

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE D'ADRAR  
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DES SCIENCE DE A MATIERE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE en vue de l'obtention du diplôme de  
MASTER en PHYSIQUE ENERGETIQUE

## Thème

# Contrôle et adaptation d'un système PV par la commande MPPT

Soutenu le :08/06/2015

Présenté par :

Membres de jury :

Mr :BENBOUHANI SALAH

Président : Mr OMARI BOUMEDIENE

Mme :HAMAOUI AMEL

Promoteur : Mr HAMMOUDA

Examineur : Mr GUENFOUD MOHAMED

Pr M.HAMMOUDA ENC

Melle KH.ROMANI

## *Remerciement*

*En terminant notre mémoire, il nous est  
agréable d'adresser nos vifs remerciements à tous  
ce qui nous ont aidés de près ou de loin à élaborer  
cet ouvrage*

*Nous remercions en particulier notre encadreur*

*Pr Massoud HAMMOUDA*

*Ainsi que Mme KHeira ROUMANI*

## *Résumé*

La recherche du point de puissance maximum (MPPT) est intégralement réalisée de façon électronique, sans aucun dispositif ou système mécanique.

Le contrôleur ou régulateur MPPT mesure et compare en permanence, la tension délivrée par le panneau avec celle du dispositif batterie.

Il calcule alors le niveau de puissance maximum que :

1. le panneau peut délivrer à la batterie
2. la batterie est capable de recevoir

A partir de cette valeur de puissance, il détermine la tension (voltage) la plus adaptée afin d'avoir le maximum d'Ampères dans la batterie.

# **SOMMAIRE**

# SOMMAIRE

---

Introduction générale

## Chapitre I Energie Solaire Photovoltaïque

I-1 Introduction.....	2
I-2 le Rayonnement solaire . .....	3
I-3 L'effet photovoltaïque et la jonction PN.....	4
I-4 Le générateur PV et ses performances .....	6
I.4.1 Principe.....	7
I.5 La cellule solaire .....	8
I.5.1 Les type des cellules solaires	

## Chapitre II le système photovoltaïque

II-1 Introduction.....	13
II-2 Constitution d'un générateur photovoltaïque.....	13
II-2-1 Protections classiques d'un GPV.....	13
II-2-2 Connexion directe entre la source et la charge.....	15
II-2-3 L'étage d'adaptation.....	17
II-3 Caractéristiques type d'un générateur photovoltaïque.....	18
II-4 Principe de la recherche du point de puissance maximal .....	20
II-4-1 Généralités.....	20
22    II-4-2 Synthèse des différentes MPPT rencontrées dans la littérature	
II-4-2-1 Les premiers types de commande MPPT .....	22
II-4-2-2 Les commandes MPPT à algorithmes performants.....	22
II-5 Conclusion	

**CHAPITRE III Résultats et Simulation d'Une Commande (MPPT)**

III-1 Introduction .....	28
III-2 Modélisation des panneaux .....	28
III-3 Résultats et interprétations .....	31
III-3-1 Caractéristique courant- tension, puissance – tension.....	31
III-3-2 Influence de la température .....	32
III-3-3 Influence de l'éclairement.....	33
III-3-4 Influence de l'éclairement et la température.....	34
III-3-5 Influence de la résistance série .....	35
III-3-6 Influence du facteur de qualité.....	36
III-4 Recherche du point de fonctionnement optimal MPPT.....	37
III-4-1 La recherche du MPP sous l'influence de la température.....	38
III-4-2 La recherche du MPPT sous l'influence de l'éclairement...40	
III-4-3 La recherche du MPPT sous l'influence de la température et l'éclairement.....	42
III-5 Remarque.....	44
III-6 Conclusion.....	45

# **INTRODUCTION GENERALE**

# INTRODUCTION GENERALE

---

## INTRODUCTION

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

En vertu du Protocole de Kyoto, l'Union Européenne s'est engagée à réduire ses émissions de gaz à effet de serre de 8% en dessous de leurs niveaux de 1990 sur la période 2008-2012. Les énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie hydroélectrique et la biomasse doivent jouer un rôle important pour atteindre cet objectif. Dans ce contexte, en septembre 2001, l'Union Européenne a adopté la Directive relative à la promotion de l'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelable sur le marché intérieur de l'électricité. L'objectif de cette directive est la promotion et l'exploitation à l'avenir du potentiel des sources d'énergie renouvelable.

Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. La filière étudiée dans cette thèse est l'énergie solaire photovoltaïque.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur



un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale.

La caractéristique I-V du GPV dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble. De plus, son point de fonctionnement du GPV dépend directement de la charge qu'il alimente. Afin d'extraire en chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV, nous introduisons un étage d'adaptation entre le générateur et la charge pour coupler les deux éléments le plus parfaitement possible.

Le problème du couplage parfait entre un générateur photovoltaïque et une charge de type continue n'est pas encore réellement résolu. Un des verrous technologiques qui existe dans ce type de couplage est le problème du transfert de la puissance maximale du générateur photovoltaïque (GPV) à la charge qui souffre souvent d'une mauvaise adaptation. Le point de fonctionnement qui en découle est alors parfois très éloigné du point de puissance maximale (PPM). La littérature propose une grande quantité de solutions sur l'algorithme de contrôle qui effectue une recherche de point de puissance maximale lorsque le GPV est couplé à une charge à travers un convertisseur statique. Dans cette thèse, l'ensemble constitué par un GPV, un étage d'adaptation et une charge DC est abordé dans sa globalité par une approche du point de vue architecture de conversion à haut rendement, grandes fiabilité et flexibilité. Ainsi, nous avons étudié le problème de l'extraction du maximum de puissance d'un générateur suivant deux concepts : le transformateur de puissance DC et le girateur de puissance, chacun doté d'une commande MPPT.

Dans le chapitre 2, nous rappelons le contexte et la problématique de l'énergie solaire photovoltaïque ainsi que les principales caractéristiques d'un GPV. Nous décrivons les principaux types d'algorithmes de recherche de point de puissance maximale (MPPT) d'un GPV présents dans la littérature.

Dans le chapitre 3, nous avons présentés les différentes simulations sur les caractéristiques électriques du modèle électrique équivalent de la cellule photovoltaïque, ainsi que l'influence de la température et de l'éclairement sur ces caractéristiques. Notre étude ensuite est faire une estimation mathématique sur la fonction de changement du point de puissance maximal (MPPT) en fonction de l'influence de la température et de l'éclairement sur les caractéristiques électriques.

# **Chapitre I**

## **Energie Solaire Photovoltaïque**

### **I.1 Introduction :**

L'énergie solaire devient actuellement une technologie alternative de l'énergie pétrolière devant les fluctuations économiques, les changements climatiques et la demande progressive de l'énergie dans la vie sociale, mais le problème major de cette nouvelle technologie est sa déficience en rendement de conversion (30%) et la faible compétitivité dans le marché à cause du coût élevé d'un kilowatt heure .

Durant les dernières années, les applications de l'énergie photovoltaïque se développaient largement sous modèle autonome, ou connectée au réseau dans plusieurs sites à caractère social, technique et économique .

Le générateur photovoltaïque présent une caractéristique non linéaire en termes de la puissance produite en fonction de l'éclairement et la température, dans ce cas, la connexion directe entre la source et la charge indique un écart très important entre la puissance potentielle par rapport à la puissance transférée en consommation.

Afin d'extraire une puissance optimale à tout instant, un étage d'adaptation doit être introduit, jouant un rôle d'interface entre les deux éléments, ce quadripôle est un convertisseur DC-DC (boost) contrôlé par une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking ) .

Dans notre mémoire, nous analysons la simulation du fonctionnement d'un système photovoltaïque (PV) adapté par une commande analogique MPPT assurant la poursuite de la puissance maximale fournie.

Ce convertisseur statique (boost) peut être exploité dans un système photovoltaïque en couplage avec le générateur PV selon une configuration appropriée, pour établir un bus continu au profil de consommation.

Dans ce chapitre on commencera par rappeler brièvement le principe de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique reposant sur l'effet photoélectrique des semi-conducteurs.

## **I .2 Rayonnement solaire :**

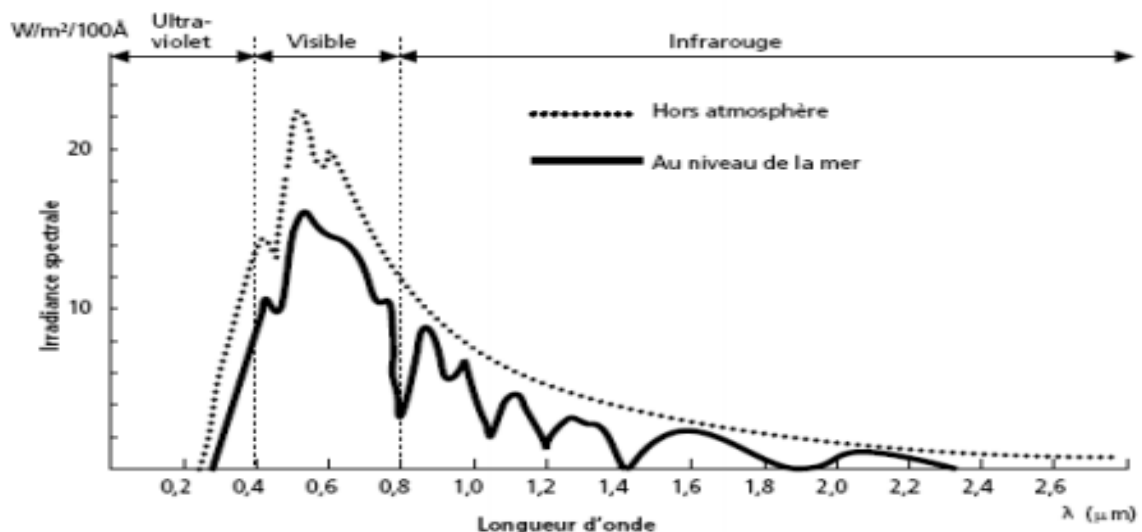
Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 mm à 10 mm. La figure (I.1) représente la variation de la répartition spectrale énergétique.

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

- 9% dans la bande des ultraviolets (<0,4 mm),
- 47% dans la bande visible (0,4 à 0,8 mm),
- 44% dans la bande des infrarouges (>0,8 mm).

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de 1,37 kilowatt au mètre carré (kW/m<sup>2</sup>), à plus ou moins 3 %, selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du soleil dans sa rotation autour de celui-ci. L'atmosphère en absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement 1200 W/m<sup>2</sup>. La rotation et l'inclinaison de la terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison.

Enfin, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et divers autres phénomènes météorologiques causent des variations horaires et quotidiennes qui tantôt augmentent, tantôt diminuent le rayonnement solaire et le rendent diffus.



Figure(I.1) analyse spectrale du rayonnement solaire. [1]

L'utilisation du rayonnement solaire comme source d'énergie pose donc un problème bien particulier. En effet, le rayonnement solaire n'est pas toujours disponible ; en outre, on ne peut ni l'emmagasiner ni le transporter. Le concepteur d'un système qui emploie le

rayonnement solaire comme source d'énergie doit donc déterminer la quantité d'énergie solaire disponible à l'endroit visé et le moment où cette énergie est disponible. [2]

Il faut d'abord comprendre l'effet de la rotation (moment de la journée) et de l'inclinaison (saison de l'année) de la terre sur le rayonnement solaire.

L'absorption atmosphérique est plus faible lorsque le soleil se trouve à son point le plus haut dans le ciel c'est-à-dire plein sud dans l'hémisphère nord et plein nord dans l'hémisphère sud<sup>1</sup>. En effet, la distance que doit parcourir le rayonnement dans l'atmosphère est plus court lorsque le soleil est directement au-dessus de l'endroit visé. C'est le «midi solaire», moment où le rayonnement solaire direct est le plus intense. Comme le soleil est plus haute et que les journées sont plus longue en été, la quantité totale d'énergie reçue sur un plan horizontal y est plus grande qu'en hiver. [3]

### **I.3 L'effet photovoltaïque et la jonction PN :**

C'est la conversion de l'énergie de transportent les photons de la lumière lorsqu'ils rentrent collision avec des matériaux semi-conducteurs convenablement traités, en énergie électrique capable de créer un courant d'électrons à travers un circuit extérieur, en réalisant un travail utile.

La clé pour produire un courant électrique utile est d'arriver à extraire les électrons libérés. Un procédé pour faire cela est d'introduire dans le matériau semi-conducteur des éléments chimiques qui contribuent à produire un excès d'électrons et de trous. Ces éléments, qui altèrent notablement les propriétés intrinsèques du semi-conducteur, s'appellent les dopants et le matériau est dit dopé lorsque le processus d'incorporation au semi-conducteur est achevé.

Un dopant approprié pour le silicium est le bore. La structure créer s'appelle un semi-conducteur de type P (positif). Un autre dopant possible pour le silicium est le phosphore. Le semi-conducteur est dit de type N (négatif).

Si les photons de la lumière incidente communiquent de l'énergie aux électrons du semi-conducteur, quelques électrons peuvent traverser la barrière de potentiel, en étant expulsés hors du semi-conducteur dans un circuit extérieur. Ceci génère un courant électrique. Les électrons, après avoir parcouru le circuit externe, retournent dans le semi-conducteur par la face opposée.

La physique quantique prédit un rendement théorique pour la cellule de silicium de 26%, mais les cellules commerciales obtenues de manière industrielle ne montent pas au dessus de 17%. Ces valeurs, impliquant une limitation sur la puissance électrique pouvant être

obtenue, montrent que seulement une petite partie de l'énergie solaire peut générer de l'électricité. [4]

La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique repose sur l'effet photoélectrique, c'est-à-dire sur la capacité des photons à créer des porteurs de charge (électrons et trous) dans un matériau. Lorsqu'un semi-conducteur est illuminé avec un rayonnement de longueur d'onde appropriée (l'énergie des photons doit être au moins égale à celle du gap énergétique du matériau), l'énergie des photons absorbés permet des transitions électroniques depuis la bande de valence vers la bande de conduction du semi-conducteur, générant ainsi des paires électron-trou, qui peuvent contribuer au transport du courant (photoconductivité) par le matériau lorsqu'on le polarise.

Si on illumine maintenant une jonction PN, les paires électron-trou qui sont créées dans la zone de charge d'espace de la jonction sont immédiatement séparées par le champ électrique qui règne dans cette région, et entraînées dans les zones neutres de chaque côté de la jonction. Si le dispositif est isolé, il apparaît une différence de potentiel aux bornes de la jonction (photo tension); s'il est connecté à une charge électrique extérieure, on observe le passage d'un courant alors qu'on n'applique aucune tension au dispositif. C'est le principe de base d'une cellule photovoltaïque.

