

République l'Algérienne Démocratique et Populaire

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique**



CENTRE UNIVERSITAIRE D'EL-OUED

INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Mémoire de fin d'étude

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Spécialité : Génie mécanique

Option : Réseaux Electrique

Thème

**Etude et modélisation d'un générateur
photovoltaïque.**

Réalisé par :

imane bouzegag

Mahboub Monia

3

Encadré par :

labbi yacine

PROMOTION 201Salhi Fadhila

Remerciement

Tout d'abord nous remercions Allah le tout puissant qui nous a éclairé le bon chemin.

Je tiens à remercier Mr Labi Yacine, Professeur à l'Université d'EL-OUED qui a accepté de m'encadrer, et je lui exprime particulièrement toute ma reconnaissance pour m'avoir fait bénéficier de ses compétences scientifiques, ses qualités humaines et sa constante disponibilité.

L'Université d'EL-OUED d'avoir accepté de faire partie du Jury.

Mes remerciements à :

Toutes nos gratitudes à nos enseignants.

Et nos amis.

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Sommaire

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I. 1 Introduction	3
I. 2 Historique	3
I. 3 Cellule solaire	3
I. 3. 1 Structure et principe de fonctionnement	4
I. 3. 2 Influence de la température et du rayonnement.....	6
I. 3. 2. 1 Influence de la température	6
I. 3. 3. 2 Influence du rayonnement	7
I. 4 Le panneau solaire	7
I. 5 Association des générateurs photovoltaïques	7
I. 5.1 Association en parallèle	8
I. 5.2 Association en série	9
I. 6 Le générateur photovoltaïque	10
I. 7 Modèle électrique du générateur photovoltaïque	11
I. 7. 1 Schéma électrique équivalent	11
I. 7. 2 Caractéristiques <i>courant – tension</i>	11
I. 7. 3 Caractéristiques puissance – tension.....	12
I. 8 Avantages et inconvénient de L'énergie solaire photovoltaïque	12
I. 9 Conclusion	13

Chapitre 2 : Généralités sur la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking)

II. 1 Introduction	14
II. 2 Théorie de la commande MPPT	14
II. 2. 1 Principe de la commande MPPT	14
II. 2. 2 Critères d'évaluation d'une commande MPPT	16
II. 3 Différents types de commandes MPPT	17
II. 4. La commande MPPT perturbation puis observation	18
II. 4. 1 Principe des commandes "Perturbation et Observation" (P&O)	18

II. 4.2 Structure de l'algorithme P&O	18
II. 5 Définition de l'étage d'adaptation entre une source et une Charge	23
II. 6 Conclusion	23

Chapitre 3 : Applications et résultats

III. 1 Introduction	24
III. 2 Tests et applications	25
III. 2. 1 1 ^{er} test : la technique MPPT-P&O	25
III. 2. 1.1 Effet de l'éclairement	26
III. 2. 1.2 Effet de la température	27
III.2.1.3 Effet simultané de l'éclairement et de la température	28
III.3 Conclusion	30
Conclusion générale	31
Liste de figure	
Liste de tableau	
Bibliographique	
Annexe	
Sommaire	

Liste de Figure

Chapitre 1 :

Figure. 1. 1 Structure d'une cellule photovoltaïque

Figure. 1. 2 Caractéristique I(V) sous obscurité et sous éclairement d'une cellule photovoltaïque

Figure. 1. 3 Effet de la température sur la caractéristique I-V

Figure. 1. 4 Evolution du courant de court-circuit et de la tension du circuit ouvert avec la température

Figure. 1. 5 Evolutions de la caractéristique courant- tension avec l'énergie reçue

Figure. 1. 6 Cellules placés en parallèle

Figure. 1. 7 Cellules placés en parallèle

Figure. 1. 8 cellules placées en série

Figure. 1.9 Évaluation de la caractéristique courant- tension avec le nombre de cellules en série

Figure. 1.10 Notion de cellule, panneau et générateur photovoltaïque.

Figure. 1.11 Schéma électrique équivalent d'un générateur photovoltaïque.

Figure. 1.12 Caractéristiques I(V) d'une cellule et d'une association de 3 branches en parallèle ayant chacune 2 Cellules en série.

Figure. 1. 13 Caractéristique courant- tension et puissance-tension du générateur photovoltaïque.

Chapitre 2 :

Figure. 2.1 Chaîne élémentaire de connexion photovoltaïque.

Figure. 2.2 Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale

Figure .2.3 Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau solaire.

Figure. 2.4 Algorithme de la méthode P&O.

Figure.2.5 Divergence de la commande P&O lors de variation d'irradiation.

Figure.2.6 Circuit électrique de base du hacheur survolteur

Figure.2.7 Caractéristique de la tension et du courant du hacheur survolteur.

Figure.2.8 Etage d'adaptation jouant le rôle d'interface de puissance entre un GPV et une charge pour le transfert de P_{MAX} du GPV.

Chapitre 3 :

Figure.3.1 Caractéristique du module photovoltaïque pour différents éclairements.

Figure.3.2 Variation PPMT sous différents valeurs de l'éclairement.

Figure.3.3 Variation PPMT sous différents valeurs de la température.

Figure.3.4 PPM avec Variation dans la température et l'éclairement au même temps.

Liste de tableau

Table. 3.1 Résultats de l'optimisation avec différents éclairement et température constante égale à 25°.

Table. 3.2 Résultat de l'optimisation avec une température variable et un éclairement constant égal à 1000 w/m².

Table.3.3 Résultats de l'optimisation avec la température et l'éclairement qui varient en même temps.

Chapitre I

Chapitre I

Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I. 1 Introduction

L'utilisation des cellules solaires comme source d'énergie électrique a fait apparaître le besoin d'étudier ces systèmes afin de les optimiser. Le générateur photovoltaïque est composé particulièrement par :

1. Historique.
2. Les cellules solaires.
3. Les modules (ou panneaux solaires)
4. Le générateur photovoltaïque.

Dans ce chapitre, nous allons donner l'essentiel sur la constitution et les caractéristiques électriques de ces structures.

I. 2 Historique [1]

Quelques dates importantes dans l'énergie photovoltaïque

1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre 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.

1954 : Trois chercheurs américains Chapin, Peason et Prince fabriquent une cellule Photovoltaïque.

1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % ; 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 en énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 Km en Australie.

I. 3 Cellule solaire [2]

La conversion photovoltaïque est la transformation de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les dispositifs capables d'effectuer cette transformation sont appelés cellules solaires ou photovoltaïques.

Le principe d'une cellule solaire est basé sur le phénomène physique appelé « effet photovoltaïque ». Celui-ci consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé, de sa disposition, de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de la cellule.

I. 3. 1 Structure et principe de fonctionnement [3]

La Figure.1.1 illustre la structure d'une cellule PV typique. On voit clairement qu'elle est réalisée à partir de deux couches de semi-conducteurs : une dopée P (dopée au bore) et l'autre couche dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule.

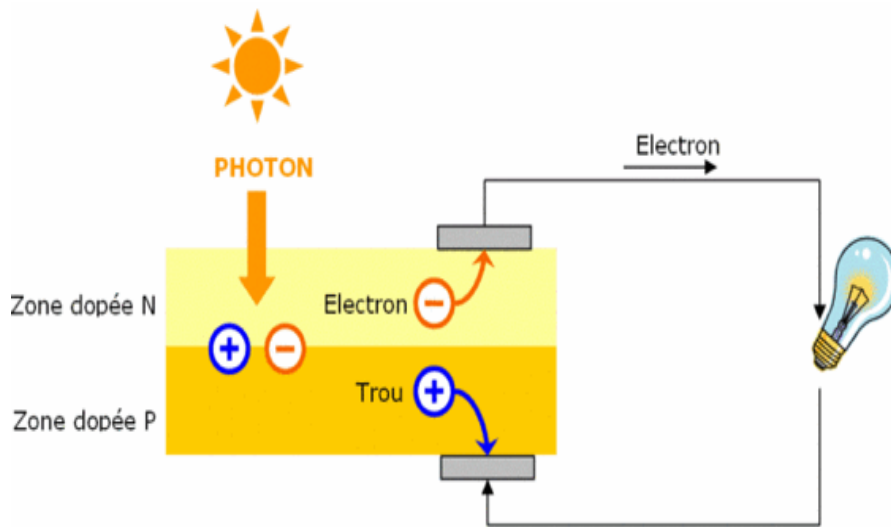


Figure. 1. 1 Structure d'une cellule photovoltaïque.

Le courant délivré sur une charge par une cellule solaire éclairée s'écrit :

$$I(V) = I_{ph} - I_{obs}(V) \dots\dots\dots (1. 1)$$

I_{ph} : Courant photo généré,

I_{obs} : Courant d'obscurité.

Pour une cellule solaire idéale, l'équation (1 .1) peut être écrite sous la forme suivante :

$$I(V) = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{KT}\right) - 1 \right] \dots\dots\dots (1. 2)$$

Avec :

I_s : Courant de saturation de la diode

q : charge élémentaire

K : constante de Boltzmann

T : la température.

Pour une cellule réelle, l'expression (1. 2) est alors remplacée par :

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{nKT}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \dots\dots\dots (1. 3)$$

$I_p = \frac{V + I.R_s}{R_p}$: Le courant dérivé par la résistance parallèle

$I_d = I_s \left[\exp\left(\frac{q(V + I.R_s)}{nKT}\right) - 1 \right]$: Le courant traversant la diode.

I_s : le courant de saturation inverse de la diode.

n : facteur d'idéalité de la diode.

Sur la Figure.1. 2 nous reportons cette caractéristique.

