

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU
FACULTÉ DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DÉPARTEMENT D'ÉLECTROTECHNIQUE



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDE

En vue de l'obtention du diplôme de Master en

Électrotechnique

Option : Machines électriques

THÈME

**Détection et Localisation de Défauts dans un
Système Photovoltaïque**

Réaliser par :

- **Mr:** IMESSAOUDENE Saïd
- **Mr:** LACEB Chafie

Proposé et Encadré par :

- **Mr:** DICHE Arezki
- **Mr:** GHEDAMSI Kaci

Promotion: 2012 / 2013

Table des matières

Table des matières	1
INTRODUCTION GÉNÉRALE	8
CHAPITRE 1.....	12
NOTIONS DE COMPRÉHENSIONS SUR LE PHOTOVOLTAÏQUE.....	12
I.1- INTRODUCTION.....	12
I.2- HISTORIQUE	13
I.3- LE PHOTOVOLTAÏQUE	13
I.3.1- La jonction PN, formation et principe.....	13
I.3.2- Phénomène du photovoltaïque	17
I.3.3- Caractéristique électrique d'une cellule PV	18
I.4- STRUCTURE DU système PV	19
I.4.1- La cellule PV	19
I.4.2- Module PV.....	19
I.4.3- Le String PV	21
I.4.4- Champ PV.....	21
I.5- LE GÉNÉRATEUR PV.....	21
I.6- ASSOCIATION DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES.....	23
I.6.1- Association en série	23
I.6.2- Association en parallèle	24
I.6.3- Regroupement (Mixte)	26
I.7- SYSTÈME DE PROTECTION.....	27
I.7.1- La Diode By-Pass	28
I.7.2- La Diode Anti-Retour.....	29
I.8- CONCLUSION	31
CHAPITRE 2.....	33
LES DIFFÉRENTS MODÈLES ÉLECTRIQUES D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE AINSI QUE L'INFLUENCE DES DIVERS PARAMÈTRES	33
II.1- GÉNÉRALITÉS.....	33
II.2- INTRODUCTION	34
II.3- PARAMÈTRES DE FONCTIONNEMENT D'UNE CELLULE PV.....	35
II.4- DIFFÉRENTS MODÈLES ÉLECTRIQUES.....	36
II.4.1- Modèle une Diode (Exponentielle Simple)	36
II.4.2- Modèle à deux diodes.....	40

II.5- CONCLUSION	42
II.6- Caractéristiques d'un module PV	43
II.7- ÉTUDE du Modèle BISHOP :	45
II.7.1- Résolution du modèle de la cellule	46
II.8- Configuration retenue.....	47
II.9- Modélisation d'un champ PV (fonctionnement sain)	48
II.10- Application numérique d'illustration	49
L'INFLUENCE des DIFFÉRENTS PARAMÈTRES dans le SYSTÈMES pv	50
II.11- Introduction	50
II.12- Facteur limitation du rendement.....	51
II.12.1- Influence de l'éclairement	51
II.12.2- Influence de la température	52
II.13- Influence des cinq paramètres sur la caractéristique I (V)	54
II.13.1- L'Effet du courant photovoltaïque I_{ph}	54
II.13.2- L'Effet du courant de saturation de la diode I_0	56
II.13.3- L'Effet du facteur d'idéalité	57
II.13.4- L'Effet de la résistance série R_s	58
II.13.5- Résistance parallèle R_{sh}	59
II.14- Conclusion	60
CHAPITRE 3.....	62
CARACTÉRISATION DE DÉFAUTS SUR LES SYSTÈMES PV.....	62
III.1- Introduction	62
III.2- Objectif.....	62
III.3- Plan suivie pour la modélisation des différents défauts	63
III.4- Les défauts et anomalies d'un champ PV retenues	64
III.5- Les Différents Défauts	64
III.5.1- Défaut de Mismatch et d'ombrage.....	64
III.5.1.1- Définition.....	64
III.5.1.2- Modélisation	66
III.5.1.3- Exemple explicatif	73
III.5.1.4- Application	75
III.5.2- Défauts de diodes de By-pass	78
III.5.2.1- Modélisation	79
III.5.3- Défauts de module.....	84
III.5.3.1- Modélisation	84

III.5.3.2- Application	85
III.5.4- Défaut de connectique	86
III.5.5- Défaut de diode Anti-Retour.....	87
III.5.5.1-Modélisation	88
III.6- Validation	93
III.6.1- Comparaison dans le cas d'un module	93
III.6.2- Comparaison dans le cas d'un string	94
III.7- Conclusion.....	95
CHAPITRE 4.....	97
COMMANDE POUR LA RECHERCHE DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE (MPPT)	97
IV.1- Introduction	97
IV.2- PROCÉDURE	97
IV.2.1- APPLICATION DE LA MÉTHODE (P&O).....	97
IV.2.2- Explication.....	98
IV.3- Modélisation	100
IV.3.1- 1 ^{ere} Condition (Variation de l'éclairement).....	100
IV.3.2- 2 ^{ÈME} Condition (Variation de la température)	101
IV.4- Conclusion.....	102
CHAPITRE 5.....	104
LOCALISATION DE DÉFAUTS SUR UN système PHOTOVOLTAÏQUE.....	104
V.1- Introduction	104
V.2- But de l'étude	105
V.3- Procédure.....	105
V.3.1- Identification des symptômes	106
V.3.2- Symptômes retenus pour notre étude	107
V.3.1- Signatures de défauts retenus pour un cas de Module.....	108
V.4- Modélisation	108
V.4.1- Calcul des symptômes	109
V.4.2- Application.....	110
V.4.3- Résultat.....	110
V.5- Conclusion.....	111
Conclusion Générale	113

Remercîments

Au terme de notre travail nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à sa réalisation.

*Nous remercions notre promoteur, monsieur **DICHE Arezki** pour sa disponibilité et ses orientations afin de mener à bien notre travail. Nos remerciement vont également à notre Co-promoteur monsieur **GHE DAMSI Kaci** qui malgré son éloignement, nous a beaucoup aider avec lucidité et efficacité dans les informations transmises et les orientations suggérées.*

Nous tenons aussi à remercier toutes les personnes qui nous ont encouragés pour aller au bout de notre travail, en particulier nos familles avec leur soutien indéfectible.

Nos derniers remerciements vont aux membres de jury qui nous feront l'honneur de juger notre travail.

Ma Dédicace

Pour leurs soutiens au quotidien et leurs contributions du mieux qu'ils peuvent, ce travail ne peut être dédié en premier lieu qu'à ma famille, Mon père Abderrahmane, ma mère Dahbia, mes frères : Abdelhafid, Abdelaziz(Samir), Abdelhamid, mes sœurs : Kahina, Fatima(Saïda), Ouiza, Et Meriem ainsi qu'à mes neveux et mes nièces, sans oublier bien sur mon grand-père Madjid, ma grand-mère Ouiza, mes oncles et tantes, ainsi que tous mes cousins et cousines en particulier Madjid, et enfin à toute ma grande famille sans exception.

Je dédie également ce travail : A tous mes amis, Saïd mon binôme, Kamel, Djamal, et à tous les étudiants de ma promotion.

Je ne pourrai oublier deux personnes, chère et unique à moi, qui n'ont jamais cessé de me soutenir malgré leurs éloignements, elles trouvent ici ma gratitude et ma reconnaissance profonde Merci à toi Samia.K et Josiane-T.T.H.

Merci à tous.

CHAFIE

DÉDICACE

En premier lieu, je ne peux dédier ce travail qu'à ma famille : mon père Arezki, ma très chère mère Ouardia et mes frères Mokrane, Akli, Boussad, Djafar, Achour et également mon demi-frère Alexis et enfin mes cousins et cousines et toute ma grande famille.

Je dédie également ce travail :

A tous mes amis(es), Kamal, Chafie (R), Djamal, Sid Ali, Malik, Rabah, Mohand et son épouse.

A tous mes collègues et camarades.

Un grand Merci à tous.

Saïd

INTRODUCTION

GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

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. À 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. Dans le cadre de ce travail, on s'intéresse à l'énergie solaire photovoltaïque [1].

L'énergie photovoltaïque a connu un développement extraordinaire en l'espace de 50 ans. Son essor est devenu une priorité, sinon une nécessité de survie à l'échelle humaine pour se détourner de la course insensée vers le mur invisible des contraintes et du fini.

La recherche spatiale a permis de financer les recherches initiales. La compréhension des phénomènes physiques qui a découlée de ces recherches a permis à de nombreux matériaux d'être développés avec succès par la suite, petit à petit, grâce aux différents facteurs stimulants voire la réduction du coût des matières utilisées, la baisse des coûts de production, et une meilleure maîtrise de la technologie, les panneaux photovoltaïques ont quitté l'espace et les quelques sites isolés pour être généralisés et utilisés au niveau domestique. Les politiques d'incitation et de soutien gouvernementales, ont permis l'essor de cette filière arrivée à maturité qui connaît depuis maintenant 20 ans des taux de croissance à deux chiffres.

Grace aux bonds et rebonds significatifs en matière de performances et de coût, l'investissement sur une installation photovoltaïque devient de plus en plus attrayant et intéressant.

Cependant comme tous les autres processus industriels, un système photovoltaïque peut être soumis, au cours de son fonctionnement, à différents défauts et anomalies conduisant à une baisse de la performance du système voire à l'indisponibilité totale du système [2].

Ces conséquences défavorables vont avoir un effet néfaste, et ainsi réduire la productivité, et donc la baisse du profit de l'installation, sans oublier le coût de maintenance afin de remettre le système en état sain.

La fiabilité des systèmes PV joue un rôle très important. En effet, un système PV est soumis à diverses sollicitations (humidité, températures, chocs, ... etc.) qui peuvent avoir un impact de manière significative sur le fonctionnement et la sécurité du système en question. Il est donc fondamental de pouvoir établir une surveillance rigoureuse capable de détecter les défaillances. Dans ce cas les techniques de diagnostic, de détection et de localisation de défauts peuvent être combinées pour garantir une performance optimale du système, et ainsi réduire les coûts de maintenance et surtout augmenter la productivité en augmentant le taux de disponibilité des installations afin d'avoir un meilleur rendement.

Accroître les options de surveillance, de diagnostic et de supervision nous conduira à parler du coût, c'est ce qui ne devra pas être ressenti par l'acheteur.

Il existe plusieurs méthodes de détection et de localisation de défauts, telles que les systèmes de monitoring qui permettent de calculer la puissance fournie par les panneaux et l'énergie associée par l'intermédiaire de capteurs de tension et de courant. Mais aussi des services qui permettent de faire la corrélation entre la production d'une installation et les conditions météorologiques et ce grâce à des satellites. L'inconvénient c'est qu'elles ne permettent pas de détecter et localiser en temps bref et réel suite à l'apparition d'un défaut quelconque.

Dans ce qui suit, nous nous intéresseront donc à établir une relation causale entre les principaux défauts considérés et la caractéristique résultante, et ensuite développer un algorithme de détection et de localisation de défauts .

Le travail présenté dans ce mémoire a porté sur la détection et localisation de défauts côté DC du système PV, c'est-à-dire du côté générateur PV.

Nous avons présenté ce manuscrit de la façon suivante :

- Dans le premier chapitre, nous décrivons les notions essentielles, les rappels théoriques portant sur le phénomène photovoltaïque, nous allons développer quelques notions de base sur les propriétés des semi-conducteurs qui sont fortement liées à ce phénomène, nous discuterons aussi des systèmes de protection nécessaire pour comprendre les paragraphes portant sur la détection et localisation des défauts.

- Le second chapitre est consacré à la modélisation des cellules photovoltaïques, trois modèles seront étudiés et développés à savoir le modèle à une diode, modèle deux diodes, et le modèle Bishop. Pour représenter les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ ainsi que le comportement non linéaire des cellules PV, nous parlerons par la suite de l'influence des différents paramètres qui sont importantes pour pouvoir ensuite classifier le type de défaut responsable de la variation de ces paramètres.
- Dans le troisième chapitre on parlera de la caractérisation des défauts sur les systèmes PV, nous allons pour cela concevoir un modèle d'un champ PV défaillant qui permet d'obtenir la caractéristique $I-V$ à une condition de fonctionnement donnée (ensoleillement, température) pour un défaut quelconque et pour une configuration quelconque.

Afin de valider notre travail sur la caractérisation de défauts, Nous allons donc procéder à une série de comparaison entre quelques caractéristiques courant-tension obtenues dans notre étude de modélisation, et celle obtenues et enregistrés par [2], Aux conditions réelles de température et de rayonnement.

- Le quatrième chapitre portera sur l'étude de la MPPT, nous rappellerons la principale technique de poursuite MPPT voire la meilleure et la plus utilisée qui est la méthode P&O (perturbation et observation). Et par la suite exploiter les résultats, analyser les grandeurs courant tension pour une localisation et identification de défauts qui sera présenter dans le chapitre cinq.
- On terminera notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I

*Notions de compréhension sur le
photovoltaïque*

CHAPITRE 1

NOTIONS DE COMPRÉHENSIONS SUR LE PHOTOVOLTAÏQUE

I.1- INTRODUCTION

Le soleil fournit chaque jour à la terre, par son rayonnement, l'équivalent de plusieurs milliers de fois la consommation énergétique globale de l'humanité pour ses activités. Le seul problème est de convertir l'énergie solaire en une énergie utilisable. C'est pourquoi, l'Homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque.

Ce phénomène (photovoltaïque) fut découvert au 19^{ème} siècle par le physicien Alexandre Edmond Becquerel. La première cellule photovoltaïque fut développée début 1954.

Resté très longtemps comme une curiosité de laboratoire, l'effet photovoltaïque a d'abord connu une utilisation dans le domaine du spatial durant les années quarante et cinquante, avant d'être utilisé comme source d'énergie en site isolé à partir des années soixante-dix, et de connaître le développement qu'on lui connaît aujourd'hui en application connectée au réseau [3].

De nos jours le photovoltaïque prend une place prépondérante, et cela revient à sa fiabilité et son concept respectueux de l'environnement.

Dans ce chapitre, nous aborderons, dans une première partie, le domaine photovoltaïque dans sa généralité ainsi que quelques notions de base sur les propriétés des semi-conducteurs qui sont fortement liées à ce phénomène.

Nous développerons les caractéristiques des cellules PV et leur modélisation dans le cas des groupement série ou parallèle, ou mixte, afin de définir leurs modes de fonctionnement. Nous étudierons ensuite les éléments de sécurité à introduire lors de la réalisation d'un module ou d'un champ PV. La compréhension du fonctionnement d'un générateur PV nous permettra d'appréhender les impacts importants que provoque l'interconnexion de générateurs PV ayant des caractéristiques différentes (mismatch) sur la production.

I.2- HISTORIQUE

- 1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.
- 1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.
- 1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.
- 1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- 1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.
- 1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie [4].

- **Remarque**

Pour bien comprendre le principe de fonctionnement d'une cellule solaire, la jonction P-N sera étudiée. En effet, elle représente la majorité des cellules commercialisées actuellement.

I.3- LE PHOTOVOLTAÏQUE

I.3.1- La jonction PN, formation et principe

Le silicium, comme tous les semi-conducteurs, a une bande de valence pleine et une bande de conduction vide. Mais grâce à un apport énergétique suffisant, il est possible de faire passer des électrons de la bande de valence (BV) à la bande de conduction (BC), d'où la génération d'électrons libres voir Fig.I.0.

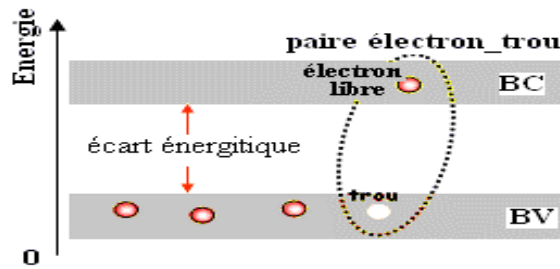


FIG. I.0 GÉNÉRATION DE LA PAIRE ÉLECTRON-TROU.

La présence d'électrons libres dans la bande de conduction d'un matériau n'est pas suffisante pour générer un courant : il est nécessaire de créer une différence de potentiel aux bornes du photogénérateur afin d'entraîner les charges positives d'un côté et les charges négatives de l'autre. Cette opération est possible par dopage du Silicium.