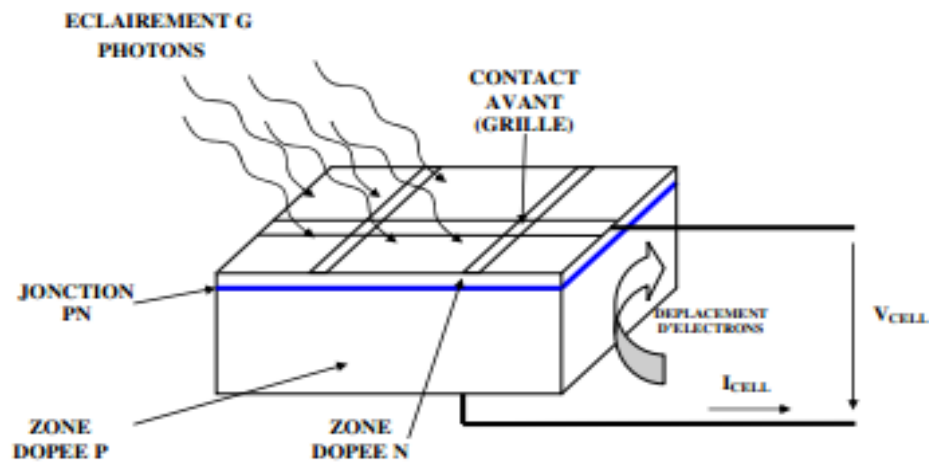


Figure (I.3.1) : la jonction P-N comme capteur

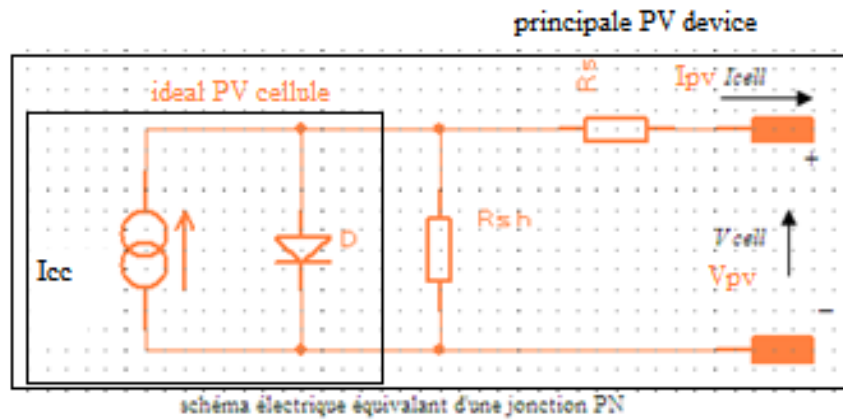


Figure (I.3.2) schéma électrique équivalent d'une jonction PN

Les résistances  $R_s$  et  $R_{sh}$  permettent de tenir en compte des pertes liées aux défauts de fabrication.  $R_s$  représente les diverses résistances de contact et de connexion tandis que  $R_{sh}$  caractérise les courants de fuite dus à diode et aux effets de bord de la jonction.

#### I.4 Le générateur PV et ses performances :

Un générateur photovoltaïque ou module est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou parallèles à fin d'obtenir des caractéristiques électroniques désirées tels que la puissance, le courant de court-circuit ou la tension circuit ouvert.

##### I.4.1 Principe :

La conception globale de systèmes photovoltaïques optimisés est par nature difficile. En effet, côté source, pour un générateur photovoltaïque (PV), la production de puissance varie fortement en fonction de l'éclairement, de la température. Mais aussi du vieillissement global du système.

Chaque charge, que ce soit en continu (DC) (batteries, certains appareils électroménagers destinés à des réseaux continus isolés) ou bien en alternatif (AC) (réseau électrique Algérien 220 V/50 Hz, certains moteurs), possède un comportement propre. [5]

Ainsi, pour qu'une connexion source-charge soit possible, un point de fonctionnement correspondant à l'intersection des caractéristiques électriques doit exister. Pour mieux comprendre ceci, prenons par exemple le cas d'une connexion directe entre un générateur PV et une charge purement résistive  $R_i$  d'une part et d'autre part entre un générateur PV et une



batterie d'une résistance interne  $R_i$ . Nous regardons l'énoncé de la nature de la charge, comme illustré dans la (figure1.4) et (figure1.4.1.a).

Comme nous pouvons le constater sur la (figure1.4 b)) et la (figure.1.2(b)),

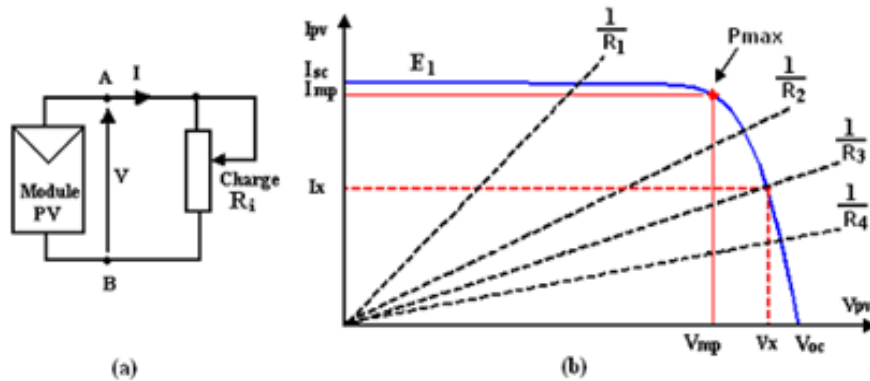


Figure (I.4) : (a) Connexion électrique directe entre un générateur PV et une charge.

(b) Points de fonctionnement résultant de l'association des générateurs PV sous un niveau D'éclairement  $E_1$  avec une charge résistive variable ( $R_1, R_2, R_3, R_4$ )

Fonctionnement du générateur PV dépend fortement des caractéristiques de la charge à laquelle il est associé.

En effet, pour la charge résistive ou pour l'accumulateur de résistance interne  $R_i$  sont données pour différentes valeurs, l'adaptation optimale ne se produit que pour un seul point de fonctionnement particulier, nommé Point de Puissance Maximal (PPM) et noté dans notre cas  $P_{max}$ . Ces formes correspondent à la puissance maximale que peut délivrer un générateur PV pour une courbe  $I(V)$

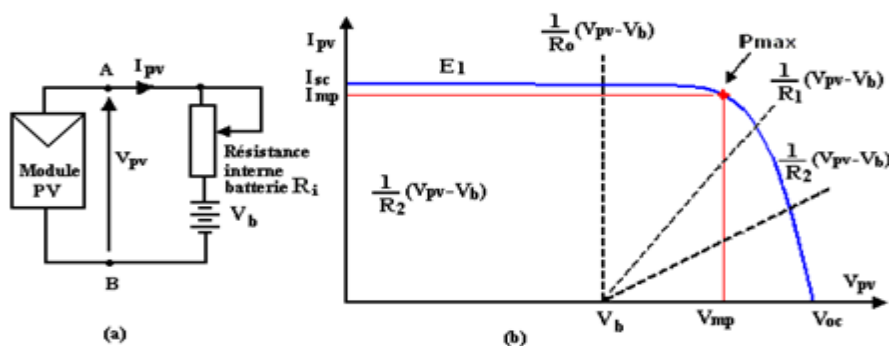


Figure (1.4.1) : (a) Connexion électrique directe entre un générateur PV et une batterie. [6]

(b) Points de fonctionnement résultant de l'association des générateurs PV sous un niveau d'éclairement  $E_1$  avec une batterie comme charge ayant ou pas une résistance interne  $R_i$  Variable ( $R_1, R_2$ ) donnée. [7]

Pour la charge de type batterie, le point de connexion source-charge n'est pas optimal. Ainsi, lorsque l'on réalise une connexion directe source-charge (figure.1. 3), le rendement de l'ensemble est rarement optimal.

Dans le cas d'une connexion directe entre une batterie et un générateur PV, le rendement du système dépend de l'écart entre la tension optimale du générateur PV ( $V_{op}$ ) et la tension de batterie ( $V_b$ ) qui varie en fonction de son état de charge. [10]

## I.5 La cellule solaire :

On appelle cellule solaire un convertisseur qui permet la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. La photopile ou cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque.

### I.5.1 Les type des cellules solaires : [11]

Il existe trois grands types de silicium : mono cristallin, poly cristallin et amorphe

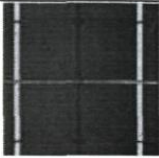
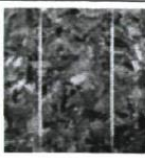

	Silicium monocristallin	Silicium polycristallin	Silicium amorphe
<b>Types</b>			
<b>Rendement</b>	De 15% à 19%		7% à 10%
<b>Durée de vie</b>	35 ans	35 ans	< 10 ans
<b>Avantage</b>	Bon rendement en soleil direct	Bon rendement en soleil direct (moins que le monocristallin mais plus que l'amorphe)	Souplesse Prix moins élevé que les cristallins Bon rendement en diffus
<b>Inconvénient</b>	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...) Prix élevé.	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...) Prix élevé.	Mauvais rendement en plein soleil.

Tableau 1.1 : Classification de différents types de cellules photovoltaïques au silicium.

### Cellules au silicium mono-cristallin : [12]

Pour ce genre d'applications technologiques, le silicium pur est obtenu à partir de la silice de quartz ou de sable par transformation chimique métallurgique.

Le silicium a un rendement électrique et une durée de vie de l'ordre de deux fois celle du silicium amorphe, mais il est nettement plus cher.

## **Cellules au silicium poly-cristallin :**

Le silicium poly-cristallin est un matériau composé de cristaux juxtaposés obtenus par moulage. Ce matériau est moins coûteux (que le mono-cristallin). Les cellules carrées ou rectangulaires sont faciles à utiliser.

## **Conclusion :**

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique propre à certains matériaux appelés "Semi-Conducteurs" qui, exposés à la lumière, produisent de l'électricité.

Le plus connu d'entre eux est le silicium cristallin qui est utilisé aujourd'hui dans 90% des panneaux solaires produits dans le monde. Il existe de nombreuses autres technologies déjà industrialisées, (comme les couches minces) ou en phase de recherche.

Le silicium amorphe semble adapté à des dispositifs nécessitant peu d'énergie, tels que les montres ou les calculatrices ou à des systèmes connectés au réseau. En revanche, les cellules au silicium cristallin sont utilisées et adaptées à un très large panel d'applications autonomes, malgré leur coût plus élevé.

Dans ce chapitre nous avons présenté brièvement l'énergie solaire photovoltaïque. Et aussi nous avons cité les paramètres essentiels de cette énergie. Cette dernière considère comme une entrée pour la recherche du Point De Puissance Maximale (MPPT) d'un GPV qui nous allons traiter dans le chapitre suivant.

## **Chapitre -II**

# **Point De Puissance Maximale (MPPT) d'un GPV**

### **II-1 Introduction :**

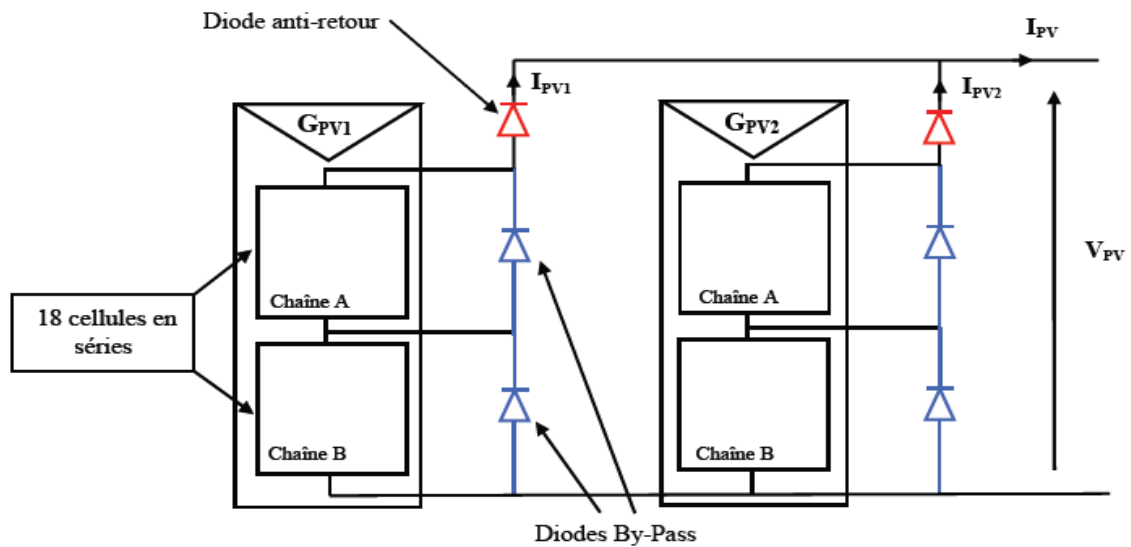
La puissance électrique produite par un panneau photovoltaïque dépend fortement de l'ensoleillement et à un degré moins important de la température des cellules. Ces deux variables influençant sur le comportement du système et présentent des fluctuations quotidiennes et saisonnières. Pour ces raisons, le panneau photovoltaïque ne peut fournir une puissance maximale que pour une tension particulière et un courant bien déterminé ; ce fonctionnement à puissance maximale dépend de la charge à ses bornes. A cet effet et en fonction du type de cette charge, un dispositif de contrôle devra être intégré dans le circuit de commande du convertisseur. Ce dernier doit être capable de faire fonctionner le panneau photovoltaïque à sa puissance maximale. La méthode de suivi ou "Tracking" connue sous le nom MPPT (Maximum Power Point Tracking) est basée sur l'utilisation d'un algorithme de recherche du maximum de la courbe de puissance du panneau photovoltaïque. Contrairement au contrôle à tension fixe, le tracking n'est pas basé sur une valeur de référence prédéterminée mais il s'agit d'une recherche de la valeur de référence pour atteindre le maximum de la puissance sur la caractéristique courant-tension. A noter que le tracking joue un rôle très important parce qu'il maximise le rendement et réduit au maximum le coût. [8]

## **II-2 Constitution d'un générateur photovoltaïque:**

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés délivre, au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque. La connexion en série des cellules permet d'augmenter facilement la tension de l'ensemble, tandis que la mise en parallèle permet d'accroître le courant. Le câblage série/parallèle est donc utilisé pour obtenir globalement un générateur PV aux caractéristiques souhaitées.

### **II-2-1 Protections classiques d'un GPV :**

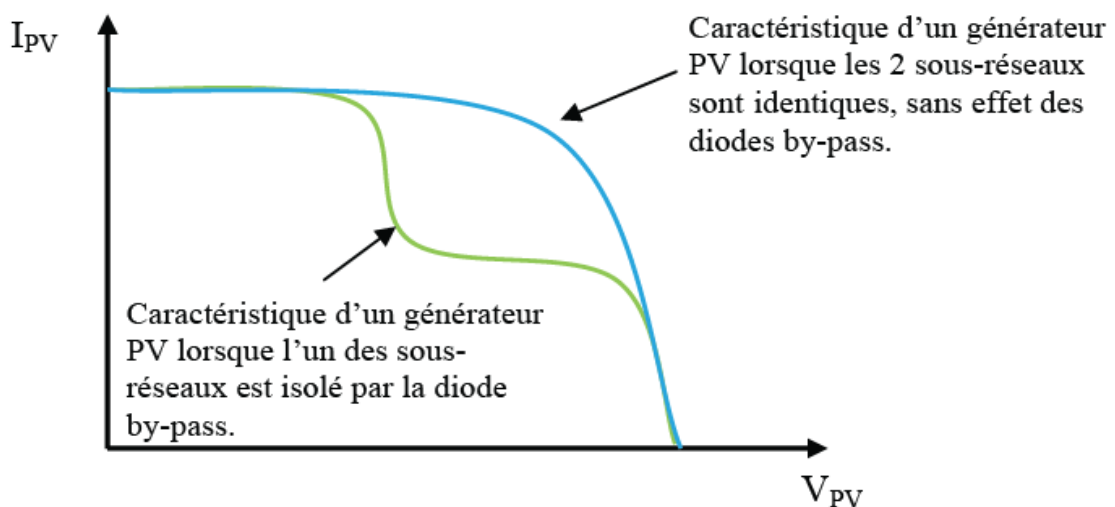
Pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules commerciaux afin d'éviter des pannes destructrices liées à l'association de cellules en séries et de panneaux en parallèles. Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés dans les installations actuelles figure (II-1) :



**Figure II-1** Exemples d'association sécurisée de deux modules PV commerciaux en parallèles avec leurs diodes de protections.

- la diode anti-retour empêchant un courant négatif dans les GPV. 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 évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées. La mise en conduction de ces diodes affecte la caractéristique de sortie du générateur, comme illustré sur la figure (II-2), par la perte d'une partie de la production d'énergie et par la présence de deux maximums de puissance.