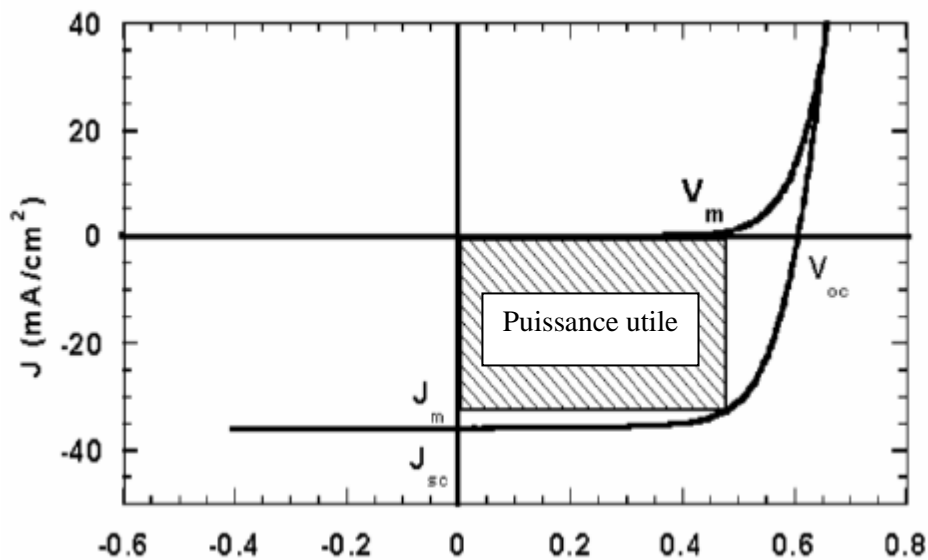


Figure. 1. 2 caractéristiques I (V) sous obscurité et sous éclairage d'une cellule photovoltaïque [2].

A partir de cette Figure, on déduit les paramètres électriques propres à la cellule :

$I_{sc} = I_{ph}$: Courant de court-circuit (obtenu pour $V=0$)

V_{oc} : Tension en circuit ouvert (obtenue pour $I=0$)

I_m : Courant à la puissance max de fonctionnement de la cellule solaire.

V_m : Tension à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule.

I. 3. 2 Influence de la température et du rayonnement

I. 3. 2. 1 Influence de la température [4]

La température est un paramètre très important dans le fonctionnement des cellules solaires vu que les propriétés électriques d'un semi-conducteur sont très sensibles à la température.

Sur la Figure.1.3, nous reportons les caractéristiques courant-tension pour différentes températures sous un ensoleillement donné ($E=1000W/m^2$).

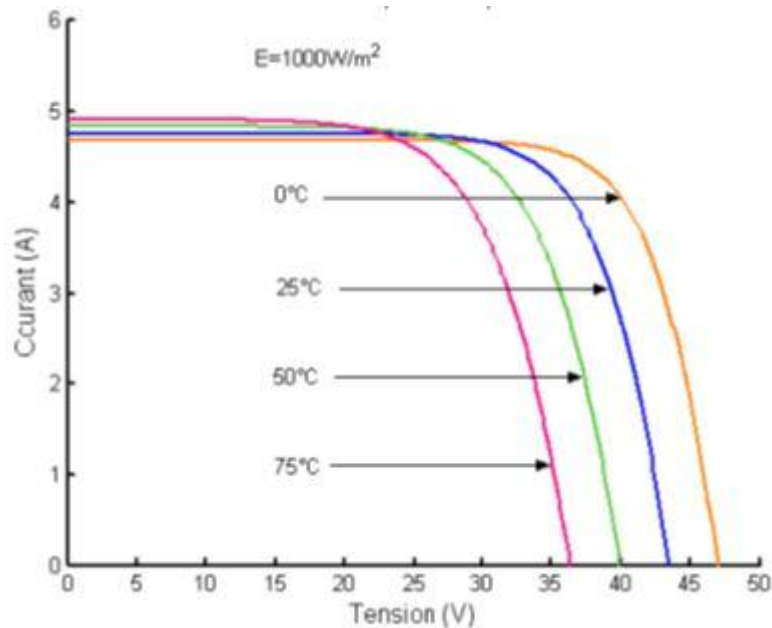


Figure. 1. 3 Effet de la température sur la caractéristique I-V [1].

L'évolution du courant de court-circuit (I_{sc}) et de la tension du circuit ouvert (V_{oc}) avec la température pour un ensoleillement $E = 100mW/cm^2$ est alors donnée sur la Figure.1. 4.

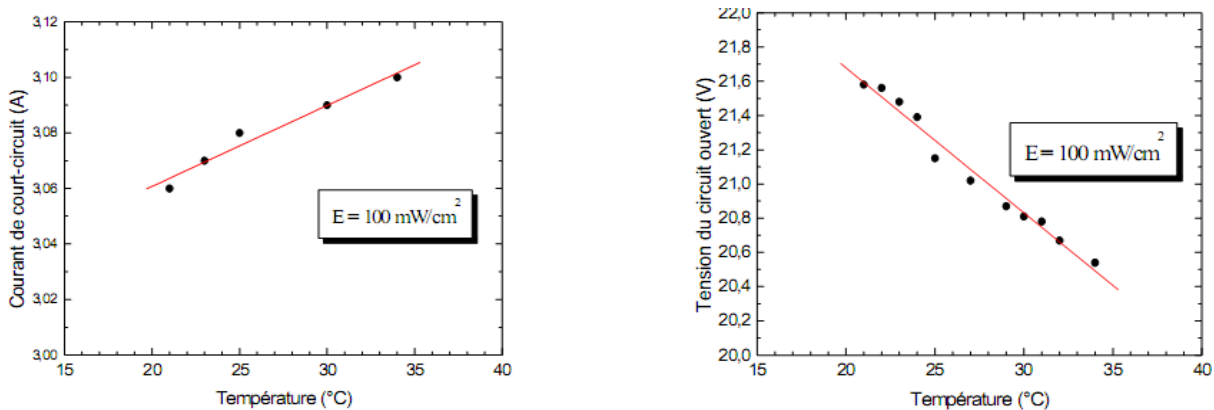


Figure. 1. 4 : Evolution du courant de court-circuit et de la tension du circuit ouvert avec la température [1].

I. 3. 2. 2 Influence du rayonnement

De la même manière que la température, la jonction PN réagit différemment selon l'énergie qu'elle reçoit. Plus elle reçoit d'énergie plus elle en restitue [4]. La variation de la caractéristique $I(V)$ est représentée sur les courbes suivantes :

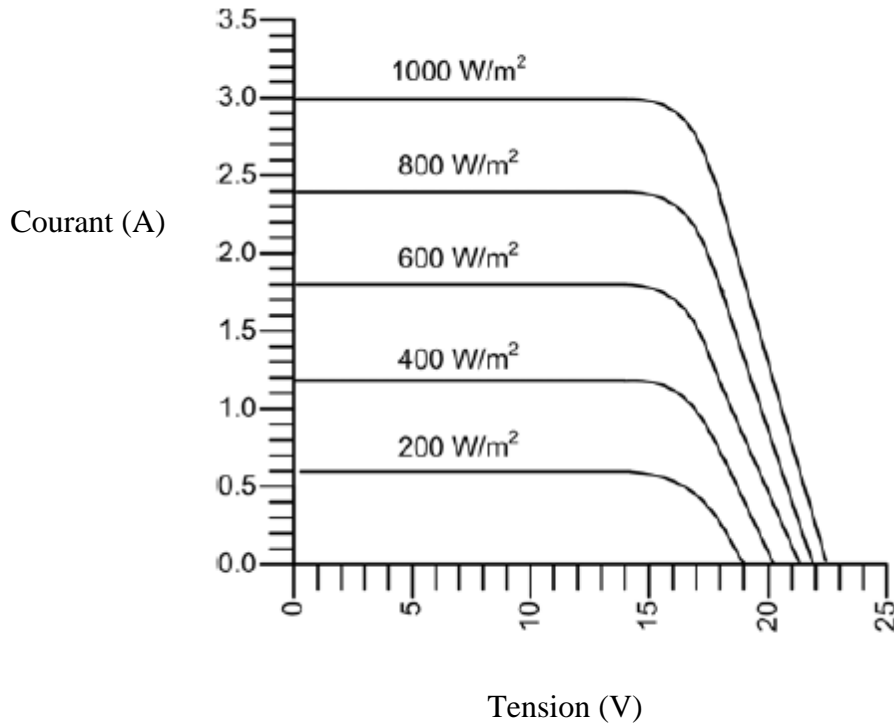


Figure. 1. 5 Evolutions de la caractéristique courant- tension avec l'énergie reçue [3].

I. 4 Le panneau solaire [3]

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un Volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. La puissance crête, obtenue sous un éclairage maximal sera proportionnelle à la surface du module.

I.5 Association des générateurs photovoltaïques [5]

La puissance disponible aux bornes d'une cellule unitaire est très faible .il est donc nécessaire d'associer en série et en parallèle des générateurs photovoltaïques pour augmenter la puissance et de rendre la puissance compatible avec l'équipement électrique usuel. Les puissances des modules disponibles sur le marché s'échelonnent entre quelque watt crête et quelque dizaines de watt crête, 1 m² de cellule produit environ 100W, En fait l'association de cellules PV est analogue à l'association de générateurs de courant. En série : leurs tensions s'ajoutent, En parallèle : leurs courants s'ajoutent.

I .5.1 Association en parallèle

Dans le cas d'une association en parallèle, les cellules délivrent la même tension mais elles peuvent fonctionner avec des courants différents. Si les modules en parallèles ne sont pas identiques ou si quelques cellules d'un module sont ombragées, le courant d'utilisation total des modules sera plus faible. Pour une impédance de charge élevée, les modules moins performants deviendront récepteurs si la tension d'utilisation est supérieure à la tension produite par ces modules. Une dissipation de puissance importante peut devenir dangereuse au niveau de la cellule la plus faible de ces modules. Ainsi pour le cas le plus critique où la charge est nulle et le circuit ouvert, le courant des branches des modules performants se dissipera dans la branche la Moins performante .dans ce cas il est préférable d'ajouter une diode anti retour, mais cette solution occasionne une chute de tension additionne.

$$U = U1 = U2 = U3 = Un$$

$$I = I1 + I2 + I3 + \dots + In$$

- Schéma électrique

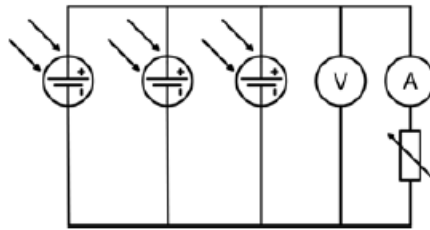


Figure. 1. 6 cellules placées en parallèle [2].

