

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département d'Electronique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : ELECTRONIQUE

Spécialité : Electronique des Systèmes Embarqués (E.S.E)

Par

- Djendi Chaima
- Deffaf Djemaa

Intitulé

Etude de l'effet de la tension directe de la diode by-pass sur la puissance maximale d'un système photovoltaïque en présence d'ombrage partiel.

Évalué le : 14/09/2021

Par la commission d'évaluation composée de :*

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>Mme. Hamadache. Fouzia</i>	<i>Pr</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Mohamed El Hossine DAACHI</i>	<i>MCA</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. Abd El hakim. Latoui</i>	<i>Dr</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2020/2021

Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier Dieu clément et miséricordieux de Nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Nous tenons à remercier tout particulièrement et à témoigner nos reconnaissances à monsieur Dr. DAACHI MOHAMED EL HOSSINE, d'avoir encadré ce mémoire, pour tout le temps qu'il nous a consacré, et surtout pour son expérience enrichissante et pleine d'intérêt qu'elle nous a aidé à bien achever ce travail dans des meilleurs conditions.

Nos remerciements vont également aux membres de jury qui nous ont fait l'honneur de participer au jury. Il serait également le moment opportun de remercier nos enseignants du département d'Electronique pour les efforts consacrés et la formation qui nous ont donnés durant notre cycle d'études.

Pour terminer nous tenons à adresser un remerciement à nos très chères familles et aussi à d'autres très chères personnes qui ont été toujours présents pour nous encourager et nous soutenir.

Chaima djendi / deffaf djemaa

Dédicaces

A mes chers parent, pour tous leurs sacrifices, leurs amour,

*Leurstendresse, leurs soutiens et leurs prières tout au long de mes
études.*

*A mes chères "Romaissa" et "assia " et mes chers frères "Sohaib" et
"Anes", pour leurs*

*Encouragements permanente, et leur soutien moral. À mon amie et
binôme "Deffaf djemaa"*

*Pour leur appui et leur Encouragement. A tout ma famille pour leurs
soutien tout long de mon*

*Parcours universitaire, Que ce travail soit l'accomplissement de vos
vœux tant allégués, et le*

Fuit, de votre

Soutien, infaillible

Merci d'être toujours là pour moi.

Chaima djendi

Dédicaces

Je dédie ce modeste mémoire de Master :

À ma mère et mon père

À mes sœurs, mes frères et ma grand-mère

À toute mes familles: Deffaf

À mon amie et binôme "Djendi chaima"

À tous les enseignants de ma période d'étude

À tous mes amis et collègues

Deffaf djemaa

Table des matières

Introduction générale

Chapitre I : Généralités sur les générateurs photovoltaïques

I.1 Introduction	3
I.2 Effet photovoltaïque	3
I.2.1 Définition.....	3
I.2.2 Principe de la conversion photovoltaïque	3
I.3 Cellule photovoltaïque	4
I.3.1 Historique	4
I.3.2 Définition.....	5
I.3.3 Différents types de cellules photovoltaïque	5
I.3.3.1 Cellules monocristallines.....	6
I.3.3.2 Cellules poly cristallines :.....	6
I.3.3.3 Cellules amorphes :	6
I.4 Modélisation de la cellule photovoltaïque.....	7
I.4.1 Modèle électrique idéal	7
I.4.2 Modèle à une diode	8
I.4.3 Modèle à deux diodes	9
I.4.4 Modèle de fonctionnement inverse d'une cellule photovoltaïque	10
I.4.4.1 Modèle de Bishop	10
I.5 Caractéristiques électriques de la cellule photovoltaïque :.....	11
I.6 Association des cellules PV:.....	12
I.6.1 association série.....	13
I.6.2 association parallèle.....	13
I.7 Générateur PV	14
I.7.1 constitution d'un générateur PV	15
I.7.2 diode by-pass	16
I.7.3 diode anti retour	16

I.8 Effets des conditions environnementales sur les caractéristiques du Générateur PV	17
I.8.1 Effet de l'ombrage	17
I.8.1.1 Ombrage homogène.....	17
I.8.1.2 Ombrage partiel	18
I.8.2 Effet de la température.....	18
I.9 conclusion :.....	19

Chapitre II : Etude des caractéristiques I-V des générateurs PV en présence de défauts

II.1 Introduction.....	20
II.2 Les défauts dans les systèmes PV	20
II.3 Défaut dans le générateur PV	21
II.3.1 Défaut aux niveaux de la cellule PV	22
II.3.2 Défaut aux niveaux des modules PV	23
II.3.3 Autres problèmes du générateur PV	24
II.4 Caractéristiques électriques en fonctionnement défaillant :.....	25
II.4 .1 Défaut d'ombrage.....	25
II.4.2 Détermination de la caractéristique I -V et P-V d'une cellule sous conditions d'ombrage	26
II.4.3 Détermination de la caractéristique I-V d'un module sous conditions d'ombrage	27
II.4.4 Caractéristiques électriques d'un même générateur PV en présence d'ombrage partiel à différents degrés :	29
II.5 Conclusion	29

Chapitre III :Effet de la tension directe de la diode by-pass sur la puissance maximale fournie par un générateur PV

III.1 Introduction :	30
III.2 Résultats expérimentaux :.....	30

III.3 Résultats de simulation relatifs au premier générateur (Ensoleillement varie de 0 à 900 W/m²) :	31
a. Courbe correspondant à 900 W/m ²	31
b. Courbe correspondant à 800 W/m ²	31
c. Courbe correspondant à 700 W/m ²	32
d. Courbe correspondant à 600 W/m ²	32
e. Courbe correspondant à 500 W/m ²	32
f. Courbe correspondant à 400 W/m ²	33
g. Courbe correspondant à 300 W/m ²	33
h. Courbe correspondant à 200 W/m ²	34
i. Courbe correspondant à 100 W/m ²	34
III. 4 Résultats de simulation relatifs au second générateur (Ensoleillement varie de 100 à 900 W/m²) :	35
a. Courbe correspondant à 900 W/m ²	35
b. Courbe correspondant à 800 W/m ²	35
c. Courbe correspondant à 700 W/m ²	36
d. Courbe correspondant à 600 W/m ²	36
e. Courbe correspondant à 500 W/m ²	37
f. Courbe correspondant à 400 W/m ²	37
g. Courbe correspondant à 300 W/m ²	38
h. Courbe correspondant à 200 W/m ²	38
i. Courbe correspondant à 100 W/m ²	39
III.5.Représentation des puissances maximales en fonction des différentes valeurs de la tension directe de la diode bay-pass.	39
III.6 Conclusion	43
Conclusion générale	44
BIBLIOGRAPHIE	45

Liste des figures

Figure I.1 Diagramme de bandes d'énergie au voisinage de la jonction

Figure I.2 : Cellule élémentaire photovoltaïque

Figure I.3 : Cellule en silicium Monocristallin

Figure I.4 : Cellule en silicium Poly-cristallin

Figure I.5 : Cellule en silicium amorphe.

Figure I.6 : Circuit équivalent simple de la cellule PV.

Figure I.7: Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode.

Figure I.8: Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diode.

Figure I.9: Modèle de Bishop.

Figure I.10: Caractéristique d'une cellule photovoltaïque

Figure I.11:Caractéristiques résultantes d'un groupement de n_s cellules en série.

Figure I.12: Caractéristiques résultant d'un groupement de n_p cellules en parallèle.

Figure I.13: Composants d'un GPV.

Figure I.14: Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour.

Figure I.15: Etat de fonctionnement de diode by-pass.

Figure I.16 : Protection avec une diode anti-retour.

Figure I.17: Caractéristique I-V d'un panneau sous différents éclairements

Figure I.18: Caractéristique P-V d'un panneau sous différents éclairements

Figure I.19.a : Influence de la température sur la caractéristique I-V

Figure I.19.b: Influence de la température sur la caractéristique P-V

Figure II.1: Taux de dégradation d'un module PV par an

Figure II.2: Schéma de cellules en série sans diode by-pass et avec diode by-pass

II.3 : GPV dans des conditions partiellement ombragés causés par le passage de nuages

Figure II.4 : Caractéristique P-V d'un système PV à l'ombrage partiel.

Figure II.5: Caractéristiques I-V d'un module PV en fonctionnement normal et en fonctionnement sous ombrage.

Figure II.6 : Caractéristique I-V d'un générateur PV en fonctionnement défaillant avec une cellule ombrée de 25% à 75%.

Figure III.1: schéma utilisé pour la simulation dans l'environnement Matlab

Figure III.2: La courbe caractéristique P-V de la configuration avec 4 modules ombrés.

L'éclairement des modules ombragés était de 900 W/m².

Figure III.3: La courbe caractéristique P-V de la configuration avec 4 modules ombrés.

L'éclairement des modules ombragés était de 800 W/m².

Figure III.4: La courbe caractéristique P-V de la configuration avec 4 modules ombrés.

L'éclairement des modules ombragés était de 700 W/m².

Figure III.5: La courbe caractéristique P-V de la configuration avec 4 modules ombrés.

L'éclairement des modules ombragés était de 600 W/m².

Figure III.6: La courbe caractéristique P-V de la configuration avec 4 modules ombrés.

L'éclairement des modules ombragés était de 500 W/m².

Figure III.7: La courbe caractéristique P-V de la configuration avec 4 modules ombrés.

L'éclairement des modules ombragés était de 400 W/m².

Figure III.8: La courbe caractéristique P-V de la configuration avec 4 modules ombrés.

L'éclairement des modules ombragés était de 300 W/m².

Figure III.9: La courbe caractéristique P-V de la configuration avec 4 modules ombrés.

L'éclairement des modules ombragés était de 200 W/m².

Figure III.10: La courbe caractéristique P-V de la configuration avec 4 modules ombrés.

L'éclairement des modules ombragés était de 100 W/m².

Figure III.11: La courbe caractéristique P-V de la configuration avec 16 modules ombrés.

L'éclairement des modules ombragés était de 900 W/m².

Figure III.12: La courbe caractéristique P-V de la configuration avec 16 modules ombrés.

L'éclairement des modules ombragés était de 800 W/m².

Figure III.13: La courbe caractéristique P-V de la configuration avec 16 modules ombrés.

L'éclairement des modules ombragés était de 700 W/m².

Figure III.14: La courbe caractéristique P-V de la configuration avec 16 modules ombrés.

L'éclairement des modules ombragés était de 600 W/m².

Figure III.15: La courbe caractéristique P-V de la configuration avec 16 modules ombrés.

L'éclairement des modules ombragés était de 500 W/m².

Figure III.16: La courbe caractéristique P-V de la configuration avec 16 modules ombrés.

L'éclairement des modules ombragés était de 400 W/m².

Figure III.17: La courbe caractéristique P-V de la configuration avec 16 modules ombrés.

L'éclairement des modules ombragés était de 300 W/m².

Figure III.18: La courbe caractéristique P-V de la configuration avec 16 modules ombrés.

L'éclairement des modules ombragés était de 200 W/m².

Figure III.19: La courbe caractéristique P-V de la configuration avec 16 modules ombrés.

L'éclairement des modules ombragés était de 100 W/m².

Figure III.20: La configuration avec 16 modules ombragés. L'éclairement des modules ombragés était compris entre 0 et 100W/m².

Figure III.21: La configuration avec 16 modules ombragés. L'éclairement des modules ombragés était compris entre 200 et 900W/m².

Figure III.22 : La configuration avec 4 modules ombragés. L'éclairement des modules ombragés était compris entre 0 et 300 W/m².

Figure III.23 : La configuration avec 4 modules ombragés. L'éclairement des modules ombragés était compris entre 400 et 900 W/m².

Liste des tableaux

Tableau II .1 : Classification des défauts et les anomalies d'un GPV

Tableau III.1:Comparaison de la puissance maximale lorsque un éclairement de 0-100 W/m²

Tableau III.2:Comparaison de la puissance maximale lorsque un éclairement de 200-900 W/m²

Tableau III.3:Comparaison de la puissance maximale lorsque un éclairement de 0-300 W/m²

Tableau III.4:Comparaison de la puissance maximale lorsque un éclairement de 400-900 W/m²

Introduction générale

Le développement technologique que vit le monde fait que le besoin en énergie ne cesse d'augmenter jour après jour. La grande partie d'électricité est produite des sources d'énergie fossile. L'exploitation massive de cette dernière ne provoque pas seulement de la pollution mais conduit également à l'épuisement du stock mondial, et par conséquent priver les générations à venir de ce type d'énergie. Pour pallier ce problème, le choix de la solution est orienté aux énergies renouvelables. Dans ce contexte, les états ont engagé des investissements colossaux et semblent sans aucun doute sur la bonne voie pour réussir le challenge d'allier production et consommation d'énergie d'une part et le maintien de l'équilibre environnemental de la planète de l'autre part. L'énergie photovoltaïque est considérée comme l'alternative la plus prometteuse du fait qu'elle n'est pas polluante et dont la source est inépuisable.

Par ailleurs, Les performances d'un système PV se mesurent par la puissance maximale que peut fournir ce système. Cette puissance n'est pas toujours constante mais plutôt variable et dépend de plusieurs paramètres. Cependant, l'apparition de défauts dans un système PV entraîne la diminution de la puissance. L'ombrage, que ce soit partiel ou total, est l'un des défauts fréquents pouvant diminuer les performances d'un système PV en termes de puissance fournie. La présence d'un ombrage partiel par exemple fait intervenir les diodes by-pass ayant pour rôle la protection des modules PV soumis à l'ombrage. Alors, en plus de la perte de puissance occasionnée par le court-circuit des modules sujets à l'ombrage (intervention des diodes by-pass), la tension directe des diodes by-pass intervenues pourra contribuer davantage à la diminution de la puissance maximale fournie, dans des conditions particulières. [1]

Dans ce mémoire, nous allons étudier l'effet de la tension directe des diodes by-pass sur la puissance maximale d'un système PV. Pour ce faire, nous allons réaliser des simulations dans l'environnement Matlab tout en considérant quelques scénarios relatifs à l'ombrage partiel et aux générateurs PV. Il est à noter que le présent travail est inspiré d'un travail récent publié dans une revue internationale.

Pour la rédaction de notre mémoire, nous avons choisi de l'organiser comme suit :

Dans le premier chapitre, nous présentons les générateurs PV tout en allant de l'élément de base qui consiste en la cellule PV. Dans le deuxième chapitre, nous étudions les caractéristiques des générateurs PV dans les deux cas de figures : fonctionnement sain et défaillant (se baser beaucoup plus sur le défaut d'ombrage).

Le troisième chapitre, quant à lui, est réservé à notre étude concernant l'effet de la tension directe des diodes by-pass sur la puissance maximale fournie par le système PV en présence de l'ombrage partiel. Notre étude sera validée par simulation dans l'environnement Matlab. Nous terminons notre manuscrit par une conclusion générale et quelques perspectives à ce présent travail.

*Chapitre I : Généralité sur les générateurs
photovoltaïque*

I.1 Introduction

L'énergie électrique issue de la conversion photovoltaïque à partir de l'énergie solaire s'avère une alternative inévitable à d'autres sources d'énergie polluantes et qui s'épuisent avec le temps.

Dans ce chapitre, nous présentons des Généralités sur les générateurs photovoltaïques partant de la cellule PV en tant qu'élément de base. Nous allons décrire également la modélisation de la cellule photovoltaïque et son principe de fonctionnement avec les caractéristiques électriques qui leur sont relatives. Nous présentons aussi les caractéristiques électriques pour les différentes conditions environnementales.