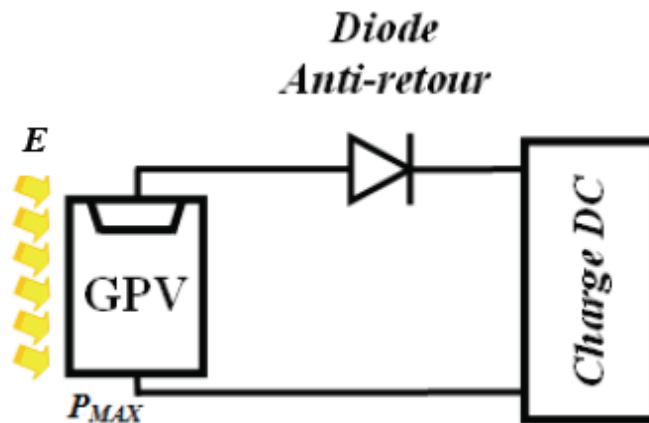


**Figure II-2** Effet de la diode by-pass sur la caractéristique  $I(V)$  d'un générateur photovoltaïque.

## II-2-2 Connexion directe entre la source et la charge :

Dans le cas d'une connexion directe qui est finalement aujourd'hui l'utilisation terrestre la plus répandue de l'énergie solaire, le point de fonctionnement du GPV dépend de l'impédance de la charge à laquelle il est connecté.

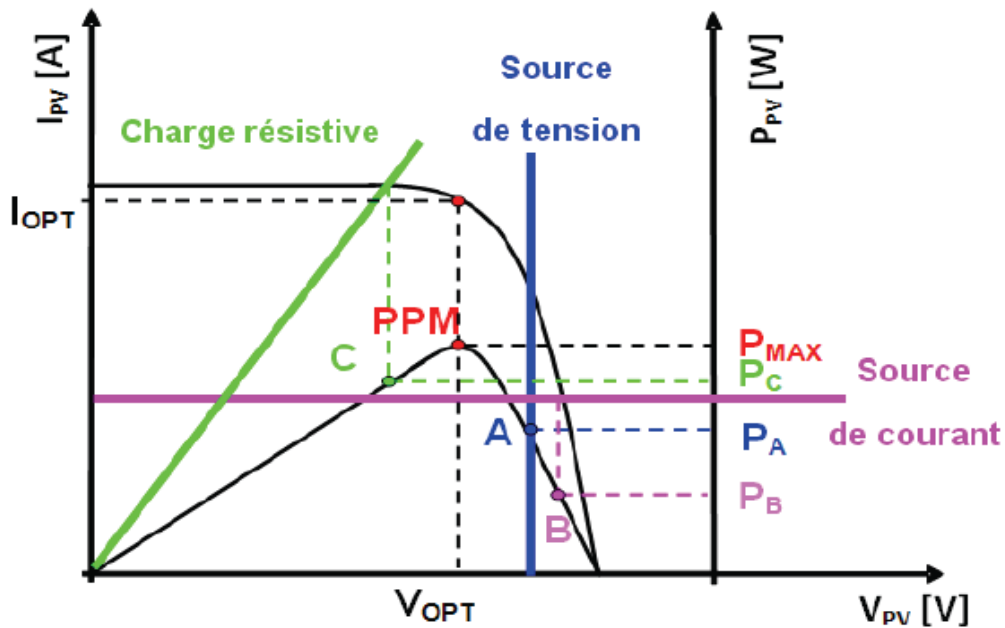
Actuellement, ce type d'application peut se résumer à un champ photovoltaïque ayant une tension  $V_{OPT}$  fixée par la tension nominale de l'application. Ce choix est principalement lié à la simplicité, la fiabilité et le faible coût de l'opération figure (II-3). La présence de la diode anti-retour est indispensable pour empêcher la circulation d'un courant négatif vers le module PV.



**Figure II-3** Principe d'une connexion directe entre un GPV et une charge. [9]

Cependant, cette configuration n'offre aucun type de limitation et/ou de réglage de la tension de la charge. Ce qui la restreint à des applications nécessitant une tension fixe ou faiblement variable. Par exemple, le cas de batteries de stockage dans les systèmes isolés.

Cependant, un examen plus approfondi de ces applications montre que même dans ce cas, le transfert d'énergie électrique disponible aux bornes du GPV vers la charge dépend fortement de l'état de la batterie ayant une tension à ses bornes variant d'un pourcentage non négligeable. Plus généralement, la puissance extraite d'un GPV connectée directement à une application est souvent très éloignée du maximum de puissance que peut délivrer le GPV, comme l'illustre la figure (II-4).



**Figure II-4** Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe, en fonction de la charge.

Comme le schématise la figure 2.8, un GPV peut être connecté directement à trois types de charges :

- une charge de type source de tension continue,
- une charge de type source de courant continue,
- une charge purement résistive.

Trois points de fonctionnement A, B, C respectifs peuvent être identifiés fournissant une puissance  $P_A$ ,  $P_B$  et  $P_C$ . Ces cas de figures montrent que le GPV est mal exploité et ne fournit pas la puissance maximale potentielle, la différence étant perdue sous forme de chaleur dissipée dans le générateur.

D'autre part, certains types de charges ont besoin de tensions et courants alternatifs. La connexion directe n'est alors pas possible car le GPV fournit un courant continu.

A travers ces exemples, on peut montrer rapidement les limites de la connexion directe autant sur les pertes de production qu'elle entraîne que sur les limites des applications compatibles (DC). Des recherches sur des solutions novatrices optimisant mieux la production d'énergie PV sont d'actualité et même nécessaires pour amener l'énergie PV à un degré de fiabilité comparable à une source d'énergie traditionnelle.

### II-2-3 L'étage d'adaptation:

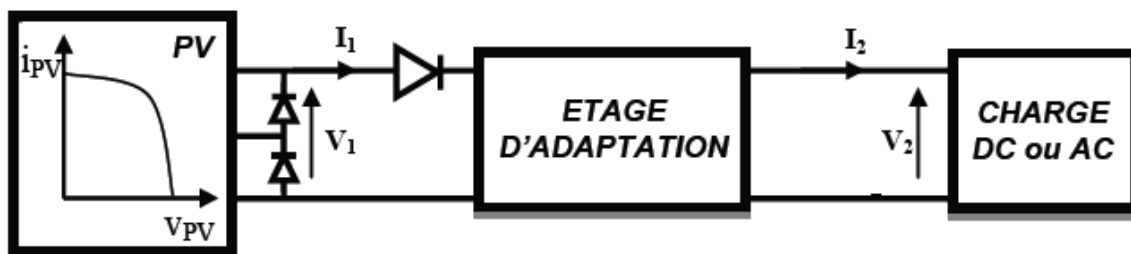
Comme illustré précédemment, le point de fonctionnement peut se trouver plus ou moins éloigné du PPM, voir ne pas exister. Ce dernier cas se produit par exemple, lorsqu'une



batterie connectée à un GPV, présente une tension de batterie systématiquement supérieure à la tension de circuit ouvert du générateur photovoltaïque ( $V_{OC}$ ). Alors, aucun transfert de puissance ne peut avoir lieu. Ainsi, l'un des intérêts à introduire un étage d'adaptation comme indiqué sur la figure (II-5), est d'assurer que le transfert d'énergie est toujours possible et qu'il peut s'effectuer dans des conditions de fonctionnement optimales pour la source PV et la charge. Pour cela, il suffit d'effectuer un choix sur l'étage d'adaptation selon ses propriétés de conversion de puissance et la présence d'au moins un degré de liberté lui permettant d'adapter les tensions et les courants autant en valeur qu'en forme entre son port d'entrée et son port de sortie pour respecter au mieux les contraintes d'une part du GPV et d'autre part, de la charge. L'électronique de puissance largement utilisée dans divers domaines de la conversion d'énergie offre plusieurs solutions potentielles sous forme de convertisseurs statiques (CS).

En résumé, selon l'application et le degré d'optimisation de production souhaités, l'étage d'adaptation entre le GPV et la charge peut être constitué d'un ou plusieurs convertisseurs statiques et permet d'assurer les fonctions suivantes :

- adapter les niveaux de tensions entre la source et la charge dans de grandes proportions si nécessaire (convertisseur Buck, Boost,...),
- introduire une isolation galvanique (convertisseur Flyback, Forward,...),
- connecter une charge avec des besoins d'alimentation de type alternative (onduleur).



**Figure II-5** Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation.

Il est à remarquer que l'étage d'adaptation ne remplace pas forcément les protections électriques évoquées dans la section (II-2-1), pour que le GPV fonctionne dans de bonnes conditions et ait une durée de vie importante. Ainsi, dans la plupart des cas, les protections initiales de diodes by-pass et de diodes anti-retour sont également indispensables lors d'une connexion à l'aide d'un étage d'adaptation.

L'introduction d'un étage d'adaptation permettant de fixer le point de fonctionnement du GPV indépendamment de celui de la charge, permet l'extraction de la puissance optimale. L'ensemble peut fonctionner de façon idéale, si diverses boucles de contrôle en entrée et en sortie de l'étage d'adaptation sont prévues. En entrée, elles garantissent l'extraction à chaque instant, du maximum de puissance disponible aux bornes du GPV. Et en sortie, des boucles de contrôle spécifiques permettent un fonctionnement optimal de chaque application dans son

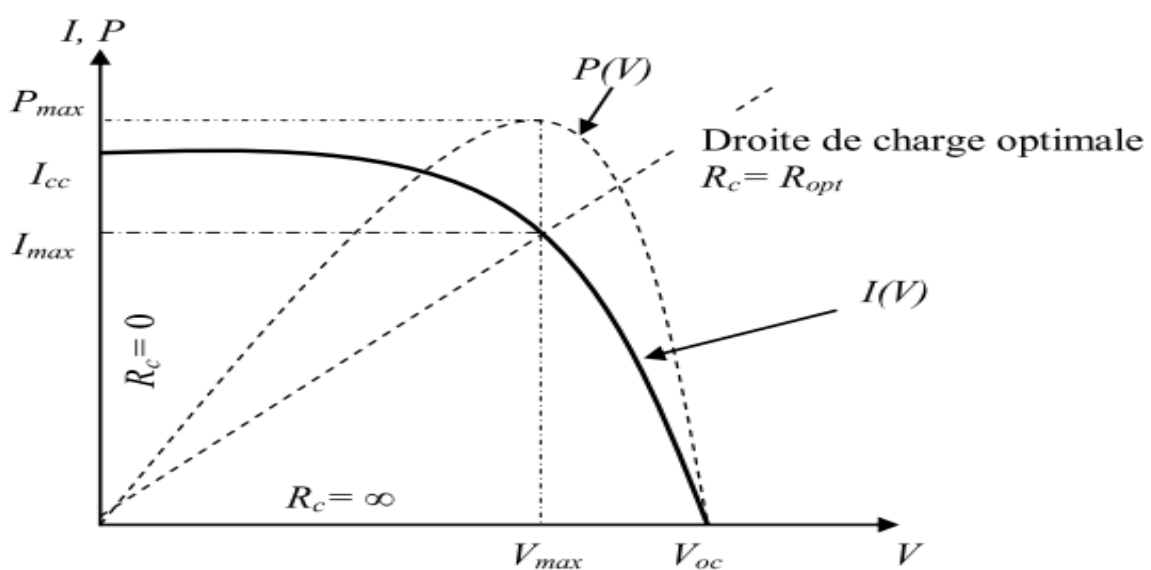
mode le plus approprié. Les techniques utilisées classiquement pour les boucles de contrôle en entrée consistent à associer à l'étage d'adaptation une commande appelée MPPT (de l'anglais Maximum Power Point Tracking) qui effectue une recherche permanente du PPM.

Cependant, en pratique, pour que l'étage d'adaptation joue le rôle d'interface idéale (sans pertes) entre les deux éléments, plusieurs conditions sont à respecter :

- le type d'action de contrôle sur le port d'entrée ne doit pas générer des pertes en régime statique ou transitoire.
- le transfert de la puissance du GPV ne doit pas être minimisé par les diverses pertes liées au fonctionnement de l'étage d'adaptation.

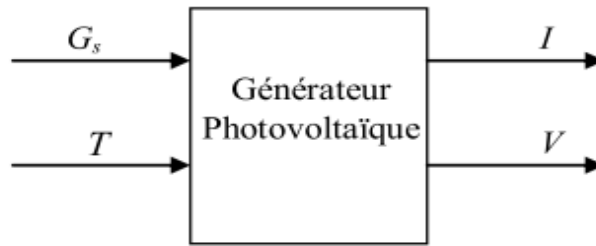
### II-3 Caractéristiques type d'un générateur photovoltaïque.

Le capteur photovoltaïque est décrit par ses caractéristiques électriques le courant en fonction de la tension ( $I=f(V)$ ) figure (II-6); Cette modélisation est utilisée généralement pour approximer la sortie du capteur (tension, courant) en fonction de deux entrées qui sont la température et l'éclairement reçu par le capteur figure (II-7). Le courant généré par le module photovoltaïque à une tension donnée dépend uniquement de l'éclairement et de la température de la cellule. A température et éclairage constants, le rendement d'une cellule solaire dépend de la charge dans le circuit électrique. En circuit ouvert ( $R_c = \infty$ ,  $I = 0$ ,  $V = V_{oc}$ ) ou en court-circuit ( $R_c = 0$ ,  $I = I_{cc}$ ,  $V = 0$ ), aucune énergie n'est transmise à l'extérieur. Entre ces deux extrêmes, il existe une valeur optimale  $R_{opt}$  de la résistance de charge  $R_c$  pour laquelle la puissance  $P=V_{max} \times I_{max}$  fournie par la cellule solaire à la résistance de charge est



maximale, et vaut  $P_{max}$ .

**Figure II-6** : Caractéristiques type d'un générateur photovoltaïque.



**Figure II-7** Schéma bloc de générateur photovoltaïque.

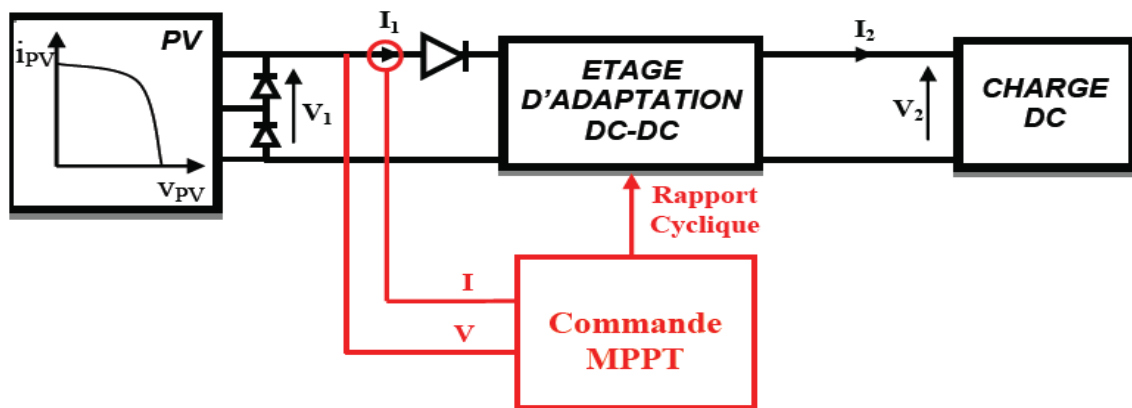
Le rendement énergétique de la cellule solaire est défini par,  $\eta = P / P_\gamma$ , où  $P_\gamma$  est la puissance lumineuse incidente sur la surface de la cellule. Pour la valeur optimale  $R_{opt}$  de la résistance de charge  $R_c$ , le rendement de la cellule solaire est maximum, et  $\eta_{max} = P_{max} / P_\gamma$  vaut . La valeur  $R_{opt}$  n'est pas une constante caractéristique pour une cellule donnée, mais dépend du spectre du rayonnement incident et de la température de la jonction. En fait, le rendement diminue lorsque la température augmente, ce qui conduit parfois à construire des capteurs hybrides résultant de la combinaison d'un capteur thermique et d'une cellule solaire, qui permettent de produire simultanément de l'eau chaude et d'augmenter le rendement photovoltaïque en refroidissant la cellule. La puissance fournie par la cellule solaire ( $P = I \times V$ ) et son rendement ( $\eta = P / P_\gamma$ ) dépendent du matériau utilisé et de la technologie de fabrication (silicium amorphe, silicium polycristallin, silicium monocristallin), de la géométrie de la jonction (épaisseur des couches, multicouches, etc.) et des paramètres extérieurs (température, spectre et puissance du rayonnement incident, circuit électrique extérieur connecté à la cellule, etc.).