Une jonction PN est créée par l'assemblage de deux barreaux de Silicium de type N et P. Le composant ainsi créé est appelé diode, voir Fig. I.1

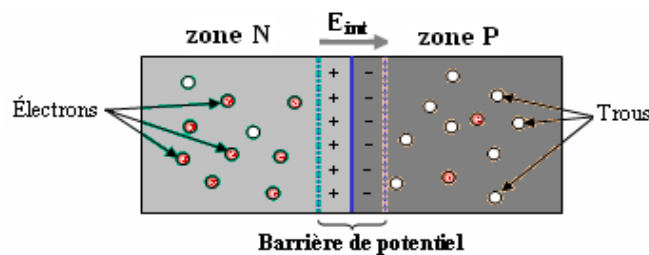


FIG. I.1 LA JONCTION PN.

Analysons le fonctionnement d'un tel dispositif. Imaginons que l'on sépare la jonction en deux parties :

Si on relie la région (N) au pôle négatif d'un générateur et la région (P) au pôle positif c'est ce qu'on appelle (polarisation directe). Les électrons libres de la région (N), ainsi que les trous libres de la région (P), vont vers la jonction, vu le sens de polarisation.

Donc, si les deux parties sont en contact, un courant passe. Les électrons sont injectés dans la région (P) et les trous dans la région (N).

Si maintenant on polarise la jonction en sens inverse, les électrons allant vers le pôle (+) et les trous vers le pôle (-), ils s'éloignent de la jonction, laissant au voisinage de celle-ci des charges dues aux impuretés ionisées. Si l'on met les deux parties en contact, on a au voisinage une région isolante, et la résistance du dispositif en polarisation inverse sera donc très élevée.

La jonction (N-P) joue donc le rôle d'un redresseur laissant passer le courant électrique en polarisation directe et présentant une très forte résistance en polarisation inverse.

Si l'on soumet une jonction PN de faible épaisseur à un flux lumineux, des paires électron-trou sont créées par les photons dont l'énergie est supérieure à la largeur de la bande interdite du matériau. Il en résulte une augmentation du courant inverse de saturation proportionnelle au flux lumineux. Physiquement, cet effet se traduit de deux manières selon le quadrant de fonctionnement du dispositif :

- Dans le 3^{ème} quadrant, le système fonctionne en récepteur dont la résistance varie fortement avec l'éclairement, c'est la photorésistance,
- Dans le 4^{ème} quadrant, le système fonctionne en générateur dont le courant de court-circuit est proportionnel à l'éclairement et dont la tension à vide est celle de la diode en polarisation directe (0.5 à 0.8 Volts pour Si); c'est la cellule photovoltaïque à jonction PN [5].

Nous allons maintenant nous intéresser uniquement au quadrant (4) pour la réalisation de générateurs photovoltaïques à partir de cellules photovoltaïques.

Pour cela, on inverse la convention sur le signe du courant de la Fig.I.2, on représente les caractéristiques dans un nouveau repère $I=f(V)$ donné par la Fig.I.3 où le courant de saturation inverse est compté positivement. I_{CC} représente le courant de court-circuit et V_{CO} la tension en circuit ouvert de la cellule photovoltaïque [5].

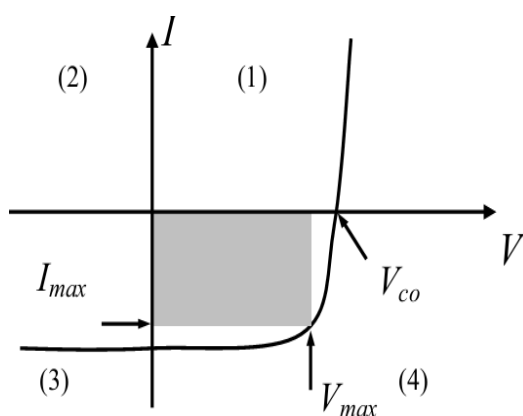


FIG.I.2 CARACTÉRISTIQUE I-V EN CONVENTION RÉCEPTEUR

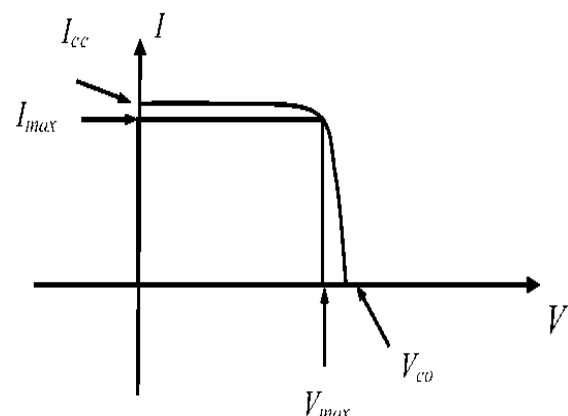


FIG.I.3 CARACTÉRISTIQUE I-V DANS LE NOUVEAU REPÈRE

La Fig.I.4 suivante explicite le rapport Diode / Cellule : [6].

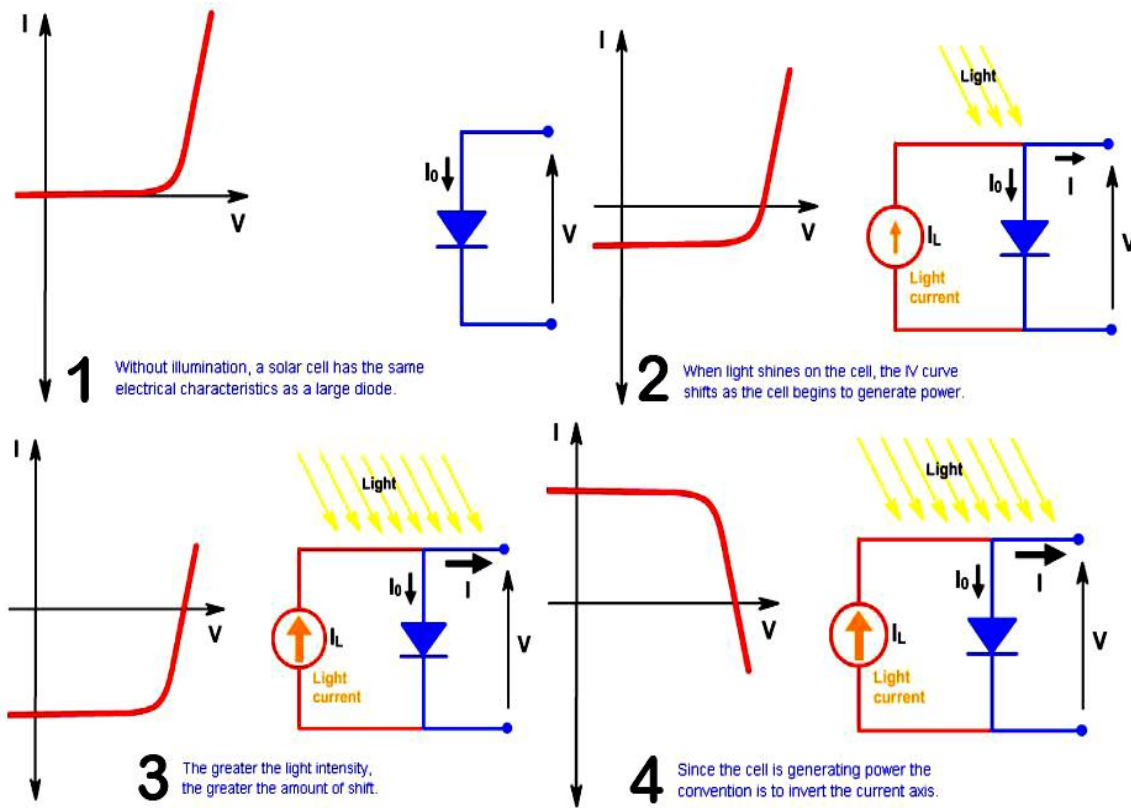


FIG.I.4 CARACTÉRISTIQUE I-V D'UNE CELLULE SOLAIRE

1. Sans éclairage, une cellule solaire a les mêmes caractéristiques électriques qu'une diode classique.
2. Lorsque la lumière brille sur la cellule, la courbe IV se déplace et se décale, la cellule commence à produire de l'énergie.
3. Plus l'intensité lumineuse est importante, plus la quantité d'énergie est importante et le décalage est important aussi.
4. Étant donné que la cellule génère de la puissance (énergie), la convention est d'inverser l'axe.

1.3.2- Phénomène du photovoltaïque

La structure d'une cellule photovoltaïque est illustrée dans la fig.I.5 ci-dessous.

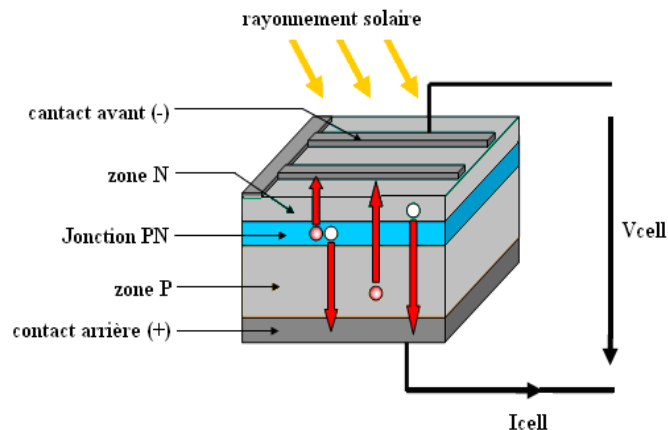


FIG.I.5 STRUCTURE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE.

Une cellule PV est réalisée à partir d'un matériau semi-conducteur (par exemple le silicium). Sa réalisation est comparable à une diode classique.

La cellule est composée de deux différentes couches. La couche supérieure est dopée N et la couche inférieure est dopée P créant ainsi une jonction PN.

Si on illumine maintenant une jonction PN. Et lorsque les grains de lumière (les photons) heurtent la surface de ce matériau, ils transfèrent leur énergie aux atomes de la matière. Ce gain d'énergie libère des électrons de ces atomes, créant des trous et des électrons. Ceci engendre donc une différence de potentiel entre les deux couches qui est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. Cette différence de potentiel crée un champ E qui draine les porteurs libres vers les contacts métalliques des régions P et N. Il en résulte alors un courant électrique et une différence de potentiel dans la cellule PV. C'est le principe de base d'une cellule photovoltaïque [3].

La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (V_{OC}). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit (I_{CC}) et dépend fortement du niveau d'éclairement [1].

Le courant et la tension fournis par une cellule PV dépendent de différents paramètres que nous allons expliciter ci-après [3].

1.3.3- Caractéristique électrique d'une cellule PV

Une cellule photovoltaïque fonctionne normalement en générateur, par contre lorsqu'il s'agit d'interconnexion avec d'autres cellules, il se peut que cette cellule fonctionne en mode récepteur, en absorbant l'énergie débitée par les autres cellules, la caractéristique électrique d'une cellule dans les différents régimes est illustrée dans la Fig.I.6

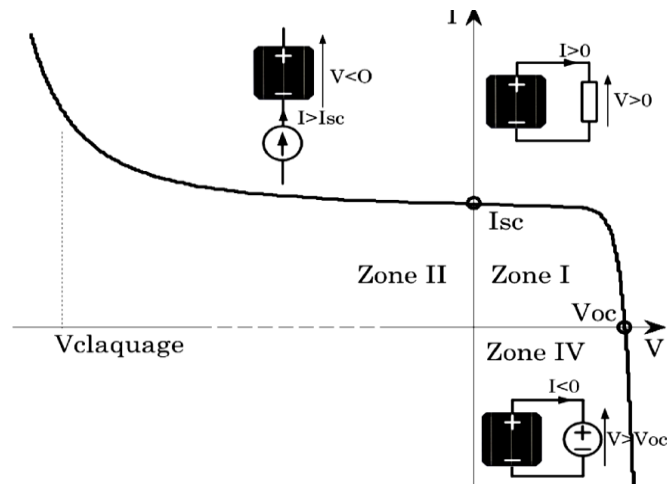


FIG.I.6 CARACTÉRISTIQUE I-V D'UNE CELLULE PV. [2]

-(I_{sc}): le courant de court-circuit qui correspond au courant quand la cellule est court-circuitée. Ce courant de court-circuit est proportionnel à la surface de la cellule qui capture la lumière

-(V_{CO}) : tension de circuit ouvert est la tension aux bornes de la cellule quand il n'y a pas de courant. Sa valeur est de l'ordre de 0.6 V pour la cellule de type cristallin.

- La zone I de la Fig.I.6 correspond au fonctionnement en générateur de la cellule. C'est le fonctionnement dit normal de la cellule dans lequel elle débite la puissance produite à la charge.
- La zone II correspond au fonctionnement en récepteur de la cellule. Quand le courant traversant la cellule est forcé par un circuit extérieur à dépasser son courant de court-circuit, la cellule produit une tension négative à ses bornes. La croissance en courant provoquera l'endommagement de la cellule si la tension à ses bornes atteint une limite : la tension de claquage ($V_{claquage}$).
- La zone IV correspond de nouveau au fonctionnement en récepteur de la cellule.

Quand la tension aux bornes de la cellule est amenée à dépasser sa tension de circuit ouvert, un courant inverse circule dans la cellule. Si ce courant inverse dépasse une limite, la cellule sera irrémédiablement endommagée.

I.4- STRUCTURE DU système PV

I.4.1- La cellule PV

La cellule PV est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs [3].

Lorsqu'elle est illuminée, le déséquilibre de la charge électrique dans les deux couches (P et N) provoque un mouvement de la charge à travers la jonction produisant ainsi de l'électricité.

La tension générée par une cellule photovoltaïque est limitée à la valeur du gap du matériau dont elle est issue. Elle est de l'ordre de 0.6 V pour les cellules de type cristallin et amorphe. [2], Généralement cette tension générée peut varier entre 0.3V et 0.7V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule [1].

Pour le courant, il est en fonction de la surface de la cellule et pour une même surface, il dépend du rendement de la cellule. Le rendement des cellules monocristallines est de l'ordre de 15 à 22%, tandis celui des cellules multi cristallines est de l'ordre de 10 à 15% [2].

I.4.2- Module PV

Un module PV est le plus petit ensemble de cellules solaires, individuelles reliées électriquement entre elles. De plus, les cellules PV sont fragiles et sensibles, c'est pour cette raison qu'elles sont assemblées en modules et munies d'une protection mécanique (l'encapsulation), de sorte qu'elles soient protégées de l'environnement extérieur et de sorte que l'utilisateur est protégé contre les chocs électriques, mais aussi d'un dysfonctionnement qui peut être destructif [3, 6, 2].

L'ensemble cité ci-dessus est composé d'un certain nombre de cellules solaires qui sont installées en série et en parallèle dans une armature, comme cela est représenté sur la Fig.I.7

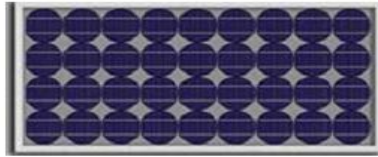


FIG.I.7 MODULE PHOTOVOLTAÏQUE

Vu que La tension et le courant et donc la puissance d'une seule cellule n'est pas adaptée et surtout insuffisante aux applications courantes, il est donc nécessaire de les associer afin de répondre aux exigences de ces dernières.

Les cellules sont généralement connectées en série dans les modules courants commercialisés. Un module PV « classique » contient 36 ou 72 cellules. Mais ce nombre de cellules peut varier selon les modules servant aux applications spécifiques. On peut donc trouver des modules de 40, 54, 60 ou même 92 cellules en série [2].

La question donc mérite d'être posée à ce niveau, pourquoi les cellules sont généralement connectées en série ?

Cela repose encore sur des raisons historiques. À l'origine, l'énergie solaire était réservée aux applications en sites isolés. La tension de fonctionnement de ces installations était donc imposée par la tension des batteries utilisées pour stocker l'énergie. Ces systèmes fonctionnant avec des batteries en plomb, leurs tensions étaient de 12V, 24V ou 48V. Cette raison historique explique que la quasi-totalité des modules existants aujourd'hui aient encore une tension de sortie de 12 ou 24V. Les modules étant conçus pour pouvoir fonctionner sur ces systèmes, ils ne sont en réalité qu'une mise en série de cellules pour obtenir la tension désirée, 36 cellules pour 12V ($b=2$) et 72 cellules pour 24V ($b=4$). Aujourd'hui, très peu d'études remettent ou ont remis en cause cette conception historique qui se retrouve non optimisée pour le fonctionnement connecté au réseau [3]. La conception d'un module photovoltaïque impose de s'assurer que les composants de ce dernier ne risquent pas d'être détruits au cours d'un fonctionnement dans les quadrants 2 et 4. Dans ces zones les cellules PV fonctionnent en récepteurs et des risques de destruction existent. Pour se protéger de ces risques deux types de protection sont mis en place dans les installations photovoltaïques: la diode by-pass et la sécurité contre-courant [3].