- Caractéristiques $I(V)$ courant – tension

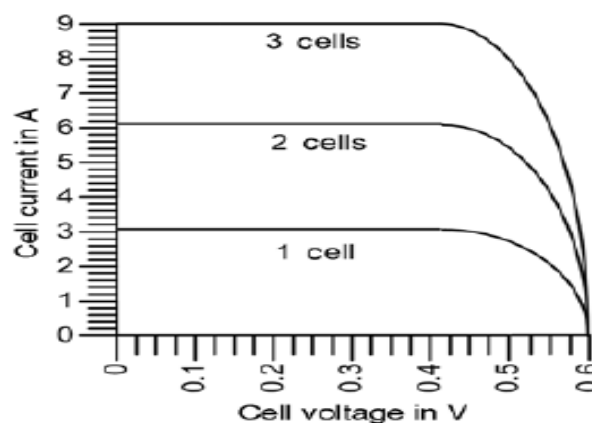


Figure. 1. 7 cellules placées en parallèle [2].

I .5.2 Association en série

La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, connectées en série pour des applications en 12 V.

$$U = U1 + U2 + \dots + Un$$

$$I = I1 = I2 = In$$

Dans ce cas, le courant qui traverse les cellules est le même mais les cellules peuvent fonctionner à des tensions différentes. Si une cellule est occultée (si elle ne reçoit plus qu'une faible partie de l'énergie solaire reçue par les cellules voisines), elle ne peut délivrer qu'un courant limité. Elle fonctionne donc en inverse (comme un récepteur soumis à une tension inverse de celle produite en direct) par rapport aux autres cellules du module qui elles, délivrent un courant supérieur à ce courant limité. En fonctionnant ainsi, un échauffement de la cellule apparaît et peut provoquer le claquage de la cellule.

- *Schéma électrique*

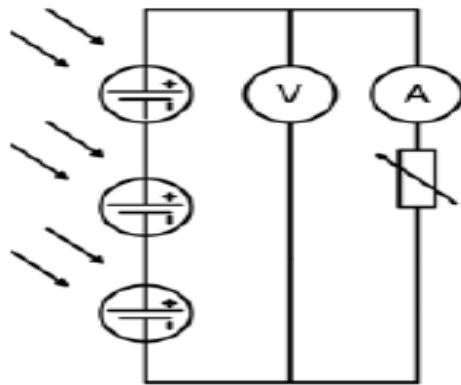


Figure. 1. 8 cellules placées en série [2].

- *Caractéristiques courant - tension*

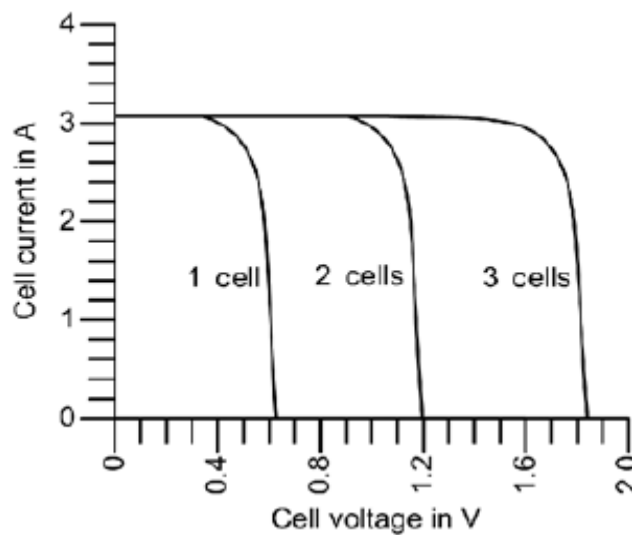


Figure. 1.9 Évaluation de la caractéristique courant- tension avec le nombre de cellules en série [2].

I. 6 Le générateur photovoltaïque [6]

L'interconnexion des modules entre eux, en série ou en parallèle, pour obtenir une puissance plus grande, définit la notion de *générateur photovoltaïque* (GPV). Le générateur photovoltaïque se compose de plusieurs modules et d'un ensemble de composants qui adaptent l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs.

L'interconnexion des cellules peut être série ou parallèle. La tension totale disponible est égale au produit du nombre de cellules en série par la tension d'une cellule, et le courant est multiplié par le nombre de cellules connectées en parallèle.

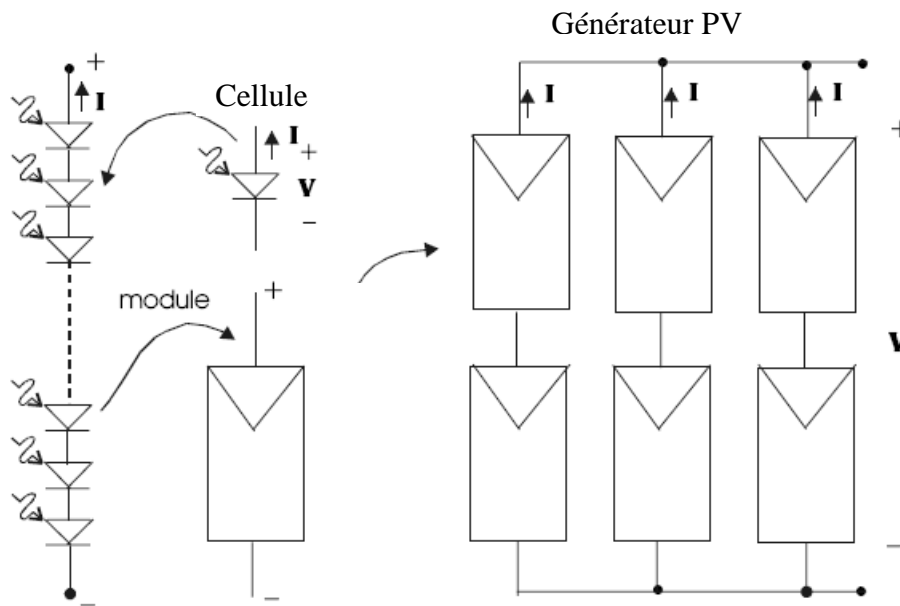


Figure. 1.10 Notion de cellule, panneau et générateur photovoltaïque.

I. 7 Modèle électrique du générateur photovoltaïque

I. 7. 1 Schéma électrique équivalent

En considérant l'expression (1. 3) et en tenant compte de l'effet de l'association des cellules PV, nous pouvons décrire le schéma électrique équivalent d'un générateur PV par la Figure.1. 11 ci-dessous :

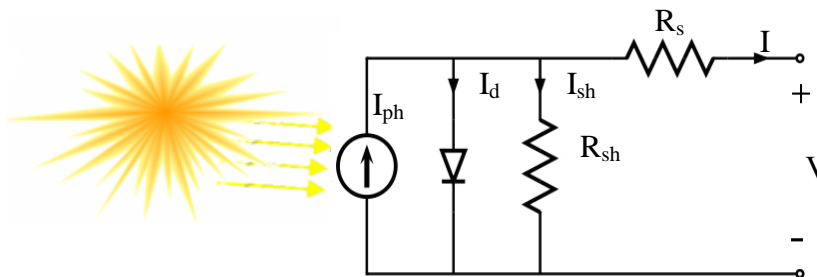


Figure. 1.11 Schéma électrique équivalent d'un générateur photovoltaïque.

I. 7. 2 Caractéristiques courant – tension

Sur la Figure.1. 12, nous reportons un exemple de la caractéristique I-V d'un module constitué d'une association de trois branches en parallèles ayant chacune deux branches en série. On remarque que :

- Le courant du module est égal au courant de la cellule multiplié par le nombre des cellules montées en parallèle.
- La tension totale est égale au produit de la tension de la cellule par le nombre des cellules en série.

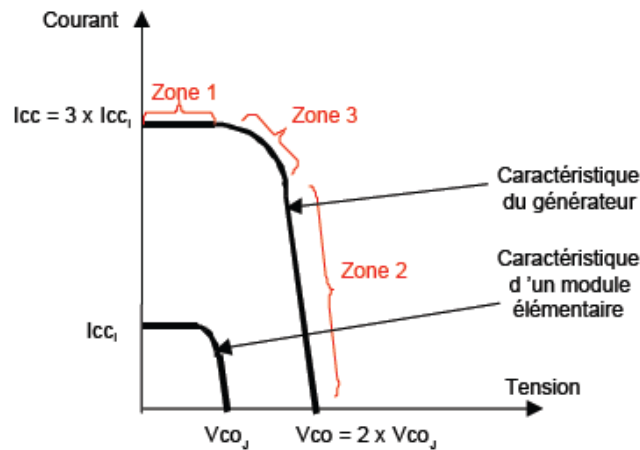


Figure. 1.12 Caractéristiques I(V) d'une cellule et d'une association de 3 branches en parallèle ayant chacune 2 cellules en série [4].

Nous pouvons décomposer la caractéristique I(V) du générateur photovoltaïque en trois zones :

- Une zone assimilable à un générateur de courant I_{CC} proportionnel à l'irradiation, d'admittance interne pouvant être modélisée par $1/R_p$ (Zone 1).
- Une zone assimilable à un générateur de tension V_{CO} d'impédance interne équivalente à R_s (Zone 2).
- Une zone où l'impédance interne du générateur varie très fortement de R_s à R_p (Zone 3).

I. 7. 3 Caractéristiques puissance – tension

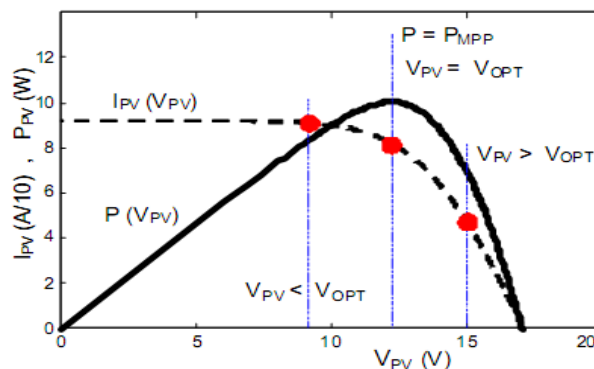


Figure. 1. 13 Caractéristique courant- tension et puissance-tension du générateur photovoltaïque [4].