## **II-4 Principe de la recherche du point de puissance maximal:**

### **II-4-1 Généralités:**

Des lois de commandes spécifiques existent pour amener des dispositifs à fonctionner à des points maximums de leurs caractéristiques sans qu'a priori ces points soient connus à l'avance, ni sans que l'on sache à quel moment ils ont été modifiés ni qu'elles sont les raisons de ce changement. Pour le cas de sources énergétiques, cela se traduit par des points de puissance maximum. Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou bien « Maximum Power Point Tracking » en anglo-saxon (MPPT). Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximal (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance.

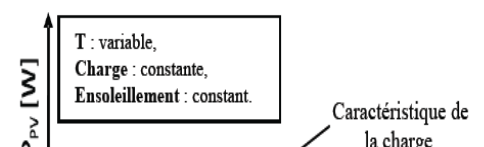
La figure (II-8) représente une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque élémentaire associée à une commande MPPT. Pour simplifier les conditions de fonctionnement de cette commande, une charge DC est choisie. Comme nous pouvons le voir sur cette chaîne, la commande MPPT est nécessairement associée 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 corresponde à la puissance maximale ( $P_{MAX}$ ) qu'il génère et qu'elle puisse ensuite être transférée directement à la charge.

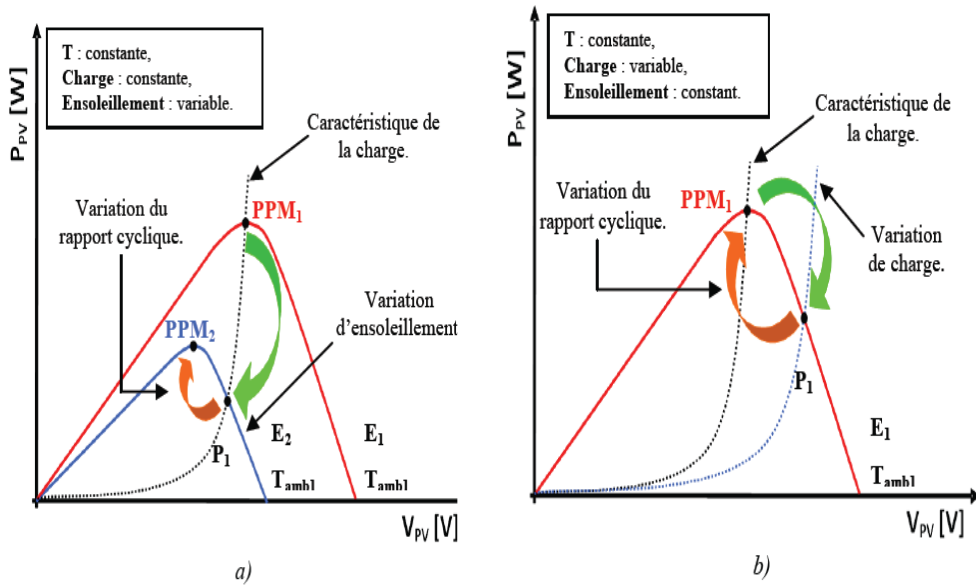


**Figure II-8** Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.

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 (II-9) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 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 PPM2. Pour une variation de 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 II-9** Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximal

- a) suite à une variation d'ensoleillement.
- b) suite à une variation de charge.
- c) suite à une variation de température.

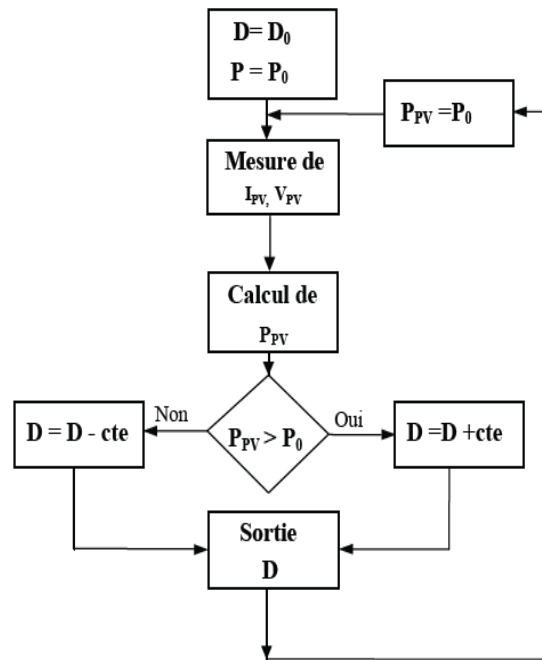
Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV. Une synthèse des principaux modes de recherche du PPM existants dans ce chapitre nous a permis de bien identifier l'existant et les points qu'il restait à améliorer.

#### II-4-2 Synthèse des différentes MPPT rencontrées dans la littérature:

Diverses publications sur les commandes assurant un fonctionnement de type commande MPPT apparaissent régulièrement dans la littérature depuis 1968, date de publication de la première loi de commande de ce genre, adaptée à une source d'énergie renouvelable de type photovoltaïque. Etant donné le grand nombre de publications dans ce domaine, nous avons fait une classification des différentes MPPT existantes en les regroupant selon leur principe de base. La classification, en plus du principe, s'est effectuée selon des critères comme la précision de la recherche ou sa rapidité pour en faire une évaluation comparative. Seuls les algorithmes qui nous semblent décrire une méthode de recherche spécifique sont reportés dans ce manuscrit et brièvement analysés.

##### II-4-2-1 Les premiers types de commande MPPT :

L'algorithme mis en œuvre dans les premières commandes MPPT était relativement simple. En effet, les capacités des microcontrôleurs disponibles à l'époque étaient faibles et les applications, surtout destinées au spatial avaient beaucoup moins de contraintes en variation de température et d'éclairement que les applications terrestres. Appliqué initialement au photovoltaïque, son principe a d'abord été décrit par A.F. Boehringer. Cette commande est basée sur un algorithme de contrôle adaptatif, permettant de maintenir le système à son point de puissance maximum (PPM). Ce dernier est décrit en figure (II-10) et peut être implanté entièrement en numérique.



**Figure II-10** Principe de la première commande MPPT numérique.

Il consiste à calculer la puissance à l'instant  $t_i$  à partir des mesures de ( $I_{PV}$  et  $V_{PV}$ ), et de la comparer à celle stockée en mémoire, correspondant à l'instant  $t_{i-1}$ . De-là, un nouveau rapport cyclique ( $D$ ) sera calculé et ensuite appliqué au convertisseur statique. Ce principe est toujours valable du point de vue théorique, il est appliqué de nos jours sur des algorithmes numériques plus performants. Cependant, le temps de réaction a été amélioré ainsi que la précision de la recherche du PPM associée à un certain nombre de précautions pour ne pas perdre le PPM même temporairement.

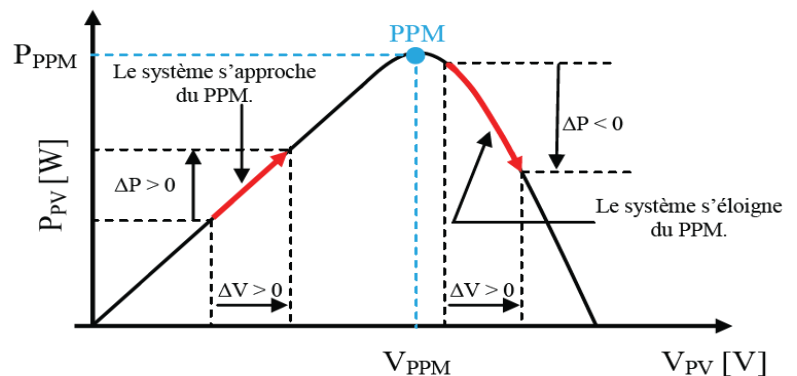
#### II-4-2-2 Les commandes MPPT à algorithmes performants:

Dans la littérature, nous pouvons trouver différents types d'algorithmes effectuant la recherche du PPM. Les trois méthodes les plus couramment rencontrées sont communément appelées respectivement *Hill Climbing*, *Perturb&Observ (P&O)* et *l'incrément de conductance (IncCond)*. Dans notre travail on s'intéresse par la méthode *Perturb&Observ (P&O)*, nous rappelons brièvement le principe de cette méthode.

#### Principe des commandes "Perturb and Observe" (P&O) :

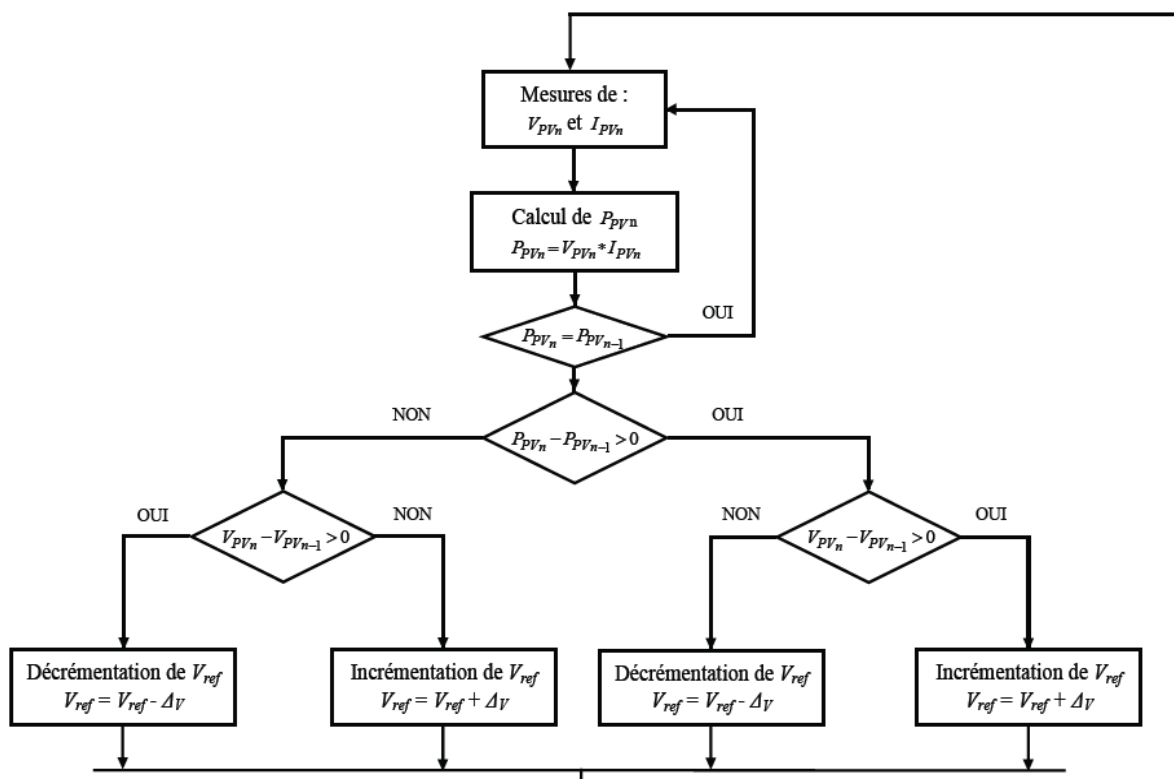
Le principe des commandes MPPT de type **P&O** consiste à perturber la tension  $V_{PV}$  d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance  $P_{PV}$  qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la figure (II-11), on peut déduire que si une incrémentation 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 II-11** Caractéristique  $P_{PV}(V_{PV})$  d'un panneau solaire.

La figure (II-12) 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.



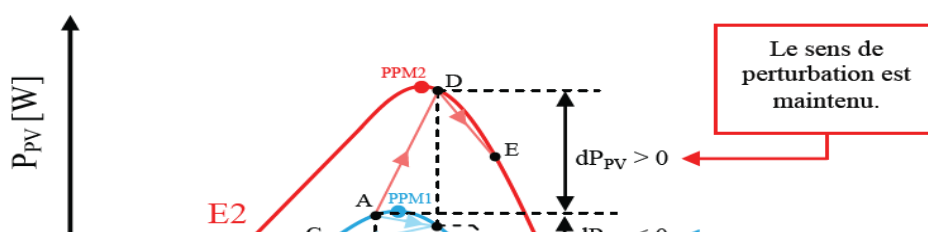
**Figure II-12** Algorithme type de la méthode P&O.

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 variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralentit la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser.

Par contre, une étude comparative entre différents algorithmes de recherche a été effectuée par D. P. Hohm en 2000. Dans cet article, l'auteur a développé un banc de mesure et une procédure de test qui permettent d'évaluer différentes commandes MPPT sous les mêmes conditions climatiques durant une journée de fonctionnement. Les principes de recherche analysés sont, outre la méthode P&O, l'incrément de conductance et une méthode basée sur la mesure de la tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ ), détaillées toutes deux dans la suite du document. Il ressort de cette étude que la commande MPPT testée basée sur le principe P&O affiche un rendement MPPT de l'ordre de 96,5 %, cependant aucune indication n'est fournie par l'auteur sur la valeur de la variable d'incrément et si cette valeur est une valeur moyenne ou une valeur liée aux conditions climatiques. En effet, il est connu que ce type de commande permet d'obtenir un rendement plus important durant une journée relativement ensoleillée, où le PPM évolue lentement et proportionnellement au soleil.

Par contre pour une journée présentant de forts changements d'irradiations très fréquents, cette commande présente plus de pertes, engendrées par le temps de réponse de la commande pour atteindre le nouveau PPM.

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 (II-13).





**Figure II-13** Divergence de la commande P&O lors de variations d'irradiation.

Pour comprendre, prenons l'exemple d'un éclairement donné, noté  $E_1$ , avec un point de fonctionnement se situant en A. Suite à une perturbation de tension de valeur  $\Delta V$ , ce dernier bascule en B, impliquant, dans un fonctionnement sans variation d'éclairement, 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.

## **II-5 Conclusion :**

Dans ce chapitre, une analyse théorique montre que le choix optimal de point de fonctionnement par la méthode P&O présentée est particulièrement approprié où les variations rapides de l'éclairement se produisent en raison des conditions climatiques. Mais il existe des inconvénients de cette technique, tel que celui du cas de changement rapide des conditions atmosphériques (nuage mobile) ; dans ce cas, cette méthode peut déplacer le point de fonctionnement dans une direction fautive par rapport à l'ondulation.

## **Chapitre III**

# **Résultats et Simulation d'Une Commande (MPPT)**

*Résultats et Interprétations*

### III-1 Introduction :

Les générateurs photovoltaïques sont par nature des sources non linéaires qui nécessitent une meilleure estimation du point optimal du fonctionnement pour un contrôle en temps réel. Cette puissance varie en fonction des facteurs climatiques tels que la température et l'ensoleillement. Cependant, le point de fonctionnement varie largement dans le temps, plusieurs méthodes ont été utilisées pour identifier le point optimal dans lequel la puissance de sortie du GPV est maximale .

### III-2 Modélisation des panneaux :

Pour ce travail, un modèle de complexité modérée a été employé, la dépendance à la température du courant de la diode et du courant inverse de saturation, est incluse. La résistance série était incluse, mais pas la résistance shunt. Une simple diode shunt a été utilisée pour réaliser la meilleure forme de la courbe. Ce modèle est une version simplifiée du modèle à une seule diode présenté par **Gow et Manning**.