La Fig.I.8 et Fig.I.9 montrent respectivement un module contenant 36 cellules interconnectées en série [2]. Et un module avec x cellules en série et (a) Blocs en parallèle et (b) Blocs en série

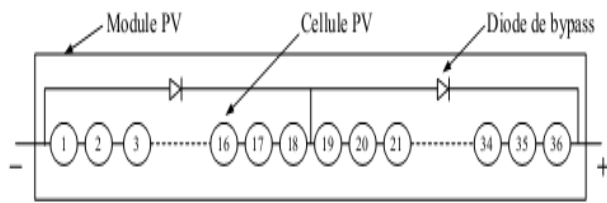


FIG.I.8 MISE EN SÉRIE DES CELLULES PV DANS LE MODULE

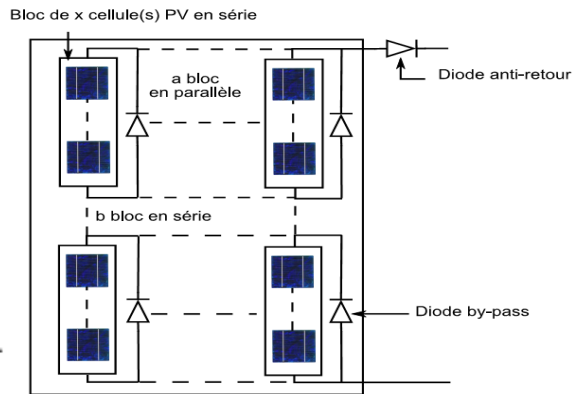


FIG.I.9 MODULE PV AVEC X CELLULES EN SÉRIE ET A BLOCS EN PARALLÈLE ET B BLOCS EN SÉRIE

Les cellules dans un module sont associées en plusieurs groupes. Chaque groupe est ensuite connecté en antiparallèle avec une diode, appelée diode de bypass ou diode de dérivation (On compte généralement 18 cellules pour une diode de bypass). Cette diode sert à protéger les cellules contre leur fonctionnement dans le régime inverse [2]. Nous aborderons le rôle de cette Diode dans ce qui suit.

1.4.3- Le String PV

Chaine photovoltaïque, ou String, est un ensemble de modules connectés en série afin de générer la tension de sortie spécifiée [2].

1.4.4- Champ PV

Un champ PV est le regroupement de modules en série et en parallèle dans le but d'obtenir une puissance suffisamment grande pour les applications souhaitées.

1.5- LE GÉNÉRATEUR PV

Le générateur photovoltaïque est l'unité de production d'énergie électrique sous forme de courant continu. Le composant élémentaire de cette unité qui convertit l'énergie solaire en l'énergie électrique est la cellule photovoltaïque.

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 (PPM). Fig.I.10

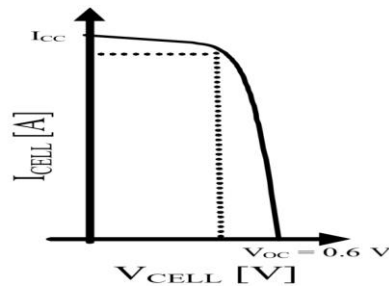


FIG.I.10 CARACTÉRISTIQUE I(V) D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE,

Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur et donc la puissance. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera [1,2].

Étant la tension délivrée par une cellule PV étant très faible [7], Le générateur photovoltaïque est constitué de plusieurs modules assemblés en série et en parallèle selon la puissance demandée. Chaque module est lui-même constitué de cellules photovoltaïques généralement montée en sérié.

Celles-ci sont encapsulées dans une même structure pour former un module.

L'encapsulation ainsi réalisée va avoir deux principaux rôles [8] :

- Protection des cellules contre les agressions extérieures (chocs, humidité, corrosion, poussière ... etc).
- Contrôle de température des cellules qui vont permettre une bonne dissipation vers l'extérieur de la partie de l'énergie incidente qui n'est pas transformée en énergie électrique.

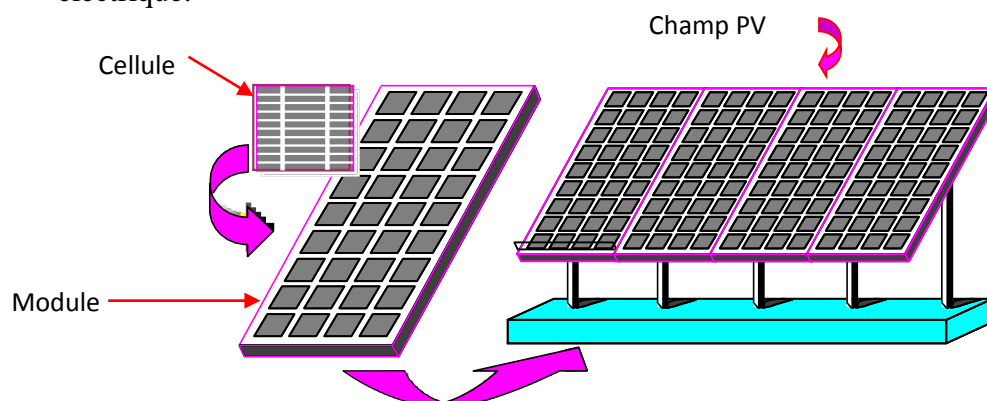


FIG.I.11 COMPOSANT D'UN GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE.

Nous allons présenter le comportement de cellules PV lors de ces différentes connexions.

I.6- ASSOCIATION DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

Notons que nous avons pris un exemple de deux (2) cellules que nous avons assemblé en série, ensuite en parallèle, cela juste dans le but d'illustrer ce comportement.

I.6.1- Association en série

Une association de (Ns) cellules ou de modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais cela permet d'augmenter proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. Les équations résument la caractéristique électrique d'une association série de (Ns) cellules [9,10].

Avec :

$$V_{coNS} = NS * V_{co} \quad (1.0)$$

$$I_{ccNS} = I_{cc}$$

V_{coNS} : La somme des tensions en circuit ouvert de NS cellules en série

I_{ccNS} : Courant de court-circuit de NS série

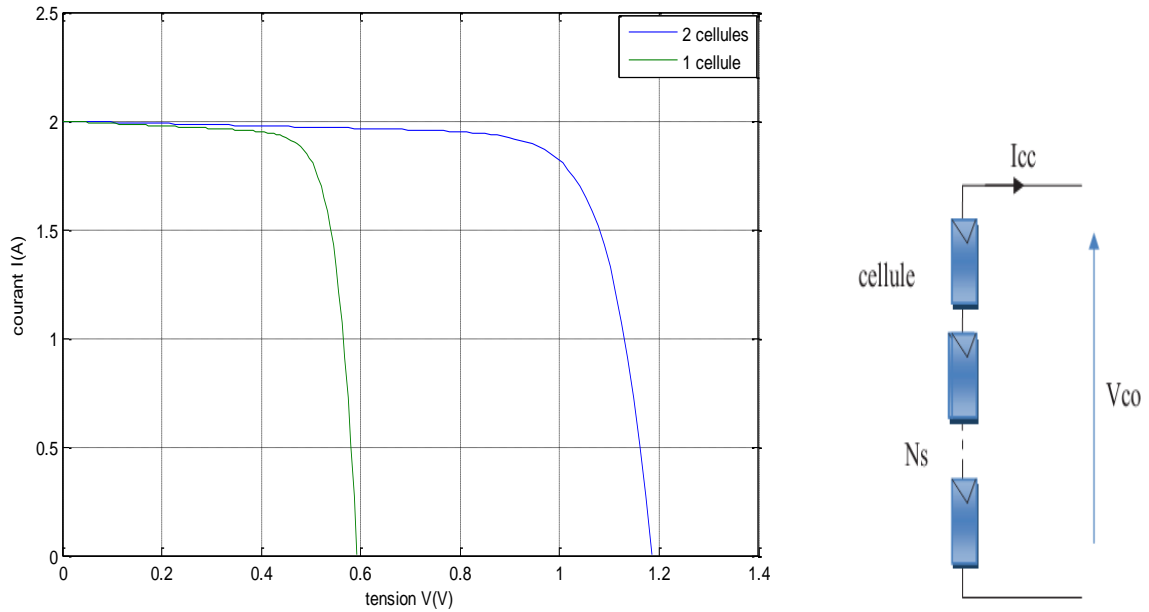


FIG.I.12 REGROUPEMENT DE CELLULES EN SÉRIE (EXEMPLE DE 2 CELLULES)

1.6.2- Association en parallèle

Une association parallèle de (NP) cellules, est possible et permet d'accroître (proportionnellement au nombre de cellules ou modules en parallèle dans la branche), le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants [9,10].

Les équations au-dessous résument les caractéristiques électriques d'une association parallèle de NP cellules.

Avec:

$$I_{scNP} = NP \cdot I_{sc} \quad (1.1)$$

$$V_{oc} = V_{ocNP}$$

I_{scNP} : la somme des courants de court circuit de (NP) cellule en parallèle

V_{ocNP} : tension du circuit ouvert de (Np) cellules en parallèle

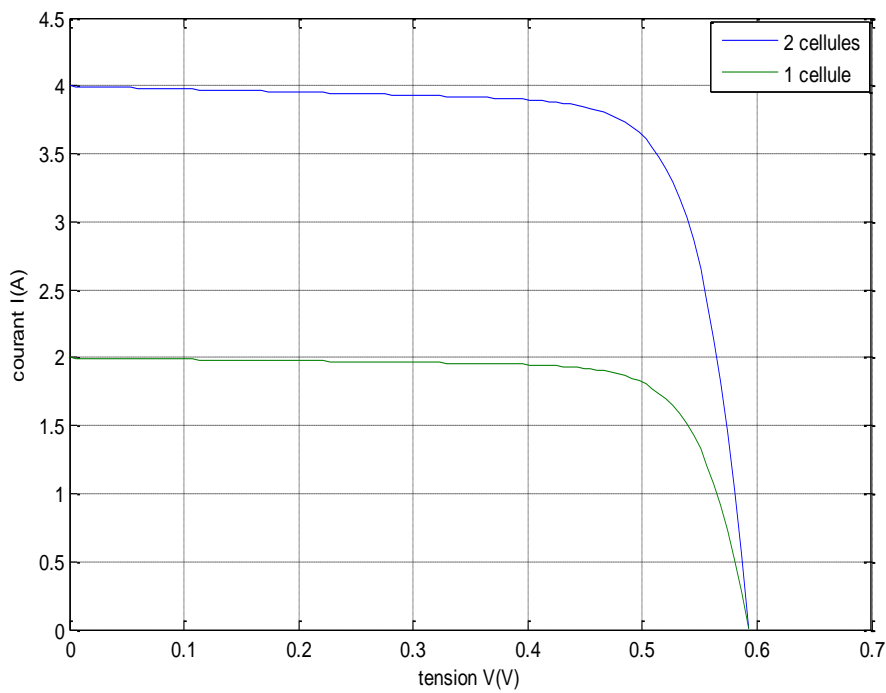
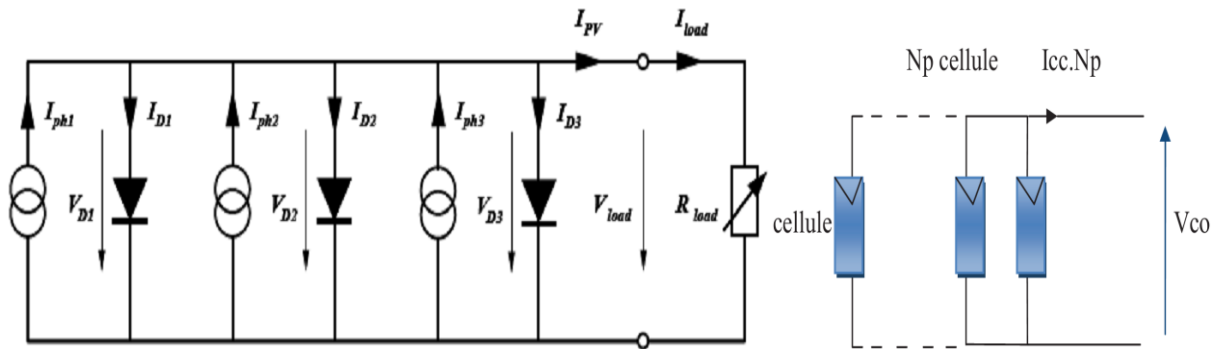


FIG.I.13 REGROUPEMENT DE CELLULES EN PARALLÈLE (EXEMPLE DE 2 CELLULES)

En résumé, pour tracer la caractéristique équivalente d'un groupement de cellules PV :

- En parallèle, il faut se placer à tension donnée et sommer les courants de chaque cellule. Il faut renouveler cette opération pour toutes les tensions entre 0V et V_{co}
- En série, il faut cette fois-ci se placer à courant donné et sommer les tensions des différentes cellules à ce courant.

I.6.3- Regroupement (Mixte)

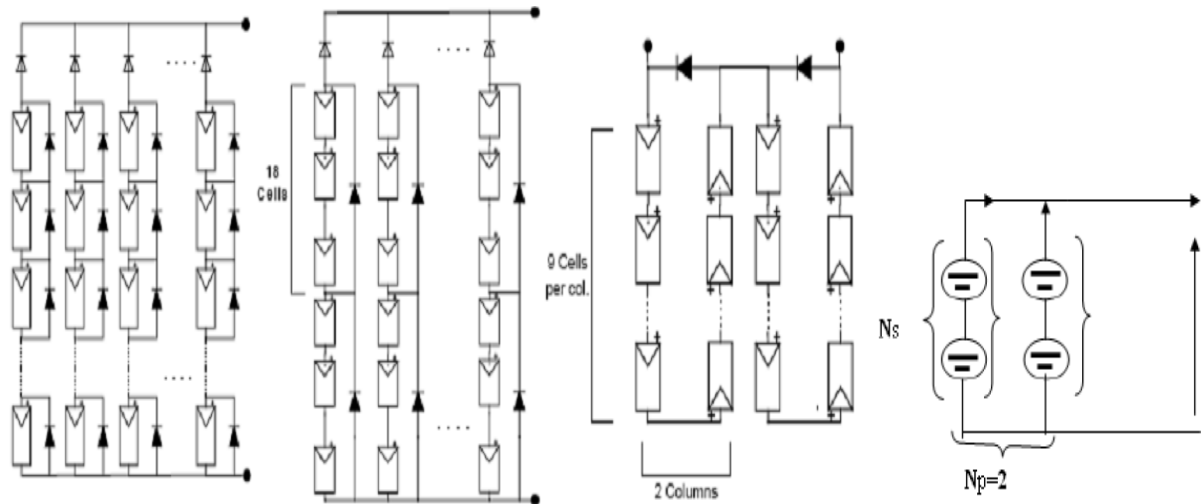


FIG.I.14 ASSOCIATION MIXTE DES MODULES.

Actuellement la puissance d'un module est de quelques watts à plusieurs dizaines de watts. Pour obtenir des puissances supérieures, il est nécessaire d'associer en série-parallel des modules pour avoir un générateur PV [8].

Le courant et la tension aux bornes d'un générateur photovoltaïque sont exprimés par la relation suivante :

$$\begin{aligned} I_M &= N_p \cdot I_c \\ V_M &= N_s \cdot V_c \end{aligned} \quad (1.2)$$

Où :

- I_c, V_c : Sont le courant et la tension aux bornes de module PV respectivement.
- I_M, V_M : Sont le Courant et la tension aux bornes du générateur PV respectivement.
- N_s, N_p : Sont le Nombre des modules connectées en série et en parallèle respectivement.