I.2 Effet photovoltaïque

I.2.1 Définition

L'effet photovoltaïque est un processus de transformation de l'énergie émise par le soleil, sous forme de photons, en énergie électrique à l'aide de composant semi-conducteur appelé cellule solaire. L'effet photovoltaïque ne peut se produire que s'il existe une barrière de potentiel dans le semi-conducteur avant qu'il ne soit éclairé. Une telle barrière existe, par exemple, à l'interface entre deux volumes dopés différemment c'est à dire où l'on a introduit deux types différents d'impuretés à concentration différente, par exemple de type P-N. Si ce matériau est éclairé, les charges électriques, rendus mobiles par la lumière (l'effet photoélectrique), seront séparées par la barrière avec d'un côté les charges positives et de l'autre côté les charges négatives

Parmi les matériaux semi-conducteurs les plus utilisés on trouve le silicium, le germanium, le sulfure de Gallium et l'arséniure de Gallium. [2]

I.2.2 Principe de la conversion photovoltaïque

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,

généralisant 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 entraîné 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. [3]

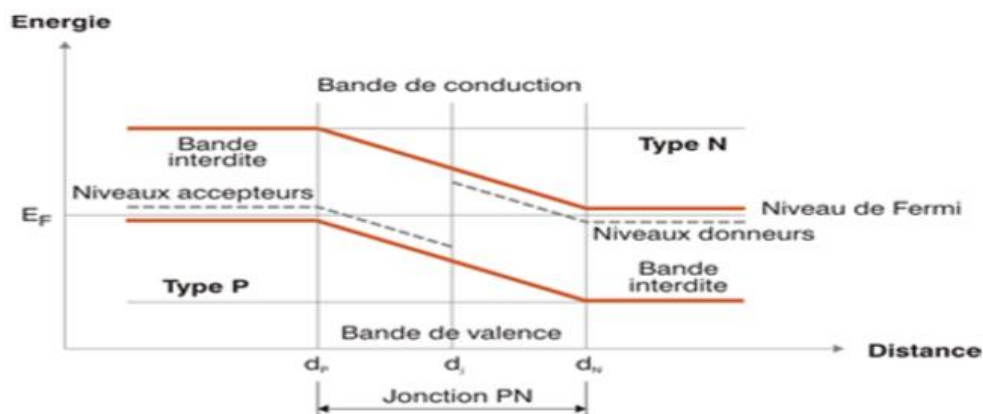


Figure I.1 Diagramme de bandes d'énergie au voisinage de la jonction

I.3 Cellule photovoltaïque

I.3.1 Historique

Le physicien français Edmond Becquerel décrivit le premier l'effet photovoltaïque en 1839 et Einstein en expliqua les mécanismes en 1912, mais cela resta une curiosité scientifique de laboratoire jusque dans les années 50. Becquerel découvrit que certains matériaux délivrent une petite quantité d'électricité quand on les expose à la lumière. L'effet fut étudié dans les solides tels que le sélénium par Heinrich Hertz dès les années 1870. Avec des rendements de l'ordre de 1%, le sélénium fut rapidement adopté par les photographes comme luxmètre [4].

De rapides progrès furent obtenus dès les années 1950 par les équipes de Bell Laboratoires qui fabriquèrent la première cellule au silicium cristallin de rendement 4% à partir du procédé de tirage Czochralski. L'industrie des semi-conducteurs contribua largement

au développement des cellules solaires. La taille des cellules PV accompagna la progression de la dimension des wafers de l'industrie des circuits intégrés, de 5,08 cm dans le début des années 70, à 7,62 cm à la fin des années 70, et à 10,16 cm au début des années 80, avant de s'émanciper par la découverte de la croissance de lingots multi cristallins parallélépipédiques qui donnèrent des plaquettes carrées de 10 cm de côté et qui atteignent aujourd'hui couramment 12.5 à 15 cm de côté [4].

I.3.2 Définition

Une cellule photovoltaïque est un capteur constitué d'un matériau semi-conducteur qui transforme l'énergie lumineuse absorbée en courant électrique. Le principe de fonctionnement est basé sur les propriétés d'absorption du rayonnement lumineux par des matériaux semi-conducteurs. Le choix des matériaux utilisés pour la construction des cellules PV se fait en fonction des propriétés physiques des électrons qui sont susceptibles d'être libérés de leurs atomes lorsqu'ils sont excités par des photons provenant du spectre solaire. Une fois libérée, le déplacement de ces électrons dans le matériau forme un courant électrique de type continu, qui donne naissance à une force électromotrice aux bornes de la cellule. Ce phénomène physique est appelé effet photovoltaïque. La figure (I.2) illustre la constitution d'une cellule photovoltaïque en silicium [5] .

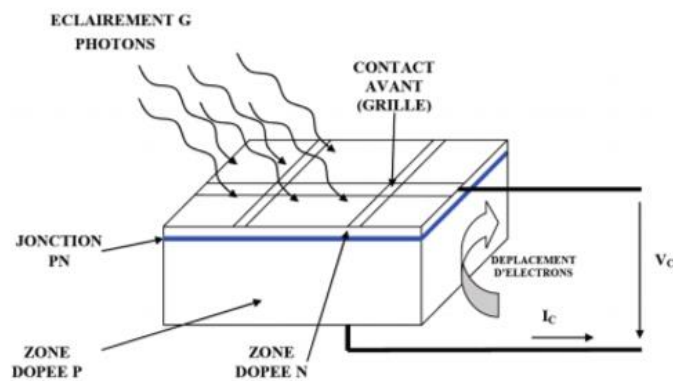


Figure I.2 : Cellule élémentaire photovoltaïque

I.3.3 Différents types de cellules photovoltaïque

Il existe trois principaux types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quel que soit le type, le rendement reste assez faible.

I.3.3.1 Cellules monocristallines

Elles ont le meilleur rendement (de 12 à 18% voir jusqu'à 24.7% en laboratoire). Cependant, elles coûtent trop chers due à leur fabrication complexe.



Figure I.3 : Cellule en silicium Monocristallin

I.3.3.2 Cellules poly cristallines :

Leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important. Cependant leur rendement est plus faible : de 11% à 15% jusqu'à 19.8% en laboratoire).

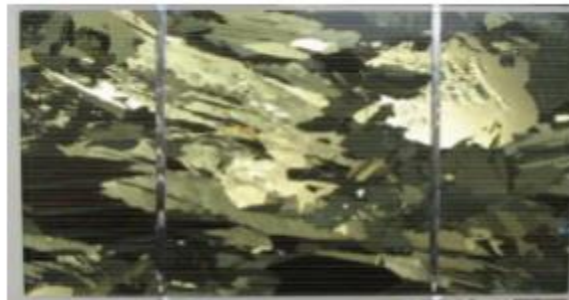


Figure I.4 : Cellule en silicium Poly-cristallin

I.3.3.3 Cellules amorphes :

Elles ont un faible rendement (5% à 8%,13% en laboratoire), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres. [6]



Figure I.5 : Cellule en silicium amorphe.

I.4 Modélisation de la cellule photovoltaïque

Il existe plusieurs modèles électriques caractérisant le fonctionnement de la cellule photovoltaïque, et ils ont comme facteur commun la considération de la cellule PV comme générateur du courant idéal. Généralement on a trois modèles différents selon la modélisation électrique des comportements physiques de la cellule.

I.4.1 Modèle électrique idéal

Le module photovoltaïque peut être représenté par le circuit électrique équivalent donné par la figure (I-6) composé d'un générateur de courant qui produit un courant proportionnel à la puissance lumineuse incidente, et d'une diode parallèle qui correspond à l'aire de transition P-N du module PV

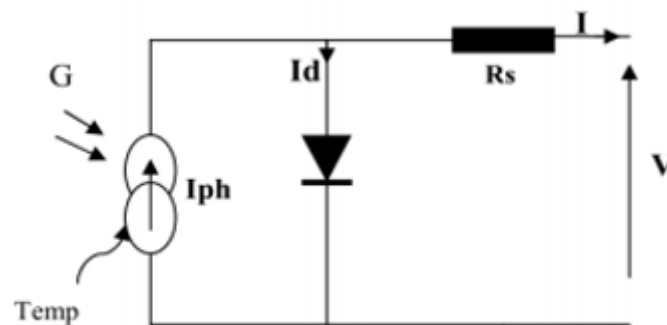


Figure I.6 : Circuit équivalent simple de la cellule PV.

Le courant fourni par la cellule est donné par la relation :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (I-1)$$

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{V + R_s \cdot I}{V_t}\right) - 1 \right] \quad (I-2)$$

Avec :

I : Courant fourni par la cellule [A].

V : Tension à la borne de la cellule [V].

I_{ph} : Le photo-courant, proportionnel à l'irradiance, avec correction selon T.

I_0 : Le courant de saturation de diode.

R_s : Résistance série [ohm].

R_{sh} : Résistance shunt (ou parallèle) [ohm].

$V_t = (AKbTc/q)$: Tension thermique de la diode.

Elle dépend de température de la cellule T_c A est le facteur d'idéalité de diode, Kb la constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$) et q la charge de l'électron ($1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$).

I.4.2 Modèle à une diode

Ce modèle contient une source de courant I_{ph} qui représente l'ensoleillement reçu par la cellule et une diode pour modéliser la jonction PN de la cellule. La résistance série R_s et la résistance shunt R_{sh} représente l'état non idéal de la cellule. La résistance série représente la résistivité du matériau dans lequel est fabriquée la cellule, la résistance de contact entre métal et semi-conducteur et la résistance d'interconnexion entre cellules. La résistance parallèle représente tous les chemins traversés par le courant de fuite.

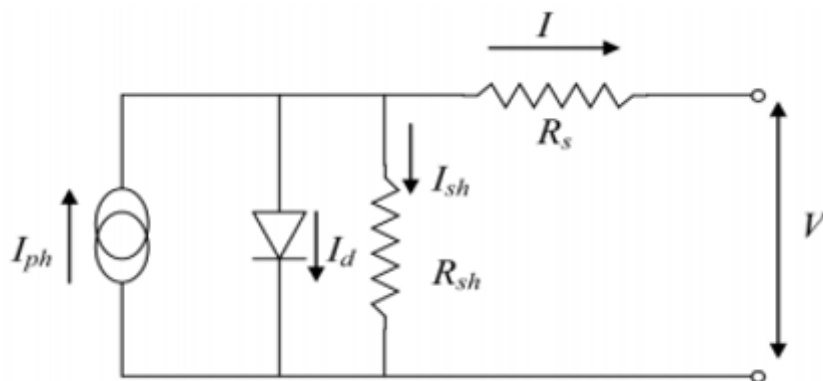


Figure I.7: Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode.

Le courant fourni par la cellule est donné par la relation :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (I-3)$$

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{V+R_s I}{V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (I-4)$$

I.4.3 Modèle à deux diodes

La figure (I.8) représente le circuit équivalent d'une cellule solaire, réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes de courants de saturation I_{01} et I_{02} et de facteurs de diode n_1 et n_2 , une source de courant produisant le courant de court-circuit de la cellule qui dépend de l'éclairement solaire. La résistance série R_s tient compte de la résistivité du matériau et du contact semi-conducteur-métal. La résistance parallèle R_{sh} traduit la présence d'un courant de fuite dans la jonction.

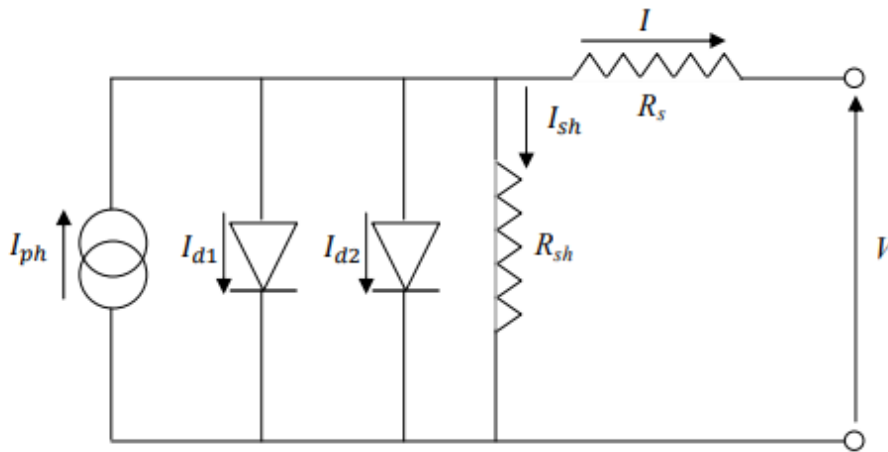


Figure I.18: Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diode.

Le courant fourni par la cellule est donné par la relation :

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \quad (I-5)$$

$$I = I_{ph} - I_{01} \cdot \left[\exp\left(\frac{q(V+R_s I)}{n_1 K_b T}\right) - 1 \right] - I_{02} \cdot \left[\exp\left(\frac{q(V+R_s I)}{n_2 K_b T}\right) - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (I-6)$$

Avec :

I_{01} (A) correspondant au courant de saturation de la diode 1

I_{02} (A) correspondant au courant de saturation de la diode 2

K_b (1.381×10^{-23} J/K), la constante de Boltzmann

T (K) : la température effective de la cellule

q : (1.602×10^{-19} C), la charge de l'électron

n_1 : le facteur de non idéalité de la jonction de la diode1

n_2 : le facteur de non idéalité de la jonction de la diode2

I (A) : le courant fourni par la cellule

V (V) : la tension aux bornes de la cellule

R_{sh} (Ω) : la résistance de shunt caractérisant les courants de fuites de la jonction

R_s (Ω) : la résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions.

I.4.4 Modèle de fonctionnement inverse d'une cellule photovoltaïque

Comme vu précédemment, il existe plusieurs modèles : le plus simple est le modèle à une diode, il représente relativement bien une cellule en fonctionnement normal. Néanmoins, il ne prend pas en compte l'effet d'avalanche de la cellule. ce qui le rend inefficace dans L'étude d'un champ PV en fonctionnement défaillant, au cours duquel la cellule peut subir plusieurs régimes de fonctionnement, ce qui nécessite un modèle qui peut présenter la majorité des cas possibles dans l'état défaillant de la cellule.

I.4.4.1 Modèle de Bishop

Parmi les modèles de cellules photovoltaïques proposés dans la littérature, le modèle de Bishop est généralement retenu comme le modèle le plus adapté pour modéliser une cellule PV tant en fonctionnement normal qu'en fonctionnement dans le régime inverse. Ce modèle peut être exprimé par l'équation suivante, dans laquelle I et V sont respectivement le courant et la tension d'une cellule PV [7].

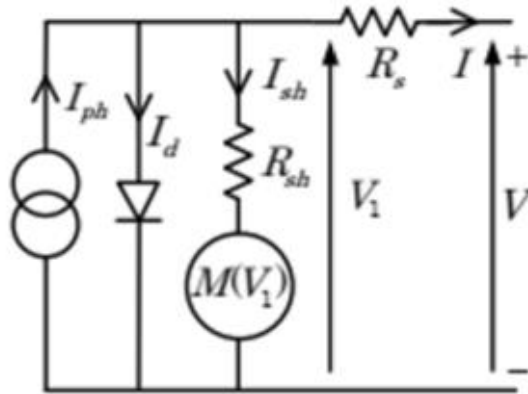


Figure I.9: Modèle de Bishop.

Le courant fourni par la cellule est donné par la relation :

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{V + R_s I}{V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \left[1 + K \left(1 - \frac{V + R_s I}{V_{br}} \right) \right] \quad (I.7)$$

C'est une équation à 2 inconnues (I et V) et 8 paramètres. Ces paramètres sont :

I_{ph} : Photo courant : courant équivalent proportionnel à l'ensoleillement reçu par la cellule

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode

$V_t = (akbTc/q)$: Tension thermique de la diode. Elle dépend de température de la cellule T_c tandis que akb et q sont respectivement le facteur d'idéalité de diode (1 à 2), la constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$) et la charge de l'électron ($1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$).

R_s : Résistance série de la cellule

R_{sh} : Résistance shunt de la cellule

n : Coefficient de réglage de Bishop (3.4 à 4)

K : Coefficient de réglage de Bishop (~ 0.1)

V_{br} : Tension de claquage de la cellule (-10 V à -30 V)

I.5 Caractéristiques électriques de la cellule photovoltaïque :

Chaque cellule ou module photovoltaïque a ses propres caractéristiques de fonctionnement et est représentée par les courbes caractéristiques non linéaires $I(V)$ et $P(V)$. Elles présentent plusieurs paramètres importants.