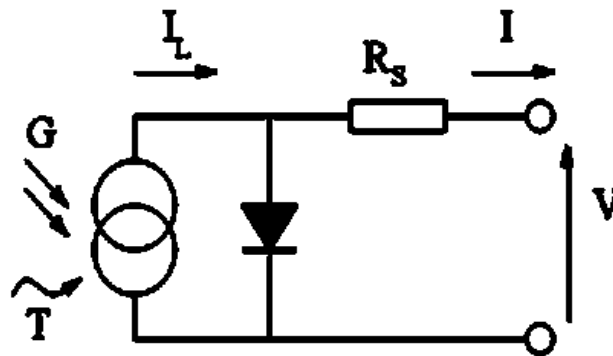


Figure III-1 Circuit électrique équivalent de la cellule photovoltaïque

Les équations décrivant le système de la cellule photovoltaïque sont:

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp \left( \frac{q}{nKT} (V + I \cdot R_s) \right) - 1 \right] \quad (\text{III. 2})$$

$$I_L = I_{L(T_1)} [1 + K_0 (T - T_1)] \quad (\text{III. 3})$$

$$I_{L(T_1)} = G * \frac{I_{sc(T_1, nom)}}{G_{(nom)}} \quad (\text{III. 4})$$

$$K_0 = \frac{(I_{sc(T_2)} - I_{sc(T_1)})}{T_2 - T_1} \quad (\text{III. 5})$$

$$I_0 = I_{0(T_1)} * \left( \frac{T}{T_1} \right)^{\frac{3}{n}} \cdot \exp \left( \frac{-q \cdot V_g}{n \cdot K \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_1} \right)} \right) \quad (\text{III. 6})$$

$$I_{0(T_1)} = \frac{I_{sc(T_1)}}{\exp \left( \frac{q \cdot V_{oc(T_1)}}{n \cdot K \cdot T_1} \right) - 1} \quad (\text{III. 7})$$

$$R_s = - \frac{dV}{dI_{V_{oc}}} - \frac{1}{X_V} \quad (\text{III. 8})$$

$$X_V = I_0(T_1) \cdot \frac{q}{n \cdot K \cdot T} \exp \left( \frac{q \cdot V_{oc}(T_1)}{n \cdot K \cdot T_1} \right) \quad (\text{III. 9})$$

Avec :

G : Eclairement (W/m<sup>2</sup>).

I : Courant délivré par le module PV(A).

V : Tension du module PV (V).

I<sub>L</sub>: Photon courant (A).

I<sub>0</sub> : Courant de saturation de la diode (A).

T<sub>1</sub> : Température 1 de référence (°K).

$T_2$  : Température 2 de la cellule (°K).

$T$  : Température de la cellule (°K).

$q.V_g$  : Energie de gap pour le silicium cristalline ( $E_g = 1,12$  eV) .

$R_s$  : Résistance série ( $\Omega$ ).

$n$  : Le facteur d'idéalité de la jonction.

$k$  : Constante de Boltzmann (k).

$q$  : Charge de l'électron ( $q = 1,6.10^{-19}$  C).

$I_{sc}$  : Courant de court-circuit du GPV.

$V_{oc}$  : La tension de circuit ouvert.

Toutes les constantes dans les équations ci-dessus peuvent être déterminées en utilisant les données de fabricants de panneaux photovoltaïques et à partir des courbes  $I(V)$ . Le module BP MSX62 de BPSolar 62W sera utilisé pour illustrer et vérifier le modèle. Le photo-courant est directement proportionnel à l'éclairement.

Quand la cellule est court-circuitée, un courant négligeable entrée dans la diode. Le rapport entre le photo-courant et la température est linéaire, voir équation (III. 3) et est déduit en notant le changement du photo-courant en fonction de la variation de température. Quand la cellule est en obscurité, la caractéristique  $I(V)$  est donnée par l'équation de Shockley.

Quand la cellule illuminée est en circuit ouvert, le photo-courant passe entièrement dans la diode. Voir la courbe des zones de fonctionnement dans le chapitre I (**figure I-12**) est excentrée de l'origine par le photo-courant généré ( $I_L$ ) et donné par l'équation (III. 2). La valeur du courant de saturation à 25°C donné par l'équation (III. 7) est calculée en utilisant la tension de circuit ouvert et le courant de court circuit à cette température. La relation de la température est complexe, mais ne contient heureusement aucune variable qui exige une estimation de l'équation (III.6). La résistance série du module possède un grand impact sur la pente de la caractéristique (III.5) à  $V=V_{oc}$ . Les équations (III.6) et (III.7) sont calculées en différenciant l'équation (III.2), l'évaluation à  $V=V_{oc}$ , et le réarrangement en terme de ( $R_s$ ) en utilisant les valeurs données par le constructeur, on peut estimer une valeur finale de la résistance série  $R_s = 8$  m $\Omega$ .

<b>Température</b>	$T$	25	°C
<b>Tension de circuit ouvert</b>	$V_{oc}$	21.0	V
<b>Courant de court circuit</b>	$I_{cc}$	3.8	A
<b>Tension de puissance maximale</b>	$V_m$	16.03	V
<b>Courant de puissance maximale</b>	$I_m$	3.5	A
<b>Puissance maximale</b>	$P_m$	62.13	W

**Tableau (III- 1):** Caractéristiques électriques du module BP MSX62 de BP Solaire [31].

### III-3 Résultats et interprétations :

Nous avons fait une étude d'un panneau photovoltaïque simple du module BP MSX62 de BP Solaire sous environnement **Matlab version 7.10** et nous avons déduit les caractéristiques suivantes:

#### III-3-1 Caractéristique courant- tension, puissance – tension :

Une première manière d'étudier la cohérence du modèle développé tout dans ce chapitre est d'étudier l'allure des caractéristiques courant-tension **I(V)** figure (III-2) et puissance-tension **P(V)** figure (III-3) obtenues a l'aide des équations du modèle électrique présenté dans la figure (III-1).

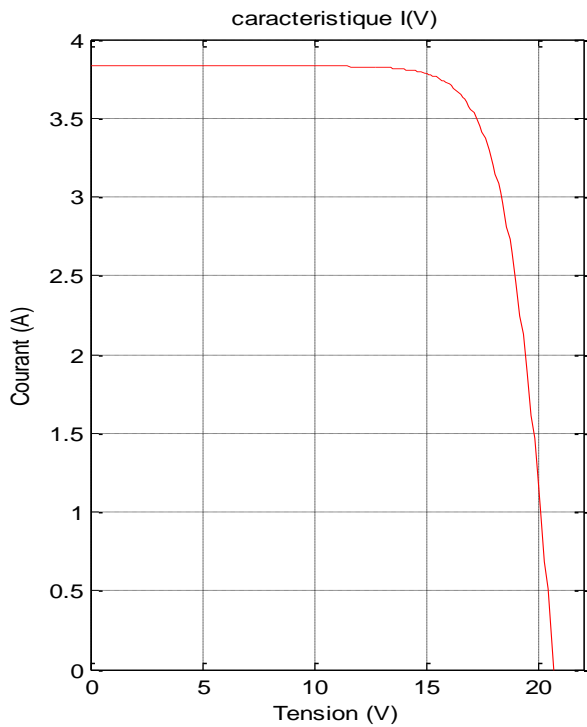


Figure III-2 Caractéristique courant-tension

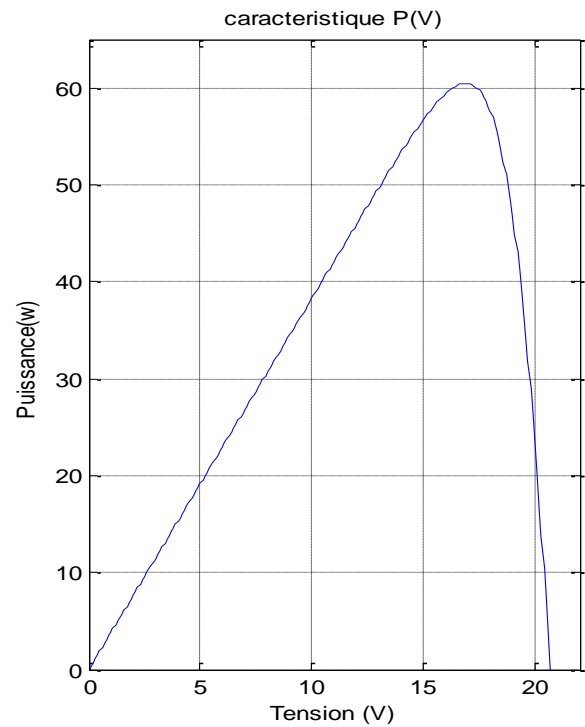


Figure III-3 Caractéristique puissance-tension

Afin de voir le bon fonctionnement du modèle étudié, nous avons effectué des simulations suivant les effets des différents paramètres (la **température** et **l'éclairement**) sur les caractéristiques courant-tension.

### III-3-2 Influence de la température :

Nous avons effectué une simulation où nous avons maintenu un éclairement constant ( $G=1000W/m^2$ ) pour différentes température (**25°C**, **50°C**, **75°C**, **100°C**). La courbe des caractéristiques va présenter des allures différentes selon la température. La tension à vide va diminuer lorsque la température a augmentée, à l'inverse du courant de court-circuit. La variation de tension à vide est pratiquement compensée par la variation du courant de court-circuit figure (III-4) et figure (III-5).

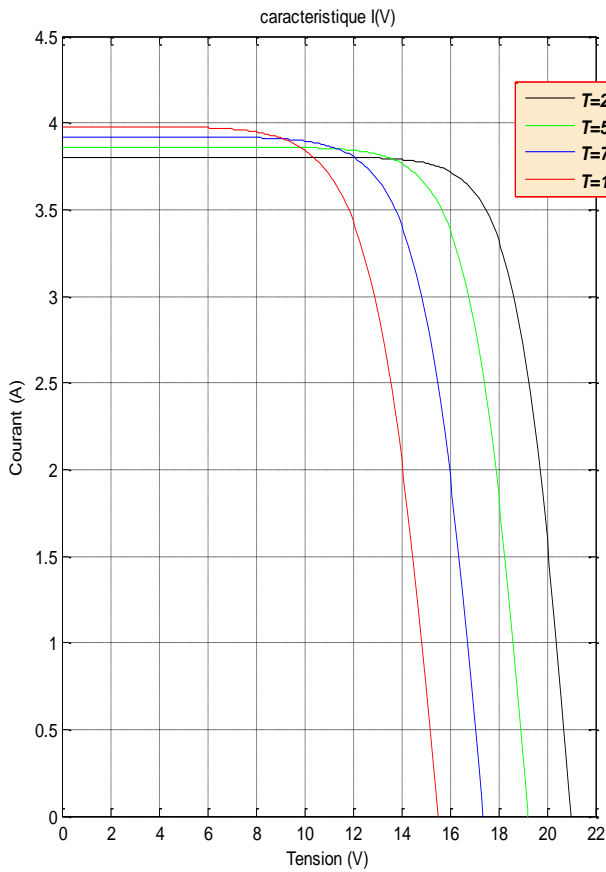


Figure III-4 Influence de la température sur I(V)

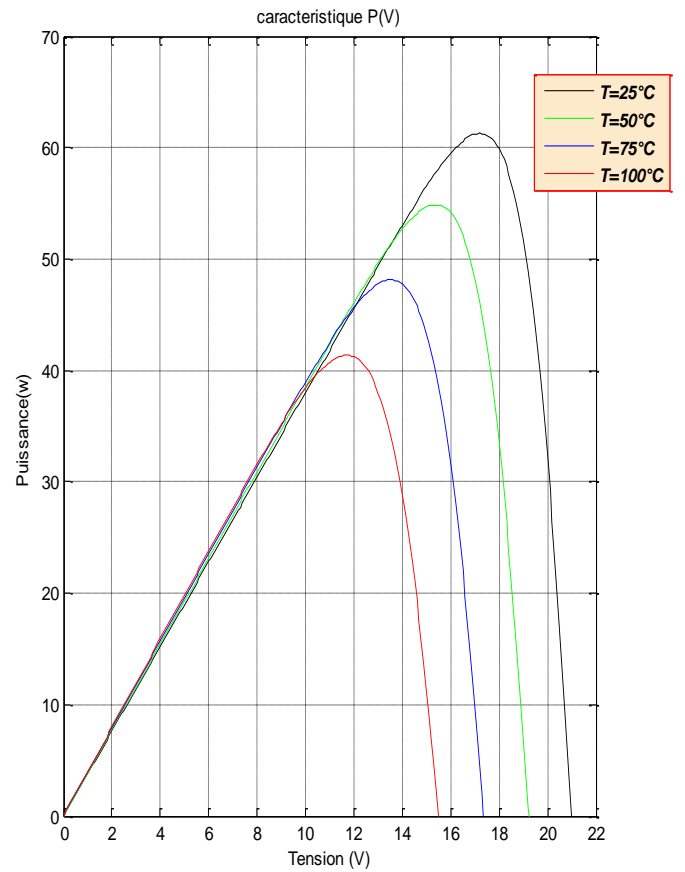


Figure III-5 Influence de la température sur P(V)

### III-3-3 Influence de l'éclairement :

Par contre du cas précédent, lorsque nous avons maintenu une température constante (**25°C**) à différents éclaircements (**0W/m<sup>2</sup>, 100W/m<sup>2</sup>, 200W/m<sup>2</sup>, 300W/m<sup>2</sup>, 400W/m<sup>2</sup>, 500W/m<sup>2</sup>, 600W/m<sup>2</sup>, 700W/m<sup>2</sup>, 800W/m<sup>2</sup>, 900W/m<sup>2</sup>, 1000W/m<sup>2</sup>**) on remarque que l'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que l'augmentation de la tension de circuit ouvert, car le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) est une fonction linéaire de l'éclairement et la tension du circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) est une fonction logarithmique voire figure (III-6) et figure (III-7).



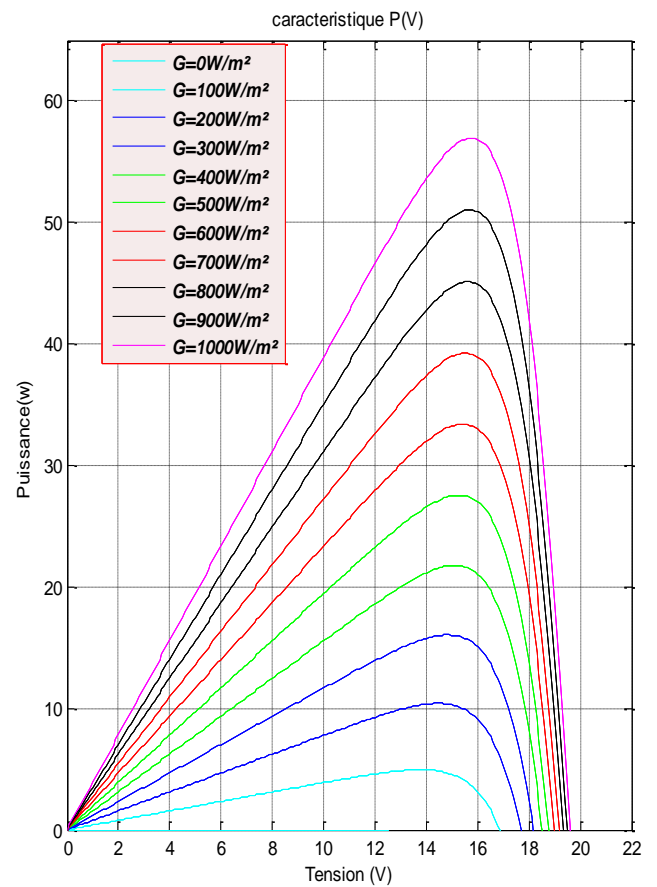
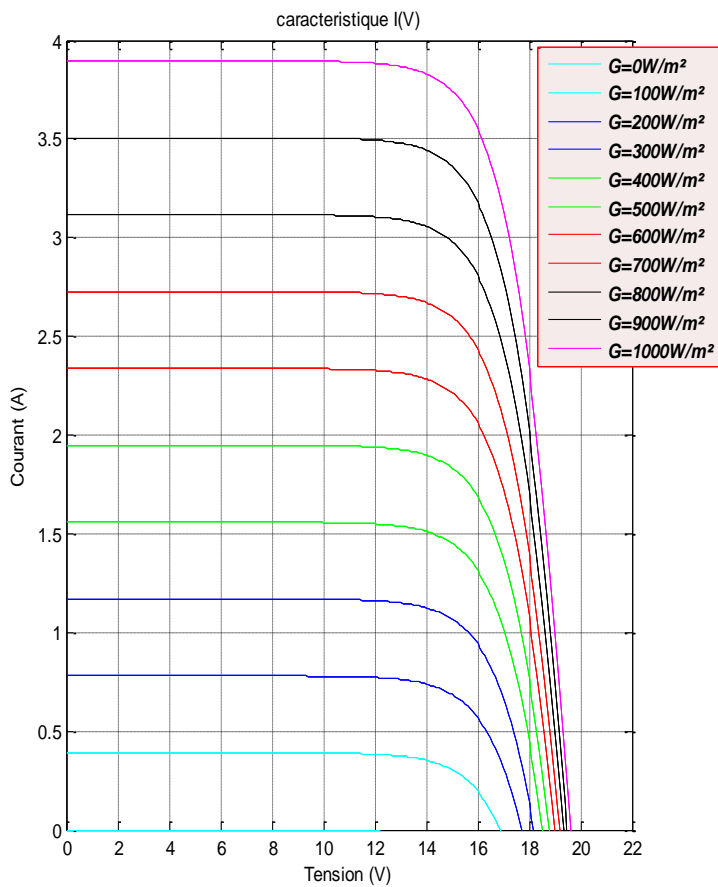