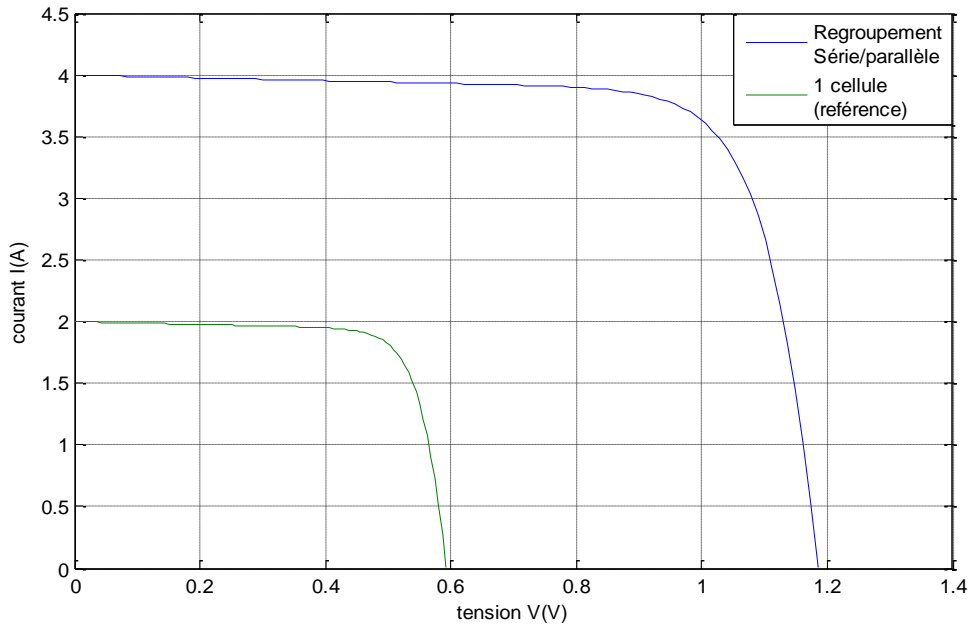


FIG.I.15 REGROUPEMENT (MIXTE) (EXEMPLE DE 2 CELLULES)

I.7- SYSTÈME DE PROTECTION

Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter la durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage. Pour cela, deux types de protections sont classiquement utilisées dans les installations actuelles :

- la protection en cas de connexion en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour)
- la protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass) et éviter les points chauds.

La Fig.I.16 illustre ces deux protections.

Nous rappelons dans les paragraphes suivants le fonctionnement de ces deux protections [1].

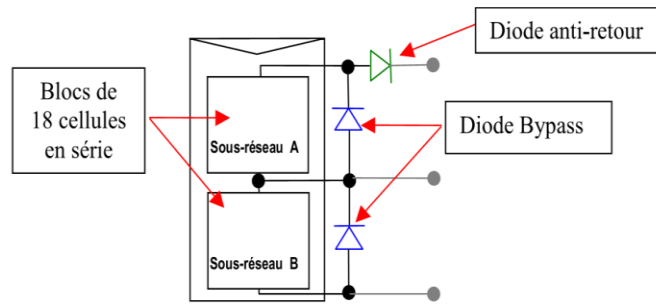


FIG.I.16 DISPOSITION DES DIFFÉRENTES PROTECTIONS VOIR : LA DIODE BYPASS ET ANTI-RETOUR

I.7.1- La Diode By-Pass

Il est possible, par exemple sous l'effet d'un ombrage ou de la température que toutes les cellules placées en série n'aient pas les mêmes caractéristiques, et les cellules grises (moins ombrées) ne seront pas en mesure de produire autant de courant que les cellules non ombrées, créant ainsi des déséquilibres et des échauffements ou même déformer ou éclater la plaque en verre des panneaux [3].

Par ailleurs, quand un module devient grisé sa diode de dérivation devient «polarisée» et commence à conduire. Tout le courant supérieur au nouveau courant de court-circuit de la cellule ombragée est «court-circuité» par la diode, cela réduit considérablement la quantité de chauffage local à la zone ombrée.

En fin lors d'un assemblage de cellules PV en série, il est nécessaire de mettre une diode de by-pass pour empêcher le fonctionnement dans la zone II (en inverse) d'une cellule ombrée et ainsi empêcher la destruction de celle-ci.

Notons que dans les faits, pour des raisons économiques et de simplicité de réalisation, une diode de by-pass est placée en parallèle de chaque groupe de 18 cellules constituant le module [3].

La Fig.I.17 illustre le fonctionnement de cette Diode

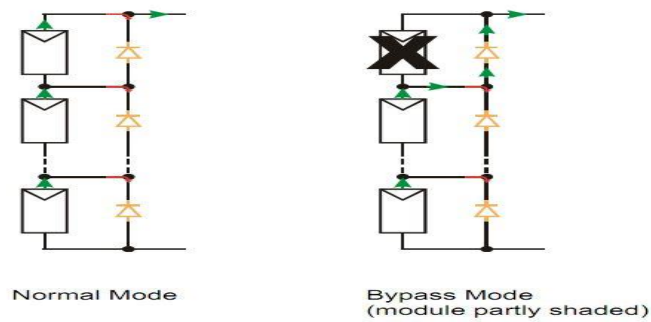


FIG.I.17 ILLUSTRE LE FONCTIONNEMENT DE LA DIODE BYPASS

I.7.2- La Diode Anti-Retour

Dans le cas de plusieurs chaînes de cellules mises en parallèle sur une charge, le risque est que des chaînes de cellules éclairées débitent dans des chaînes ombrées ou que la charge ne se décharge à travers le générateur. On dispose pour cela de diodes anti-retour (de blocage) mises en série avec le GPV comme le montre la fig.I.16 Cette diode est indispensable quand la charge du module PV est une batterie. En fait, cette diode évite que la batterie de stockage ne débite sur le module PV pendant la nuit. La fig.I.18 Montre les caractéristiques I(V) d'une cellule solaire, ensoleillée, puis dans l'obscurité.

Comme nous pouvons le voir, quand la cellule est dans l'obscurité, une batterie pourrait se décharger à travers la cellule si nous ne disposons pas d'une diode de blocage [1].

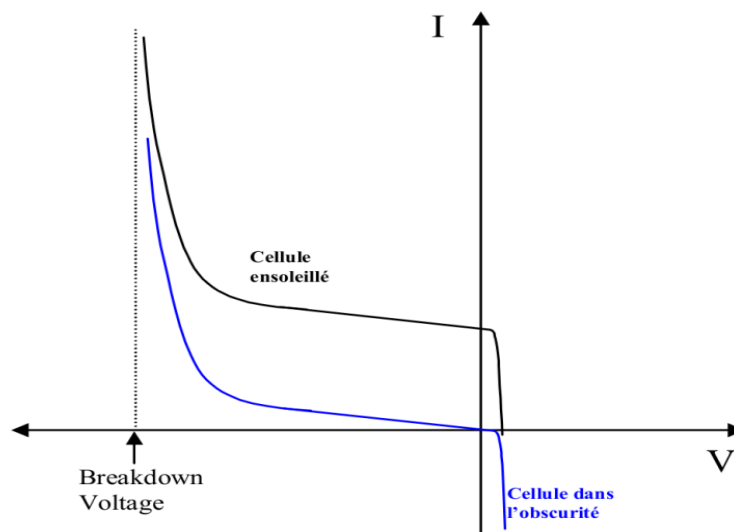


FIG.I.18 CARACTÉRISTIQUES I-V D'UNE CELLULE SOLAIRE ENSOLEILLÉE ET DANS L'OBSCURITÉ.

Remarque :

la présence d'une diode anti retour entre un GPV et la charge provoque la dissipation d'une certaine quantité d'énergie et donc une perte (une perte de puissance produite proportionnelle à la chute de tension qu'elle occasionne) dans la production, du fait de la chute de tension causée par cette diode pendant le fonctionnement normal du champ PV.

De plus, ces diodes peuvent se mettre en défaut et demandent par conséquent un contrôle régulier [2, 3, 1].

A la place d'une diode anti-retour, un fusible peut être utilisé, mais cela ne permet pas de protéger le string contre le courant inverse.

Il doit donc être dimensionné à $I_{max} = I_{sc} \times 1,25$ afin que les composants du string (module, câble, connecteur) puissent supporter l'intensité du courant inverse lorsque ce dernier surgit.

Le choix de l'un des deux composants réside donc sur la tolérance entre la perte en fonctionnement normal (pour le cas d'utilisation de la diode anti-retour) et la perte causée par le courant inverse (lors de l'utilisation du fusible) [2,3].

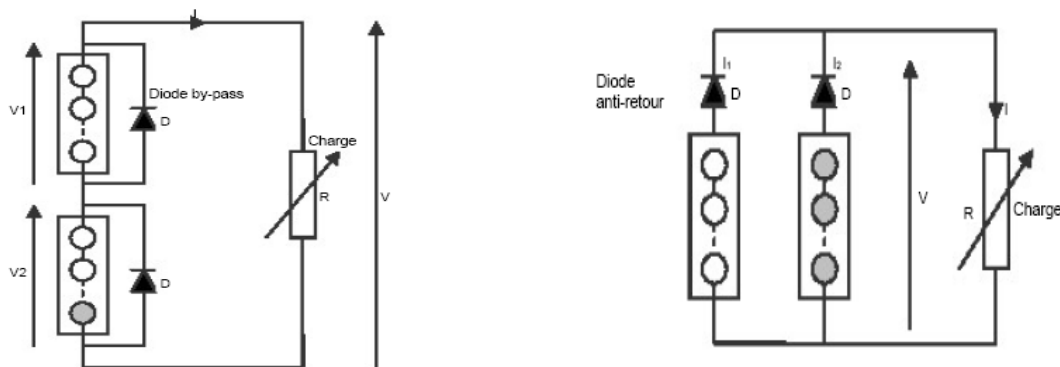


FIG.I.19 SCHÉMA SYNOPTIQUE D'UN GÉNÉRATEUR PV (A) EN SÉRIE (B) EN PARALLÈLE.

I.8- CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons donné un petit historique sur le photovoltaïque, on a présenté ensuite le principe et le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque ainsi que sa structure et la formation de la jonction PN qui est le principe de fonctionnement de la cellule PV, en expliquant brièvement le phénomène.

Nous avons vu que la cellule PV présente une caractéristique $I(V)$ non linéaire et qu'elle peut être modélisée par un circuit électrique simple.

On a vu encore le résultat par simulation de l'interconnexion de cellules PV en série/parallèle et mixte, et voir ainsi l'augmentation de la tension ou courant, ou encore les deux ce qui nous aidera à augmenter la puissance.

L'interconnexion de cellules PV en série/parallèle surtout dans le cas où les cellules n'ont pas le même point de fonctionnement ou encore l'influence des différents paramètres extérieurs pose plusieurs problèmes de déséquilibre qui sont très pénalisants pour l'installation PV, nous avons donc parlé brièvement de protection et donné quelques définitions sur les éléments de protection (diode by-pass, et anti retour) qui sont primordiaux dans une installation PV.

Chapitre II

Différents modèles électriques et l'influence des divers paramètres.

CHAPITRE 2

LES DIFFÉRENTS MODÈLES ÉLECTRIQUES D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE AINSI QUE L'INFLUENCE DES DIVERS PARAMÈTRES

II.1- GÉNÉRALITÉS

La performance d'un système PV dépend fortement des conditions météorologiques, telles que le rayonnement solaire, la température et la vitesse du vent. Pour fournir l'énergie continuellement durant toute l'année, un système PV doit donc être correctement dimensionné. Ce qui exige une étude assez rigoureuse dans le but de faire le meilleur choix, le plus performant et au moindre coût. Mais les informations fournies par les constructeurs d'équipements photovoltaïques ne permettent que de dimensionner approximativement le système PV.

L'objectif principal de cette étude est de simuler les performances d'une seule composante du système PV, à savoir le générateur PV. C'est l'élément le plus onéreux et le plus sensible aux conditions climatiques sur le site. Les méthodes d'optimisation du générateur PV sont d'une grande utilité pour les fabricants n'ayant pas des informations détaillées sur les futurs sites d'implémentation de leurs produits [11].

La modélisation mathématique des cellules solaires est indispensable pour toute opération d'optimisation du rendement ou de diagnostic du générateur photovoltaïque. Le module PV est représenté généralement par un circuit équivalent dont les paramètres sont calculés expérimentalement en utilisant la caractéristique courant-tension. Ces paramètres ne sont pas généralement des quantités mesurables ou incluses dans les données de fabrication. En conséquence, ils doivent être déterminés à partir des systèmes des équations V-I à divers points de fonctionnement donnés par le constructeur ou issue de la mesure directe sur le module.

La modélisation de ces dernières s'impose comme une étape cruciale et a conduit à une diversification dans les modèles proposés par les différents chercheurs [3].

Leurs différences se situent principalement dans le nombre de diodes, la résistance shunt finie ou infinie, le facteur d'idéalité constant ou non, ainsi que les méthodes numériques utilisées pour la détermination des différents paramètres inconnus [7].

Dans ce qui suit on s'intéresse dans un premier temps à la présentation, à la mise en équation et la simulation des deux modèles couramment utilisés, à savoir le modèle à une seule diode dit modèle à cinq paramètres ou aussi modèle complet ou à simple exponentielle. On présentera aussi, le modèle à deux diodes.

Nous avons opté pour le modèle à une seule diode et étudié les différents effets remarquables de la température et de l'éclairement sur les paramètres caractérisant la courbe I (V) est la cause de plusieurs variations sur cette dernière, cette influence sera aussi discutée.

Vu que les deux modèles précédents représentent le fonctionnement des cellules que dans la zone (I), pour une étude en mode défaillant, nous auront besoin donc d'un modèle plus large qui nous permettra de représenter le fonctionnement des cellules dans les zones une, deux et quatre, nous parleront dans ce cas du modèle Bishop [2].

II.2- INTRODUCTION

Pour modéliser les cellules photovoltaïques, il est nécessaire de passer par un choix judicieux de circuits électriques équivalents.

Pour développer ce dernier d'une manière précise, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément.

Il existe plusieurs modèles qui ont été proposés pour représenter une cellule PV et leur comportement très fortement non linéaire qui résulte de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations, dont le but est l'obtention de la caractéristique courant-tension I(V). Ces modèles diffèrent entre eux par la procédure mathématique et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la paire courant-tension [20 ,5].

On présentera principalement deux modèles du GPV:

- Modèle à une diode. (Exponentielle simple)
- Modèle à deux diodes. (Double exponentielle)

Tous les deux sont basés sur l'équation de la diode connue de Shockley.

II.3- PARAMÈTRES DE FONCTIONNEMENT D'UNE CELLULE PV

- Le courant de court-circuit : (I_{sc}) C'est le courant obtenu aux bornes de la cellule quand la tension à ses bornes est nulle. Il constitue le maximum de courant qui peut être obtenu d'une cellule.
- La puissance maximale : P_{max}
- La caractéristique d'une charge résistive R étant une droite de pente $1/R$.
- La puissance délivrée à cette charge dépendra exclusivement de la valeur de la résistance R
- La puissance maximale sera obtenue pour $R = R_{opt}$ (point M sur la Fig.II.1) lorsque la caractéristique $I = f(V)$ du générateur est tangente à l'une des courbes de même puissance.
- La puissance de sortie du générateur est le produit du courant de sortie délivrée par une charge électrique et la tension aux bornes du générateur. Elle est généralement considérée comme positive lorsqu'elle est délivrée à la charge et de signe négatif lorsqu'elle est consommée par le générateur.
- La tension à circuit ouvert : V_{co} C'est la tension pour laquelle le courant aux bornes du générateur est nul ; elle constitue la tension maximum qui peut être obtenu d'un générateur.

II.4- DIFFÉRENTS MODÈLES ÉLECTRIQUES

II.4.1- Modèle une Diode (Exponentielle Simple)

Le modèle à une diode (souvent désigné comme le seul exponentielle); décrit par l'équation (II.3) et son schéma électrique équivalent représenté sur la Fig.II.0 , a été largement utilisé grâce à sa simplicité et sa précision d'approximation convenables pour la plupart des applications tels que l'analyse de performance d'une installation, le dimensionnement d'un système photovoltaïque, l'étude de performance de l'algorithme de la MPPT (Maximum Power Point Tracking), l'étude de stabilité du raccordement au réseau [2].

II.4.1.1- Constitution

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, que ce soit en parallèle de la cellule ou au bord d'elle-même. Il résulte généralement des dommages dans le cristal ou d'impuretés dans ou à côté de la jonction.

Il a une assez bonne précision d'approximation et il est peut-être le modèle le plus approprié pour le diagnostic de Panneaux photovoltaïques, car il offre un bon compromis entre la précision de l'approximation et la simplicité de modélisation [2, 12].