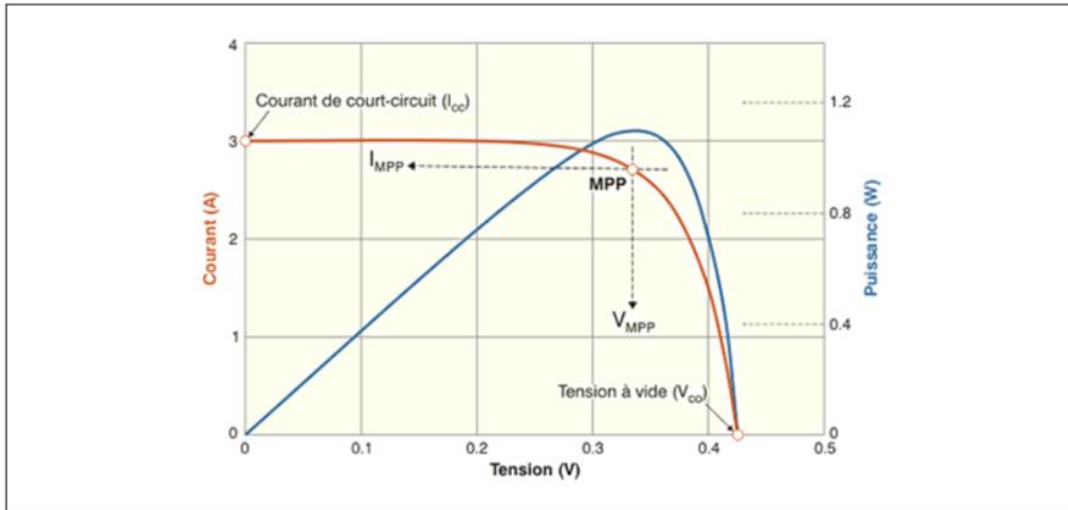


Figure I.10: Caractéristique d'une cellule photovoltaïque

- ✓ **Le courant de court-circuit I_{cc}** : Il correspond au courant maximal généré par la cellule. Il est produit dans des conditions de court-circuit ($V_c=0$). I_{cc} est directement proportionnel à l'éclairement à la température ambiante. Il varie également en fonction de la surface de la cellule. On obtient sa valeur en branchant un ampèremètre aux bornes de la cellule.
- ✓ **La tension à vide V_{oc}** : Elle correspond à la tension maximale générée par la cellule. Elle est produite dans des conditions de circuit-ouvert ($I_c=0$). La tension en circuit-ouvert d'une cellule photovoltaïque varie de manière logarithmique avec l'éclairement et baisse avec l'augmentation de la température. On obtient sa valeur en branchant directement un voltmètre aux bornes de la cellule.
- ✓ **Point de puissance maximale (PPM)** : La partie intéressante de la caractéristique $I(V)$, pour l'utilisateur, c'est celle qui génère de l'énergie. Donc ce ne sera ni au point de tension de circuit ouvert (ou la tension à vide), ni au point de court-circuit, qui ne génèrent aucune énergie puisque la puissance est le produit du courant par la tension. $P = V I$. Le point de puissance maximale est le point de fonctionnement M (V_{PPM} , I_{PPM}) pour lequel la puissance dissipée dans la charge résistive est maximale [8]

I.6 Association des cellules PV :

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) [9].

I.6.1 association série

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série (appelée "String"), le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série [9].

- $V_{CO_{ns}} = n_s \cdot V_{CO}$ (I-8)
- $I_{CC_{ns}} = I_{CC}$ (I-9)

n_s : nombre des cellules en série, et V_{CO} : tension d'une cellule.

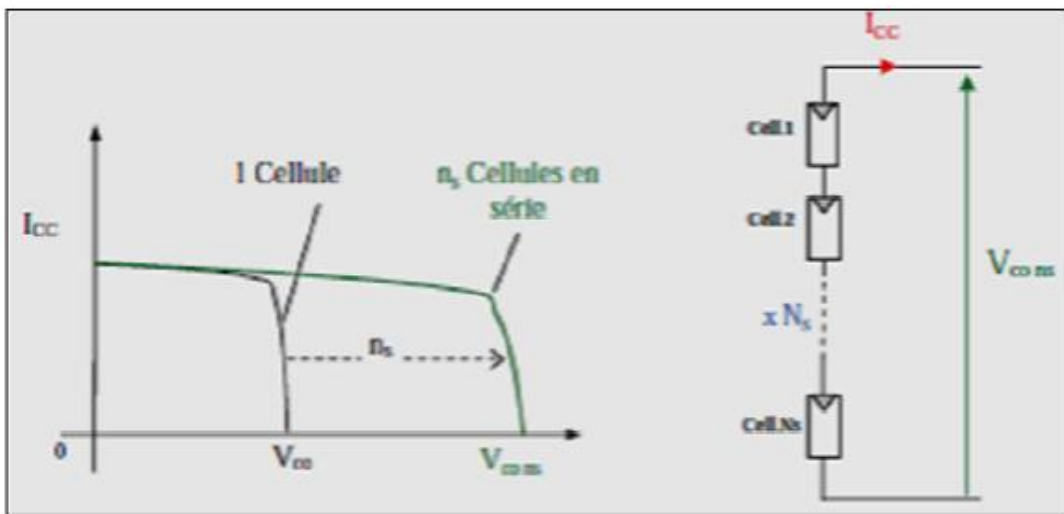


Figure I.11: Caractéristiques résultantes d'un groupement de ns cellules en série.

I.6.2 association parallèle

En additionnant des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche [9].

- $V_{CO_{np}} = V_{CO}$ (I-10)
- $I_{CC_{np}} = n_p \cdot I_{CC}$ (I-11)

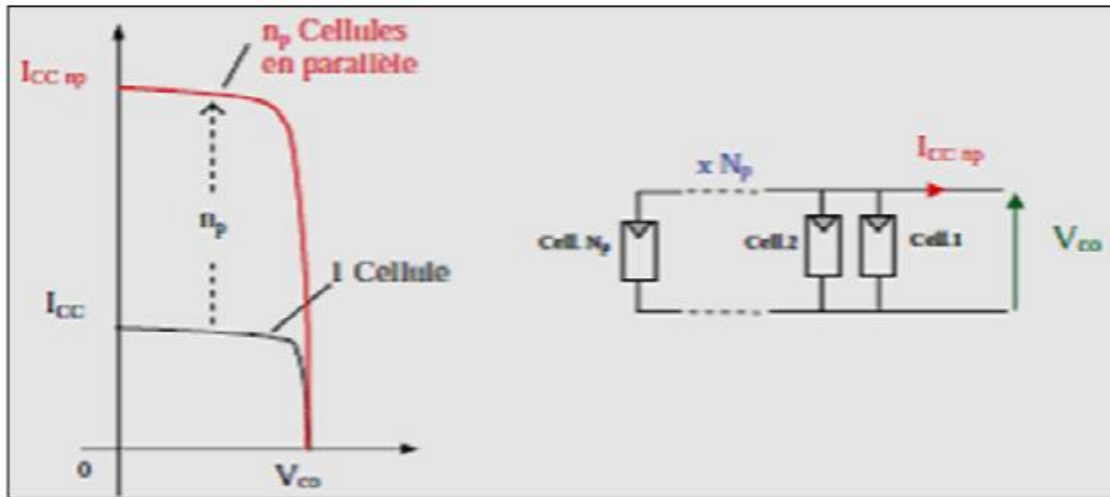


Figure I.12: Caractéristiques résultant d'un groupement de n_p cellules en parallèle.

I.7 Générateur PV

Les cellules solaires sont généralement associées en série et en parallèle, puis En capsulées sous verre pour obtenir un module photovoltaïque. Un générateur PV est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel (figure I.13). Les modules PV sont habituellement branchés en série-parallèle pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur. Les modules interconnectés sont montés sur des supports métalliques et inclinés suivant l'angle désiré en fonction du lieu, cet ensemble est souvent désigné par champ de modules. [10]

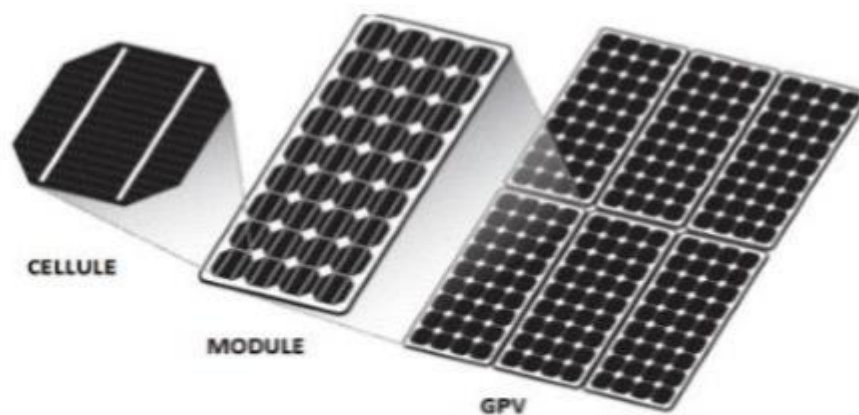


Figure I.13: Composants d'un GPV.

I.7.1 constitution d'un générateur PV

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un GPV. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera.

La plupart des panneaux PV commerciaux sont constitués par des sous-réseaux de cellules connectés en série. Chacun de ces sous-réseaux est lui-même constitué d'un groupe de cellules PV connectés en série. Le nombre de cellules par sous-réseaux est le fruit d'un compromis économique entre protection et pertes d'une partie importante du GPV en cas de défaut partiel.

Nous pouvons remarquer que comme pour une cellule, la caractéristique électrique $I(V)$ d'un GPV est non linéaire et présente un point de puissance maximale (PPM). Ce point a également un courant et une tension associés appelés I_{opt} et V_{opt} respectivement. Le point de fonctionnement d'un GPV est fonction de l'impédance de la charge qu'il alimente. Cette charge pourrait être une charge résistive ou un bus de tension continue (par exemple, connecté sur une batterie). Dans le cas d'une batterie, c'est elle qui impose le point de fonctionnement du GPV lors d'une connexion directe.

La figure I.14 montre la schématique classiquement adoptée pour un GPV élémentaire. Pour tous les essais que nous avons menés dans cette thèse, nous avons eu à notre disposition des modules PV référencés BP585 constitués de deux fois 18 cellules PV. Leur environnement de fonctionnement traditionnel comprend la connexion de deux diodes by-pass et d'une diode anti-retour. Les connexions physiques permettent de travailler avec ou sans les diodes en fonction des conditions souhaitées [11].

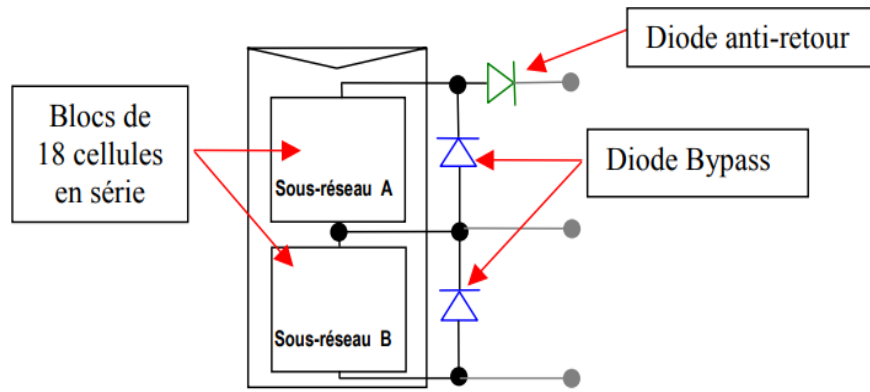


Figure I.14: Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour.

I.7.2 diode by-pass

La diode de bay-pass est connectée en antiparallèle avec un groupe de cellules pour protéger les cellules les plus faibles contre la polarisation inverse, cette diode sera conductrice dans le cas de l'ombrage d'une ou plusieurs cellules dans une branche et bloquée dans le cas normal, et permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass) et éviter les points chauds [12].

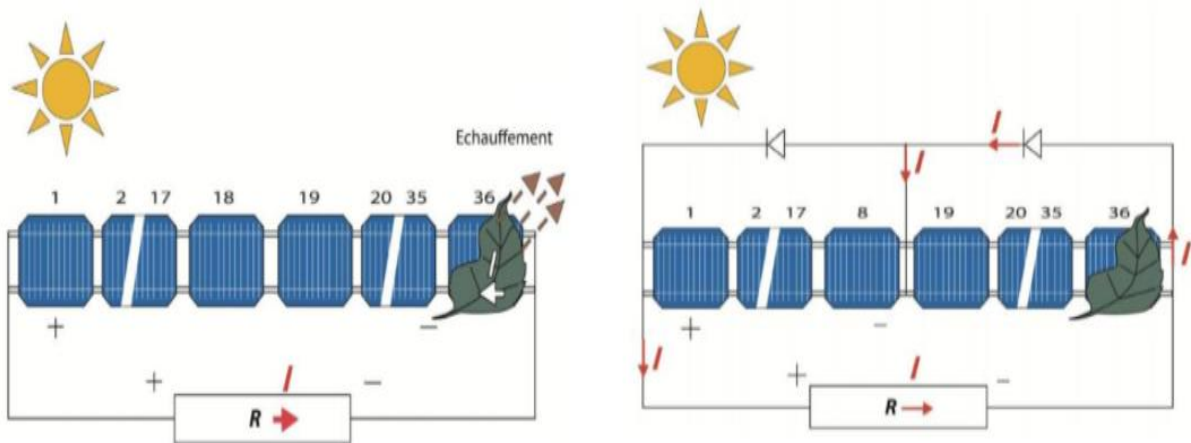


Figure I.15: Etat de fonctionnement de diode by-pass.

I.7.3 diode anti retour

La tension produite par chaque string peut être différente. Lors de la mise en parallèle de ces strings pour former un champ, le string avec la tension la plus faible peut absorber un courant inverse provenant des autres strings. Cela conduit donc à une baisse de production et les modules du string traversés par le courant inverse pourraient être également susceptibles

de la défaillance. Pour éviter ces courants inverses, une diode anti-retour est placée au bout de chaque string [12].

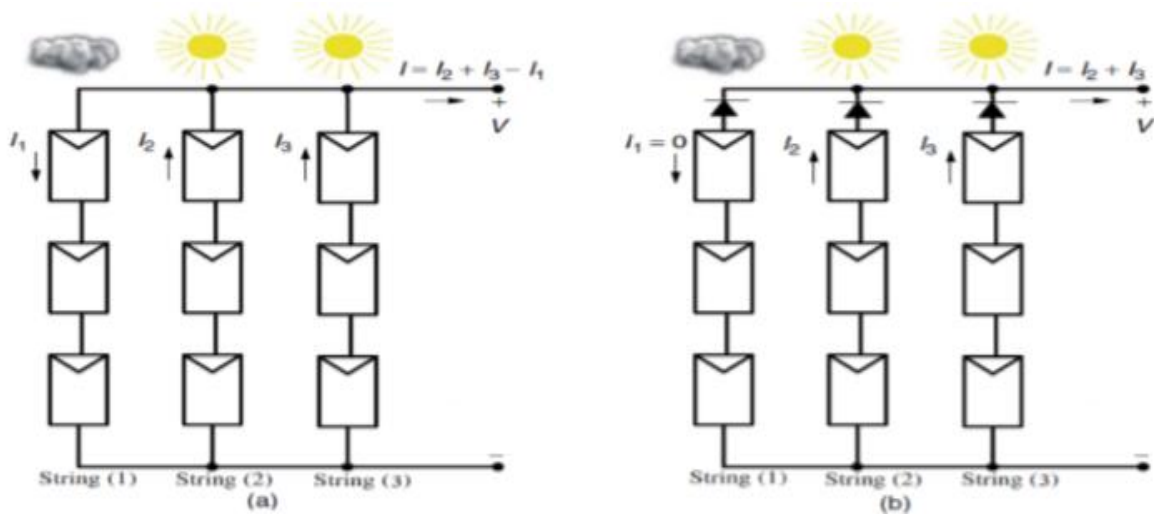


Figure I.16 : Protection avec une diode anti-retour.

I.8 Effets des conditions environnementales sur les caractéristiques du Générateur PV

Il est bien connu que la puissance électrique générée par un module photovoltaïque peut être fortement diminuée par rapport aux conditions optimales de production (point maximum de puissance), mais aussi par rapport aux conditions météorologiques. En effet, de nombreux facteurs, tels que l'ombrage, ou la température, peuvent agir considérablement sur la production électrique d'un panneau photovoltaïque

I.8.1 Effet de l'ombrage

Nous pouvons dans cette partie définir deux types d'ombrage agissant pour le premier à l'échelle de la cellule et pour le second à l'échelle du module. Nous les retrouvons dans la littérature sous la dénomination ombrage partiel n'affectant qu'une cellule et ombrage homogène affectant le module.

I.8.1.1 Ombrage homogène

Dans ce cas la répartition de l'éclairement incitant est homogène sur toute la surface de la cellule ou le module photovoltaïque.

Nous avons réalisé sur un panneau de 18 cellules un test en faisant varier l'éclairement de 1000 W/m² à 400 W/m² avec un pas de 200 W/m². La Figure I.17 représente la variation

de la caractéristique I-V lorsque les 18 cellules sont occultées de manière homogène. La chaîne se comporte comme si l'éclairement global était diminué.