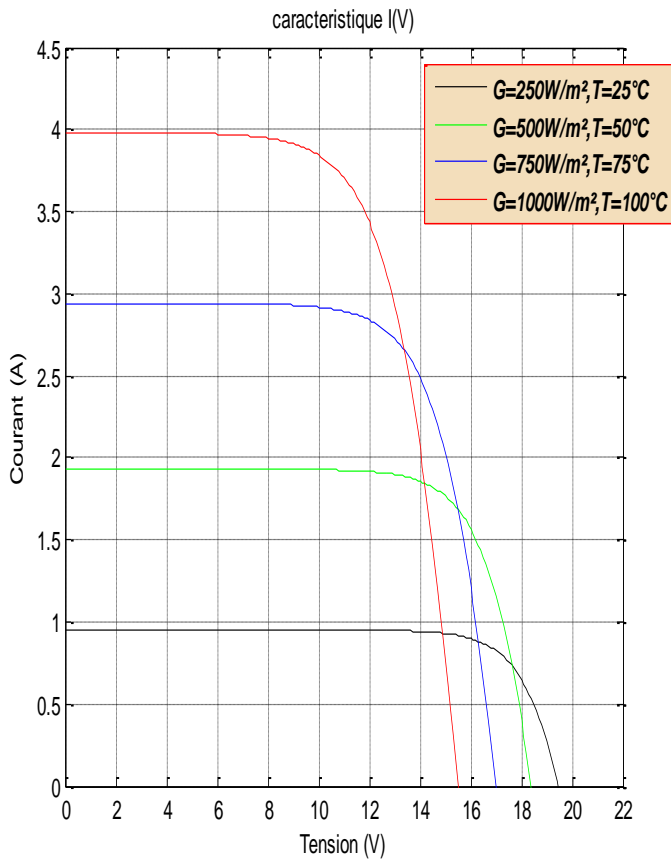
Figure III-6 Influence de l'éclairement sur I(V)

Figure III-7 Influence de l'éclairement sur P(V)

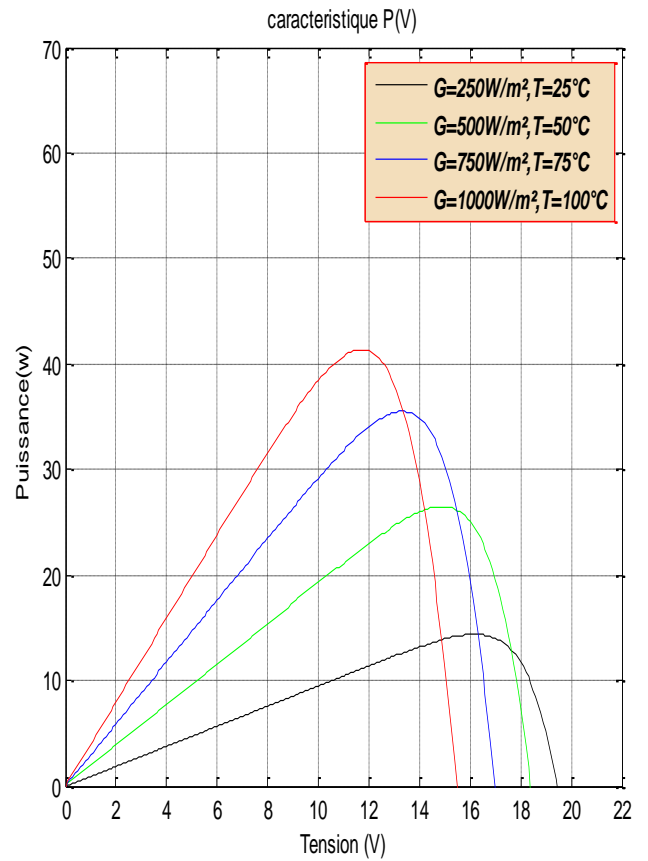
### III-3-4 Influence de l'éclairement et la température :

La variation de la température et de l'éclairement en même temps (**250W /m²et 25°C, 500W /m²et 50°C, 750W /m²et 75°C, 1000W /m²et 100°C**), nous a permis de conclure qu'il y a une petite variation de la tension du circuit-ouvert ( $V_{oc}$ ), par contre il y a une grande variation du courant ( $I_{cc}$ ), voir figure (III-8) et figure (III-9).

On remarque aussi que la puissance délivrée par un générateur photovoltaïque dépend beaucoup plus de la variation de l'éclairement que la variation de la température.



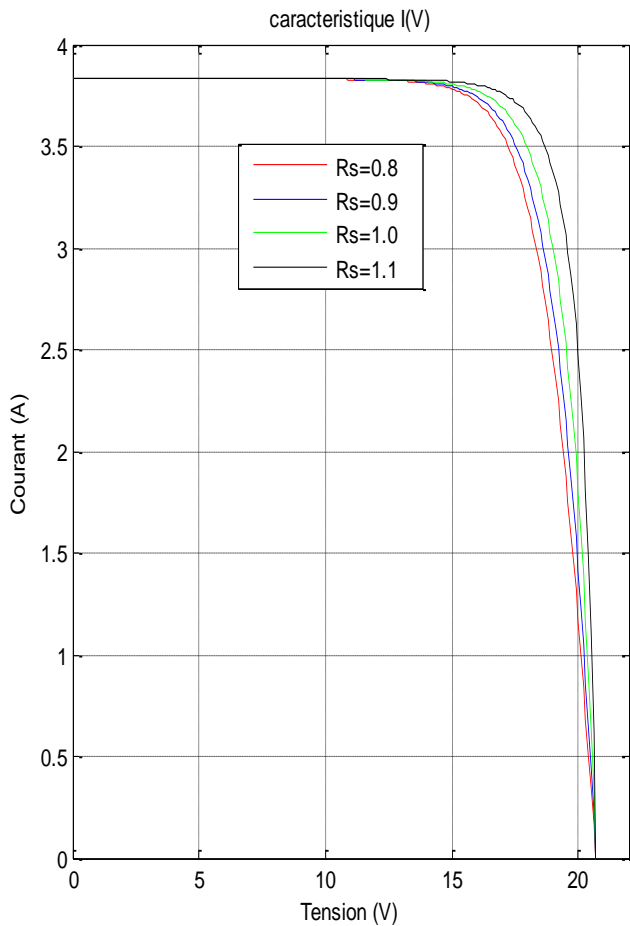
**Figure III-8** Influence de l'éclairement et de la température sur I(V)



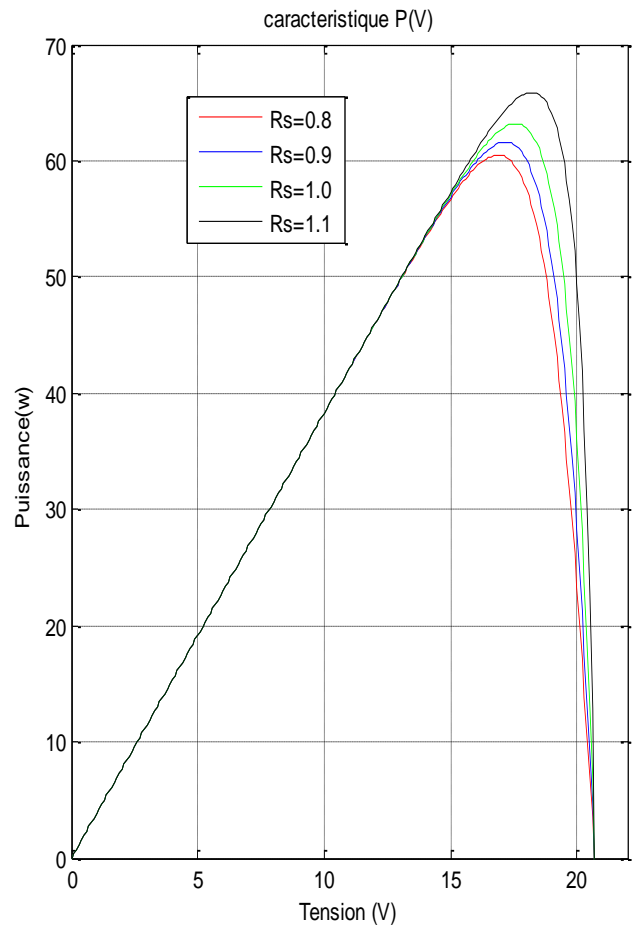
**Figure III-9** Influence de l'éclairement et de la température sur P(V)

### III-3-5 Influence de la résistance série :

La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la photodiode qui se comporte comme un générateur de tension, et lorsqu'elle est élevée ( $R_s=0.08\Omega$ ,  $R_s=0.09\Omega$ ,  $R_s=1\Omega$ ,  $R_s=1.1\Omega$ ), elle diminue la valeur du courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) voir figure (III-10) et figure (III-11).



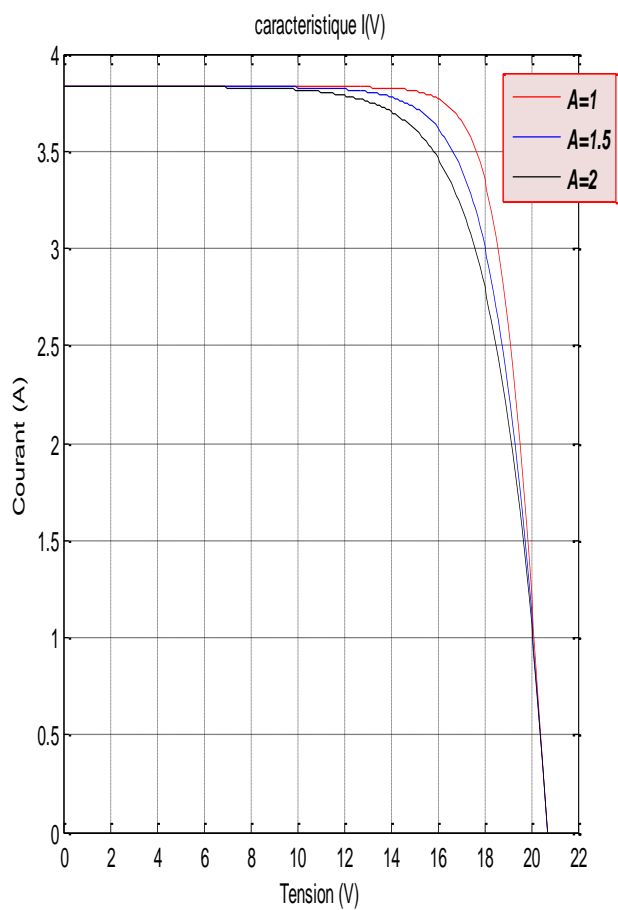
**Figure III-10** Influence de la résistance série sur I(V)



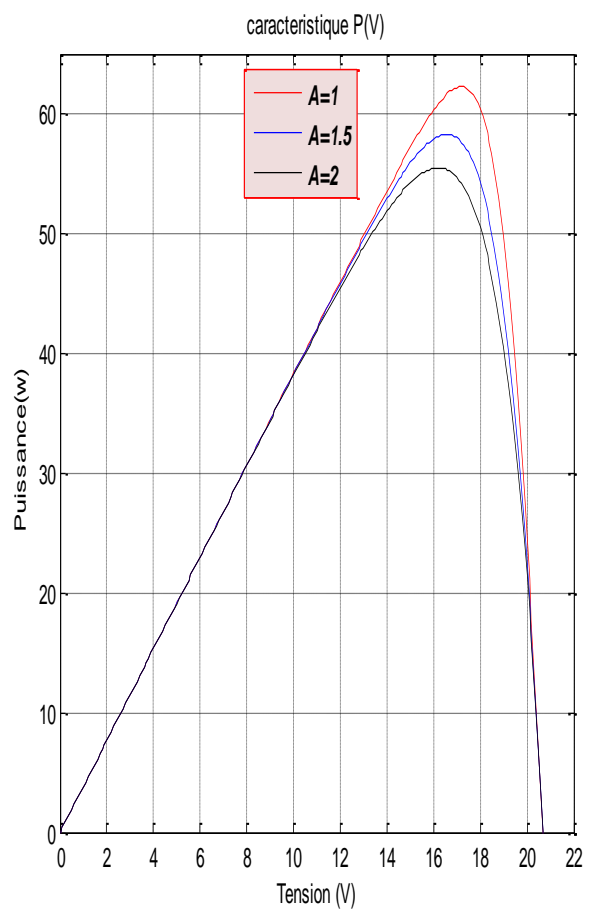
**Figure III-11** Influence de la résistance série sur P(V)

### III-3-6 Influence du facteur de qualité :

L'augmentation du facteur de qualité de la diode influe inversement sur le point de puissance maximale et cela se traduit par une baisse de puissance au niveau de la zone de fonctionnement voir figure (III-12) et figure (III-13).



**Figure III-12** Influence du facteur de qualité sur I(V)



**Figure III-13** Influence du facteur de qualité sur P(V)

### III-4 Recherche du point de fonctionnement optimal (MPPT) :

Pour que le système photovoltaïque soit optimisé et fonctionne au point maximale de la puissance, il faut intégrer un MPPT qui a pour rôle de détecté ce point et oblige le système d'opérer précisément sur ce dernier dont le fonctionnement est optimale. Le point maximum de puissance est habituellement contrôlé par deux variables de commande. La tension ou la puissance est à chaque fois mesurée est employée à nouveau dans une boucle pour déterminer si le module solaire est au point de puissance maximale. Quand le système emploie comme paramètre la tension, il règle le module solaire à une tension spécifique qui devrait donner le point maximum de la puissance, ce point dépend de la température et de l'éclairement.

Notre étude nous a permet de calculer la puissance maximale du module photovoltaïque et d'obtenir le point optimal de fonctionnement du modèle soit sous l'influence de la température soit sous l'influence de l'éclairement soit sous l'influence de deux, figure (III-14) a l'aide du logiciel **Matlab version 7.10**, on a utilisé une méthode sous forme d'un code programme qui peut rechercher de ce point et la courbe idéale suivi par le MPP durant le changement de la température et de l'éclairement.

