant en lumière leurs différents types, ainsi que les avantages et les inconvénients comparatifs des systèmes photovoltaïques.

Dans le deuxième chapitre, nous avons exposé le principe de fonctionnement d'un système Photovoltaïque, à cet effet, nous avons commencé par un aperçu sur les systèmes photovoltaïques, le principe de fonctionnement et le modèle mathématique ensuite on a montré les résultats de simulation d'un panneau photovoltaïque (150W) dont les deux effets (température et rayonnement) ont été montrés et analysé.

Le troisième chapitre est consacré à la description de la commande MPPT, le principe de recherche du MPP, les différents algorithmes MPPT les plus répandus existants dans la littérature (Inc.CoN, P&O), avec des études d'amélioration de la performance de l'algorithme (P&O) avec une nouvelle technique propose le principe de pas variable. Les résultats de simulation obtenue ont montré que le rendement d'un système photovoltaïque dépend essentiellement par le rayonnement mais aussi les dispositifs de commande. Malgré la variété des techniques d'extraction à savoir IC, P&O mais il nécessaire de les améliorés afin de réduire (les oscillations. Améliore le temps de réponse, suivit) pour cette raison a fin d'amélioré les performances d'un système photovoltaïque nous avons introduit le régulateur PID.

Le travail présenté dans ce mémoire peut être améliorée la validation expérimentale.

Références Bibliographiques

- [1] **Ali Nasr Allah Ali, Mohamed H. Saied, M. Z. Mostafa And T. M. Abdel- Moneim,** “a survey of maximum ppt techniques of pv systems”. IEEE energy tech, 2012.
- [2] **Trishan Esram And Patrick**“comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques” IEEE transactions on energy conversion, 2007.
- [3] **B. Fléche, D. delagnes,** «énergie solaire photovoltaïque», STI ELT juin 2007
- [4] **Y. Pankow**, «Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse Tension application au Générateur photovoltaïque », thèse de Doctorat, centre nationale de Recherche technologique de Lille, 2004.
- [5] <http://energies2demain.com/wpcontent/uploads/polycristaline.jpg>.
- [6] **Frank Jackson** : Planning and Installing Photovoltaic Systèmes Green Dragon Energy, A guide for installers, architects and engineers second edition Berlin October 2007
- [7] **Anne Laburet, Michel Villoz** : énergie solaire photovoltaïques 3eEdition dunod paris 2006
- [8] www.ohmeo.com/composition-panneau-PV
- [9] **F. Benyarou** « Conception assistée par ordinateur des systèmes Photovoltaïques [Modélisation, dimensionnement et simulation », Thèse de Doctorat d'état. Université de Tlemcen Juillet 2004.
- [10] **Amara.K**, «Contribution à l'étude de conception d'une centrale photovoltaïque de puissance (1MW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyen tension », Mémoire de Master, Université de Tizi-Ouzou, 2015
- [11] **Slama.F**, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique », Mémoire de Magister, Université de Sétif, 2011
- [12] **O.Katia,M.Houria**, «Modélisation et Contrôle d'un Système Photovoltaïque Connecté au Réseau», MASTER ACADEMIQUE, Université Abderrahmane Mira de Bejaia,2015.
- [13] **A. Ould Mohamed Yahya**, A. Ould Mahmoud Et I. Youm « etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque » revue des energies renouvelables vol. 11 n°3 sénégal, 2008
- [14] **Sahraoui.A..N**,«étude d'une chaine de convertisseur photovoltaïque», Mémoire de magistère Université de Msila,2010

- [15] **A.Benayad**, « modélisation des panneaux photovoltaïques par les méthodes de soft computing. » mémoire de magister, département de génie électrique, université de béjaia 2011.
- [16] **Alain Bilbao** « larreta réalisation de commandes mppt numériques » diplôme ingénieur technique industriel, septembre 2006
- [17] **N.Femia, G.Lisi, G. Petrone, And M.Vitelli** “distributed maximum power point tracking of photovoltaic arrays: novel approach and system analysis”. IEEE transaction on industrial electronics, vol. 55, no. 7. 2008.
- [18] **C.Andr'Es, G.Spagnuolo, G. Petrone, M.Vitelli And J.David bastidas** “a multivariable mppt algorithm for granular control of photovoltaic systems” IEEE 2010
- [19] **F.Slama**, « modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique », mémoire de magister d'electrotechnique, sétif 2012.
- [20] **M.Obeidi**, « commande des hacheurs mppt par logique floue », mémoire de magister, ecole nationale polytechnique 2006
- [21] **Aamarouayache Mohamed**, « contribution à l'optimisation d'une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque », doctorat en sciences en électrotechnique option ,2014
- [22] **M. Angel Cid Pastor**, « conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques », docteur de l'institut national des sciences appliquées de toulouse, 2006
- [23] **Anantapuram**, “investigation on potential photovoltaic power modules for higher electrical output” ph.d in electrical engineering, kiranmayi r-jawaharlal nehru technological university, 2012
- [24] **Ahmad Zbeeb**, “a new microcontroller-based mppt algorithm for photovoltaic applications” for the degree of master of applied science, concordia university montreal, quebec, canada, 2009.
- [25] **d. Lee, H. Noh, D. Hyun, And I. Choy**, “an improved mppt converter using current compensation method for small scaled pv-applications,” IEEE applied power electronics conf. And exposition, vol. 1, pp. 540-545, 2003
- [26] **Akihiro Oi**, “ design and simulation of photovoltaic water pumping system”, faculty of cali- fornia polytechnic state university, 2005
- [27] **Hajar Bagheri** “advances in electric power engineering” publisher: lulu (usa), 2015
- [28] **Bisker Asma, Chiri Meriem**, « commande d'un système photovoltaïque en mode isolé et en mode connecté au réseau », diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique, école