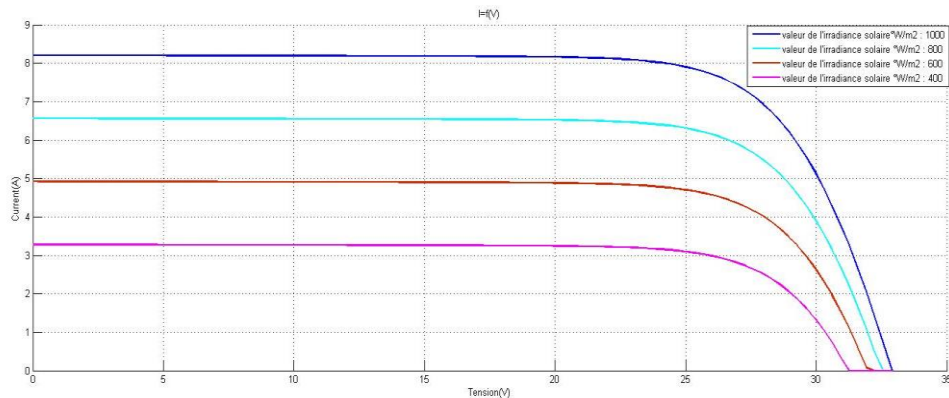


Figure I.17: Caractéristique I-V d'un panneau sous différents éclairements

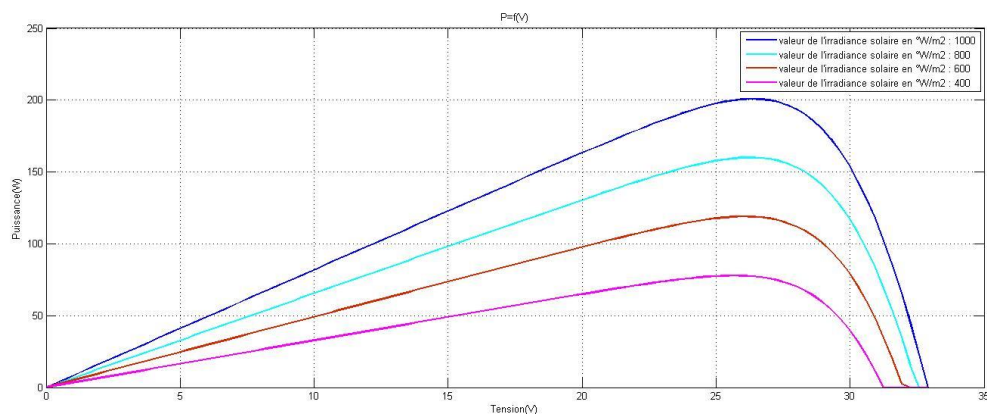


Figure I.18: Caractéristique P-V d'un panneau sous différents éclairements

II.8.1.2 Ombrage partiel

Dans ce cas la répartition de l'éclairement incitant n'est pas homogène sur toute la surface de la cellule ou le module photovoltaïque, les cellules reçoivent différents éclairements inférieurs à 1000 W/m².

I.8.2 Effet de la température

La température est le second paramètre le plus important dans le comportement de la photopile. La figure I.19 (a,b) illustre respectivement les caractéristiques I-V et P-V de la photopile simulée sous un éclairement de 1000W/m² et différentes températures

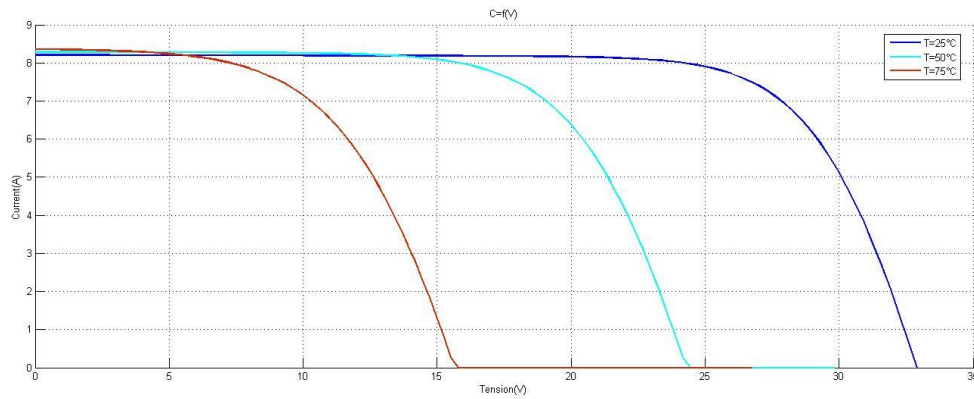


Figure I.19.a : Influence de la température sur la caractéristique I-V

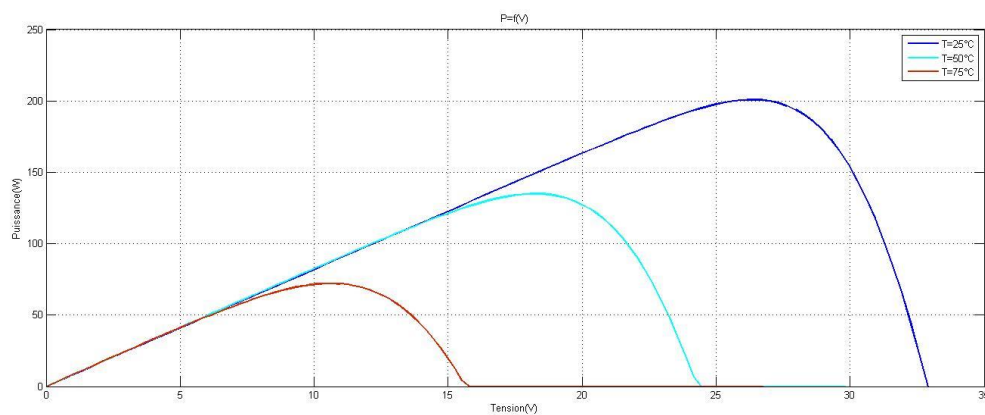


Figure I.19.b: Influence de la température sur la caractéristique P-V

Remarque : On remarque que le courant du court-circuit I_{sc} reste très peu sensible à la variation de la température mais la tension du circuit ouvert V_{oc} diminue en augmentant la température ce qui cause une diminution de la puissance à la sortie de la photopile. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte.

I.9 conclusion :

Ce chapitre s'est consacré à présenter les Généralité sur les générateurs photovoltaïques. On a étudié le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres. Aussi, on a présenté l'effet des conditions environnementales sur les caractéristiques d'un Générateur PV.

***Chapitre II : Etude des caractéristiques I-V des
générateurs PV en présence de défauts***

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord la nomenclature des différents défauts pouvant affecter un système PV. Puis, nous nous intéressons aux caractéristiques électriques d'un générateur PV en fonctionnement défaillant en particulier en présence de défaut d'ombrage partiel.

II.2 Les défauts dans les systèmes PV

Dans ce paragraphe, nous présentons les différents défauts pouvant affecter un système PV relatifs à chaque niveau.

Vocabulaire adopté :

- **Défaut** : On appelle défaut tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique théorique.
- **Symptôme** : c'est le changement de la quantité observée du comportement normal.
- **Détection** : Elle consiste à reconnaître qu'un dispositif est dans un mode de dysfonctionnement à partir de la connaissance de certaines caractéristiques.
- **Localisation** : Elle consiste à déterminer les causes physiques ou fonctionnelles d'une panne, c'est-à-dire à déterminer le ou les éléments à l'origine du défaut.

D'une façon générale, il existe plusieurs classifications des défauts considérées dans la littérature. Dans cette partie, nous donnons la classification par niveau d'apparition de défaut et l'étape à laquelle ils interviennent et s'ils peuvent modifier le comportement du composant de cette étape (cellule, groupe de cellules, modules, strings, champ). Le tableau II.1 : présente cette classification. [13].

Tableau II .1 : Classification des défauts et les anomalies d'un GPV

Composant du champ	Nature des défauts	Dénomination des défauts
Cellule	<ul style="list-style-type: none"> • Module arraché ou cassé • Pylônes, cheminée, sable, neige etc. • Echauffement des cellules • Dégradation des interconnexions • Fissure • Corrosion des liaisons entre Cellules, Modules de Performances différentes, Détérioration des cellules, Pénétration de l'humidité 	Défaut de mismatch et d'ombrage
Groups de cellules	<ul style="list-style-type: none"> • Destruction des diodes • Absence de diodes, • Inversion de la polarité des diodes • Diode mal connectée • Diode court-circuitée 	Défaut de diode by-pass
Module	<ul style="list-style-type: none"> • Modules court-circuités, • Modules shuntés 	Défaut de module
String	<ul style="list-style-type: none"> • Rupture du circuit électrique • Destruction de la liaison • Corrosion des connexions • Corrosion des contacts 	Défaut de connexion
Champ	<ul style="list-style-type: none"> • Destruction des diodes absence de diodes inverse de la polarité des diodes • Diode mal connectée • Diode court-circuitée 	Défaut de diode anti-retour

II.3 Défaut dans le générateur PV

Aujourd'hui, la plupart des modules PV industrialisés sont garantis pour 25 ans, mais il n'existe pas de protocoles de test pour valider cette durée de vie. La figure II- 1 montre le tracé du taux de dégradation d'un module PV par an C'est-à-dire que le taux de dégradation annuel moyen est de 0.8 % comme le montre la figure II-2. Il est alors important d'évaluer les différents défauts éventuels liés aux cellules PV, aux modules PV [14].

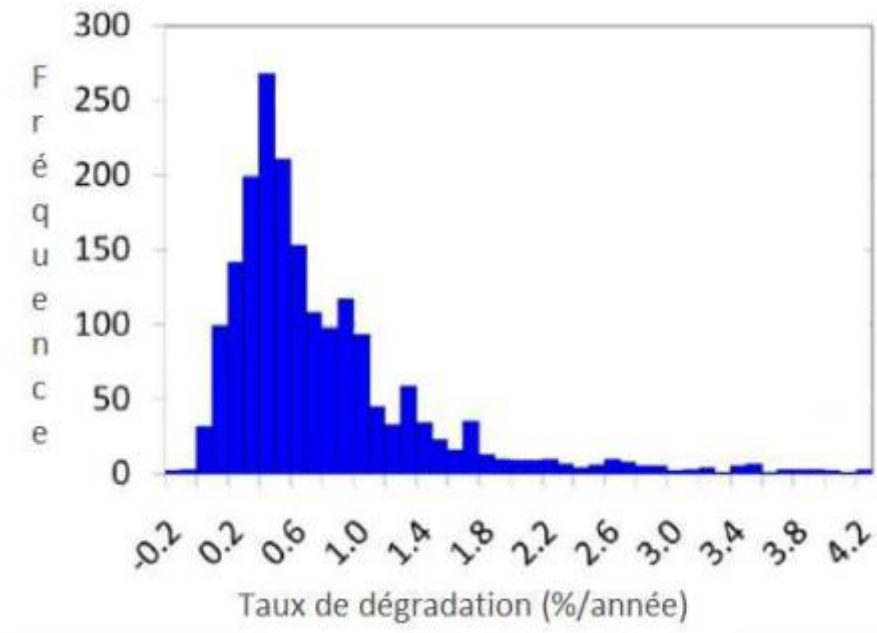


Figure II.1: Taux de dégradation d'un module PV par an

II.3.1 Défaut aux niveaux de la cellule PV

Il existe des défauts permanents et évolutifs avec le temps. La diminution graduelle de la performance d'une cellule peut être causée par :

- Une augmentation de la valeur de la résistance série. Plusieurs causes ont été identifiées comme une diminution de l'adhérence des contacts ou une oxydation des connectiques. L'augmentation de la résistance série réduit la tension de sortie et par conséquent le facteur de forme de la caractéristique courant-tension du module. Aujourd'hui, il n'existe pas de test de vieillissement sur la résistance série afin de quantifier réellement le pourcentage d'augmentation de cette résistance au fil du temps.
- Une diminution de la résistance parallèle. La migration du métal dans la jonction P-N peut causer une diminution de la tension de circuit ouvert et par la même occasion une diminution de la puissance maximale. Un comparatif a été mené avec plusieurs valeurs de résistance parallèle et il est montré que pour une faible valeur de résistance ($<6\Omega$), il y a une perte assez nette de la puissance maximale.
- Une détérioration du traitement de surface (couche anti-roture)

Des court-circuit peuvent se manifester au niveau des interconnexions. Ce type de défaut est beaucoup plus fréquent dans les cellules en couche mince car les électrodes supérieures et

inférieures sont beaucoup plus rapprochées et ont plus de chances de se retrouver court-circuitées par du matériel corrodé ou endommagé.

Le défaut des cellules en circuit ouvert est commun. Elles sont généralement connectées par deux rubans traversant les électrodes. Mais celles-ci peuvent se briser pour diverses raisons :

- Contraintes thermiques
- Grosse grêle
- Fissures invisibles au moment de l'assemblage [14]

II.3.2 Défaut aux niveaux des modules PV

Les problèmes liés aux modules peuvent eux aussi causer une réduction graduelle de la puissance de sortie d'un module PV au fil du temps ou bien engendrer une baisse de cette puissance par une ou plusieurs cellules en défaut. Le problème des circuits ouverts se présentent également au niveau des modules soit dans la boîte de jonction ou dans les câblages internes.

Il peut s'avérer que des courts circuits peuvent apparaître aussi liés aux processus de fabrication. Ces courts circuits trouvent leurs origines dans la dégradation de l'isolation électrique due à l'exposition aux effets climatiques qui induisent des délaminations, fissures ou oxydation. Des cellules ombragées ou fissurées peuvent donner naissance à un phénomène qui surchauffe localement le module entraînant sa perte. Ce phénomène s'appelle "Hot spot". En effet, si une ou plusieurs cellules sont occultées, le module voit sa caractéristique IV modifiée. Les autres cellules du groupement lui imposent un courant très supérieur à son courant de court-circuit. Du coup, les cellules occultées passent en polarisation inverse (tension négative) et dissipent une puissance importante qui provoque un échauffement amenant à sa destruction comme le montre la figure II.2. Pour éviter ce problème, des diodes by-pass ont été intégrées dans les modules comme expliqué et montré dans la section II.2.

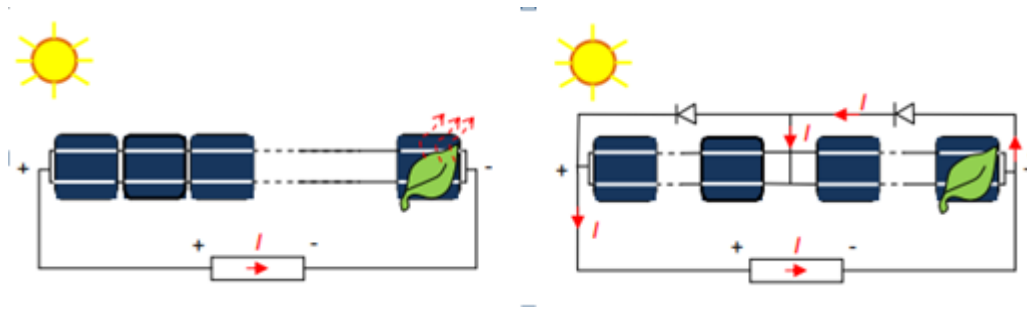


Figure II.2: Schéma de cellules en série sans diode by-pass et avec diode by-pass

Un module PV a été étudié afin de mesurer la caractéristique I-V de chaque cellule. Ainsi, le comportement des cellules sur cette caractéristique est établi lorsque celles-ci sont ombragées partiellement. La déformation de cette caractéristique augmente selon le nombre de cellules ombragées, et fait apparaître deux points potentiels de puissance maximal avec l'utilisation de diode by-pass. Il peut s'avérer qu'aux niveaux des diodes by-pass utilisés pour ces défauts d'ombrages, des problèmes de surchauffe ou de sous dimensionnement peuvent apparaître [14]

II.3.3 Autres problèmes du générateur PV

D'autres défauts peuvent apparaître au niveau du générateur PV comme :

- **Des défauts physiques** : concernant par exemple le câblage ou les connecteurs des systèmes PV peuvent apparaître notamment sur la corrosion des contacts
- **Des défauts au niveau de la diode anti-retour** : connecté en série sur chaque string. Son rôle est d'éviter tout retour de courant inverse. Lorsque chaque string est connecté en parallèle, le string avec la tension la plus faible évite d'absorber ce courant inverse provenant des autres strings par le biais de ces diodes anti-retours. Ces dernières comme pour les diodes by-pass peuvent être cause de défaut
- **Des défauts aux niveaux de l'encapsulation** : Les absorbeurs d'UV et autres stabilisants utilisés dans les matériaux d'encapsulation garantissent une durée de vie accrue des matériaux d'encapsulation des modules. Les quantités de ces adjuvants peuvent diminuer avec le temps par des phénomènes de diffusion et engendre une dégradation accélérée du module. Cette conséquence entraîne une diminution progressive de la puissance de sortie du module jusqu'à sa défaillance totale
- **Des défauts de courants de fuites** : peuvent être créés du fait des caractéristiques capacitives des panneaux et peuvent devenir dangereux en cas de contact avec le fil

de terre. Des disjoncteurs différentiels sont utilisés dans ce cas pour la protection des personnes [14].

II.4 Caractéristiques électriques en fonctionnement défaillant :

II.4 .1 Défaut d'ombrage

Il se peut qu'un obstacle, de quelque nature qu'il soit (bâtiment, arbre, etc.) fasse de l'ombre aux panneaux solaires.