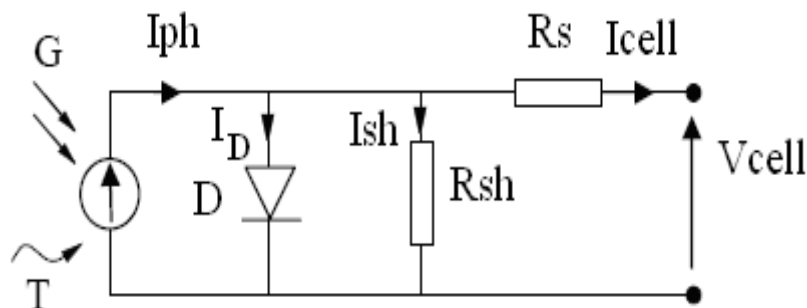


FIG.II.0 SCHÉMA ÉQUIVALENT DU MODÈLE A UNE SEULE DIODE

Application de la loi de Kirchoff :

D'après La loi de Kirchoff (loi des nœuds), le courant délivré par une cellule PV est donné par l'expression ci-après :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (\text{II.0})$$

D'où, le courant de la diode est donné dans l'équation qui suit :

$$I_D = I_0 \left(\exp \left(\frac{V + R_s I}{n \cdot V_t} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.1})$$

Le courant aux bornes de la résistance shunt est exprimé par la relation suivante :

$$I_{sh} = \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.2})$$

L'équation caractéristique de la cellule PV sera donc donnée comme suit :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp \left(\frac{V + R_s I}{n \cdot V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

I_{ph} : Le courant photovoltaïque (photon) [A].

I_0 : Le courant de saturation de la diode [A].

n : Le facteur d'idéalité de la diode.

R_s : La résistance série en Ohm (Ω).

R_{sh} : La résistance shunt en Ohm (Ω).

k : La constante de Boltzmann ($k = 1,38.10^{-23} J.K^{-1}$).

q : La charge de l'électron ($q = 1,602.10^{-19} C$).

T : La température de la cellule (K).

V_t : La tension thermique. $V_t = \frac{kT}{q}$ ($J.C^{-1}$).

Il faut noter que ces deux résistances sont liées à la technologie d'élaboration des électrodes. Il faut minimiser R_s de telle sorte que R_{sh} soit très important. Le photo-courant I_{ph} varie avec l'irradiance [5].

II.4.1.2- Paramètres de simulation

Paramètres	Valeurs
I_{ph} : Le courant photovoltaïque [A].	2
V_t : La tension thermique ($J.C^{-1}$).	0.0258
R_s : La résistance série en Ohm (Ω).	0.005
R_p : La résistance shunt en Ohm (Ω).	9
a : Le facteur d'idéalité de la diode (1 et 2)	1.2
I_0 : Le courant de saturation de la diode [A].	$1e^{-8}$
k : Coefficient de réglage de Bishop (~ 0.1)	0.1
n : Le Coefficient de réglage de Bishop (3.4 à 4)	3
V_b : Tension de claquage de la cellule (-10 V à -30 V)	-20

II.4.1.3- La Simulation

La caractéristique courant-tension montrée ci-dessous est obtenue par la résolution de l'équation (II.3), dans l'environnement Matlab en utilisant la méthode de Newton-Raphson, un paragraphe ci-dessous est consacré pour expliquer la démarche de la résolution de cette équation. Après simulation, la courbe obtenue est présentée dans la figure ci-dessous.

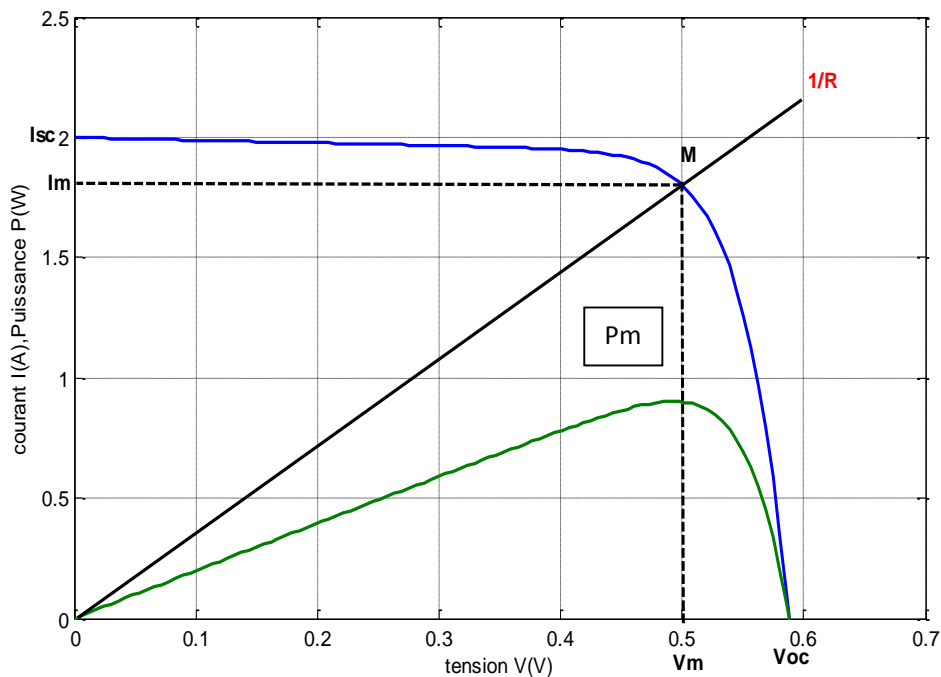


FIG.II.1 CARACTÉRISTIQUE $I = F(V)$ ET $P = F(V)$, DU GÉNÉRATEUR. (MODÈLE UNE DIODE)

La caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque peut être décomposée en trois en zones différentes : [13].

- Une zone assimilable à un générateur de courant I_{sc} proportionnel à l'irradiation (c'est la partie Horizontale)
- Une zone assimilable à un générateur de tension V_{co} d'impédance interne équivalente à R_s (c'est la partie Verticale),
- Une zone où l'impédance interne du générateur varie très fortement de R_s à R_{sh} (c'est la partie du milieu où elle n'est ni considérée comme source de courant ni une source de tension).

Une fois qu'une cellule solaire est chargée avec une charge résistive constante, la charge est présentée avec un point quelque part sur la caractéristique de cellules I-V. Quand la charge augmente, le point de fonctionnement se déplace le long de la caractéristique vers la droite. Cependant, une diminution de la charge fait monter le point de fonctionnement de la caractéristique vers la gauche de la direction [14].

II.4.1.4- Résolution de la caractéristique courant-tension

La caractéristique I(V) est la courbe représentant le courant I débité par la cellule en fonction de la tension à ses bornes. On note que l'équation caractéristique est non linéaire et implicite ce qui pose problème à trouver une solution analytique directe. Ce type d'équation ne peut être résolu qu'avec des méthodes numériques itératives. Dans ce travail, nous avons opté pour la méthode de Newton – Raphson dont la procédure se résume comme suit [15]:

La procédure se base sur l'équation récurrente suivante :

$$I_{n+1} = I_n - \frac{f(I)}{f'(I)} \quad (\text{II.4})$$

De l'équation caractéristique de la cellule PV (**équation II.3**), nous pouvons définir la fonction $f(I)$ tel que :

$$f(I) = -I + I_{ph} - I_0 \left(\exp\left(\frac{V + R_s I}{nV_t}\right) - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} = 0 \quad (\text{II.5})$$

La dérivée de la fonction $f(I)$ est donnée par l'équation suivante

$$f'(I) = -1 - I_0 \left(\frac{R_s}{nV_t} \right) \exp\left(\frac{V + R_s I}{nV_t}\right) - \frac{R_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.6})$$

II.4.2- Modèle à deux diodes

Nous avons, cette fois-ci, deux diodes pour reproduire le comportement de la cellule PV. Ces diodes symbolisent la recombinaison des porteurs minoritaires, d'une part en surface du matériau et d'autre part dans le volume du matériau. Le schéma du générateur photovoltaïque devient dans le cas de la Fig.II.2 [5]

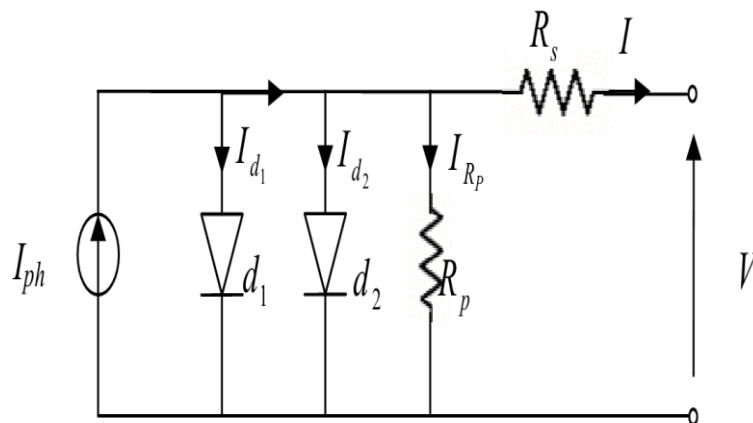


FIG.II.2 SCHÉMA ÉQUIVALENT D'UNE CELLULE PV AVEC UN MODÈLE À DEUX DIODES

Comme la montre le schéma de la Fig.II.2 une photopile comporte en réalité une résistance série R_s et une résistance en dérivation ou shunt R_p . Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I-V de la photopile :

- La résistance série est la résistance interne de la cellule. Elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles ;
- La résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction ; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée [16].

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff :

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{Rp} \quad (\text{II.7})$$

Les Diodes étant des éléments non linéaire, la caractéristique I-V est donnée par la relation : [16]

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left[e^{\frac{q(V+I.R_s)}{n_1 k T}} - 1 \right] - I_{s2} \left[e^{\frac{q(V+I.R_s)}{n_2 k T}} - 1 \right] - \frac{V + I R_s}{R_p} \quad (\text{II.8})$$

Où :

I et V sont le courant et la tension de sortie de la cellule photovoltaïque,

I_{ph} est le photo-courant produit.

I_{d1} et I_{d2} : sont les courants des diodes.

I_{s1} et I_{s2} et sont les courants de saturation des diodes.

n_1 et n_2 les facteurs de pureté de la diode.

R_s et R_p : sont respectivement la résistance série et la résistance parallèle.

T est la température absolue en Kelvin.

q ($1,602 \cdot 10^{-19}$.C) est la charge élémentaire constante

La constante de Boltzmann k ($1,380 \cdot 10^{-23}$ J/K).

II.4.2.1- Simulation de la caractéristique courant-tension, et puissance-tension du modèle deux diodes

La caractéristique courant-tension montrée ci-dessous est obtenue par la résolution de l'équation (II.7), dans l'environnement Matlab en utilisant la méthode de Newton-Raphson, après la simulation la courbe obtenue est présentée dans la figure ci-dessous.

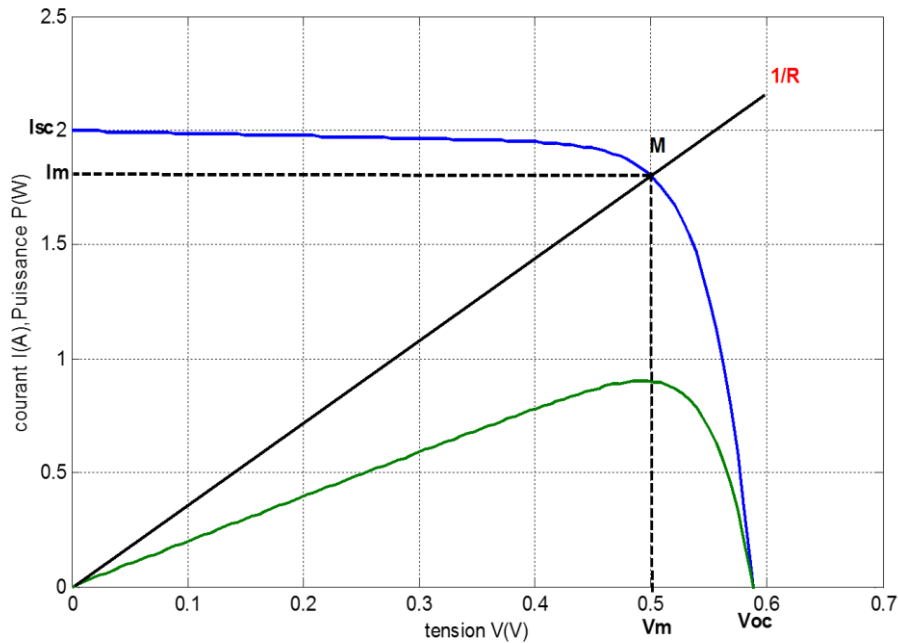


FIG.II.3 CARACTÉRISTIQUE $I = F(V)$ ET $P = F(V)$ DU GÉNÉRATEUR. (MODÈLE DEUX DIODE)

II.5- CONCLUSION

Le modèle à double diode est considéré par de nombreux auteurs comme étant le plus précis que le modèle à diode unique. Par exemple, à ce dernier il est reproché d'être imprécis en particulier à de faibles niveaux d'irradiation.

Cependant, il a été constaté que, lorsqu'il est utilisé pour modéliser le comportement de nombreux modules interconnectés par exemple, le modèle à une seule diode est préféré par de nombreux auteurs dans la littérature, par exemple, [2, Araujo].

En outre, en raison des variations inhérentes aux paramètres des cellules, il est presque impossible de déterminer un modèle très précis pour chaque cellule dans un vaste système PV. A cet effet, la précision de la représentation du modèle à une seule diode est considérée comme suffisante [12].

II.6- Caractéristiques d'un module PV

La fig.II.4 montre la caractéristique I(V) pour un module de **36** cellules en série et **2** branches en parallèle.

La caractéristique de puissance P(V) est aussi importante et sera visualisée en même temps avec la caractéristique I(V), avec une échelle différente. La relation qui donne la puissance est comme suit : $P = VI$ (II.9)

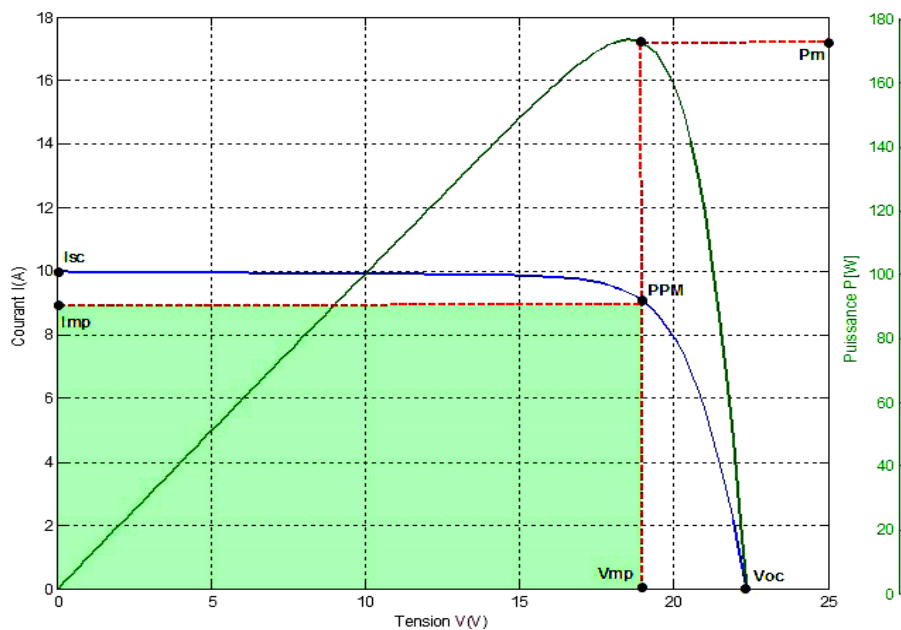


FIG.II.4 CARACTÉRISTIQUE I (V), ET P (V) D'UN MODULE PV

À 36 CELLULES SÉRIE ET 2 BRANCHE //

Il existe un point particulier sur la courbe caractéristique (I-V), pour lequel la puissance $P=IV$ fournie par la cellule est maximale (graphiquement indiquée par la surface d'un rectangle). Ce point est appelé Point de Puissance Maximum (en anglais Maximum Power Point, MPP). Ce point est situé sur le coude de la courbe caractéristique (I/V) de la Fig.II.4. Les valeurs des coordonnées de ce point, V_{MPP} et I_{MPP} , peuvent être estimées à l'aide de V_{oc} et I_{sc} de la manière suivante [17,18].

$$0.75 \cdot V_{oc} \leq V_{MPP} \leq 0.9 \cdot V_{oc}$$

$$0.85 \cdot I_{sc} \leq I_{MPP} \leq 0.95 \cdot I_{sc}$$

Mathématiquement, on obtient ce point de la façon suivante :

$$\frac{\partial P}{\partial V} = \frac{\partial (IV)}{\partial V} = I + V \frac{\partial I}{\partial V} = 0$$

D'après les caractéristiques I (V) et P (V), on peut déterminer les points essentiels suivants :

- **Le courant de court-circuit** I_{sc} : C'est le courant débité par la cellule quand la tension à ses bornes est nulle. En pratique ce courant est très proche du courant photovoltaïque I_{ph} .
- **La tension de circuit ouvert** V_{oc} : C'est la tension qui apparaît aux bornes de la cellule quand le courant débité est nul.
- **Le point de puissance maximale** PPM : C'est le point où le générateur travaille en rendement maximal et produit une puissance de sortie maximale.
- I_{mp} et V_{mp} : Le courant et la tension correspondants au point PPM respectivement.
- **Rendement** : Le rendement énergétique d'un générateur photovoltaïque est défini par le rapport entre la puissance électrique maximale générée et la puissance incidente sur sa superficie [19].

$$\eta = \frac{P_{\max}}{GS} \quad (\text{II.10})$$

Avec

G : L'éclairement en Watt/mètre carré (W/m²)

S : La surface active du générateur photovoltaïque en mètre carré (m²)

P_{\max} : La puissance maximale délivrée par le générateur PV en watt (W).