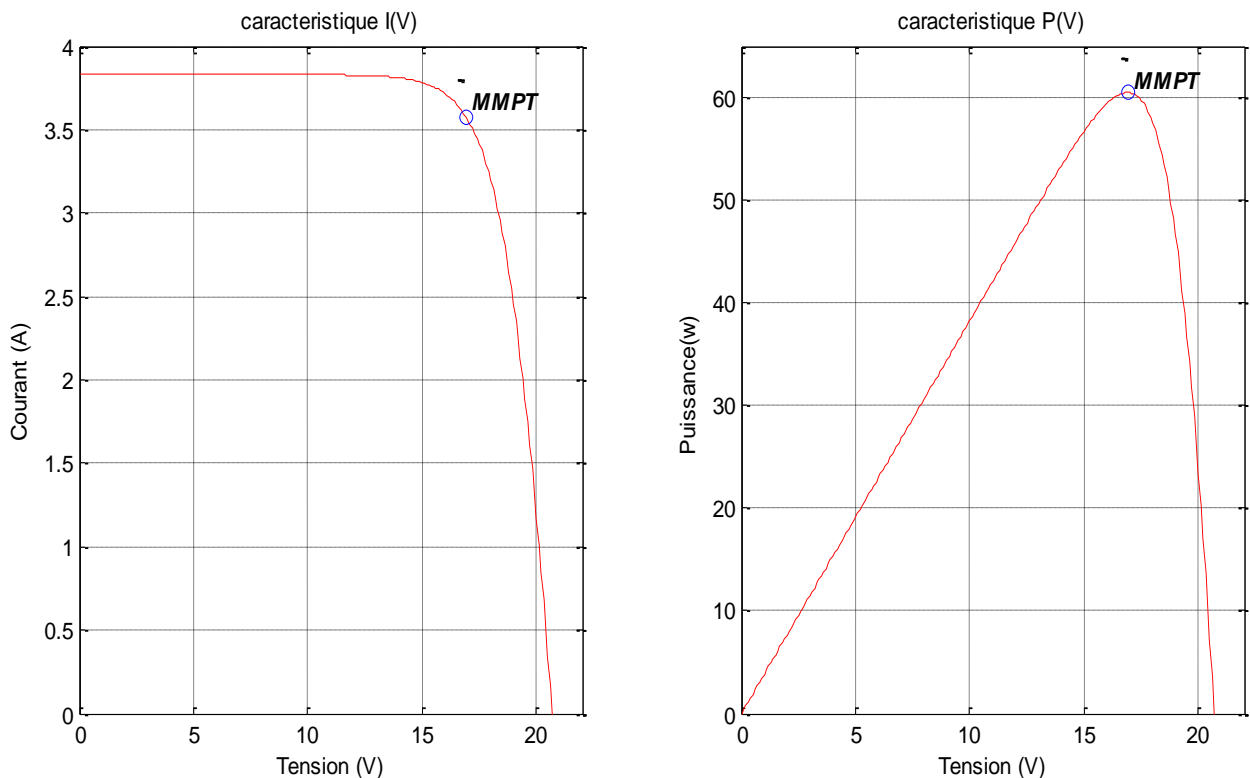
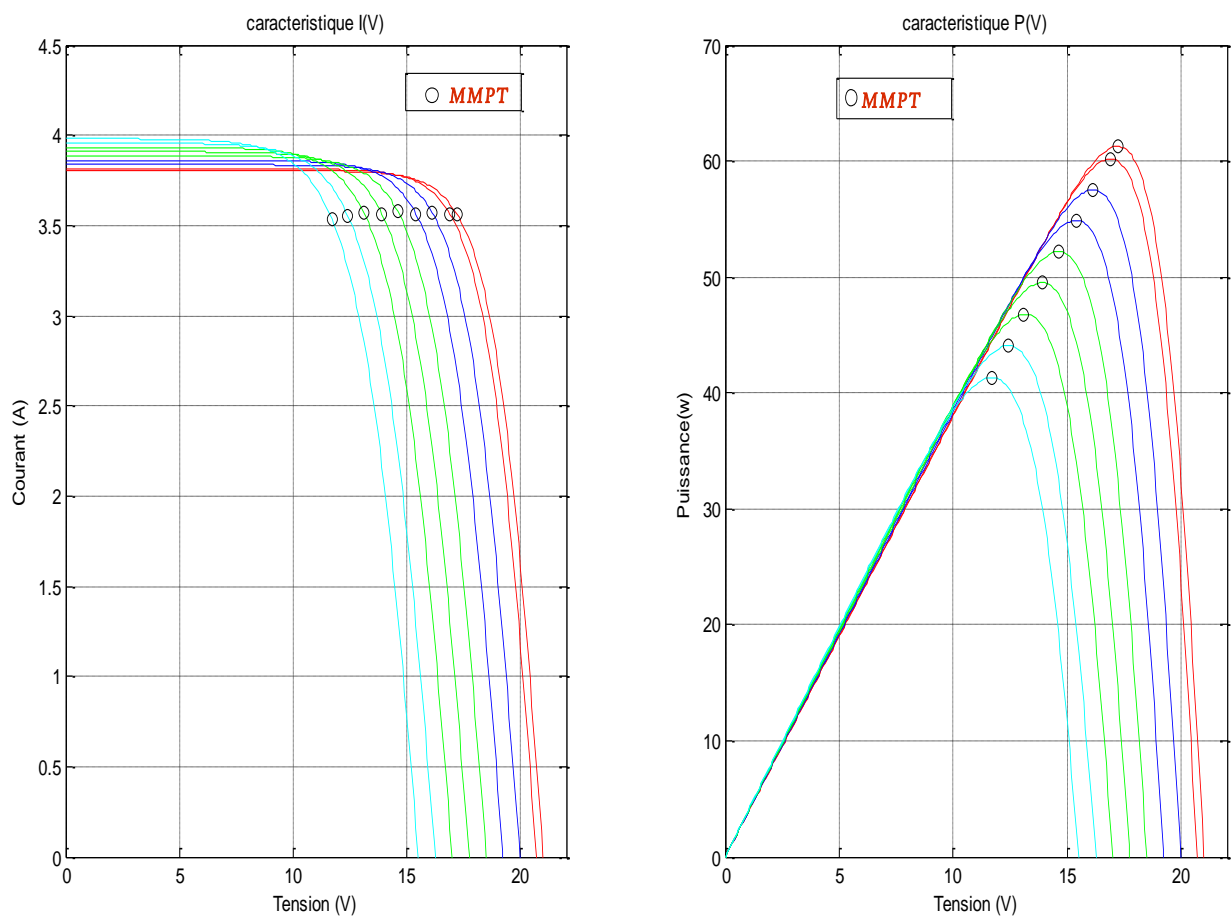


Figure III-14 Recherche du point de fonctionnement optimal (MPPT)

### III-4-1 La recherche du MPP sous l'influence de la température :

Nous avons effectué une simulation où nous avons maintenu un éclairage constant ( $G=1000W/m^2$ ) pour différentes températures (de  $25^{\circ}C$  à  $100^{\circ}C$ ) puis on cherche le point de puissance maximal et observe le changement à chaque fois dans les caractéristiques I(V) et dans les caractéristiques P(V) et enfin on trouve la fonction optimal de la courbe suivi par le point de puissance maximal durant le changement de la température voir figure (III-15).



**Figure III-15** Recherche du point de fonctionnement optimal (MPPT) sous l'influence de la température

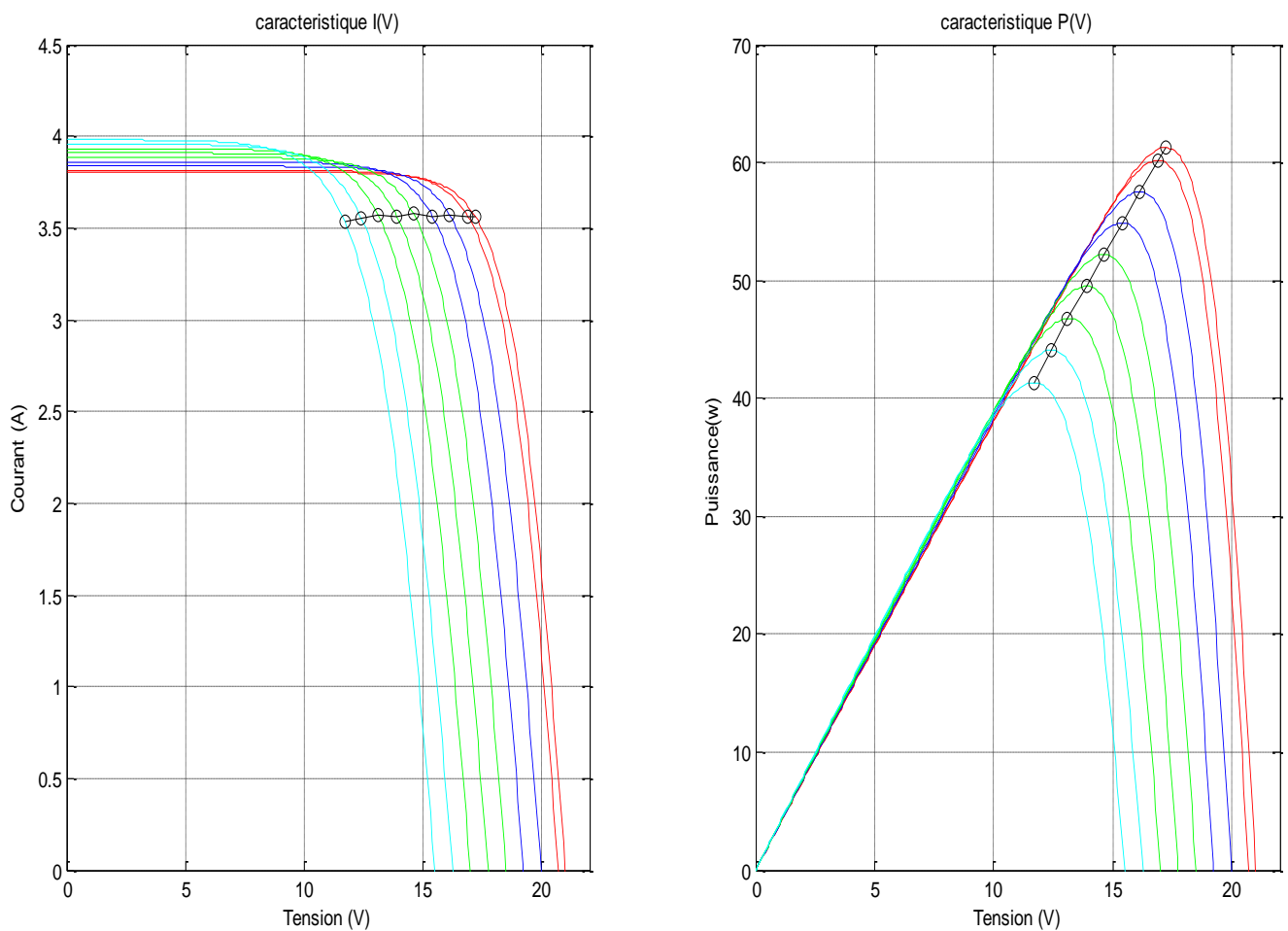
A l'aide de la commande **POLYFIT** du Matlab on peut trouver les fonctions optimales des l'allure des courbes suivis par le point de puissance maximal durant le changement de la température.

Les fonctions estimer de l'allure du point de puissance maximal obtenues sont :

$$P(V) = 3.6V - 0.58 \quad (III-10)$$

$$I(V) = (3.24 \times 10^{-3})V + 3.51 \quad (III-11)$$

Ces deux fonctions sont présentées avec la couleur noire sur la figure suivant (III-16) :

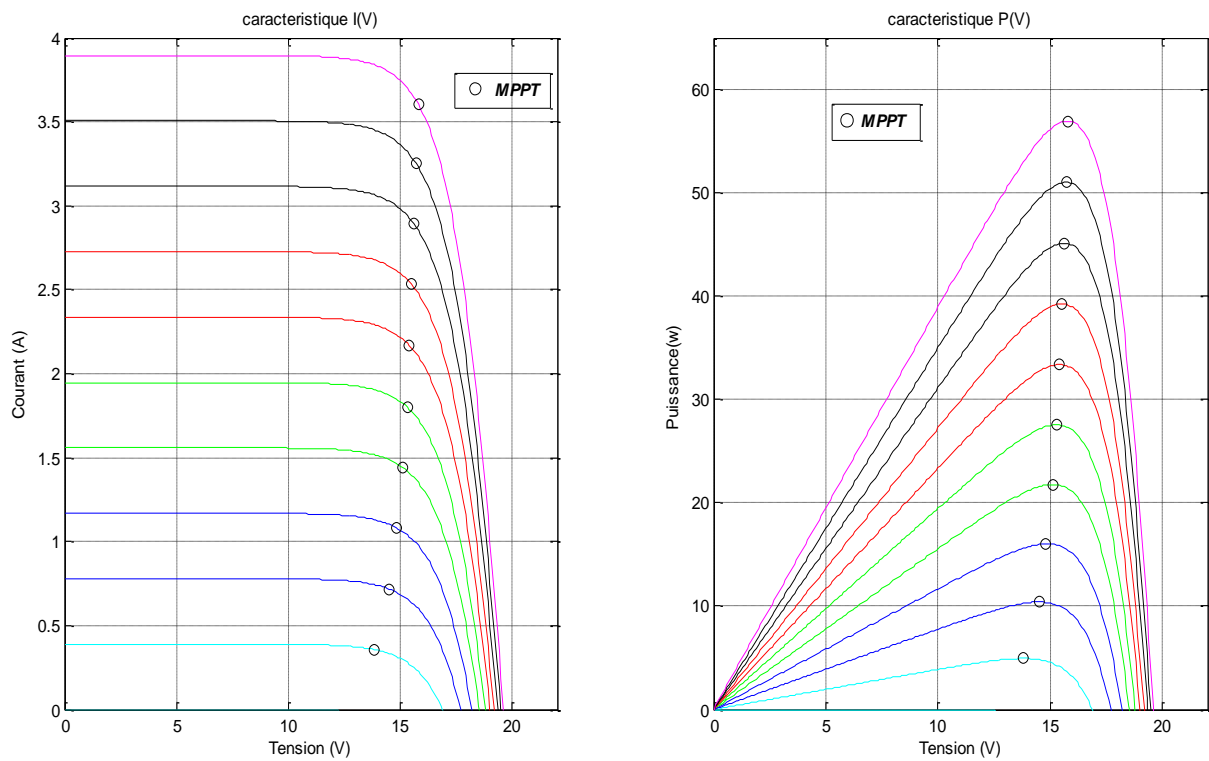


**Figure III-16** Les fonctions idéales de MPPT **I(V)** et **P(V)** sous l'influence de la température.

#### III-4-2 La recherche du MPPT sous l'influence de l'éclairement :

Dans ce cas nous avons maintenu une température constante (**T=25°C**) pour différentes éclairements (**100W/m<sup>2</sup> à 1000W/m<sup>2</sup>**) puis on suivi le point de puissance maximal a chaque fois dans

la caractéristique I(V) et dans la caractéristique P(V) et enfin on trouve la fonction optimal de la courbe suivi par le point de puissance maximal durant le changement de l'éclairement voire figure (III-17).



**Figure III-17** Recherche du point de fonctionnement optimal (MPPT) sous l'influence de l'éclairement.

Même chose, à l'aide de la commande POLYFIT du Matlab on peut trouver les fonctions optimales des l'allure des courbes suivis par le point de puissance maximal durant le changement de l'éclairement.