Un ombrage sur les capteurs photovoltaïques entraîne une perte de production d'énergie. Cette perte de production varie en fonction de la taille et de la densité de l'obstacle. Mieux vaut quantifier l'importance de la perte avant d'entreprendre de poser ses panneaux photovoltaïques.

On peut distinguer deux types d'ombrages l'ombrage partiel et l'ombrage total. On appelle ombrage total ou complet ce qui vient couvrir le panneau (couverture, branche cassée, saleté de toute nature, etc.). L'ombrage partiel laisse passer en partie les rayons du soleil.

Il faut savoir que les cellules photovoltaïques sont montées en série. La cellule la plus faible va donc avoir un impact sur le rendement des autres cellules. Ainsi, l'ombrage total d'une rangée de cellules peut rendre l'ensemble du module photovoltaïque inefficace.

Toutefois, les panneaux photovoltaïques sont aujourd'hui équipés de diodes by-pass, ce qui permet de limiter l'impact d'une ombre sur une partie du panneau.

Par exemple pour un panneau équipé d'un jeu de 3 diodes by-pass, si une ombre affecte une cellule alors la série de cellules branchée sur la même diode by-pass est court-circuitée et le reste du panneau continue de produire [Web1].

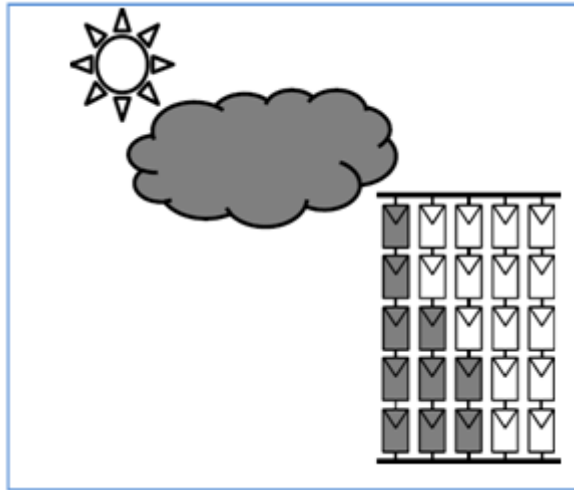


Figure II.3 :GPV dans des conditions partiellement ombragés causés par le passage de nuages

II.4.2 Détermination de la caractéristique I -V et P-V d'une cellule sous conditions d'ombrage

Le module PV en question possède des diodes de dérivation. Ce type de diode limite le flux de courant à travers les cellules ombrées. Les caractéristiques I(V) et P(V) du module PV sont représentés sur Figure II.4 dont une seule cellule solaire avait été ombragée, pour différent taux d'ombrage.

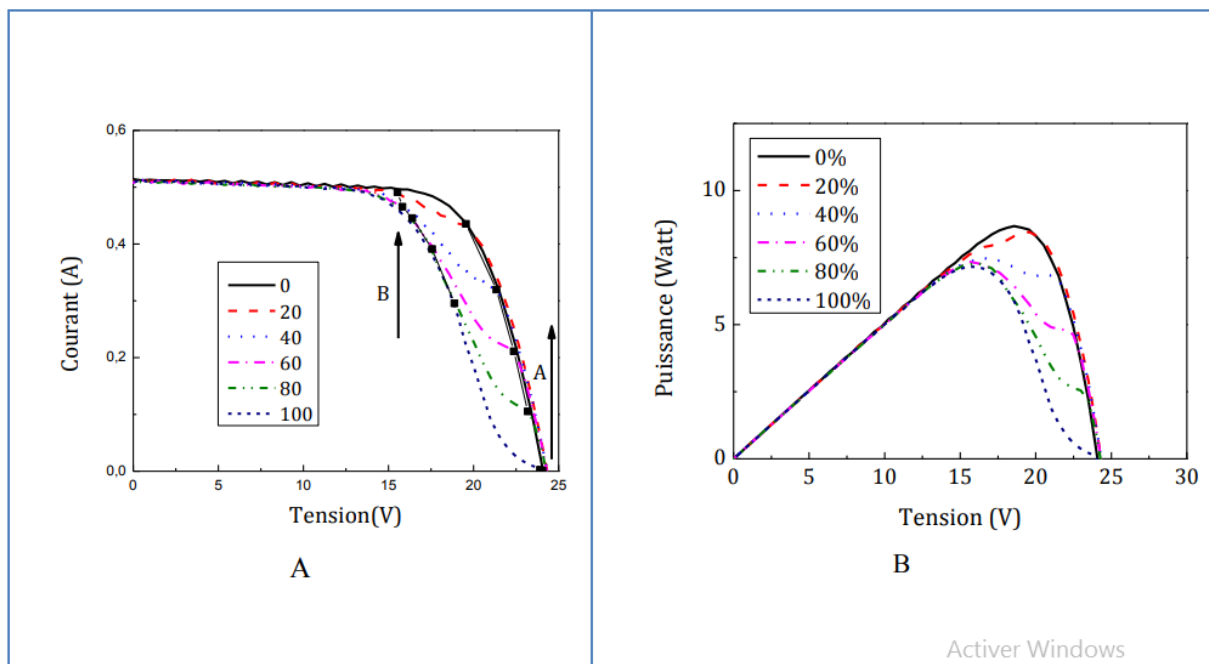


Figure II.4 : Caractéristique P-V d'un système PV à l'ombrage partiel.

On constate que l'allure générale des caractéristiques I(V) et P(V) du module photovoltaïque à subit des déformations importantes, avec l'augmentation du taux d'ombrage partiel, ce qui implique leur non-uniformité. En effet, la réduction du courant de court-circuit de la cellule ombrée est évidente, dans la mesure où le courant généré, a diminué en fonction de l'accroissement du taux d'ombrage. La diminution du courant du module est appréciable entre deux points, à savoir :

- Le point A où les effets d'ombrage sur le module commencent à apparaître
- Le point B où la diode by-pass est activée.

L'influence de la caractéristique inverse de la cellule ombrée, est aperçue dans la zone délimitée par le point où le courant de court-circuit de la cellule occultée est surpassé (point A) et, le point où la diode by-pass est activée (point B). Une cellule avec une conductance shunt élevée, son effet sur la déformation de la caractéristique I(V) sera moins.

Toutefois, cela se produit lorsque le courant qui passe à travers les cellules du module est le même (cellules en série) et le niveau d'illumination est différent (une cellule ombrée), avec la tension aux bornes de la cellule ombrée est différent de celui des autres qui sont illuminées

Il existe un autre effet dû à l'ombrage, celui du déplacement du point de puissance maximale vers des valeurs de tension plus faible Figure II.4 -B. En effet, l'ombrage de 2.77% du module, qui correspond à un ombrage de 100% de la cellule, engendre une réduction de puissance de l'ordre de 17.43% qui est dissipée sous forme de chaleur. Cet effet doit être tenu en considération, dans le cas où le système est connecté à un onduleur suiveur du point maximum de puissance (MPP), puisqu'il peut causer une mauvaise exploitation du système photovoltaïque [15].

II.4.3 Détermination de la caractéristique I-V d'un module sous conditions d'ombrage

Nous savons que la somme des tensions de toutes les cellules dans le groupe peut être négative. Cela signifie qu'une ou plusieurs cellules sont traversées par un courant supérieur à leur courant de court-circuit. Les relations suivantes permettent de calculer les données électriques courant et tension d'un module sous fonctionnement défaillant :

$$I_{\text{module}} = I_{\text{donné}} + I_{\text{by-pass}} \quad (\text{II-1})$$

$$V_{\text{module}} = \sum V_{\text{cellule}} \text{ si } \sum V_{\text{cellule}} \geq 0$$

$$V_{\text{module}}=0 \quad \text{si } \sum V_{\text{cellule}} < 0$$

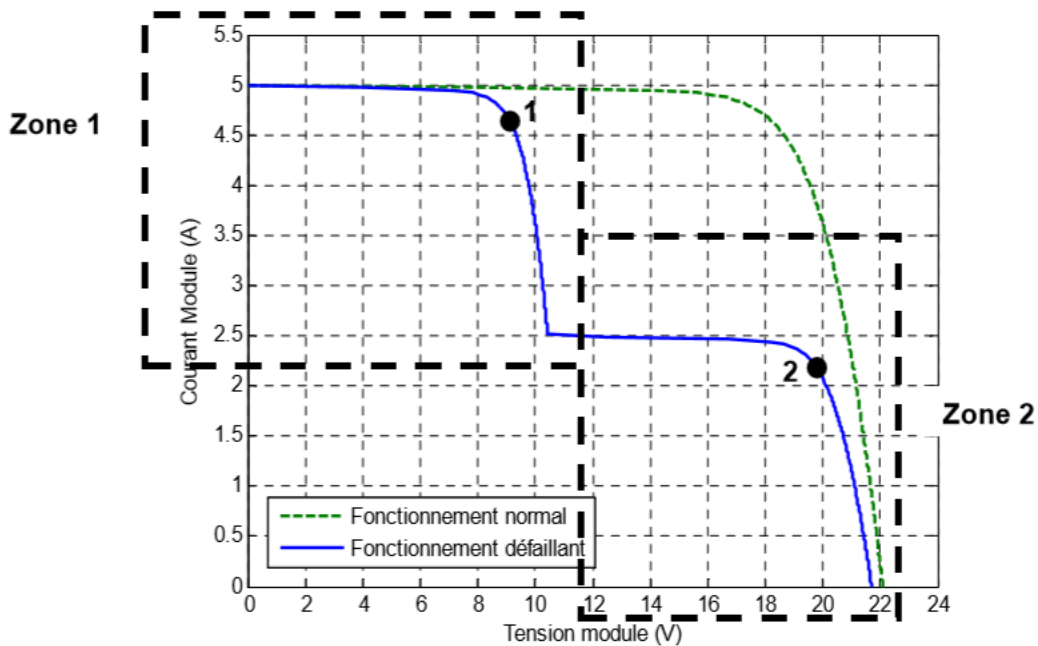


Figure II.5: Caractéristiques I-V d'un module PV en fonctionnement normal et en fonctionnement sous ombrage.

Deux zones distinctes peuvent être visualisées sur la caractéristique I-V en fonctionnement défaillant :

- **La zone 1** : correspond à la caractéristique I-V en fonctionnement normal donc pour une tension V_1 et une diode by-pass D_1 qui est bloquée
- **La zone 2** : correspond à la caractéristique I-V en fonctionnement "ombrage" donc pour une tension V_2 et une diode by-pass D_2 qui devient passante

Ainsi, les tensions V_1 , V_2 sont ajoutées afin d'obtenir la caractéristique I-V complète du module. La tension V_1 correspond à 18 cellules en série en fonctionnement normal. La tension V_2 correspond à la tension des cellules en défaut. Si la tension V_2 devient négative, la tension est considérée comme nulle aux bornes des cellules car la diode devient passante. Par conséquent, lorsque les deux tensions sont ajoutées, un point d'inflexion apparaît caractérisant le nombre de cellule en fonctionnement normal et en fonctionnement "ombrage". Cela fait apparaître la présence de deux points de puissance maximale représentée sur la figure II.5 (1 et 2). Des recherches ont montrées que la plupart des convertisseurs travaillent lorsque la tension de la caractéristique I-V sous conditions d'ombrage est la plus élevée (point 2).

Dès lors, cette tension d'opération doit être proche de celle en circuit-ouvert. Une fois la caractéristique I-V d'un module PV simulée, nous pouvons procéder à plusieurs scénarios en déterminant la caractéristique I-V d'un string. Le travail suivant consiste à représenter l'allure de la caractéristique électrique d'un string selon une configuration choisie [14].

II.4.5 Caractéristiques électriques d'un même générateur PV en présence d'ombrage partiel à différents degrés :

Dans ce paragraphe, pour plusieurs degrés d'ensoleillement, nous donnons les caractéristiques d'un générateur PV.

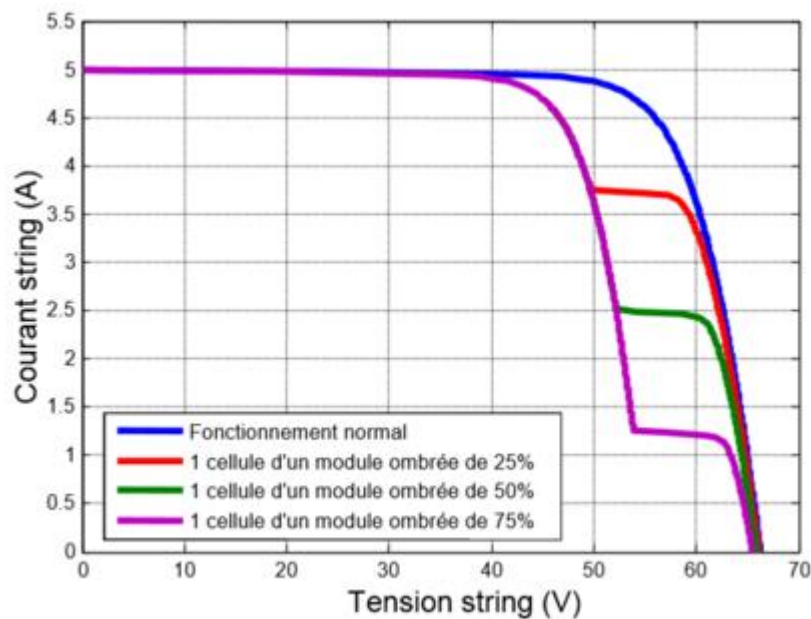


Figure II.6 : Caractéristique I-V d'un générateur PV en fonctionnement défaillant avec une cellule ombrée de 25% à 75%.

Remarque : Nous pouvons constater sur cette figure que selon le pourcentage d'ombrage sur une cellule du module, un point d'inflexion apparaît du fait de l'activation de la diode by-pass. Plus l'ombrage est important sur la cellule, plus le courant au point d'inflexion diminue.

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les défauts dans les systèmes PV. Aussi, nous avons présenté les caractéristiques électriques en fonctionnement défaillant s'agissant de l'ombrage partiel. Dans le prochain chapitre, nous étudierons l'effet de la tension directe de la diode by-pass sur la puissance maximale fournie par un générateur PV.

Chapitre III : Effet de la tension directe de la diode by-pass sur la puissance maximale fournie par un générateur PV.

Chapitre III: Effet de la tension directe de la diode by-pass sur la puissance maximale fournie par un générateur PV.

III.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons étudier l'effet de la tension directe de la diode bay-pass sur la puissance maximale fournie par un générateur PV en présence de l'ombrage partiel. Pour cela, nous allons considérer quelques structures de générateurs PV avec également quelques scénarios d'ombrage partiel. Cependant, la tension directe de la diode by-pass est aussi variable. Nous tenons à rappeler que le présent travail s'inspire dans sa totalité d'un travail de recherche récent publié dans une revue internationale [1].

III.2 Résultats expérimentaux :

Pour notre étude, nous considérons deux générateurs PV que nous avons créés dans Matlab : le premier générateur est composé de 72 Cellules avec 8 Diodes by-pass, alors que le second est composé de 200 cellules avec également 10 diodes by-pass.

S'agissant de l'ombrage et générateurs PV, nous avons considérons les scénarios suivants :

- Générateur PV 1 : 4 modules ombragés (36 cellules ombragées) et que l'ensoleillement et de 0 à 900 W/m²
- Générateur PV 2 : 16 modules ombragés (160 cellules ombragées) et que l'ensoleillement et de 0 à 900 W/m²

Le schéma utilisé pour la simulation dans l'environnement Matlab est donné comme suit :

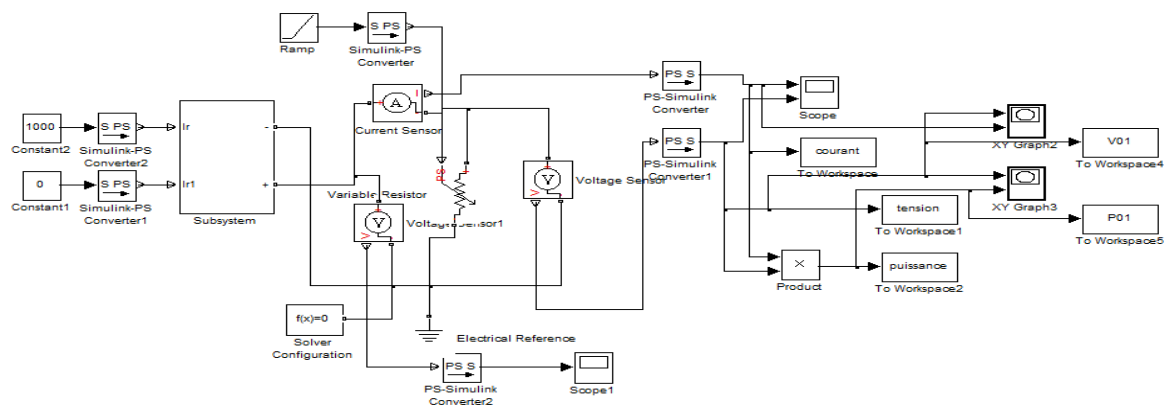


Figure III.1: Schéma Simulink utilisé pour la simulation dans l'environnement Matlab

Chapitre III: Effet de la tension directe de la diode by-pass sur la puissance maximale fournie par un générateur PV.