nationale polytechnique, 10, av. Hassen badi, elharrach, algérie, 2012

- [29] **Nadir Mohamed, Sahraoui Ahmed, Titraoui Abdessalam** « etude d'une chaine de conversion photovoltaïque », diplôme d'ingenieur d'etat en génie electrotechnique, université de m'sila, 2010
- [30] **A. Dolara, R. Faranda, S. Leva** “energy comparison of seven mppt techniques for pv systems”, scientific research j. Electromagnetic analysis & applications, department of energy of politecnico di milano, via la masa 34, 20156, milano, italy, 2009;
- [31] (2010) <http://www.solarserver.de/gclid=CJWA1ruS-K4CFS4NtAodSzY7xw>.
- [32] "**BOUALEM DENDIB**" Technique conventionnelles et avancée de poursuite MPPT

ملخص:

تعتمد كفاءة التركيب الكهروضوئي على عوامل الطقس مثل شدة الضوء ودرجة الحرارة. على سبيل المثال، في حالة محطة متنقلة تعمل بمصدر كهروضوئي، قد تختلف الطاقة التي يوفرها المولد الكهروضوئي بسبب تغيرات الاتجاه أو الممرات في المناطق ذات ضوء الشمس القليل.

وبعبارة أخرى، فإن التركيب الكهروضوئي الفعال هو الذي يضمن أقصى قدر من الطاقة مهما كانت ظروف الاستخدام. في هذا العمل قدمنا في البداية عموميات حول الطاقة الشمسية، كما عملنا تصميم للوح شمسي ذو استطاعة (150واط) واستعملنا عدة تقنيات مراقبة مثل تقنية الاضطراب و المراقبة التي لاحظنا أن لديها سلبيات تحتاج الى تحسين و لهذا قدمنا المتحكم تناصبي تكافيلي تقاضلي لتحسين هذه السلبيات، وفي الأخير، عملنا مقارنة بين التقنيتين.

كلمات مفتاحية : نظام الطاقة الشمسية، لوغارitmie الاضطراب و المراقبة ، متحكم تناصبي تكافيلي تقاضلي

Résumé:

L'efficacité d'une installation photovoltaïque dépend de facteurs météorologiques tels que l'intensité lumineuse et la température. Par exemple, dans le cas d'une station mobile alimentée par une source photovoltaïque, la puissance fournie par le générateur PV peut varier en raison de changements de direction ou de passages dans des zones peu ensoleillées.

En d'autres termes, une installation photovoltaïque performante est celle qui garantit une puissance maximale quelles que soient les conditions d'utilisation.

Dans ce document, nous avons présenté en premier temps généralités sur le système PV, puis nous avons procéder la modélisation du panneau PV de (150W) et nous avons utilisé plusieurs techniques du contrôle de MPPT à savoir P&O et nous avons constaté qu'il présente que cette méthode présente toujours des inconvénients nécessitant des amélioration pour cela nous avons introduire le régulateur PID afin de limité les inconvenants de la méthode P&O ,Finalement, nous avons fait un comparaison entre les deux technique présenté et analysé .

Mots clés : Système photovoltaïque, MPPT, le régulateur (PID).

Abstract:

The efficiency of a photovoltaic installation depends on meteorological factors such as light intensity and temperature. For example, in the case of a mobile station powered by a photovoltaic source, the power provided by the PV generator may vary due to changes in direction or passage through areas with low sunlight.

In other words, a high-performing photovoltaic installation is one that ensures maximum power output regardless of usage conditions.

In this document, we first presented generalities about the PV system, then we proceeded to model the PV panel of (150W) and we used several techniques from control of MPPT namely P&O and we found that it presents that this method presents always disadvantages require improvement for this we introduced the PID regulator in order to limit the disadvantages of the P&O method. Finally, we made a comparison between the two techniques presented and analyzed.

Keywords: Photovoltaic system, MPPT, regulator (PID).