I. 8 Avantages et inconvénient de L'énergie solaire photovoltaïque [7]

- Avantages :

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages :

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du Mill watt au Méga Watt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

-Inconvénients :

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients :

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

I. 9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu général sur le domaine photovoltaïque. Nous avons commencé par donner l'essentiel sur les cellules solaires (structure, principe de fonctionnement, ...).

La liaison de ces cellules (série et/ou parallèle) a été également traitée.

Cette liaison constitue le module photovoltaïque ; alors que la liaison de ces modules aboutit au panneau ou générateur photovoltaïque.

L'influence de la température et de l'éclairement sur les caractéristiques courant-tension a été présentée.

Chapitre II

Chapitre II

Généralités sur la commande MPPT

Généralités sur la commande MPPT

(Maximum Power Point Tracking)

(Maximum Power Point Tracking)

II. 1 Introduction

Les cellules photovoltaïques sont utilisées pour fournir de l'énergie dans de nombreuses applications électriques. Pour obtenir la puissance maximale du panneau solaire, un *Maximum Power Point Tracker* est utilisé pour contrôler les variations de la caractéristique courante tension des cellules. Nous avons vu la caractéristique d'une cellule, et l'évolution de cette caractéristique en fonction de l'éclairement ou de la température. Notre système doit donc pouvoir évoluer, rapidement et efficacement, en fonction des changements d'illuminations et variation du point de puissance maximale. Une possibilité aurait été de fixer un point de fonctionnement, en abaissant la tension du panneau et en augmentant le courant. Or ceci n'est plus valable lorsque le point de puissance maximale bouge. Ainsi le système MPPT doit traquer ou poursuivre le point de fonctionnement optimal du panneau. Dans ce chapitre nous présenterons le principe et les différents types de la commande MPPT.

II. 2 Théorie de la commande MPPT [8]

II. 2. 1 principe de la commande MPPT

Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximal (MPPT) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance.

La figure.2.1 représente une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque élémentaire associée à une commande MPPT. Pour simplifier les conditions de fonctionnement de cette commande, une charge DC est choisie. Comme nous pouvons le voir sur cette chaîne, la commande MPPT est nécessairement associée à un quadripôle possédant des degrés de liberté qui permettent de pouvoir faire une adaptation entre le GPV et la charge. Dans le cas de la conversion solaire, le quadripôle peut être réalisé à l'aide d'un convertisseur DC-DC de telle sorte que la puissance fournie par le GPV correspond à la puissance maximale (P_{MAX}) qu'il génère et qu'elle puisse ensuite être transférée directement à la charge.

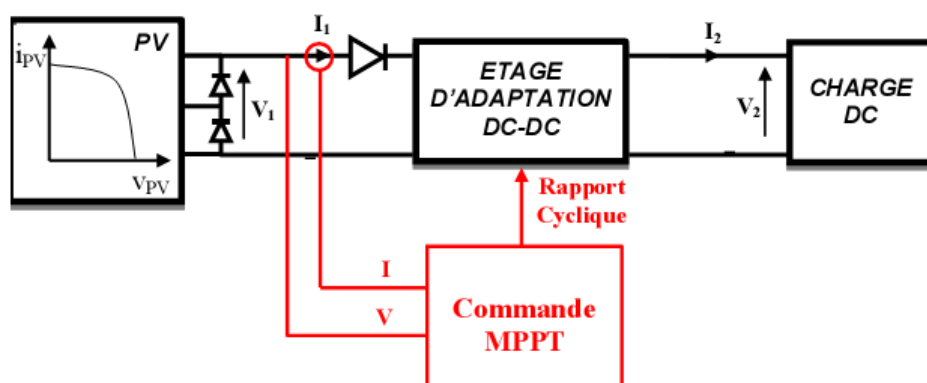


Figure. 2.1 Chaîne élémentaire de connexion photovoltaïque.

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir à tout moment.

La figure.2.2 illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM_1 vers un nouveau point P_1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum. Pour une variation d'ensoleillement (cas a), il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM_2 . Pour une variation de la charge (cas b), on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. Dans une moindre mesure, un dernier cas de variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV (cas c). Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande, cette dernière n'a pas les mêmes contraintes temporelles que les deux cas précédents. En résumé, le suivi du PPM est réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT qui agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher et atteindre le PPM du GPV.

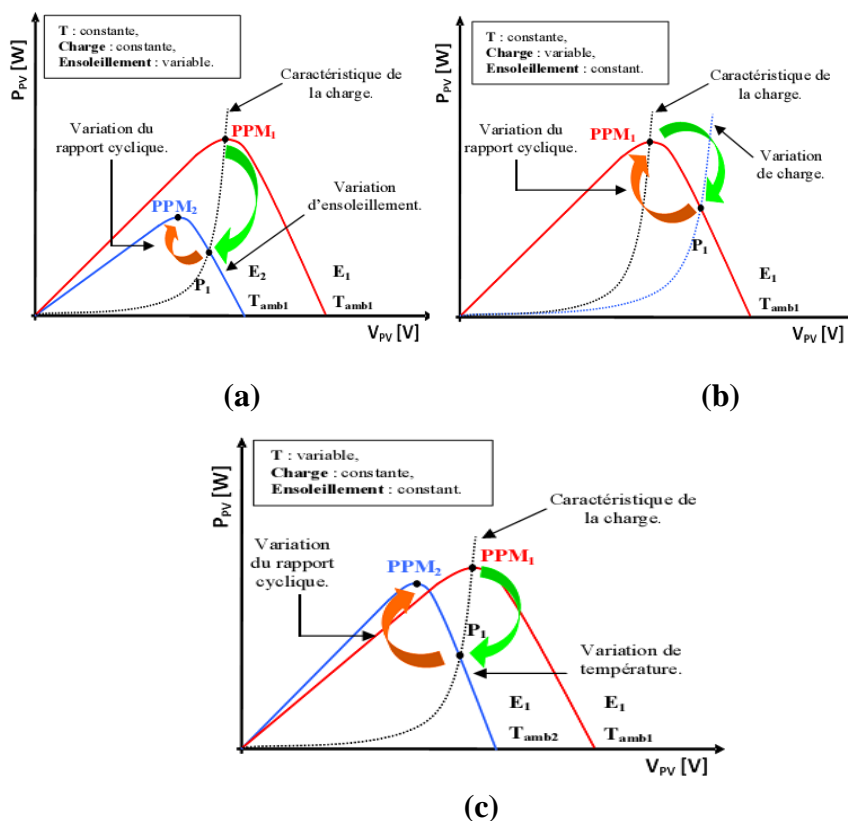


Figure. 2.2 Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale
 a) suite à une variation d'ensoleillement,
 b) suite à une variation de charge,
 c) suite à une variation de température.

II. 2. 2 critères d'évaluation d'une commande MPPT : [8]

La qualité d'une commande MPPT peut être définie comme la position du point de fonctionnement du système par rapport au PPM.

La puissance effectivement P délivrée par le GPV dépend de la commande utilisée au niveau du convertisseur. Le rendement du point de fonctionnement qui en découle et que nous noterons η_{MPPT} , permet de mesurer l'efficacité de la commande. En résumé cela donne le % de pertes de puissance d'un module PV par rapport à la fourniture de la puissance maximale qu'il pourrait produire.

$$\eta_{MPPT} = \frac{P}{P_{max}} \dots\dots\dots (2.1)$$

Les performances d'une commande MPPT ne se résument pas à ce seul paramètre (η_{MPPT}). D'autres critères, présentés dans la suite, tels que le temps de réponse et son aptitude à fonctionner sur une large gamme de puissance sont importants pour évaluer les qualités de ce type de commande.

- **Simplicité et coût** : complexité de l'algorithme entraînant des difficultés d'implantation et des pertes liées directement au nombre de calculs nécessaires. En résumé, une commande MPPT doit avoir un niveau de simplicité important favorisant une faible consommation et donc un coût de développement raisonnable pour que sa présence compense le surcoût généré.
- **Réponse dynamique** : Une commande MPPT doit avoir un bon comportement en dynamique afin de pouvoir piloter l'étage d'adaptation et assurer que la recherche du nouveau PPM, suite aux changements d'éclairement ou de température, soit faite le plus rapidement possible.
- **Flexibilité** : Une commande MPPT doit être précise et stable quelles que soient ses conditions d'utilisation. C'est-à-dire qu'elle ne doit pas être conçue pour fonctionner pour un seul type de Panneau. Elle doit être la plus universelle possible, capable de fonctionner avec des panneaux des différentes technologies sans trop de modifications, tout en gardant le même taux de précision et de robustesse.
- **Compétitive sur une large gamme de puissance** : Par définition, une commande MPPT, utilisée dans des applications photovoltaïques, est supposée traquer le PPM généré par un module PV, quel que soit le niveau d'ensoleillement. La commande MPPT est dite compétitive si le PPM est atteint avec une erreur statique, correspondant à la position du point de fonctionnement par rapport au PPM, relativement faible sur une large gamme de puissance.

II. 3 Différents types de commandes MPPT [9]

Si l'on veut poursuivre le point PPM réel, il serait nécessaire d'obtenir de l'information sur la puissance réelle extraite du module PV. Ceci peut être réalisé en mesurant la tension V_{PV} à la sortie du panneau et le courant I_{PV} qu'il peut fournir. A partir de la puissance électrique ($P = V_{PV} * I_{PV}$), on pourra utiliser différents algorithmes de contrôle pour poursuivre le PPM du module PV. Trois implantations de commande MPPT sont possibles :

- Commande MPPT à implantation analogique. Elle se caractérise par une simplicité dans la conception et une grande dynamique vis-à-vis de son équivalente numérique et aussi des diverses perturbations. Elle peut être complètement réalisée avec des composants analogiques et logiques sans qu'aucun calcul ne soit nécessaire.
- Commande MPPT à implantation mixte logique et analogique qui est basé sur l'addition d'un filtre nommé LFR (loss free resistor).