III.3 Résultats de simulation relatifs au premier générateur (Ensoleillement varie de 0 à 900 W/m²) :

a. Courbe correspondant à 900 W/m²

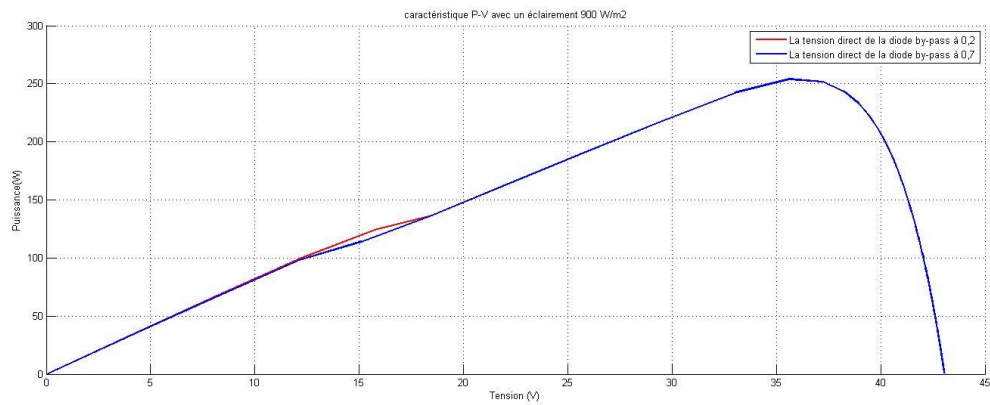


Figure III.2: La courbe caractéristique P-V de la configuration avec 4 modules ombrés. L'éclairement des modules ombragés était de 900 W/m².

b. Courbe correspondant à 800 W/m²

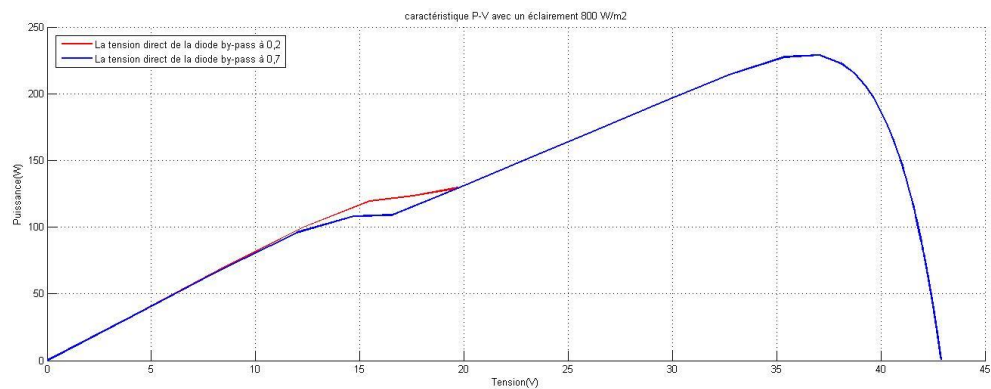


Figure III.3: La courbe caractéristique P-V de la configuration avec 4 modules ombrés. L'éclairement des modules ombragés était de 800 W/m²

Chapitre III: Effet de la tension directe de la diode by-pass sur la puissance maximale fournie par un générateur PV.

c. Courbe correspondant à 700 W/m²

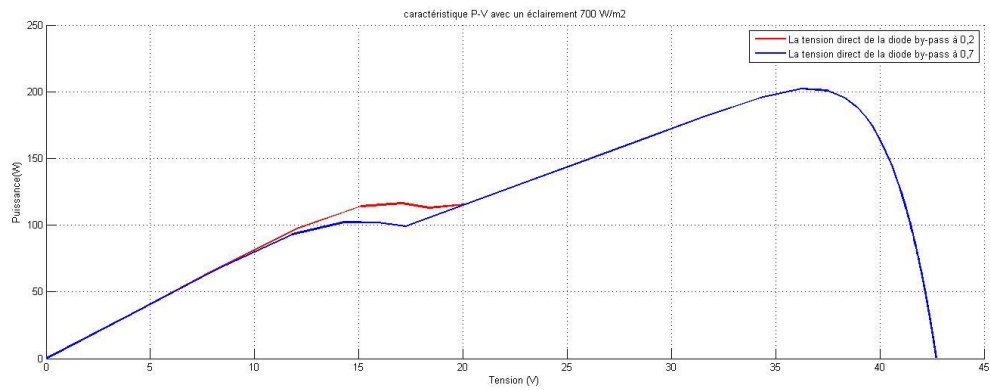


Figure III.4: La courbe caractéristique P-V de la configuration avec 4 modules ombrés. L'éclairement des modules ombragés était de 700 W/m².

d. Courbe correspondant à 600 W/m²

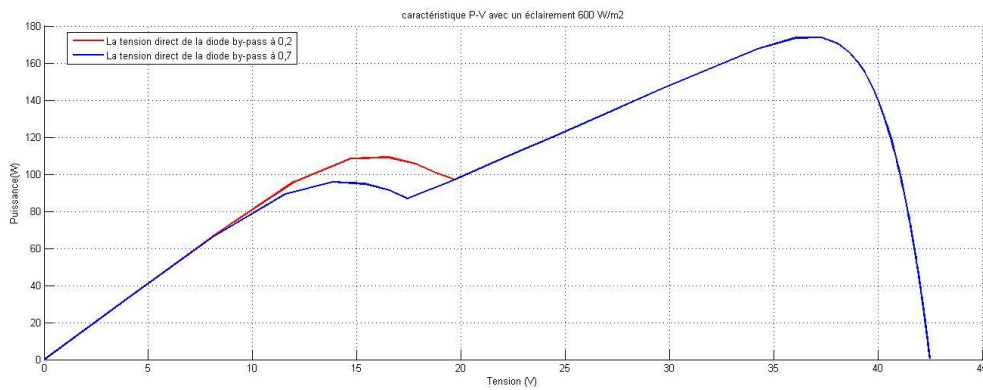


Figure III.5: La courbe caractéristique P-V de la configuration avec 4 modules ombrés. L'éclairement des modules ombragés était de 600 W/m².

e. Courbe correspondant à 500 W/m²

Chapitre III: Effet de la tension directe de la diode by-pass sur la puissance maximale fournie par un générateur PV.

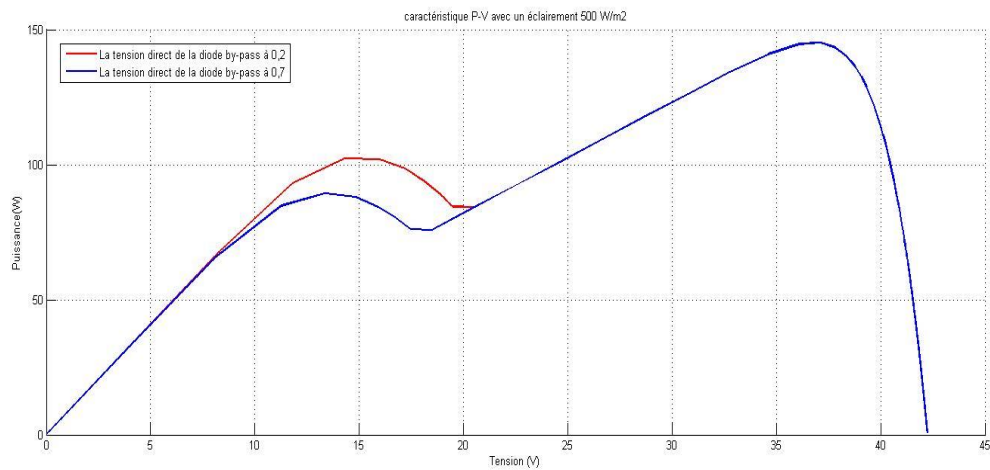


Figure III.6: La courbe caractéristique P-V de la configuration avec 4 modules ombrés.
L'éclairement des modules ombragés était de 500 W/m².

f. Courbe correspondant à 400 W/m²

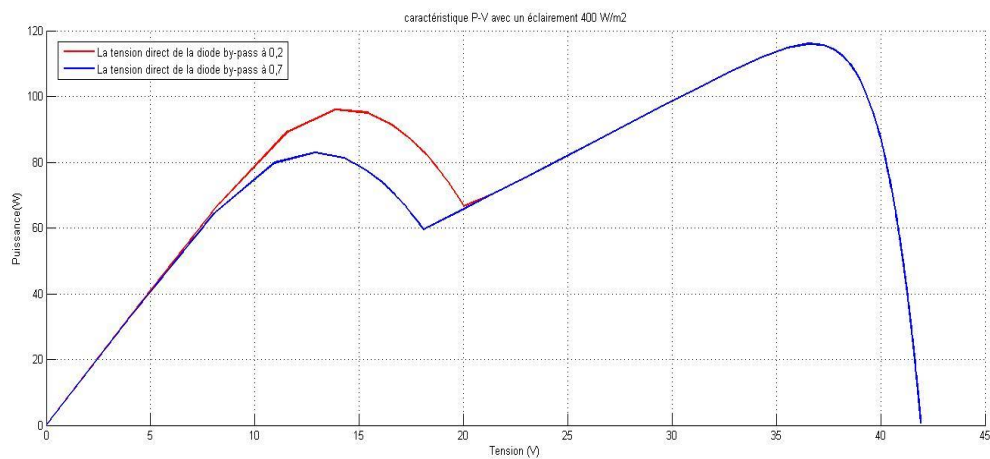


Figure III.7: La courbe caractéristique P-V de la configuration avec 4 modules ombrés.
L'éclairement des modules ombragés était de 400 W/m².

Chapitre III: Effet de la tension directe de la diode by-pass sur la puissance maximale fournie par un générateur PV.

g. Courbe correspondant à 300 W/m²

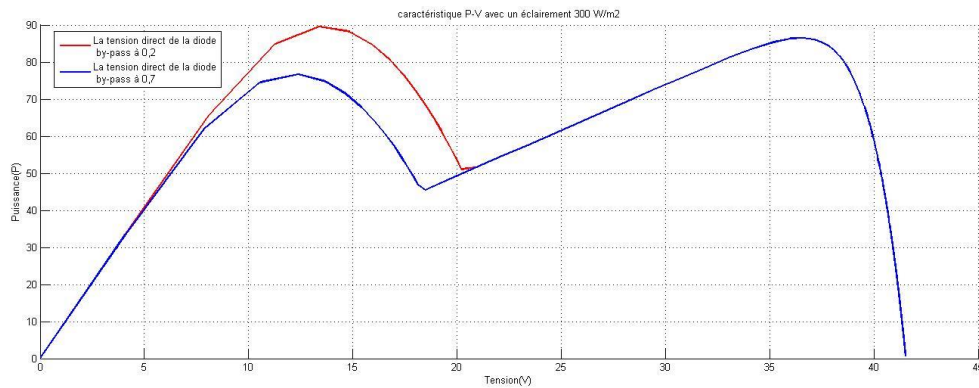


Figure III.8: La courbe caractéristique P-V de la configuration avec 4 modules ombrés.
L'éclairement des modules ombragés était de 300 W/m².

h. Courbe correspondant à 200 W/m²

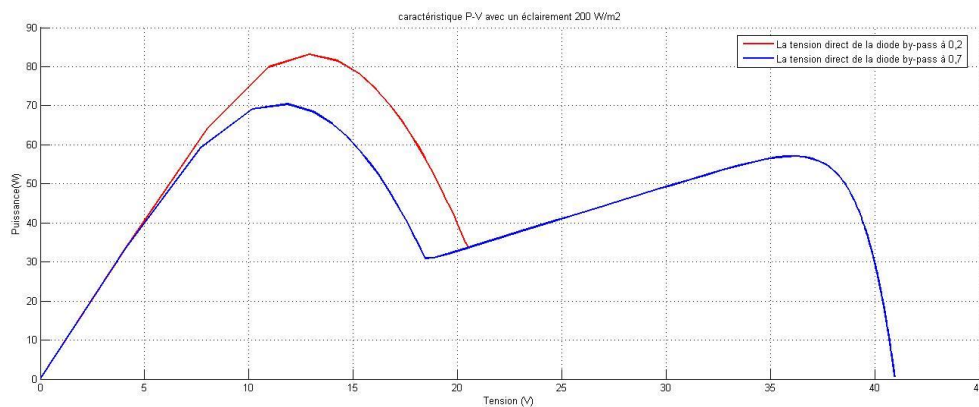


Figure III.9: La courbe caractéristique P-V de la configuration avec 4 modules ombrés.
L'éclairement des modules ombragés était de 200 W/m².

Chapitre III: Effet de la tension directe de la diode by-pass sur la puissance maximale fournie par un générateur PV.

i. Courbe correspondant à 100 W/m²

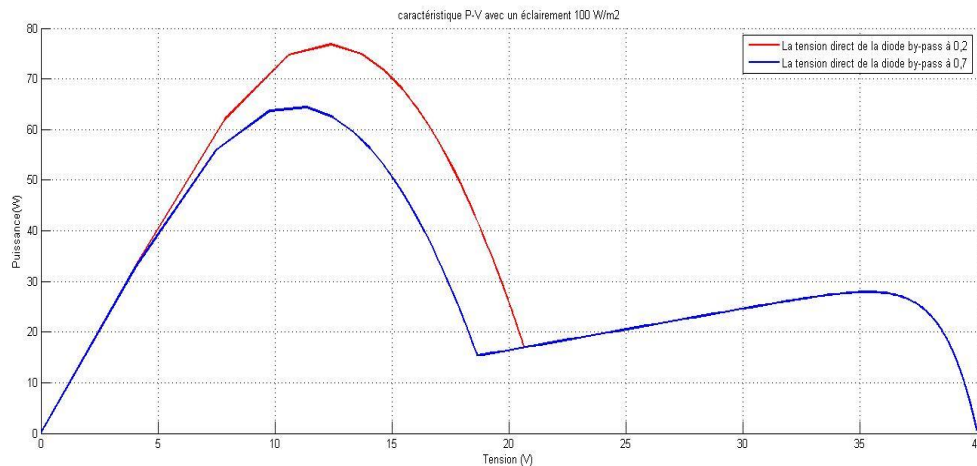


Figure III.10: La courbe caractéristique P-V de la configuration avec 4 modules ombrés.

L'éclairement des modules ombragés était de 100 W/m².

D'après les résultats présentés ci-dessus (figures III-2 à 10), nous constatons bien que l'effet de la tension directe de la diode by-pass sur la puissance maximale correspond aux faibles niveaux d'ensoleillement (moins de 300 W/m²). En revanche elle n'a aucun effet sur la puissance maximale pour des niveaux d'ensoleillement supérieurs. Nous remarquons également que cette perte d'énergie correspond à des tensions inférieures.

III. 4 Résultats de simulation relatifs au second générateur (Ensoleillement varie de 100 à 900 W/m²) :

a. Courbe correspondant à 900 W/m²

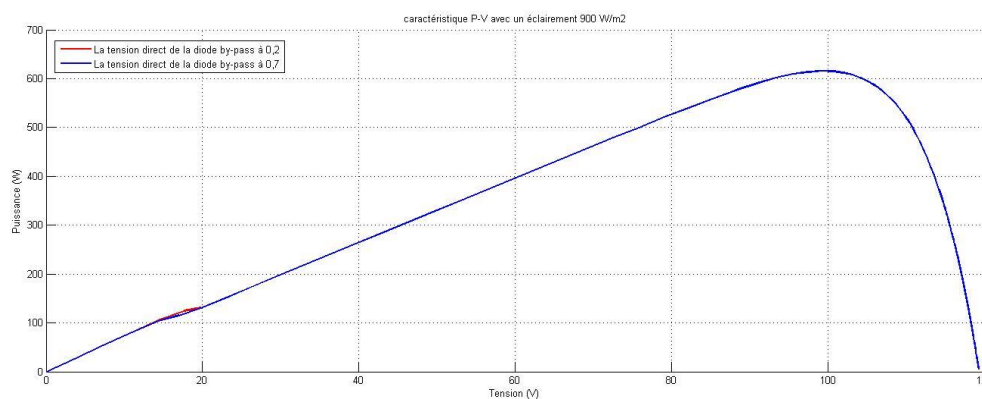


Figure III.11: La courbe caractéristique P-V de la configuration avec 16 modules ombrés.