Le rendement d'une cellule photovoltaïque est dans le cas général assez faible, de l'ordre de 10 à 13%.

- **Facteur de forme** : C'est le facteur qui indique le degré d'idéalité de la caractéristique I (V).

Le facteur de forme d'une cellule de bonne qualité est supérieur à 0.7 [19], il s'exprime par la relation ci-après :

$$FF = \frac{P_{\max}}{V_{oc} I_{sc}} = \frac{I_m V_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (\text{II.11})$$

II.7- ÉTUDE du Modèle BISHOP :

Les modèles présentés représentent relativement bien une cellule en fonctionnement normal (Zone I). Néanmoins, ils ne prennent pas en compte l'effet d'avalanche de la cellule.

L'étude d'un champ PV en fonctionnement défaillant, au cours duquel la cellule peut subir différents régimes de fonctionnement, exige un modèle qui peut décrire la totalité de la caractéristique de la cellule (les trois zones).

L'effet d'avalanche de la cellule est pris en considération dans le modèle de Bishop, en ajoutant au modèle à une diode un multiplicateur non linéaire $M(V_1)$ en série avec la résistance shunt comme on peut le voir dans la **Fig.II.5** , Ce multiplicateur correspond au dernier terme de l'équation (II.12) qui donne la relation entre le courant (I) et la tension (V) d'une cellule PV [2].

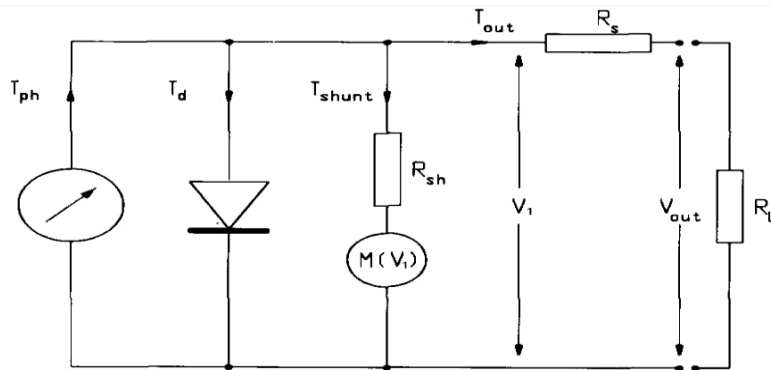


FIG.II.5 SCHÉMA ÉQUIVALENT D'UNE CELLULE PV AVEC LE MODÈLE DE BISHOP

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp\left(\frac{V + R_s I}{V_t}\right) - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \left(1 + k \left(1 - \frac{V + R_s I}{V_b} \right)^{-n} \right) \quad (\text{II.12})$$

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

I_{ph} : Courant équivalent proportionnel à l'ensoleillement reçu par la cellule.

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode.

$V_t = a k_b T_c / q$: Tension thermique de la diode. Elle dépend de la température de la cellule T_c . Tandis que : a, k_b 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 à 4)
- k : Coefficient de réglage de Bishop (~ 0.1)
- V_b : Tension de claquage de la cellule (-10 V à -30 V)

II.7.1- Résolution du modèle de la cellule

On déterminera le point de fonctionnement de la cellule par la résolution de l'équation (II-12). Le principe consiste à calculer la valeur d'une des inconnues (V ou I) en fonction de l'autre tout en supposant que les 8 paramètres de cette équation sont connus.

Vu que l'équation (II-11) ne peut être résolue analytiquement, on lui appliquera la méthode de Newton-Raphson illustré ci-dessous.

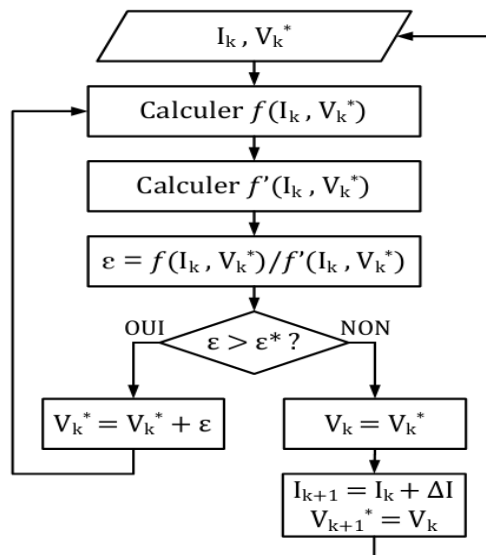


FIG.II.6 ALGORITHME POUR DÉTERMINER LA CARACTÉRISTIQUE I-V D'UNE CELLULE PV [2]

Les Figure (Fig.II.7) et (Fig.II.8) montrent la caractéristique I-V d'une cellule PV obtenue à partir de l'algorithme proposé. Ces paramètres sont indiqués précédemment.

L'étude de l'influence de ces paramètres sur la caractéristique I-V est donnée dans les paragraphes qui suivront.

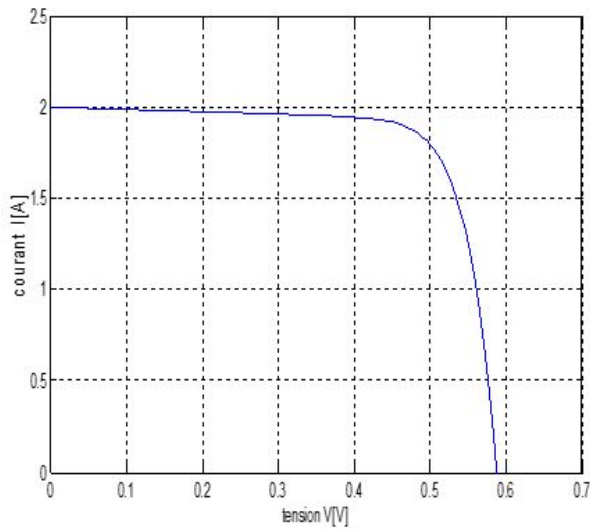


FIG.II.7 CARACTÉRISTIQUE I(V) ZONE (1)

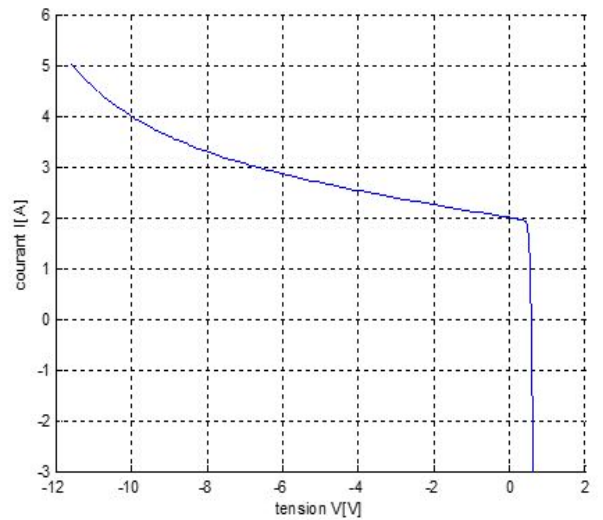


FIG.II.8 CARACTÉRISTIQUE I(V) COMPLÈTE

II.8- Configuration retenue

Composant du champ	Constitution	Symbole
Cellule		
Groupe de cellules		
Module		
String		
Champ		

FIG.II.9 CONFIGURATION RETENUE POUR LA MODÉLISATION [2]

II.9- Modélisation d'un champ PV (fonctionnement sain)

Précédemment nous avons présenté la démarche d'obtention de la caractéristique I-V d'une cellule PV.

Dans cette partie, Nous décrierons et procéderons de la même manière afin d'établir la caractéristique I-V d'un champ PV en fonctionnement sain.

Pour cela nous allons supposer que toutes les cellules sont pareilles c'est-à-dire identiques et soumises aux mêmes conditions de fonctionnement (température, ensoleillement)[2].

Vu que la somme des tensions des cellules est positive ($V_{diode} < 0$). La diode de bypass est bloqué donc tout le courant circule et passe dans les cellules.

La diode anti-retour est passante, car la tension de tous les strings est identique. Les diodes laissent donc passer le courant produit par chaque string [2].

$$I_{\text{champ}} = N_{\text{string}} * I_{\text{cellule}} \quad \text{(II.13)}$$

$$V_{\text{champ}} = N_{\text{module}} * N_{\text{groupe}} * N_{\text{cellule}} * V_{\text{cellule}}$$

N_{string} : nombre de strings en parallèle

N_{module} : nombre de modules en série d'un string

N_{groupe} : nombre de groupes de cellules en série d'un Module

N_{cellule} : nombre de cellules en série d'un groupe de cellules

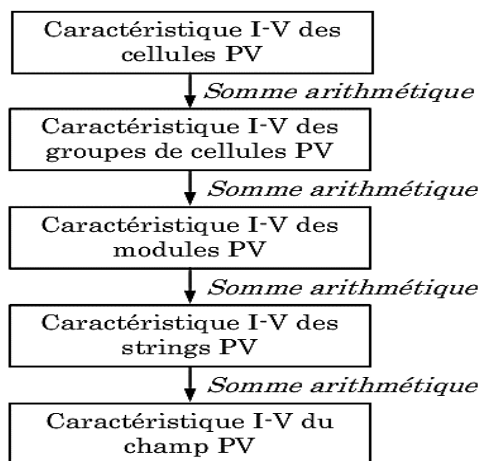


FIG.II.10 DÉMARCHÉ DE MODÉLISATION D'UN CHAMP PV EN FONCTIONNEMENT SAIN [2]

II.10- Application numérique d'illustration

Afin d'illustrer et d'expliquer la démarche proposée, nous allons suivre la configuration ci-dessous, et les paramètres de simulation restent inchangés.

Composant	Champ	String	Module	Groupe	Cellule
Nombre	01	02	03	02	18
Disposition		Parallèle	Série	Série	Série

La Fig.II.11 montre la formation de la caractéristique I-V du champ considéré à partir de celle de la cellule.

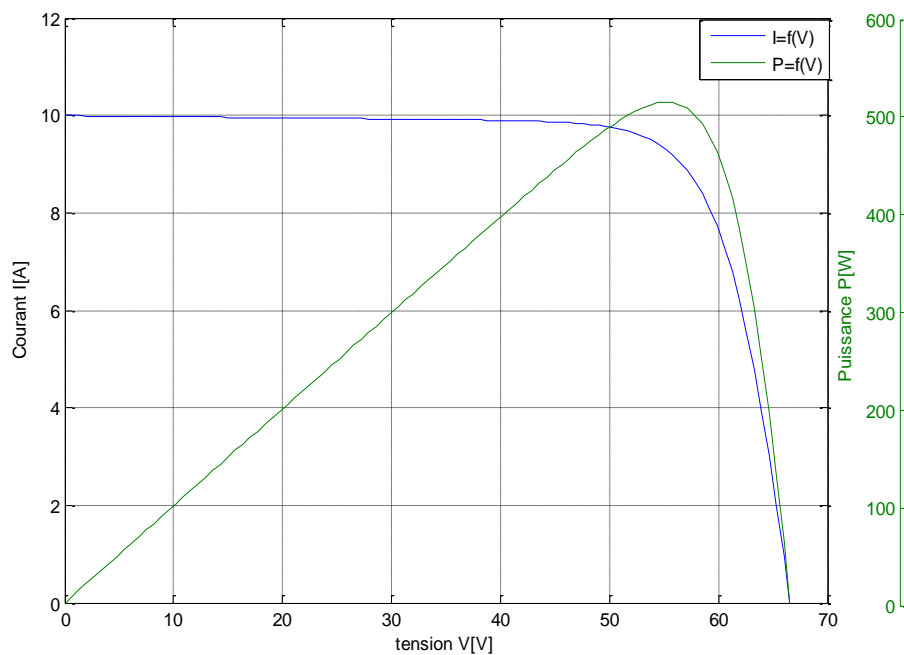


FIG.II.11 ÉTABLISSEMENT DE LA CARACTÉRISTIQUE I-V DU CHAMP À PARTIR DE CELLE DE LA CELLULE

Interprétation

Le courant reste identique et inchangé pour les composants mis en série à savoir (cellules, groupes de cellules, modules), par contre la tension d'un composant est la somme de la tension des composants qui le constituent.

Cependant Pour les composants mis en parallèle (strings), la tension à leurs bornes est identique tandis que leurs courants s'ajoutent.

L'INFLUENCE des DIFFÉRENTS PARAMÈTRES dans le SYSTÈMES pv

II.11- Introduction

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 [2].

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp \left(\frac{V + R_s I}{V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \left(1 + k \left(1 - \frac{V + R_s I}{V_b} \right)^{-n} \right) \quad \text{(II.14)}$$

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

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

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode

$V_t = a \cdot k_b \cdot T_c / q$: Tension thermique de la diode. Elle dépend de température de la cellule T_c .

Tandis que : a, et q : sont respectivement le facteur d'idéalité de diode (1 à 2),

La constante de Boltzmann K_b ($1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$) 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

- k : Coefficient de réglage de Bishop (3.4 à 4)

- n : Coefficient de réglage de Bishop (~ 0.1)

- V_b : Tension de claquage de la cellule (-10 V à -30 V)

L'étude de l'influence des différents paramètres sur la caractéristique du modèle est très importante pour pouvoir ensuite classer le type de défaut responsable de la variation de ces paramètres [2].

Nous ne nous intéressons dans cette analyse qu'aux cinq premiers paramètres qui sont les plus susceptibles de varier suite à un défaut quelconque [7].

II.12- Facteur limitation du rendement

II.12.1- Influence de l'éclairement

L'augmentation d'ensoleillement se traduit par un déplacement de la caractéristique $I = f(V)$ suivant l'axe des courants pour une température $T=25^{\circ}\text{C}$.

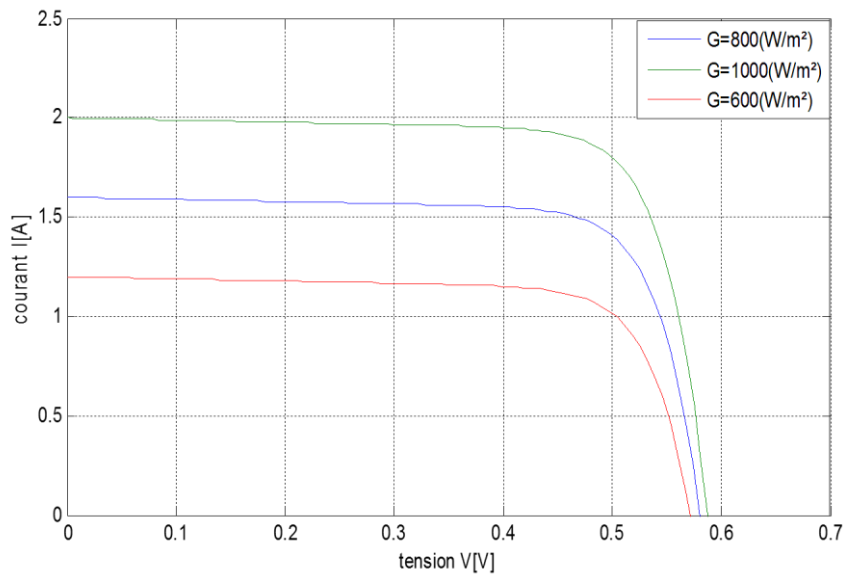


FIG.II.12 INFLUENCE DE L'ÉCLAIREMENT SUR LA CARACTÉRISTIQUE $I = f(V)$.