- Commandes MPPTs à implantation numérique faisant intervenir que des composants digitaux. La pièce principale de ces commandes est un microcontrôleur. Elles sont souvent incluses avec diverses fonctions notamment des protections. L'algorithme implanté est plus ou moins lourd selon la précision du système, la robustesse et la rapidité de la boucle de commande. Ainsi, parmi les nouvelles MPPTs publiées récemment, on peut citer la commande MPPT de type numérique proposé par M. Matsui. Celle-ci est basé sur la mesure des tensions de sortie et d'entrée d'un convertisseur de type boost. En effet, connaissant le lien entre les grandeurs d'entrée et de sortie d'un convertisseur statique en fonction du son rapport cyclique, une fois les mesures effectuées, on peut calculer la valeur du rapport cyclique permettant de faire la meilleure adaptation source-charge. Ces types de commande sont valables en basses fréquences et puissances élevées. Leur inconvénient se manifeste lorsque la fréquence de système de conversion augmente, elles peuvent induire alors des erreurs sur la détermination du rapport cyclique optimal. De ce fait, elles peuvent entraîner des pertes importantes en rendement.

Ces commandes numériques se basent sur des algorithmes de contrôle adaptatifs, permettant de maintenir le système à son point de puissance maximale. Ainsi, nous pouvons distinguer entre plusieurs algorithmes :

- l'algorithme des descentes connu sous Hill-Climbing qui est commun aux deux méthodes d'optimisation suivantes : méthode de perturbation et observation (P&O) et méthode de la conductance croissante.

II. 4 La commande MPPT perturbation puis observation [8]

II. 4. 1 principe des commandes "Perturbation et Observation" (P&O) :

Le principe des commandes MPPT de type **P&O** consiste à perturber la tension V_{pv} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{pv}

qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la figure 2.3, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , 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_{pv} (V_{pv}), il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM.

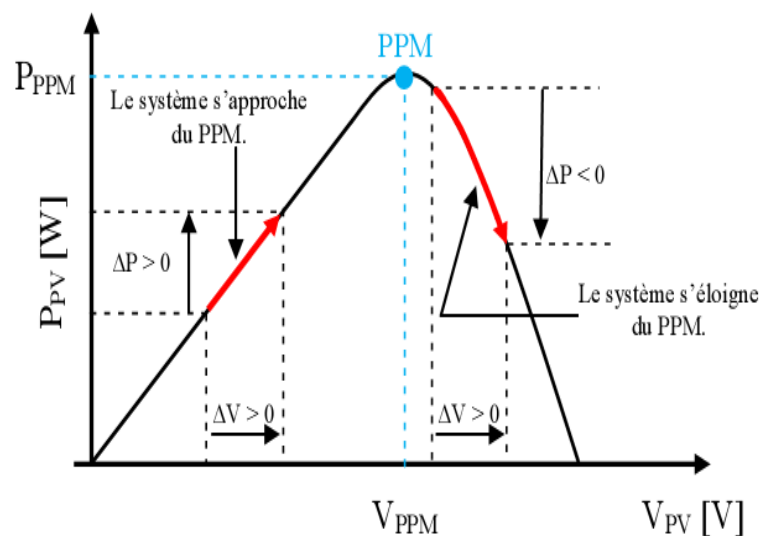


Figure .2.3 Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau solaire.

II. 4.2 structure de l'algorithme P&O :

La figure 2.4 représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant.

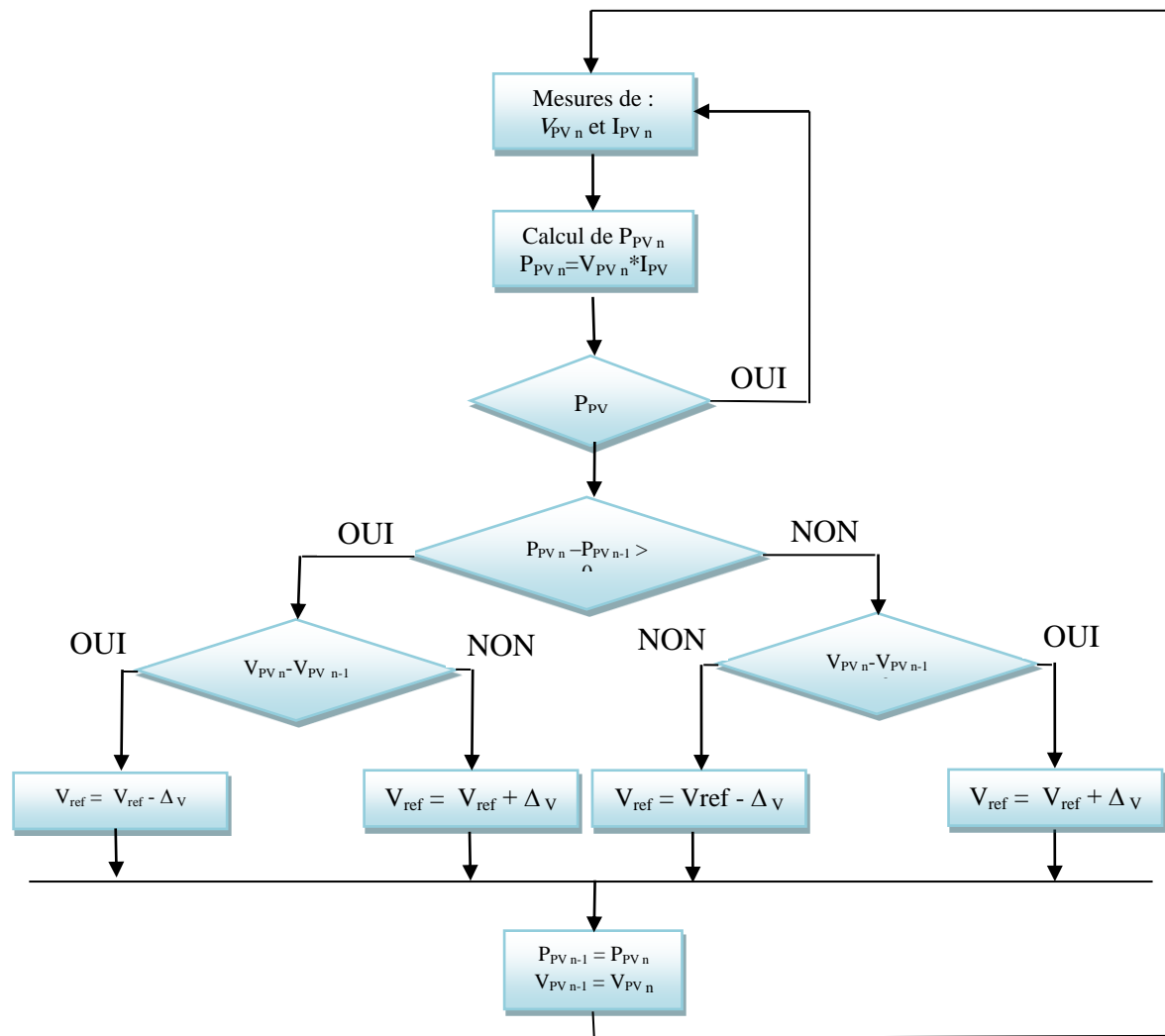


Figure. 2.4 Algorithme de la méthode P&O.

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée de par sa facilité d'implémentation, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralenti la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser.

En effet, si on analyse en détail ce mode de recherche, il présente des erreurs d'interprétation au niveau de la direction à suivre pour atteindre le PPM lorsque des variations brusques des conditions climatiques ou/et de charge apparaissent, comme cela est décrit sur la figure. 2.5.

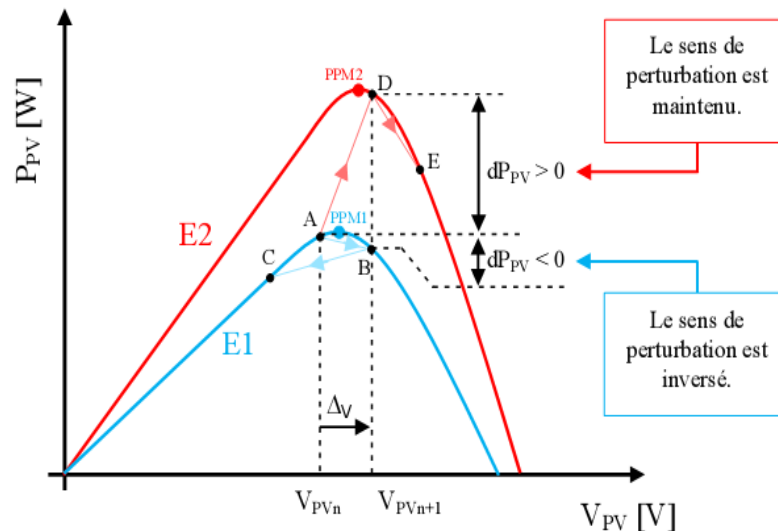


Figure.2.5 Divergence de la commande P&O lors de variation d'irradiation.

Pour comprendre, prenons l'exemple d'un éclairage donné, noté E1, avec un point de fonctionnement se situant en A. suite à une perturbation de tension de valeur ΔV , ce dernier bascule en B, impliquant, dans un fonctionnement sans variation d'éclairage, une inversion

Du signe de la perturbation due à la détection d'une dérivée de la puissance négative entraînant en régime d'équilibre, des oscillations autour du PPM causées par la trajectoire du point de fonctionnement entre les points B et C. on peut noter que des pertes de transfert de la puissance seront plus ou moins importantes en fonction des positions respectives des points B et C par rapport à A. Lors d'un changement d'irradiation (évolution des caractéristiques $P(V)$ du module de E_1 à E_2), le point de fonctionnement se déplace alors de A vers D, qui est interprété dans ce cas-là, par une variation positive de la puissance. Le système n'ayant pas la possibilité de voir l'erreur de trajectoire lié au changement de caractéristique, le signe de la perturbation ne change pas et le système s'éloigne momentanément du PPM en direction du point E. Au mieux, ceci occasionne une non- optimisation de la puissance momentanée.