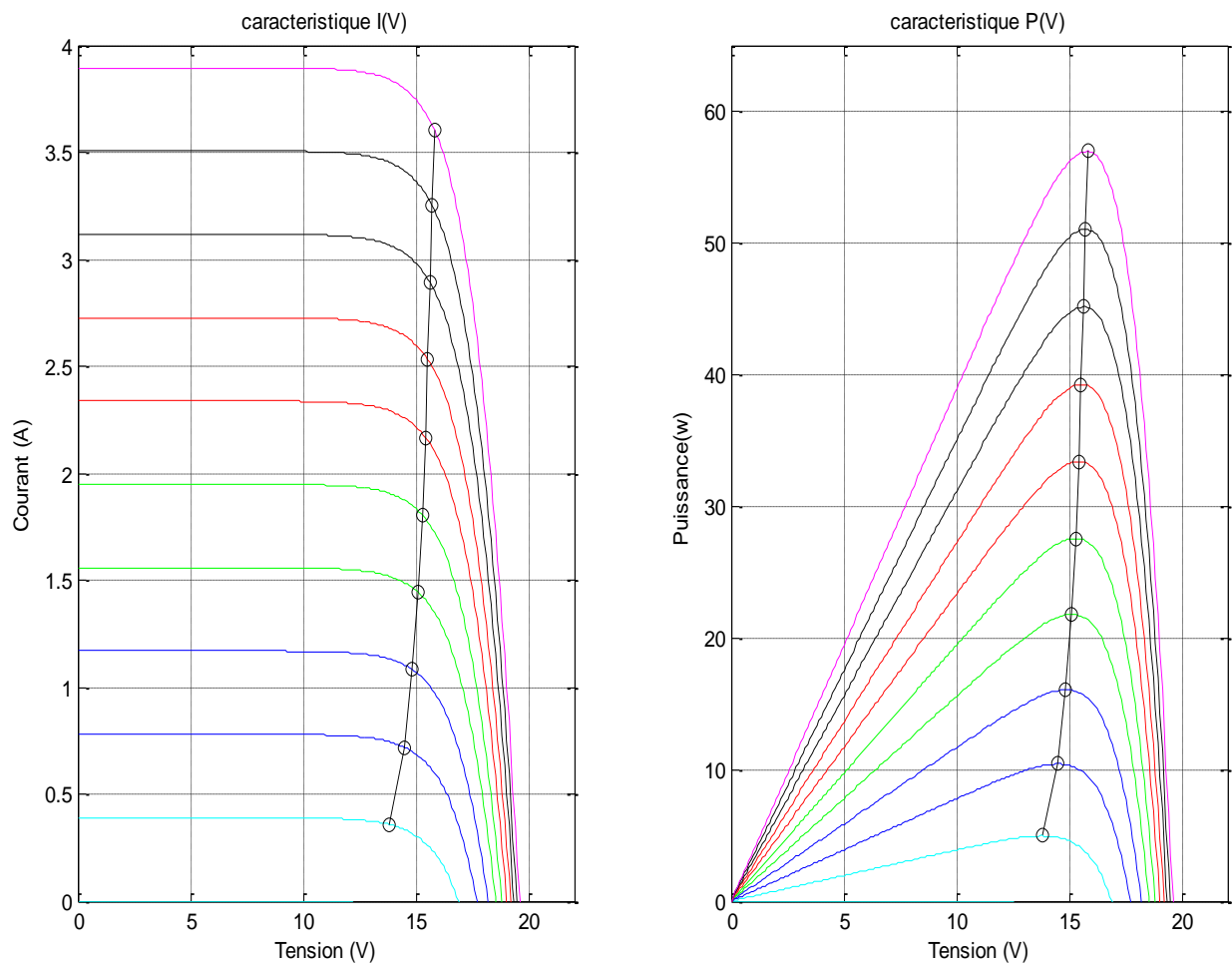
Les fonctions des courbes obtenues sont :

$$P(V) = 26.1V - 364.65 \quad (III-12)$$

$$I(V) = 1.63V - 22.77 \quad (III-13)$$

Ces deux fonctions sont présentées avec la couleur noire sur la figure suivant (III-18) :

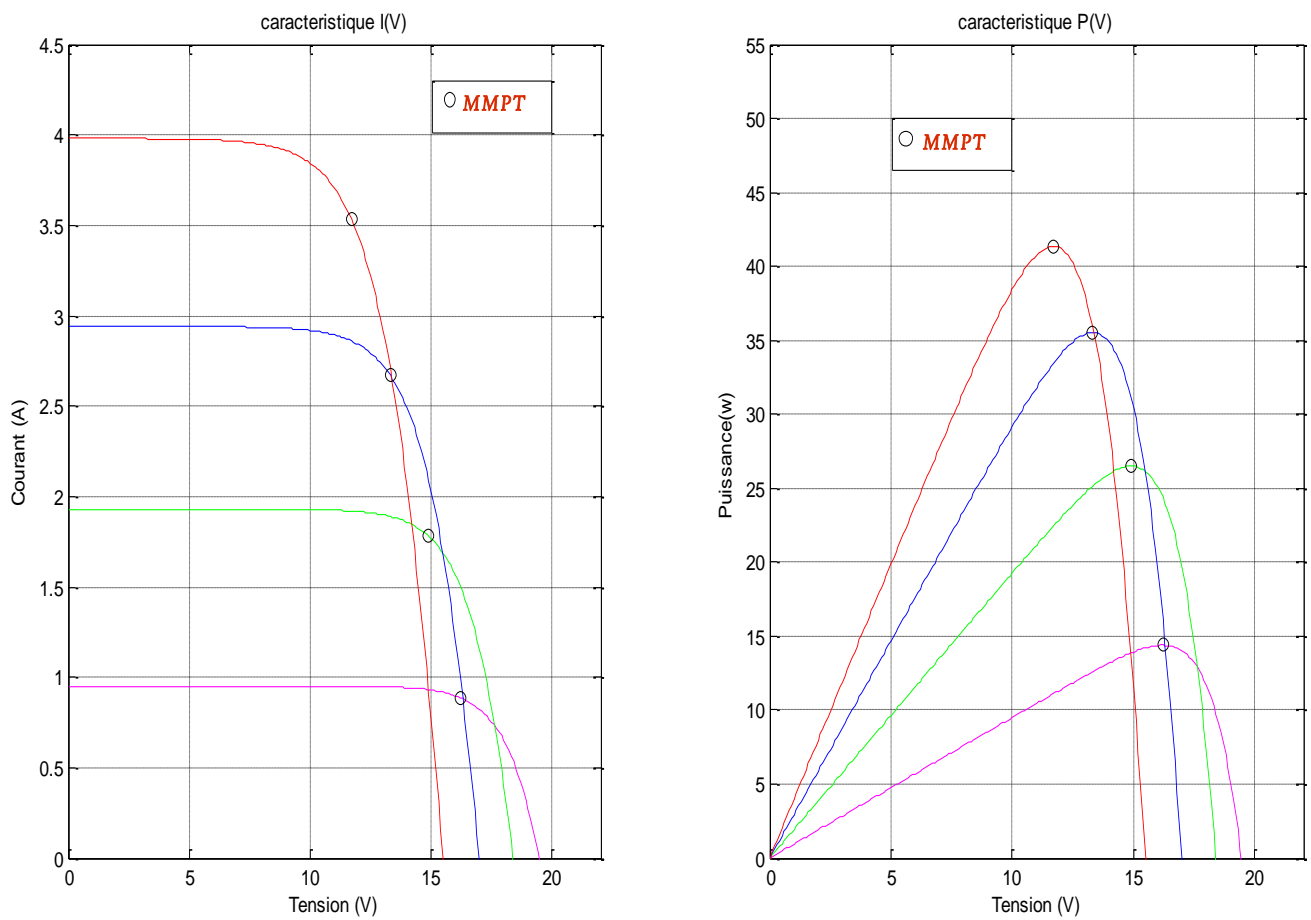




**Figure III-18** Les fonctions idéales de MPPT  $I(V)$  et  $P(V)$  sous l'influence de l'éclairement.

### III-4-3 La recherche du MPPT sous l'influence de la température et l'éclairement :

Dans ce cas nous avons varié la température et l'éclairement en même temps plusieurs fois pour nous a permet de suivi le point de puissance maximal a chaque fois dans la caractéristique  $I(V)$  et dans la caractéristique  $P(V)$  et enfin on trouve la fonction optimal de la courbe suivi par le point de puissance maximal durant le changement de la température et l'éclairement voir figure (III-19) .



**Figure III-19** Recherche du point de fonctionnement optimal (MPPT) sous l'influence de l'éclairement et la température.

Pour trouver les fonctions optimales des l'allure des courbes suivis par le point de puissance maximal durant le changement de la température et l'éclairement. On à utilisés la commande POLYFIT du Matlab.

Les fonctions des courbes obtenues sont :

$$P(V) = 0.9V^2 + 19.31V - 60.93 \quad (III-14)$$

$$I(V) = -0.58V + 10.93 \quad (III-15)$$

Ces deux fonctions sont présentées avec la couleur noire sur la figure suivant (III-20) :

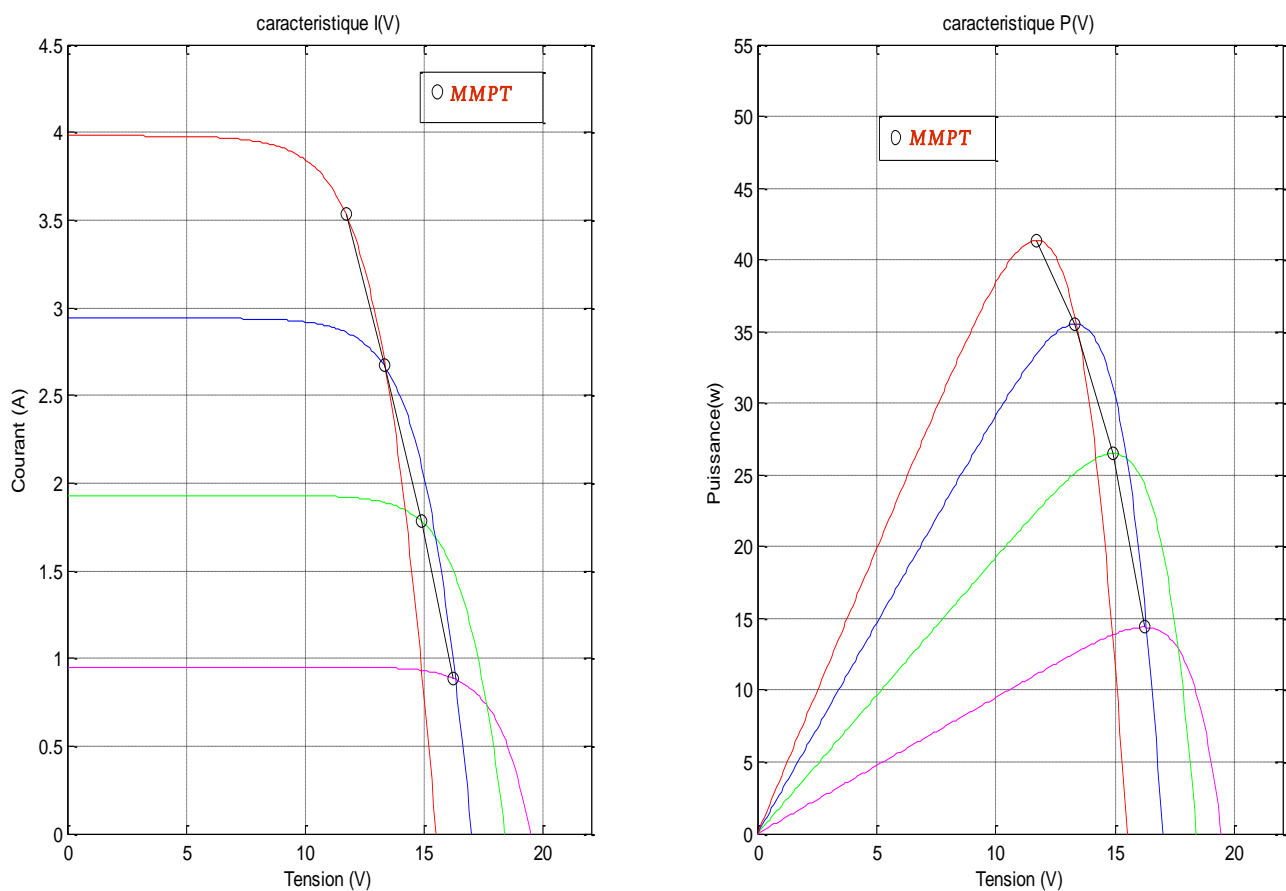


Figure III-20 Les fonctions idéales de MPPT  $I(V)$  et  $P(V)$  sous l'influence de la  $T^\circ$  et l'éclairement.

### III-5 Remarque :

Cette méthode donne des estimations mathématiques sous forme des fonctions optimales pour le changement du point de puissance maximal, mais on ne peut pas utiliser ces fonctions directement comme une commande dans un système photovoltaïque (chaîne élémentaire de

conversion PV) pour optimiser le fonctionnement du panneau. Pour cette raison, deux autres méthodes sont les plus utilisées dans les applications photovoltaïques, qui sont respectivement: la méthode de perturbation et d'observation“ *Perturb&Observe (P&O)*“ et la méthode d'incrémentation de la conductance (*IncCond*).

### **III-6 Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons présentés les différentes simulations sur les caractéristiques électriques du modèle électrique équivalent de la cellule photovoltaïque, ainsi que l'influence de la température et de l'éclairement sur ces caractéristiques. Notre étude ensuite est faire une estimation mathématique sur la fonction de changement du point de puissance maximal (MPPT) en fonction de l'influence de la température et de l'éclairement sur les caractéristiques électriques. Les résultats obtenus par simulation du modèle sont satisfaisantes.

## **CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Le travail présenté dans ce mémoire traite de la modélisation et de l'optimisation d'un générateur photovoltaïque fonctionnant avec un convertisseur pour la recharge d'une batterie. Ce convertisseur présente l'avantage d'être un élévateur et abaisseur de tension ce qui permet à ce système de s'adapter aux changements météorologiques et pour extraire le maximum de puissance disponible.

En début et en fin de journée, lorsque la tension du panneau solaire est inférieure à la tension de la batterie, le convertisseur, permet de récupérer un peu d'énergie supplémentaire pour assurer la recharge de la batterie.

L'étude bibliographique sur les générateurs photovoltaïques nous a permis de bien comprendre le fonctionnement de la cellule photovoltaïque et l'application des modules photovoltaïques dans la production de l'électricité.

La simulation du système a été effectuée en détails et en plusieurs étapes pour bien illustrer le fonctionnement du générateur photovoltaïque et son comportement face à la batterie avec ou sans convertisseur de puissance.

Les résultats de la simulation ont démontré l'intérêt d'un dispositif de recherche de la puissance maximale.

## **LISTE DES ABRÉVIATIONS**

AC	Alternating Current
BIF	Buck converter with Input Filter
BOF	Boost converter with Output Filter
DC	Direct Current or Direct Conversion
EMI	Electromagnetic Interference
GPV	Générateur Photovoltaïque
MPPT	Maximum Power Point Tracking
POPI	Power Output = Power Input
PV	Photovoltaïque
PWM	Pulse Width Modulation (MLI)
PPM	Point de Puissance Maximum
PMAX	Puissance Maximale d'un Générateur Photovoltaïque
P&O	Perturb & Observe
hMPPT	Rendement MPPT
hCONV	Rendement de conversion
hMPPT	Rendement MPPT moyen journalier
hCONV	Rendement de conversion moyen journalier
Vopt et Iopt	Tension et Courants optimaux correspondant à PMAX

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Électricité photovoltaïque <http://www.outilesolaires.com/pv/default.htm>
- [2] Laboratoire de recherche des énergies renouvelable [http : // www.cder.dz /](http://www.cder.dz/).
- [3] Outil solaire, azimute et hauteur angulaire.  
<http://www.outilesolaires.com/glossaire/images/azimut.gif>.
- [4]<http://www.niv.paris.fr/écosystèmes/index-fr.htm>.
- [5]<http://www.lios.at>.
- [6] [Perso.wanadoo.fr/solaire/sm7002.htm](http://Perso.wanadoo.fr/solaire/sm7002.htm).
- [7] BELHADJ MOHAMED, ' modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome' mémoire magistère centre universitaire de BECHAR.
- [8] Électricité photovoltaïque <http://www.outilesolaires.com/pv/default.htm>.
- [9][www.photovoltaique.com](http://www.photovoltaique.com)
- [10] N.ZEMMOUR, B.A.NASRI, «Réalisation d'un régulateur de charge de batterie dans un système photovoltaïque», PFE ingénieur, USTO, 2005.
- [11]<http://www.acsaeolica.com>
- [12] F.Benyarou, «Conversion des énergies», Document de cours (EN01), Université de Tlemcen, 2002.