L'éclairement des modules ombragés était de 900 W/m².

Chapitre III: Effet de la tension directe de la diode by-pass sur la puissance maximale fournie par un générateur PV.

b. Courbe correspondant à 800 W/m²

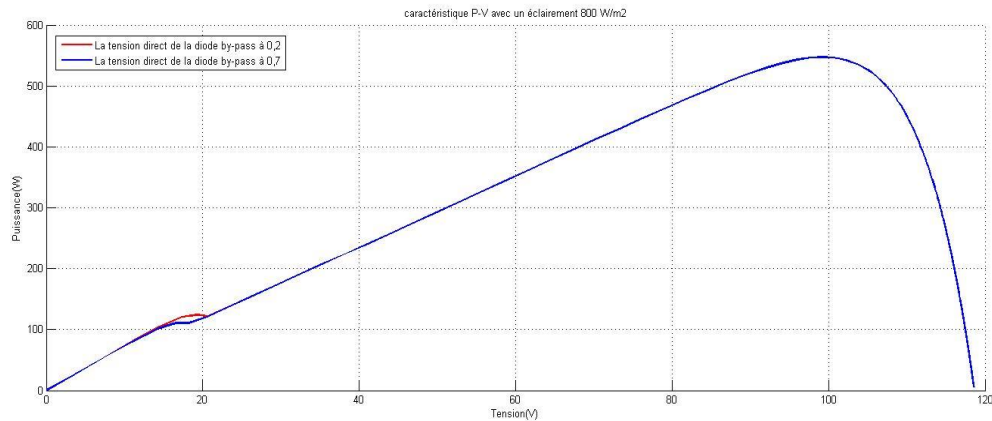


Figure III.12: La courbe caractéristique P-V de la configuration avec 16 modules ombrés. L'éclairement des modules ombragés était de 800 W/m².

c. Courbe correspondant à 700 W/m²

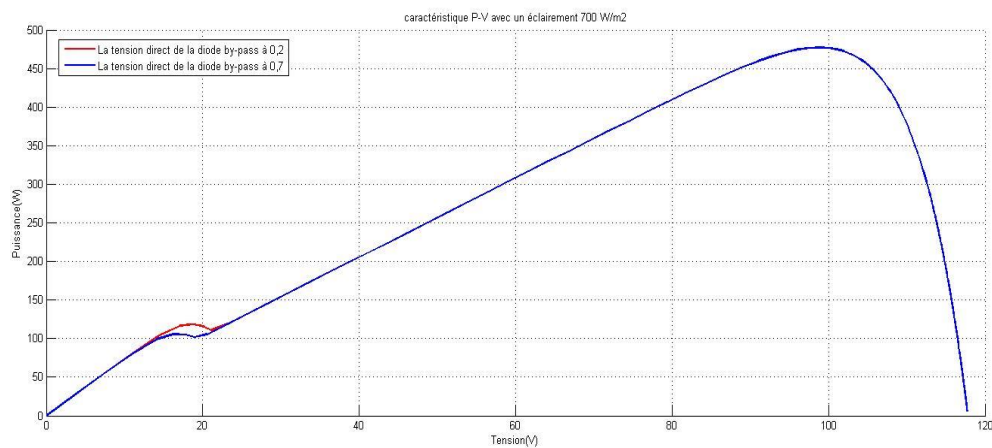


Figure III.13: La courbe caractéristique P-V de la configuration avec 16 modules ombrés. L'éclairement des modules ombragés était de 700 W/m².

Chapitre III: Effet de la tension directe de la diode by-pass sur la puissance maximale fournie par un générateur PV.

d. Courbe correspondant à 600 W/m²

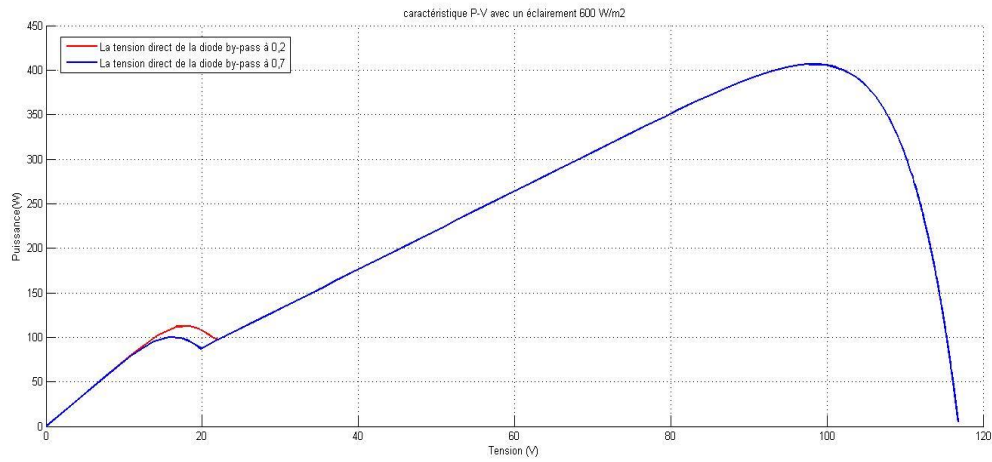


Figure III.14: La courbe caractéristique P-V de la configuration avec 16 modules ombrés. L'éclairement des modules ombragés était de 600 W/m².

e. Courbe correspondant à 500 W/m²

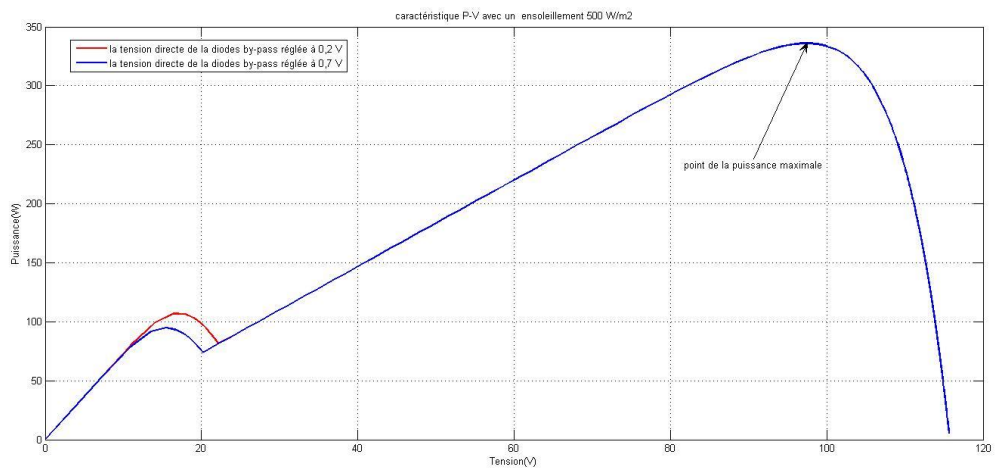


Figure III.15: La courbe caractéristique P-V de la configuration avec 16 modules ombrés. L'éclairement des modules ombragés était de 500 W/m².

Chapitre III: Effet de la tension directe de la diode by-pass sur la puissance maximale fournie par un générateur PV.

f. Courbe correspondant à 400 W/m²

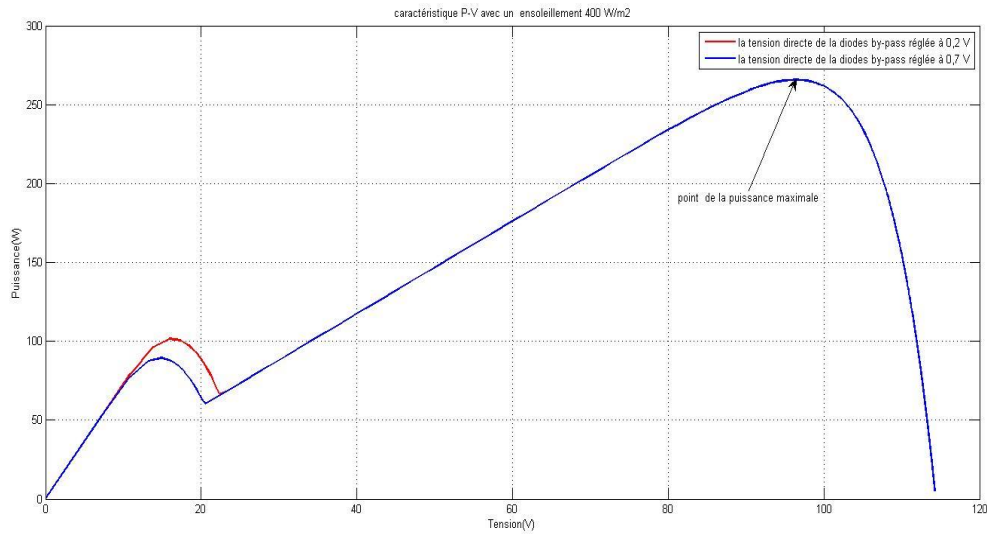


Figure III.16: La courbe caractéristique P-V de la configuration avec 16 modules ombrés. L'éclairement des modules ombragés était de 400 W/m².

g. Courbe correspondant à 300 W/m²

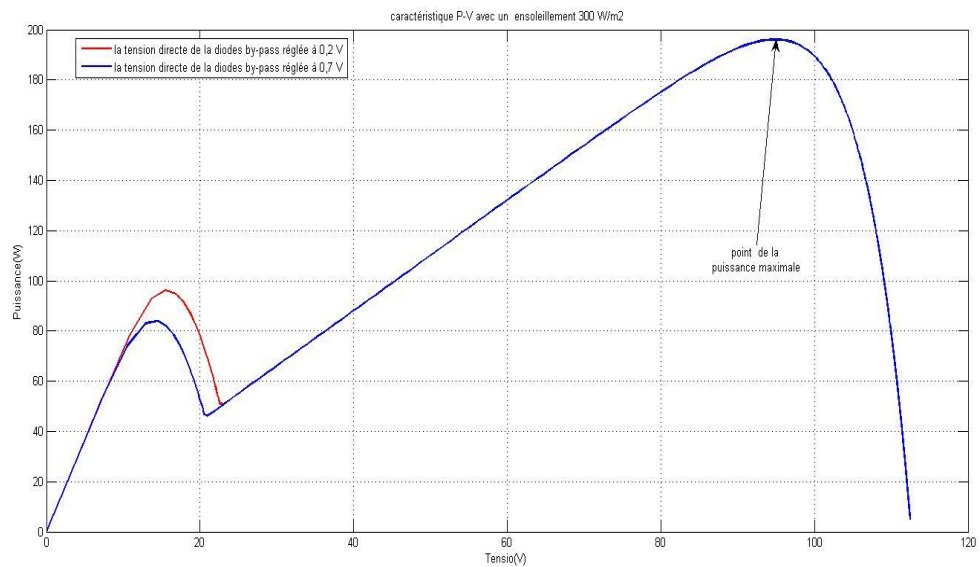


Figure III.17: La courbe caractéristique P-V de la configuration avec 16 modules ombrés. L'éclairement des modules ombragés était de 300 W/m².

Chapitre III: Effet de la tension directe de la diode by-pass sur la puissance maximale fournie par un générateur PV.

h. Courbe correspondant à 200 W/m^2

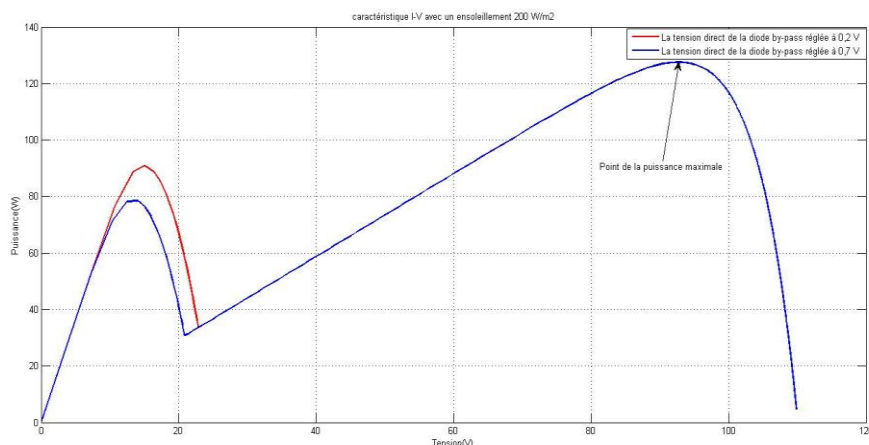


Figure III.18: La courbe caractéristique P-V de la configuration avec 16 modules ombrés. L'éclairement des modules ombragés était de 200 W/m^2 .

i. Courbe correspondant à 100 W/m^2

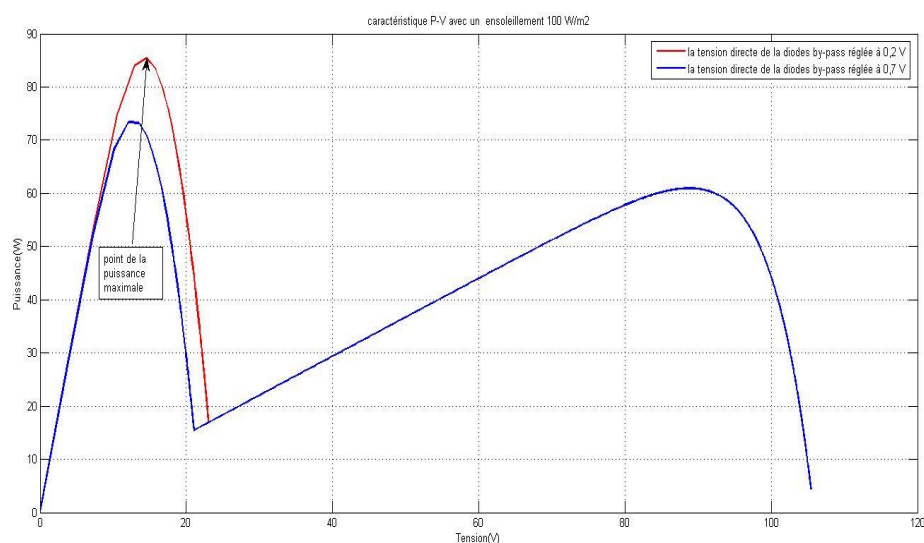


Figure III.19: La courbe caractéristique P-V de la configuration avec 16 modules ombrés. L'éclairement des modules ombragés était de 100 W/m^2 .

Les résultats obtenus dans le cas du second générateur considéré sont identiques à ceux obtenus pour le premier générateur. La seule différence, concerne uniquement le seuil de l'éclairement à partir duquel la puissance est affectée. Alors, d'après les résultats présentés ci-dessus (figures III-11 à 19), nous constatons bien que l'effet de la tension directe de la diode by-pass sur la puissance maximale correspond aux faibles niveaux d'ensoleillement

Chapitre III: Effet de la tension directe de la diode by-pass sur la puissance maximale fournie par un générateur PV.

(100 W/m²). En revanche elle n'a aucun effet sur la puissance maximale pour des niveaux d'ensoleillement supérieurs. Nous remarquons également que cette perte d'énergie correspond à des tensions inférieures. Représentation des puissances maximales en fonction des différentes valeurs de la tension directe de la diode by-pass.

III.5. Représentation des puissances maximales en fonction des différentes valeurs de la tension directe de la diode bay-pass.

De façons similaires à la représentation précédentes (P-V), nous avons préféré de représenter encore l'effet de la variation de la tension directe pour également différents niveaux d'éclairement.