Cependant, dans le pire des cas, le système de recherche peut se perdre et se retrouver en butée, soit en circuit ouvert soit en court-circuit entraînant une perte définitive du PPM. Ceci entraînant, en cas de conditions météorologiques défavorables de fortes lacunes au niveau de la commande.

Topologies de base de circuit de conversion (DC-DC) mais seront décrites le hacheur survolteur (Boost) dans les paragraphes suivants :

Le hacheur survolteur « Boost » [10]

Le convertisseur Boost est connu par le nom d'élévateur de tension. Le schéma de la figure.2.6 représente le circuit électrique du Boost. Au premier temps (αT), Le transistor (S) est fermé, Le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période. Ensuite, le transistor (S) s'ouvre et l'inductance (L) s'opposant à la

diminution de courant (I_L), génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge (R) à travers la diode (D).

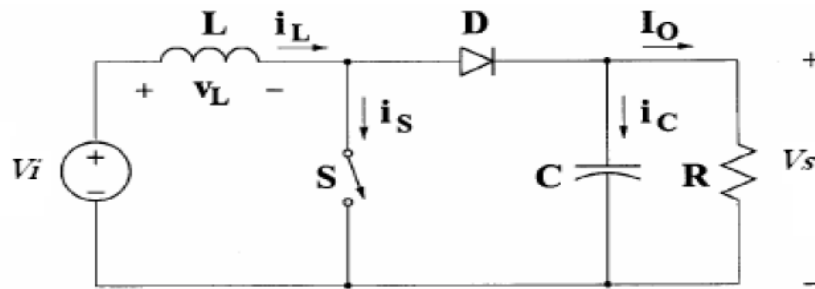


Figure.2.6 Circuit électrique de base du hacheur survolteur

La tension et le courant de la charge du convertisseur Boost dans le cas de la conduction continue sont donnés par :

$$V_s = \frac{1}{1-\alpha} \times V_i \dots\dots\dots (2.2)$$

$$I_0 = (1 - \alpha) \times i_L \dots\dots\dots (2.3)$$

Comme le présente la figure.2.7, lorsque l'interrupteur du transistor (S) est sur la position (on), le courant de l'inductance du hacheur augmente linéairement et à cet instant la diode (D) est bloquée (off).

Et lorsque (S) tournée sur la position (off), l'énergie emmagasinée par l'inductance est dissipée dans le Circuit (RC) bien que la diode (D) est passante. Les caractéristiques de tension et du courant de charge du convertisseur Boost dans le cas de la conduction continue sont décrites par la figure.2.7. Comme suit :

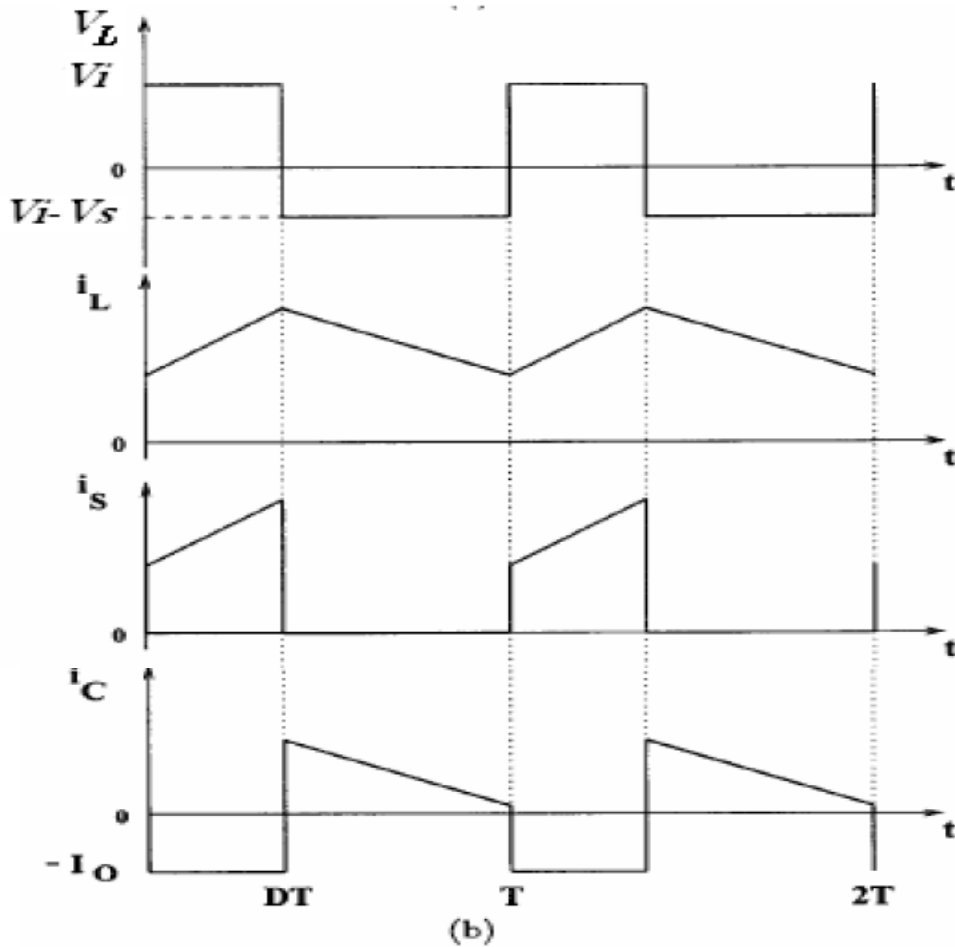


Figure.2.7.caractéristique de la tension et du courant du hacheur survolteur

II. 3 Définition de l'étage d'adaptation entre une source et une Charge [11]

Un GPV présente des caractéristiques $I(V)$ non linéaires avec des PPM. Ces caractéristiques dépendent entre autre du niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe.

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le GPV et la charge comme décrit dans la figure 2.8. Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de P_{MAX} disponible.

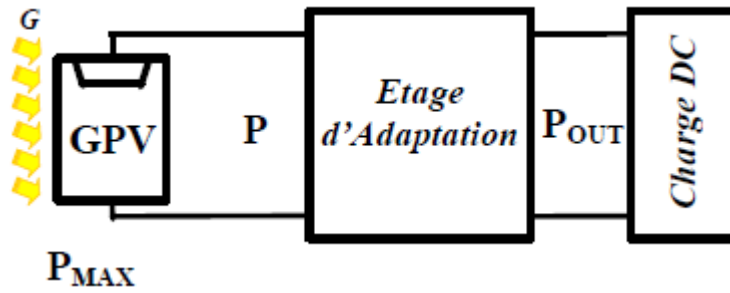


Figure 2.8 Etage d'adaptation jouant le rôle d'interface de puissance entre un GPV et une charge pour le transfert de P_{MAX} du GPV [11].

II. 6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons abordé les bases de poursuite la puissance maximale. Après avoir donné un aperçu sur les différents types de commandes MPPT et modes de connexion du GPV-Charge.

Nous avons enfin, présenté avec plus de détail la méthode MPPT P&O que nous simulerons par la suite (chapitre 3).

Chapitre III
Chapitre III

Application et résultats
Application et résultats

III. 1 Introduction

En raison de changement du point de puissance maximale de fonctionnement en fonction de l'éclairement et de la température (conditions climatiques) une grande importance est donnée au suiveur du point de puissance maximum. Ainsi, les techniques heuristiques basées sur le concept de l'optimisation sont de nos jours de grande importance en raison de leur adaptabilité avec les systèmes photovoltaïques.

L'objectif de ce chapitre est l'élaboration d'une structure de commande MPPT basé sur P&O (MPPT- P&O), afin d'atteindre le MPP quelques soient les conditions météorologiques. On donne les observations, les interprétations des résultats et on termine par les conclusions qu'on peut tirer à partir de ces résultats.

De nos jours, les techniques d'optimisation sont appliquées progressivement dans le domaine de l'engineering en raison de leur utilité. En jetant un regard rapide sur les caractéristiques courant-tension I-V (figure 3.1-a) et puissance-tension P-V (figure 3.1-b) des rayons photovoltaïques d'un module solaire référencé MSX60 qui est fait l'objet de notre étude expérimentale. Un module est constitué de 36 cellules en séries polycristallin dont les caractéristiques sont données dans l'annexe [A].

Nous constatons clairement la dépendance de la puissance générée d'un système photovoltaïque de l'éclairement et de la température.

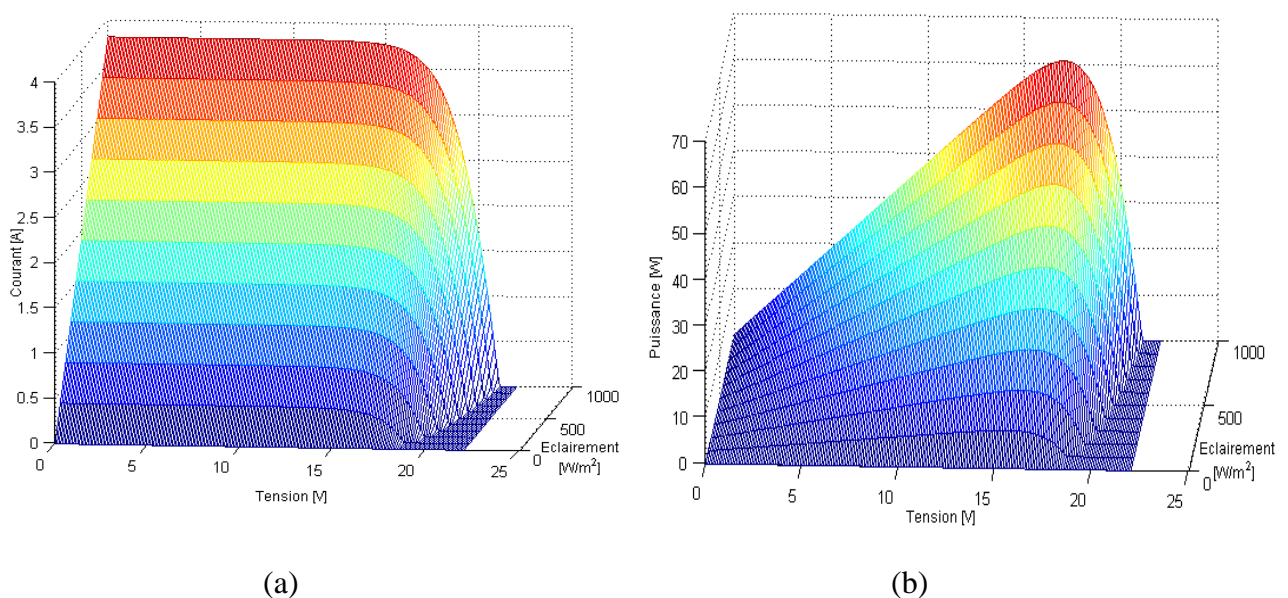


Figure 3.1 Caractéristique du module photovoltaïque pour différents éclairements.

a) courant- tension b) tension-puissance.