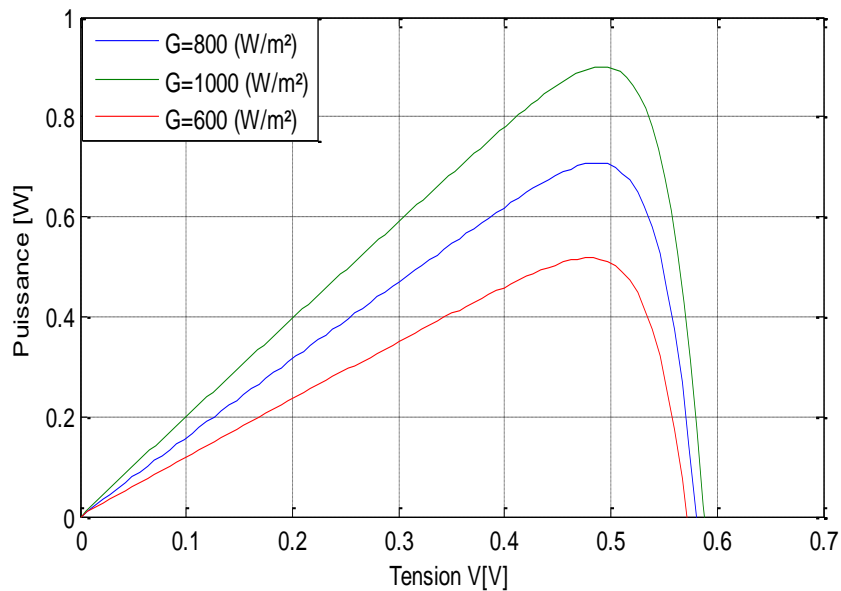


FIG.II.13 VARIATION DE LA PUISSANCE POUR DIFFÉRENTES VALEURS D'ÉCLAIREMENT.

Interprétation

On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement.

Par contre, la tension en circuit ouvert n'est pas en fonction de l'éclairement, elle reste quasiment identique même à faible éclairement.

II.12.2- Influence de la température

La température est un paramètre important puisque les cellules sont exposées au rayonnement solaire, susceptible de les échauffer. De plus, une partie du rayonnement absorbé n'est pas convertie en énergie électrique : elle se dissipe sous forme de chaleur. C'est pourquoi la température d'une cellule est toujours plus élevée que la température ambiante.

Pour estimer la température de la cellule T à partir de la température ambiante T_a , on peut utiliser la formule de correction suivante [20, 21] :

$$T = T_a + G \left(\frac{NOCT - 20}{800} \right) \quad (\text{II.15})$$

Où

$NOCT$: est la température de fonctionnement de la cellule PV (Nominal Operating Cell Temperature) en °C, définie comme la température que les cellules atteignent quand $G=800$ W/m²,

T_a : est de 20° C, la vitesse du vent est de 1 m/s et la masse d'air est de 1.5, elle prend la valeur de 48° C.

L'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$ est représentée sur la Figure I.15 pour un éclairement fixe $S=1000$ W/m².

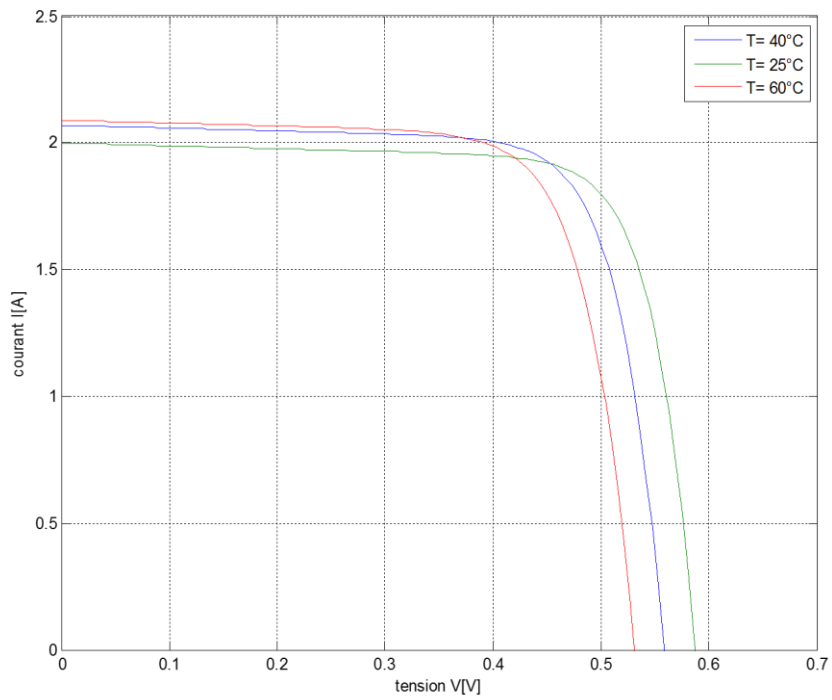


FIG.II.14 INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE SUR LA CARACTÉRISTIQUE $I = f(V)$.

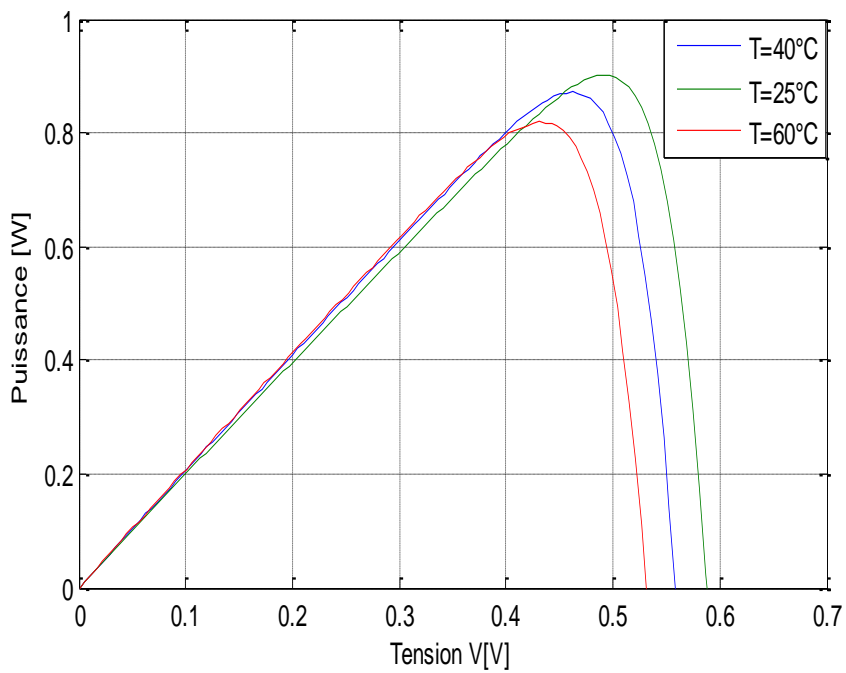


FIG.II.15 VARIATION DE LA PUISSANCE POUR DIFFÉRENTES VALEURS DE TEMPÉRATURES

Interprétation

La variation de la température affecte essentiellement la tension de circuit ouvert tandis que son influence sur le courant de court-circuit est peu notable comme le montre la caractéristique I (V) de la figure (Fig. II.15) prise à un éclairement constant et une température variable.

On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit.

Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement à prendre en compte (Lors du dimensionnement d'une nouvelle installation, la prise en compte du paramètre température est très nécessaire).

II.13- Influence des cinq paramètres sur la caractéristique I (V)

Les cinq paramètres de l'équation caractéristique (**Une diode**), I_{ph} , I_0 , A , R_s , et R_{sh} , varient soit en fonction de l'éclairement G ou en fonction de la température T , ou en fonction des deux : G et T en même temps. Ces paramètres vont être déterminés en détail dans ce qui suit :

II.13.1- L'Effet du courant photovoltaïque I_{ph}

Le courant photovoltaïque I_{ph} dépend de l'éclairement G et de la température de la cellule T . son influence est apparente sur les points du courant du court-circuit.

- **Le courant photovoltaïque I_{ph}** : est exprimé par la relation suivante :

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} [I_{ph,ref} + \alpha(T - T_{ref})] \quad \text{(II.16)}$$

Avec [2].

α : C'est le coefficient de température pour le courant court-circuit en Amp/degré Celsius ($A/^\circ C$).

G : ensoleillement reçu par la cellule photovoltaïque [W/m^2].

G_{ref} : l'éclairement aux conditions de références (test standard) ($G_{ref}=1000 \text{ W/m}^2$).

T_{ref} : température à la Condition de Test Standard [$C^\circ 25$]

$I_{ph,ref}$: photo courant à la Condition de Test Standard(référence) . Il est pratiquement égal au courant de court-circuit à la Condition de Test Standard $I_{sc,ref}$

La Fig.II.16- ci-dessous montre l'effet de la variation de l'éclairement sur la caractéristique I (V).

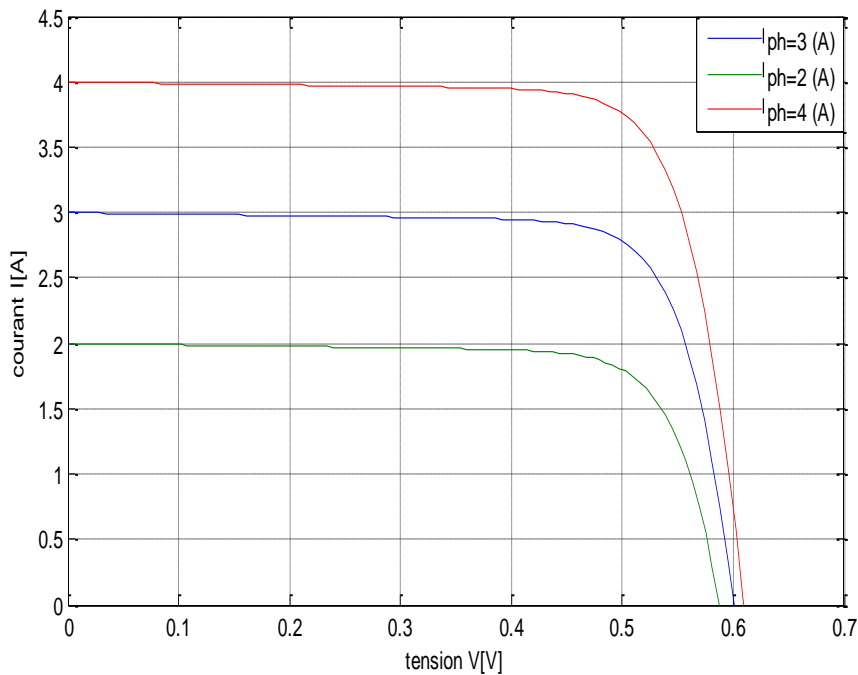


FIG.II.16 L'EFFET DU COURANT PHOTOVOLTAÏQUE SUR LA CARACTÉRISTIQUE I (V).

Interprétation

La Fig.II.16 montre la caractéristiques I-V d'une cellule photovoltaïque lorsque le courant photovoltaïque (photonique) I_{ph} varie. On peut remarquer qu'il n'a pratiquement pas une grande influence sur la tension.

Par contre, il fait varier le courant, plus le courant photonique I_{ph} augmente plus le courant de court-circuit augmente.

II.13.2- L'Effet du courant de saturation de la diode I_0

Le courant de saturation de la diode I_0 dépend de la température de la cellule photovoltaïque et de la largeur de bande d'énergie du matériel de la cellule photovoltaïque [2], sa valeur est de l'ordre de 10^{-8} à 10^{-6}). Quand celui-ci augmente, les points de la caractéristique $I(V)$ changent de position entraînant ainsi la diminution de la tension de circuit ouvert et celle du point de puissance maximale comme le montre la fig.II.17

Le courant de saturation de la diode I_0 : est donnée par la relation [2]

$$I_0 = I_{0ref} \left[\frac{T}{T_{c,ref}} \right]^3 \exp \left[\frac{E_g N_s}{ak} \left(\frac{1}{T_{c,ref}} - \frac{1}{Tc} \right) \right] \quad (\text{II.17})$$

Où

I_0 : C'est le courant de saturation inverse de la diode à la température Tc

$I_{0,ref}$: C'est le courant de saturation inverse de la diode aux conditions de références.

E_g : C'est la largeur de la bande interdite du semi-conducteur en électron Volt (eV)

Simulation

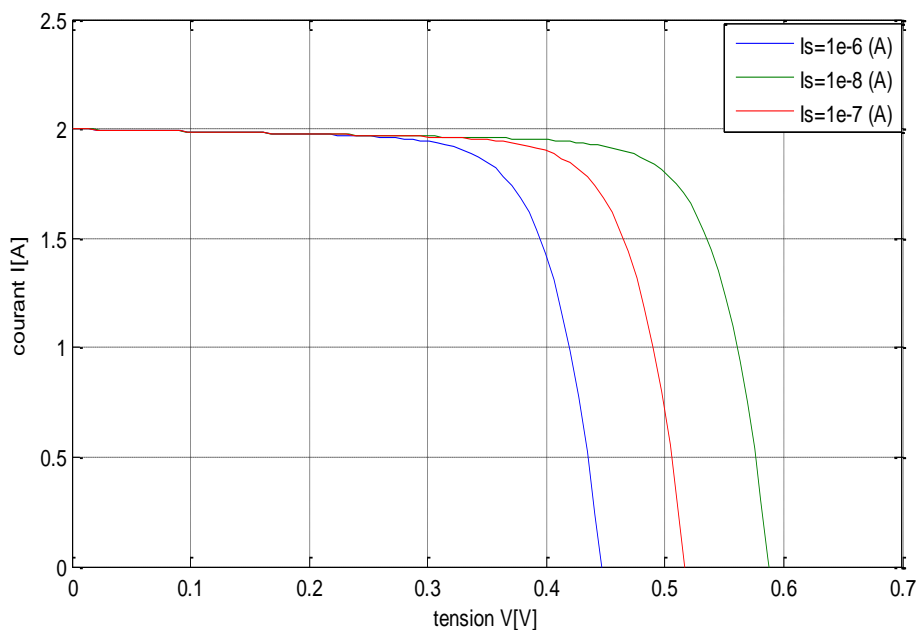


FIG.II.17 L'EFFET DU COURANT DE SATURATION (I_0) DE LA DIODE SUR LA CARACTÉRISTIQUE $I(V)$.

Interprétation

La Fig.II.17 montre la caractéristiques I-V d'une cellule photovoltaïque lorsque le courant de saturation inverse de diode varie. On peut remarquer que le courant de saturation inverse n'a aucune influence sur le courant de court-circuit de la cellule.

Par contre, il fait varier la tension de circuit ouvert. Contrairement à l'ensoleillement, plus le courant de saturation inverse augmente plus la tension de circuit ouvert diminue.

II.13.3- L'Effet du facteur d'idéalité

Le facteur d'idéalité de la diode dépend seulement de la température, il prend la valeur de 1 pour une diode idéale et est inférieure à 2 pour une diode non idéale [22].