Les figures suivantes illustrent le comportement de la courbe de la puissance maximale du premier GPV lorsque les modules photovoltaïques ombragés ont été exposés à un éclairement de 0-100 W/m² et 400-900 W/m² respectivement

Tableau III.1: la puissance maximale pour un éclairement de 0 à 100 W/m²

V _s (V)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
P(0)	82,45	80	77,55	75,12	72,98	70,78	68,57
P(100)	87,89	85,42	82,95	80,49	78,04	75,61	73,43

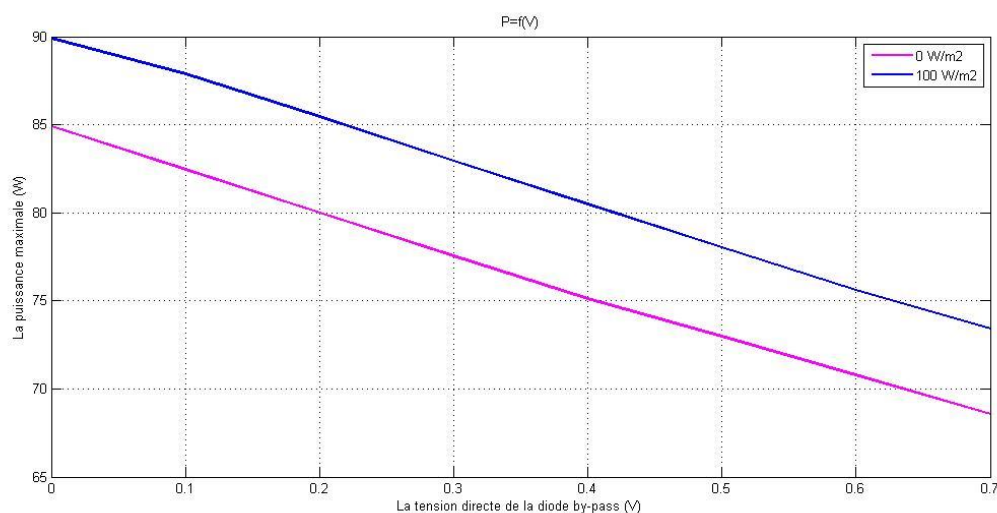


Figure III.20 : La configuration avec 16 modules ombragés. L'éclairement des modules ombragés était compris entre 0 et 100W/m².

Chapitre III: Effet de la tension directe de la diode by-pass sur la puissance maximale fournie par un générateur PV.

Interprétation : lorsqu'un plus grand nombre de modules photovoltaïques étaient ombragés, la tension directe de la diode by-pass affecte la puissance maximale à un seuil d'éclairement énergétique inférieur.

Tableau III.2: Comparaison de la puissance maximale lorsqu'un éclairement de 200-900 W/m²

Vs (V)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
P(100)	127,5	127,5	127,5	127,5	127,5	127,5	127,5
P(200)	196,1	196,1	196,1	196,1	196,1	196,1	196,1
P(400)	265,7	265,7	265,7	265,7	265,7	265,7	265,7
P(500)	335,9	335,9	335,9	335,9	335,9	335,9	335,9
P(600)	406,5	406,5	406,5	406,5	406,5	406,5	406,5
P(700)	477,2	477,2	477,2	477,2	477,2	477,2	477,2
P(800)	546,3	546,3	546,3	546,3	546,3	546,3	546,3
P(900)	615,5	615,5	615,5	615,5	615,5	615,5	615,5

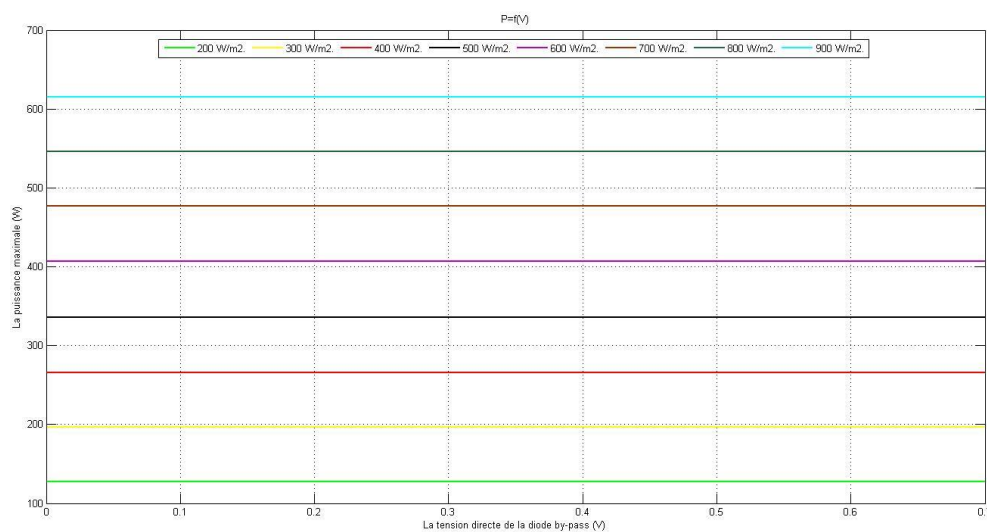


Figure III.21: La configuration avec 16 modules ombragés. L'éclairement des modules ombragés est compris entre 200 et 900 W/m².

Remarque : La puissance maximale demeure constante à mesure que la tension directe de la diode de by-pass augmente. Cela indique que la tension directe de la diode by-pass n'a pas

Affecté la puissance maximale du générateur photovoltaïque.

Chapitre III: Effet de la tension directe de la diode by-pass sur la puissance maximale fournie par un générateur PV.

Les figures suivantes illustrent le comportement de la courbe de puissance maximale pour le deuxième GPV lorsque les modules photovoltaïques ombragés ont été exposés à un éclairage de 0-300 W/m² et 400-900 W/m²

Tableau III.3: Comparaison de la puissance maximale lorsqu'un éclairage de 0-300 W/m²

Eclairage / V _s	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
P(0)	73,13	70,26	68,14	65,69	63,87	63,26	58,51
P(100)	79,39	76,83	74,29	71,78	69,28	66,82	64,38
P(200)	85,76	83,10	80,58	78,02	75,47	72,94	70,44
P(300)	92,16	89,56	86,96	84,36	81,78	79,2	76,65

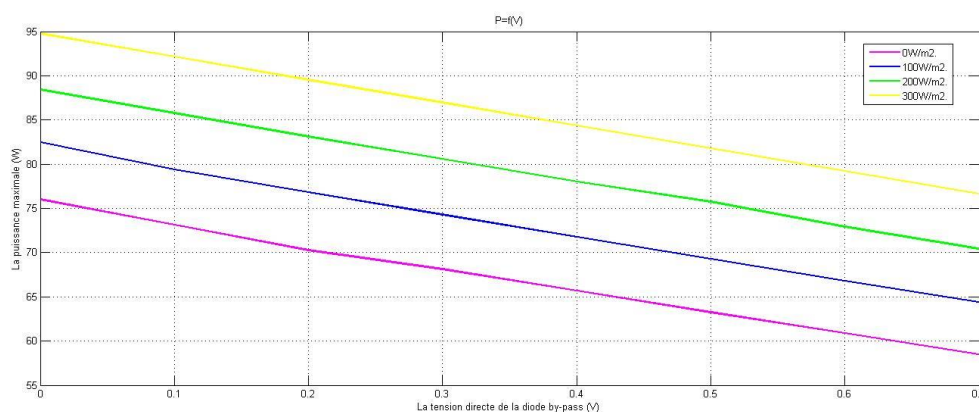


Figure III.22 : La configuration avec 4 modules ombragés. L'éclairage des modules ombragés était compris entre 0 et 300 W/m².

Remarque :

La tension de la diode by-pass affecte la puissance maximale lorsque l'éclairage des modules photovoltaïques ombragés est compris entre 0 et 300 W/m².

Tableau III.4: la puissance maximale pour un éclairage variant de 400-900 W/m²

V _s (V)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
P(400)	116	116	116	116	116	116	116
P(500)	145,1	145,1	145,1	145,1	145,1	145,1	145,1
P(600)	173,7	173,7	173,7	173,7	173,7	173,7	173,7
P(700)	202,1	202,1	202,1	202,1	202,1	202,1	202,1

Chapitre III: Effet de la tension directe de la diode by-pass sur la puissance maximale fournie par un générateur PV.

P(800)	228,8	228,8	228,8	228,8	228,8	228,8	228,8
P(900)	253,8	253,8	253,8	253,8	253,8	253,8	253,8

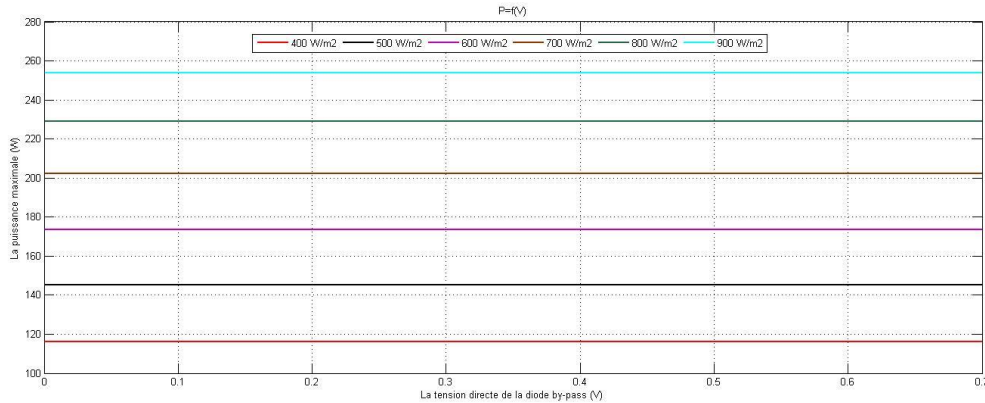


Figure III.23 : La configuration avec 4 modules ombragés. L'éclairement des modules ombragés était compris entre 400 et 900 W/m².

Remarque : La figure 23 montre que la puissance maximale demeure constante avec une augmentation de la tension directe de la diode de bay-pass lorsque l'éclairement sur les modules ombragés est compris entre 400 et 900 W/m².

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié l'effet de la tension directe de la diode by-pass sur la puissance maximale fournie par un générateur PV. En effet, Les résultats obtenus pour les deux générateurs considérés dans cette étude confirment que cette tension directe n'a effet sur la puissance maximale d'un GPV, soumis partiellement à un ombrage partiel, que lorsque celle-ci est fournie pour des tensions inférieures à des niveaux d'ensoleillement également inférieurs. Cependant, le seuil d'éclairement à partir duquel la puissance commence à décroître dépend de la taille du GPV et du nombre de modules sujets à l'ombrage partiel.

Conclusion générale

Dans ce mémoire de fin d'étude, nous nous sommes intéressées plus particulièrement à l'effet de la tension directe de la diode bay-pass sur la puissance maximale, fournie par un générateur PV, en présence de l'ombrage partiel.

Pour la réalisation de notre mémoire, nous avons commencé par introduire des notions générales sur le photovoltaïque avant d'aborder le générateur PV partant bien sûr de la cellule PV élément de base du générateur PV. Les caractéristiques électriques I-V et P-V ont été également présentées. Du fait que le diagnostic du fonctionnement d'un générateur PV peut être réalisé en se basant sur l'analyse de ces caractéristiques, nous avons étudié l'effet d'un ensemble de défauts, fréquemment rencontrés, sur ces caractéristiques. En effet, chaque défaut possède une empreinte bien propre à lui sur les caractéristiques électriques. Par ailleurs, l'objectif primordial de cette présente étude est d'étudier l'impact de la tension directe de la diode bay-pass sur la puissance maximale, fournie par un générateur PV, en présence de l'ombrage partiel. Pour cela, nous avons considéré plusieurs scénarios relatifs à l'ombrage à savoir le nombre de cellules ombragées avec également une variation du pourcentage de l'ensoleillement et de la tension directe (tension de seuil) de la diode by-pass. Lorsque la diode bay-pass est active, elle introduit une chute de tension dans la chaîne photovoltaïque à cause de sa tension directe. Par conséquent, on a généralement supposé que la tension directe de la diode de bay-pass introduisait des pertes en termes de puissance maximale dans la chaîne photovoltaïque. Cependant, les résultats de cette étude ont démontré que ce n'était pas nécessairement vrai. La tension directe de la diode by-pass n'introduisait des pertes de puissance que lorsque la chaîne photovoltaïque délivrait de l'énergie à une tension inférieure. Dans quelques cas d'ombrage partiel, la puissance maximale a été fournie à une tension inférieure, la rendant sensible à la tension directe de la diode de bay-pass et que la tension directe de la diode de bay-pass ne provoquait pas de perte de puissance lorsque la puissance maximale du système photovoltaïque était délivrée à une tension plus élevée.

Comme perspective à ce présent travail, il serait intéressant de penser à une solution pour la prise en compte de la tension directe de la diode bay-pass, en raison de minimiser les pertes en énergie du système PV sous ombrage partiel.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] J.C. Teo, Rodney H.G. Tan, V.H. Mok, Vigna K. Ramachandaramurthy, ChiaKwang Tan « Impact of bypass diode forward voltage on maximum power of a photovoltaic system under partial shading conditions » Energy (Elsevier) 191 (2020) 116491.
- [2] borni abdelhalim «étude et régulation d'un circuit d'extraction de la puissance maximale d'un panneau solaire » magister en électrotechnique. université mentouri de Constantine 05/05/ 2009.
- [3] Y.mebrek « contribution à l'étude et à la modélisation Des éléments d'un système photovoltaïque » mémoire magistère, département de physique université abou-bakr belkaide, telemcen2011
- [4] M.Orgeret, «Les piles solaires, le composent et ces applications» Préface de F.Allest.
- [5] Salim ABOUDA «contribution a la commande des systèmes photovoltaïques: application aux systèmes de pompage» THESE présentée à L'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax université de Reims Champagne-Ardenne 2015.
- [6] S. messaoudi et A. Gouga, « étude comparative de quelques techniques de poursuite du point de puissance maximale d'un générateur photovoltaïque », mémoire d'ingénieur d'état, département d'électrotechnique, université Mohamed khider Biskra,2007
- [7] :Belaout, A.(2018). Etude et diagnostic des défauts fréquents aux systèmes photovoltaïques (PV) par emploi de la caractéristique courant-tension (Doctoral dissertation).
- [8] : Cuong Hung.Tran « Améliorations d'une chaîne de conversion de l'énergie solaire en électricité autonome en vue d'application dans les pays en voie de développement » Thèse de docteur de l'université de Reims Champagne-Ardenne discipline : automatique, signal, productique, robotique 2019.
- [9]. Luc Chancelier et Eric Laurent « l'électricité solaires » Edition : GRET. Ministère de la coopération. France. 1996.
- [10] Anouar, b. E. N. N. A. C. E. U. R., & Imadeddine, b. O. U. D. E. R. B. A. L. A. (2019). Étude et modélisation des défauts d'un générateur photovoltaïque (doctoral dissertation, université Mohamed Boudiaf-Msila).

[11] <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00128644> Submitted on 2 Feb 2007

[12] A.ricaud « module et système photovoltaïque »université de savoie (polytechsavoie) .sept 2008

[13] L. Bun, « Détection et localisation de défauts pour un système PV, » Thèse de doctorat,

[14] Michaël Bressan. Développement d'un outil de supervision et de contrôle pour une installation solaire photovoltaïque. Electronique. Université de Perpignan, 2014. Français.

[15] ATEK Mourad « Effets du taux d'ombrage sur les performances des cellules solaires à base de CIGS » mémoire magistère, département de physique université Ferhat Abbas de SÉTIF 2013

Web1 : <http://www.edfenr.com/>

Résumé

La puissance maximale d'un système photovoltaïque peut diminuer considérablement dans des conditions d'ombrage partiel. Les diodes de dérivation peuvent être utilisées dans les systèmes photovoltaïques pour contourner les modules photovoltaïques ombragés pendant l'ombrage partiel. La diode de dérivation possède une tension directe qui introduit une chute de tension dans le système photovoltaïque lors de l'activation. Par conséquent, la puissance maximale d'un système photovoltaïque peut encore diminuer lors d'un ombrage partiel en raison de la tension directe de la diode de dérivation. Ce mémoire présente une étude sur l'effet de la tension directe de la diode de dérivation sur la puissance maximale d'un système photovoltaïque dans des conditions d'ombrage partiel. Les résultats ont indiqué que la tension directe de la diode de dérivation ne diminuait pas nécessairement la puissance maximale du système photovoltaïque. Cela dépend si la puissance maximale est fournie à une tension inférieure ou supérieure. Lorsque la puissance maximale est délivrée à une tension plus élevée, elle est insensible à la tension directe. Inversement, lorsque la puissance maximale est délivrée à une tension inférieure, elle est sensible à la tension directe.

Mots clés : système photovoltaïque, ombrage, diode by-pass, puissance.

Abstract

In a photovoltaic system, the maximum power delivered can be reduced considerably under conditions of partial shading. Bypass diodes are used in PV systems to protect shaded PV modules against partial shading. The bypass diode has a forward voltage which will cause a voltage drop in the photovoltaic system when it is activated and therefore a probable decrease in the maximum power supplied by the photovoltaic system. In this work, we present a study of the effect of the bypass diode forward voltage on the maximum power of a photovoltaic system in the presence of partial shading. The simulation results obtained for several scenarios demonstrated that the forward voltage of the bypass diode does not necessarily decrease the maximum power of the photovoltaic system. It depends on whether the maximum power is supplied at a lower or higher voltage. When maximum power is delivered at a higher voltage, it is insensitive to forward voltage. However, when the maximum power is delivered at a lower voltage, it is sensitive to forward voltage.

Keywords : Photovoltaic Bypass diode Partial shading P-V characteristics Solar Energy