Dans ce qui suit, nous présentons une application d'un algorithme P&O sur un système photovoltaïque, ce qui nous permettra de suivre instantanément le point de puissance maximum. Ce dernier change instantanément avec l'éclairement et la température, ce qui implique un ajustement continu de la tension de sortie pour réaliser le transfert de la puissance maximum à la charge. La justification de cette application est due au fait que les caractéristiques courant-tension et puissance-tension figure .3.1 sont non linéaires en raison d'un côté de la non linéarité des systèmes photovoltaïques, et en raison de la variation instantanée de la température et l'éclairement de l'autre côté, ce qui fait qu'en réalité les deux caractéristiques précédents possèdent beaucoup de fluctuations.

III. 2 Tests et applications :

III. 2. 1 1^{er} test : la technique MPPT-P&O :

Dans cette section, notre objectif est de réaliser la technique de type MPPT-P&O sous différentes des conditions climatiques de l'éclairement et de la température.

Les résultats d'optimisation de la technique sont reportés sur Les tableaux 3.1, 3.2 et 3.3.

Nous voyons clairement la variation et changement du MPP avec l'ensoleillement et la température ou bien les deux simultanément (figure. 3.2, 3.3 et 3.4). Dans chaque courbe le point de puissance maximale sera indiquée par le signe "o".

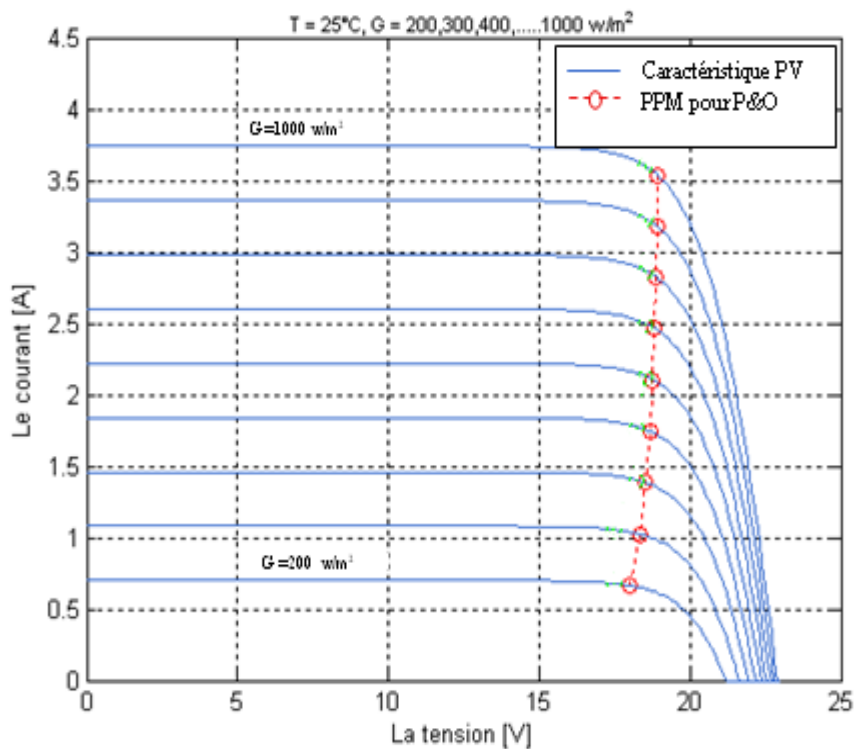
Les résultats de ces problèmes d'optimisation montrent que la technique d'algorithme (MPPT-P&O) perturbation et observation est très efficace et robuste pour différentes conditions climatiques.

III. 2. 1.1 Effet de l'éclairement :

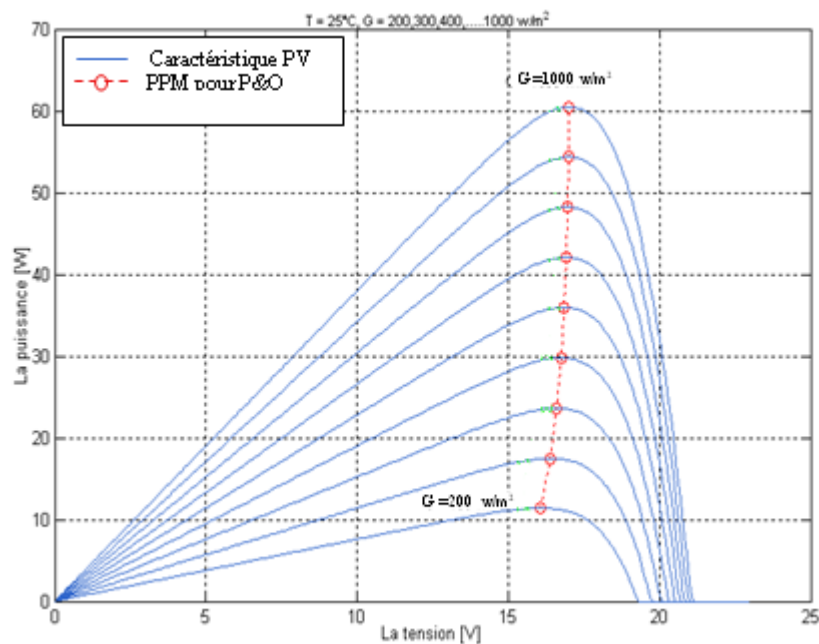
Nous allons tester les techniques pour un changement de l'ensoleillement de 100 w/m^2 à 1000 w/m^2 dont la température est maintenue constante 25°C .

Table. 3.1 Résultats de l'optimisation avec différents éclairement et température constante égale à 25° .

Eclairement [w/m ²]	V _{OPT} [V]	I _{OPT} [A]	P _{max} [w]
100	14.5000	0.3687	5.3455
300	15.5000	1.1063	17.1479
500	16.2500	1.8206	29.5848
600	16.5000	2.1713	35.8258
900	16.5000	3.2759	54.0528
1000	16.5000	3.6419	60.0906



(a)



(b)

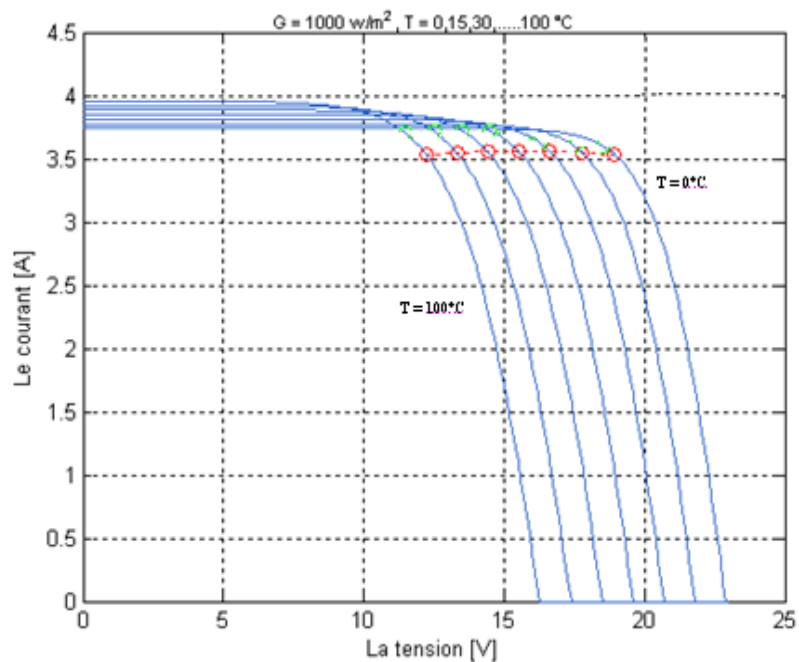
Figure. 3.2 Variation PPMT sous différents valeurs de l'éclairement :
 a) courant-tension b) puissance-tension.

III. 2. 1.2. Effet de la température :

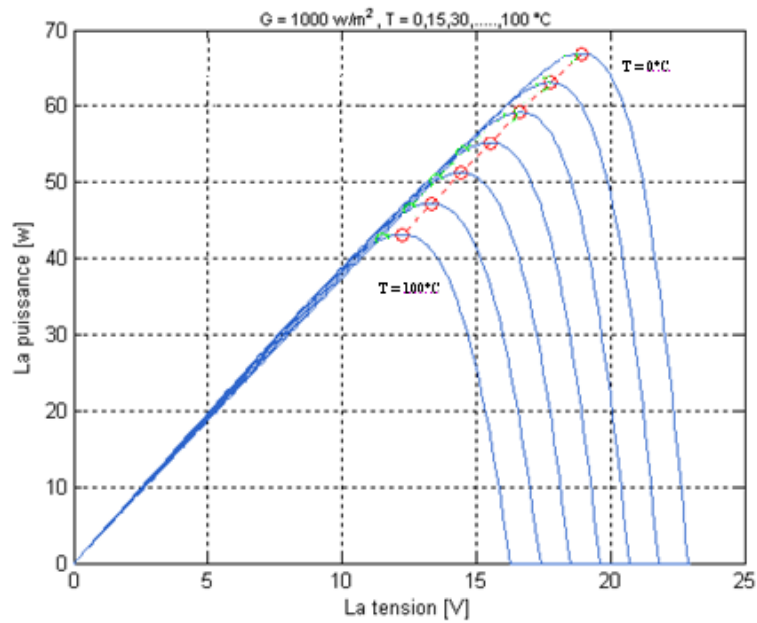
Il est important de tester les techniques sous différents valeurs de température à partir de 0 °C jusqu'à 100 °C et l'éclairement est maintenu constant à 1000 w/m².

Table. 3.2 Résultat de l'optimisation avec une température variable et un Éclairement constant égal à 1000 w/m²

Température [°C]	V _{OPT} [V]	I _{OPT} [A]	P _{max} [w]
0	18.5000	3.6030	66.6549
25	16.5000	3.6419	60.0906
50	14.5000	3.6787	53.3406
75	12.5000	3.7134	46.4170
100	10.5000	3.7460	39.3325



(a)



(b)

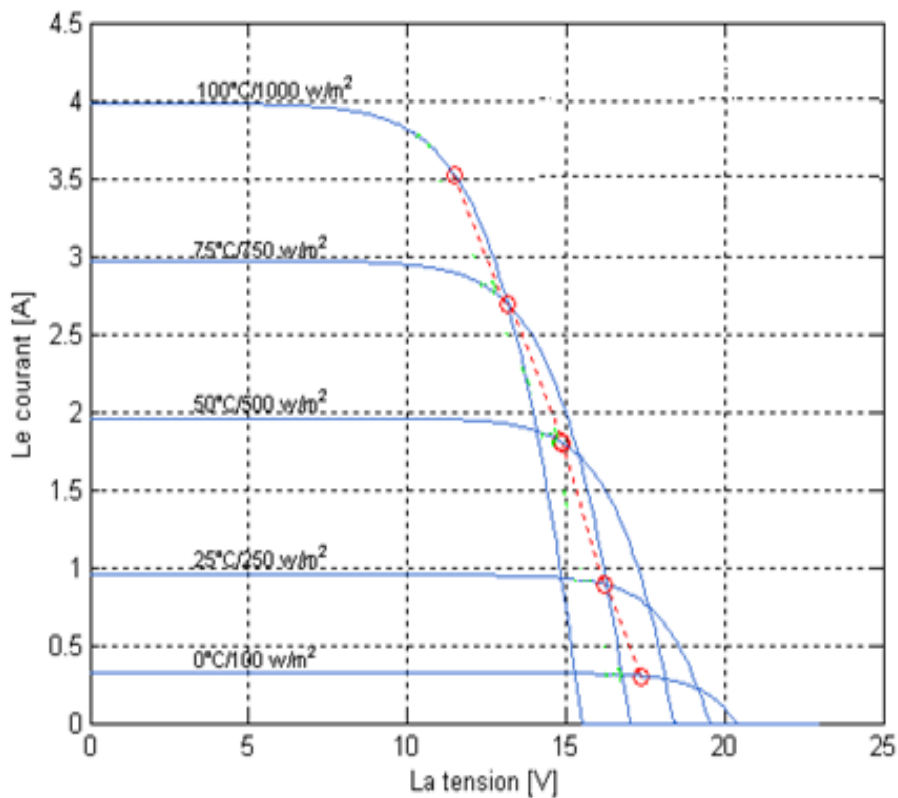
Figure. 3.3 Variation PPMT sous différents valeurs de la température :
 a) courant-tension b) puissance-tension

III.2.1.3. Effet simultanée de l'éclairement et de la température

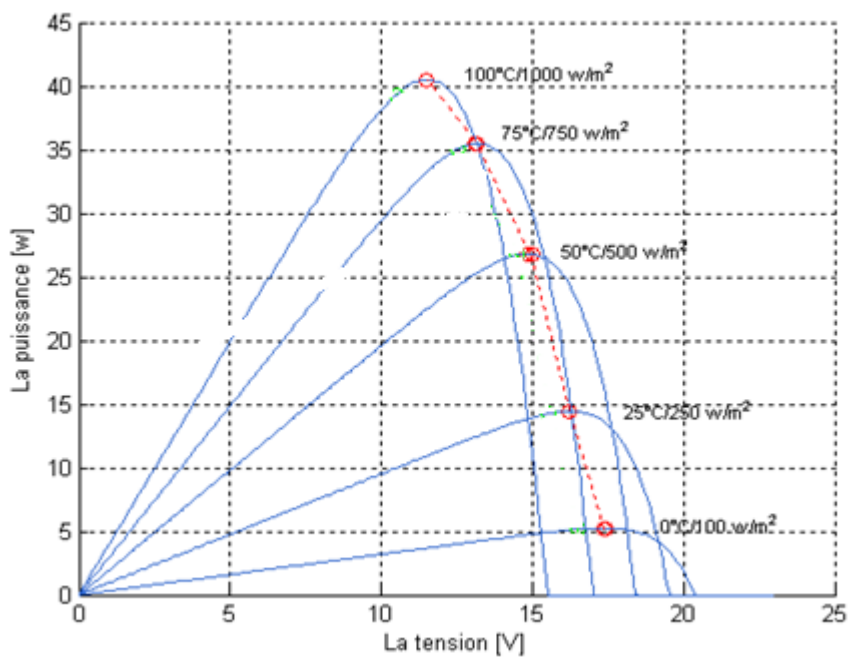
Nous allons varier simultanément les deux conditions météorologiques (G et T).

Table.3.3 Résultats de l'optimisation avec la température et l'éclairement qui varient en même temps.

Température [°C]	Eclaireme nt [w/m ²]	V _{OPT} [V]	I _{OPT} [A]	P _{max} [w]
0	100	16.5000	0.3123	5.1532
25	250	15.5000	0.9179	14.2273
50	500	14.5000	1.8422	26.7122
75	750	12.5000	2.8007	35.0082
100	1000	10.5000	3.7460	39.3325



(a)



(b)

Figure. 3.4 PPM avec Variation dans la température et l'éclairement au même temps : a) courant-tension b) puissance-tension.

La figure .3.4 indique la dépendance de la variation de puissance optimale instantanée avec la variation du courant optimal.

III.3 Conclusion :

Ce chapitre présente la technique d'optimisation MPPT-P&O, qui calcule instantanément le point de puissance maximum MPP d'un module photovoltaïque afin de maximiser le profit en termes de la puissance instantanément. A cause du changement instantané des caractéristiques I-V et P-V.

Conclusion générale

D'après l'étude faite précédemment ; une étude bibliographique à permet de faire connaissance à certaines énergies renouvelables, parmi les quelles l'énergie photovoltaïque, qui occupe ces dernières années, un pourcentage de production d'énergie mondiale, malgré sont coût, qui à son tour voit une décroissance avec le développement des technique de d'avancement du semi-conducteur.

Par suite due comparaison de quelques techniques de poursuite du point maximum de la puissance augmentent environnement des panneaux solaires, ces technique se différenciant entre eux par le domaine d'applications, on comparant le technique de la perturbation puis observation (P&O), bien qu'il existe d'autre technique (technique de la dérivée de la puissance (incrémentation de conductance), technique à contre réaction de la tension et technique à contre réaction de la courant). Comme on la signalés précédemment, afin d'adapter le panneau avec la charge, il est nécessaire de introduit un convertisseur DC-DC d'adaptation, pour déplacé le point de fonctionnement aux points optimums.

Une étude théorique sur les deux principaux types de ces convertisseurs à été présenté avec les pertes existantes en fonction de l'angle d'amorçage et la fréquence de commutation, cette étude peut être nécessaire prochainement pour l'étude pratique.

Annexe A :

Fiche technique d'un module MSX-60, sous ($G = 1000 \text{ W/m}^2$ et $T = 25^\circ\text{C}$)

Spécification du module solaire (donnée du fabricant)	
Température des conditions standards ou de références (T_{ref})	25°C
Eclairement des conditions standards ou de références (G_{ref})	1000 W/m^2
Puissance crête maximale (P_m)	60W
Tension de crête maximale (V_m)	17.1V
Courant de crête maximale (I_m)	3.5A
Courant de court-circuit (I_{sc})	3.8A
La tension de circuit ouvert	21.1V
Coefficient de la température de la tension de circuit ouvert α	$-73 \text{ mA}/^\circ\text{C}$
Coefficient de la température du courant de court-circuit β	$3 \text{ mA}/^\circ\text{C}$
Tolérance sur puissance de crête	$-0.38 \text{ W}/^\circ\text{C}$
Température nominale de fonctionnement (NOCT)	49°C

Bibliographies

[1] **BOUKHERS Djamil**

" Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage "
Thèse de magister, Université Mentouri de Constantine 28 / 11 / 2007.

[2] **Yannick Veschetti**

" Modélisation, caractérisation et réalisation de nouvelles Structures
Photovoltaïque sur substrat de silicium mince". Thèse de Doctorat, Université
Louis pastor, Strasbourg 2005.

[3] **Alain Bibao Learreta**

" Réalisation de commandes MPPT numériques", Diplôme ingénieur technique Industriel
toulouse2004.

[4] **Rezoug Mouhmed Redha**

" Etude et conception d'un positionneur automatique de panneau solaire
Mémoire de Magister. Centre universitaire d'Oum El Bouaghi 2005.

[5] **MEHIMMEDETSI Boudjemâa**

"Application du formalisme Bond Graph à une chaîne de conversion d'énergie
Photovoltaïque " Thèse de magister, Université Mentouri de Constantine 2007.

[6] **Corrine Alonso**

" Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement De l'énergie".
Mémoire Université de Toulouse 2003.

[7] **Baker-Hechifa-Mesai**

"Générateur photovoltaïque " Thèse de fin d'étude Licence académique, centre université
D'el-oued Promotion 2009.

[8] **D. Bellala**

"Contribution à l'optimisation des systèmes de conversion d'énergie. Application aux systèmes
photovoltaïques", Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Batna.

[9] O. Gergaud

"Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur", Thèse de Doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan.

[10] Abbassen Lyes

"Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque "
Thèse de magister, université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou soutenue
Le 05/05/2011

[11] M. Angel Cid Pastor

"Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques ", Thèse de
Docteur de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 29 septembre 2006.