Cette influence est reportée sur la caractéristique I (V) de la figure ci-après :

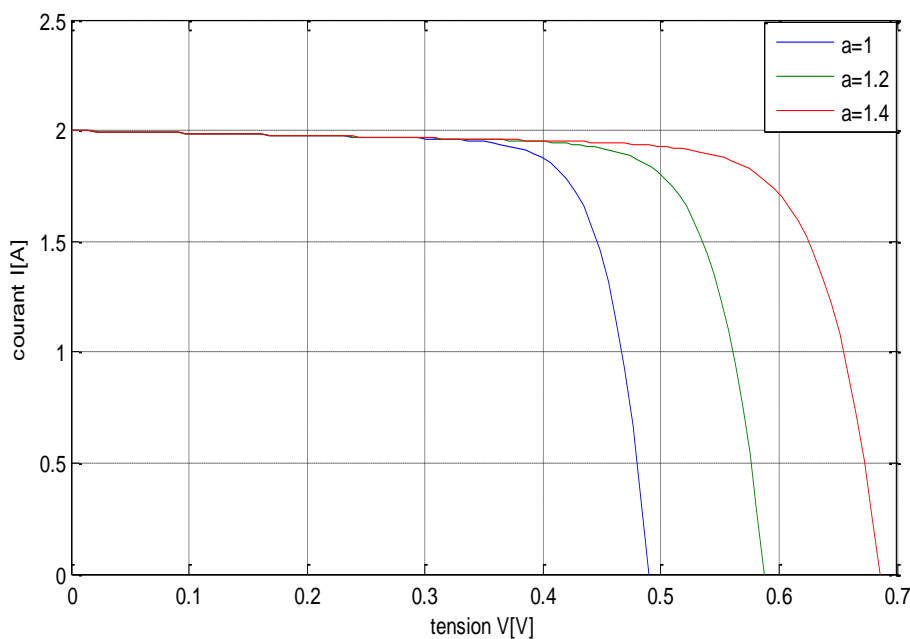


FIG.II.18 L'EFFET DU FACTEUR D'IDÉALITÉ DE LA DIODE SUR LA CARACTÉRISTIQUE I (V).

Interprétation

La Fig.II.18 montre une variation de la caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque pour quelques valeurs du facteur d'idéalité de diode. On remarque bien que ce facteur n'a aucune influence sur le courant de court-circuit qui demeure constant. Par contre, la tension de circuit ouvert varie proportionnellement en fonction de ce facteur.

II.13.4- L'Effet de la résistance série R_s

La résistance série R_s représente [2] :

- la résistance de contact entre le métal et le semi-conducteur
- la résistance du métal qui connecte les cellules
- la résistance du matériau semi-conducteur
- **La résistance série R_s** : dans ce travail le R_s est supposée constante

$$R_s = R_{s,ref}$$

La résistance série contrôle le courant et la tension dans la région génératrice de tension du module photovoltaïque (côté droit de la caractéristique I (V)). En effet l'augmentation de R_s entraîne une forte chute de tension on recueillie aux bornes du module photovoltaïque ce qui limitera la puissance générée voir Fig.II.19

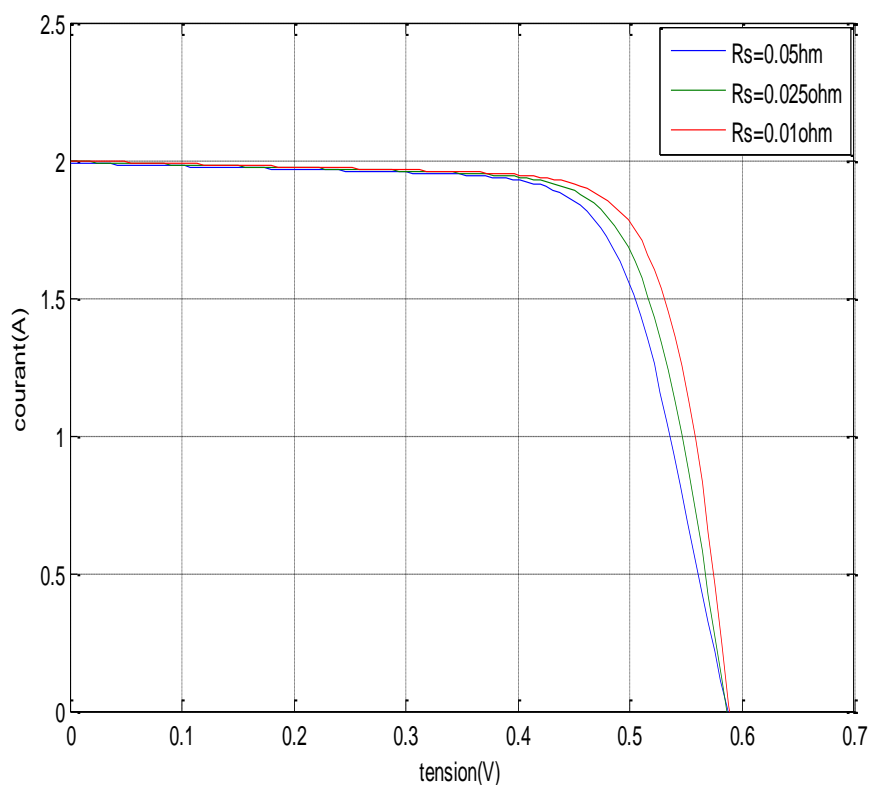


FIG.II.19 L'EFFET DE LA RÉSISTANCE SÉRIE R_s SUR LA CARACTÉRISTIQUE I (V).

Interprétation

La résistance série peut modifier la forme de la courbe (Fig.II.19). Plus la résistance série augmente, plus le facteur de forme diminue. Ceci entraîne un rendement plus faible de la cellule. Par contre, on peut bien remarquer que cette résistance n'a pas d'influence sur la tension de circuit ouvert.

II.13.5- Résistance parallèle R_{sh}

La résistance parallèle représente tout chemin du courant de fuite : courant de fuite entre des cellules, courant de fuite entre la cellule et le bord du module etc [2].

La résistance parallèle (shunt), contrôle la pente de la caractéristique I (V) dans la région génératrice de courant du module photovoltaïque (côté gauche de la caractéristique I (V)).

- **La résistance shunt** (parallèle) R_{sh} : est exprimée par la relation suivante.

$$R_{sh} = R_{sh,ref} \left(\frac{G_{ref}}{G} \right) \quad (II.18)$$

On remarque que les relations de ces cinq paramètres dépendent aussi de leurs valeurs de références $I_{ph, ref}$, $I_{0, ref}$, A_{ref} , $R_{s, ref}$, et $R_{sh, ref}$ (paramètres donnés aux conditions standards : $G=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ et AM1.5).

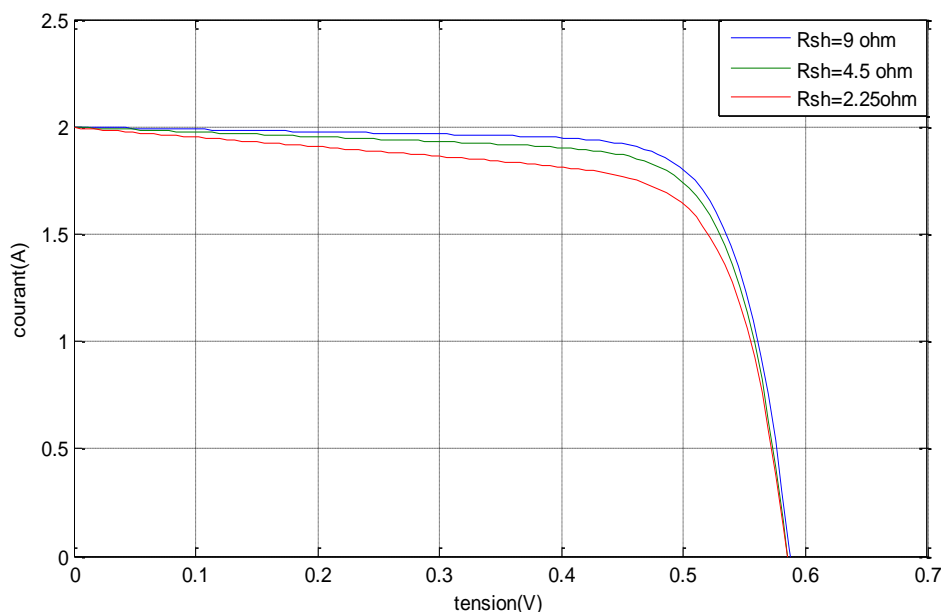


FIG.II.20 L'EFFET DE LA RÉSISTANCE SHUNT RSH SUR LA CARACTÉRISTIQUE I (V).

Interprétation

Pour de grandes valeurs de R_{sh} , on ne voit pas de modification notable. La diminution de R_{sh} entraîne la diminution du courant de sortie de la cellule PV, comme le montre la fig.II.20 suivante

Dans le cas de réduction importante de la résistance parallèle, on remarque qu'il y a une chute en tension de circuit ouvert et en courant de court-circuit.

II.14- Conclusion

Dans ce chapitre nous avons procédé, à la mise en équation et la simulation des deux modèles couramment utilisés, à savoir le modèle à une seule diode et le modèle à deux diodes. Nous avons ensuite étudié l'influence de chaque paramètre sur la caractéristique courant-tension en optant pour le modèle à une seule Diode.

On a remarqué que la variation de ces paramètres, ont une grande influence sur de la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ et par conséquent sur les performances du générateur photovoltaïque.

Par la suite on a présenté le modèle Bishop, qui prend en considération l'étude d'un champ PV en fonctionnement défaillant c'est-à-dire dans les trois zones de fonctionnement, contrairement au deux précédent qui ne fonctionnent que dans la zone (I).

Chapitre III

*Caractérisation de défauts sur les
systèmes PV*

CHAPITRE 3

CARACTÉRISATION DE DÉFAUTS SUR LES SYSTÈMES PV

III.1- Introduction

Tous les systèmes PV sont susceptibles de présenter des symptômes révélateurs de défauts, le défi est de pouvoir détecter et localiser ces défauts.

En effet, un système PV est soumis au cours de son fonctionnement à diverses défauts et anomalies, conduisant à une baisse de la performance. Les défauts et les anomalies apparus varient d'une installation à une autre en fonction de sa conception, installation, opération et maintenance, Il est donc fondamental de pouvoir établir une surveillance en continue afin de détecter les défaillances. Dans ce cas les techniques de détection de défauts pourront garantir une performance optimale du système, et ainsi réduire les couts de maintenance et surtout augmenter la productivité en augmentant le taux de disponibilité des installations afin d'avoir un meilleur rendement.

III.2- Objectif

Détection de défauts souvent, il s'agit d'un test traitant un signal susceptible de contenir des informations sur l'état du système à surveiller, dans notre cas l'objectif est d'obtenir une caractéristique I-V d'un modèle défaillant, fonctionnant dans de conditions données (température, ensoleillement,) pour un défaut quelconque et pour une configuration donnée du système PV (Cellule, Groupe, Module, String, Champ) afin qu'on puisse l'analyser et faire révéler un éventuel défaut dans le système.

III.3- Plan suivie pour la modélisation des différents défauts

Nous procéderons de la même manière que pour la modélisation d'un champ PV en fonctionnement sain, la configuration retenue est celle présenté précédemment dans la **Fig.II.9** La méthode proposée ici repose sur l'addition des caractéristiques I-V pour obtenir le comportement d'un champ PV pour un défaut quelconque [2].

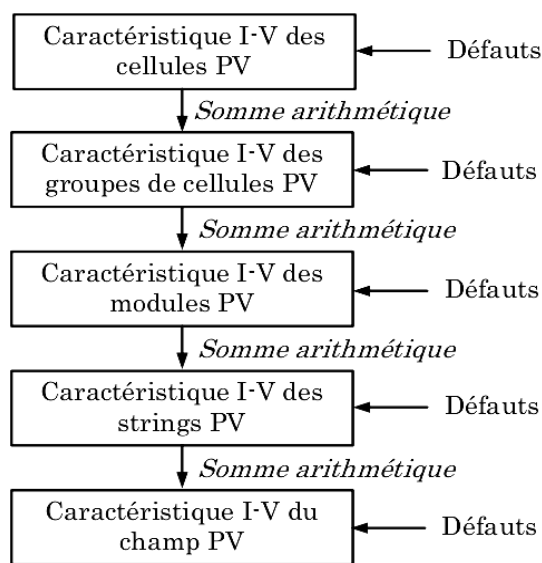


FIG.III.0 PLAN DE MODÉLISATION D'UN CHAMP PV EN FONCTIONNEMENT DÉFAILLANT

Nous savons que la caractéristique I-V d'une cellule PV possède la capacité de fournir des informations sur l'état de celle-ci, et vu que cette dernière représente le composant élémentaire du champ PV, et que certains défauts peuvent avoir lieu justement au niveau de la cellule, nous démarrons donc notre étude d'obtention de la caractéristique I-V à partir de la cellule, on travaillera sur le modèle proposé dans la littérature c'est-à-dire le (model Bishop), le passage de la caractéristique d'un composant d'une étape à une autre est réalisé en faisant la somme arithmétique du courant ou de la tension suivant la configuration (série ou parallèle) des composant qui constituent le composant considéré suivant, chaque passage d'une étape à une autre, la caractéristique I-V est accompagnée par une modification selon les nouveaux défaut venant.

III.4- Les défauts et anomalies d'un champ PV retenues

Dans cette partie nous travaillerons uniquement sur la liste et la classification Tableau.III.0 proposée dans [2], en effet selon la démarche de modélisation retenue, on cherche à classer les défauts selon l'étape à laquelle ils interviennent et si ils peuvent modifier le comportement du composant de l'étape considéré.

Composant du champ	Nature des défauts	Dénomination de défauts
Cellules	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
Groupes de cellules	Destruction des diodes Absence de diodes Inversion de la polarité des diodes Diode mal connectée Diode court-circuitée	Défaut de diode de bypass
Module	Modules court-circuités Inversion de polarité du module Modules shuntés	Défaut de module
Strings	Rupture du circuit électrique Destruction de la liaison Corrosion des connexions Corrosion des contacts Court-circuit du circuit électrique Module déconnecté	Défaut de connectique
Champ	Destruction des diodes Absence de diodes Inversion de la polarité des diodes Diode mal connectée Diode court-circuitée	Défaut de diode anti-retour

TABLEAU .III.0 : CLASSIFICATION DE DÉFAUTS ET D'ANOMALIES D'UN CHAMP PV

III.5- Les Différents Défauts

III.5.1- Défaut de Mismatch et d'ombrage

III.5.1.1- Définition

Dans le chapitre précédant, nous avons étudié l'interconnexion de cellules ayant des Caractéristiques identiques. Cette étude est purement théorique car en réalité dans un système PV chaque cellule PV possède sa propre caractéristique. Ces différences de caractéristiques sont communément appelées Mismatch. Nous définirons ici deux types de Mismatch [2,3] :

- Le mismatch structurel
- Le mismatch fonctionnel

- Le Mismatch structurel découle du fait que par exemple deux cellules identiques (même technologie, même procédé de fabrication, même constructeur, même série) soumises aux mêmes conditions de fonctionnement auront des caractéristiques différentes.

En effet les constructeurs garantissent une dispersion des caractéristiques de leurs cellules PV à +/- 3%, ou +/-5% voire même -5% / +10%. Cette dispersion occasionne lors de la mise en série ou en parallèle de ces cellules des pertes par mismatch structurel. En effet le point maximal de puissance de l'ensemble n'est pas la somme des points de puissance maximale de chaque cellule. Ces pertes par mismatch sont structurelles à l'installation et sont présentes quel que soit le fonctionnement.

En puissance ces pertes sont faibles, comprises entre 1% et 10%, mais ces pertes ayant lieu en permanence, l'énergie perdue sur la durée de vie de l'installation peut être très importante.

- Le Mismatch fonctionnel est dû à des conditions de fonctionnement des cellules PV différentes, ombrages partiel, point chaud.... Ces pertes peuvent être très importantes. Par exemple 3% de la surface d'un module ombrée entraîne une perte de puissance de plus de 50%. Tous Les différences de conditions de fonctionnement n'auront pas les mêmes conséquences bien sûr .

Dans un groupement de cellules PV placées en série le courant circulant dans toutes les cellules PV est identique. Ce courant étant très dépendant de l'éclairement, il en résulte une déformation de la caractéristique I-V du groupe de cellules . Cette déformation a deux effets. Le premier effet est la diminution de la puissance disponible ; la cellule la plus faible impose son point de fonctionnement ou bien elle est by-passée. Une répartition non uniforme de l'irradiation solaire à des conséquences importantes sur l'énergie produite lors d'une mise en série de cellules.

Les cellules ayant un éclairement plus faible vont pénaliser l'ensemble des cellules connectées en série.

En revanche une différence de température aura elle que peu d'impact sur des cellules mises en série. La cellule la plus faible n'induit que très peu de pertes de puissance dans les autres cellules car la température influence faiblement le courant de la cellule.

En revanche dans un groupement parallèle, ce sont les tensions aux bornes des cellules qui doivent être identiques. La tension variant très peu en fonction de l'irradiation solaire, la

mise en parallèle de cellules PV éclairées différemment n'a que peu d'impact sur la tension de fonctionnement. Le courant du groupement en parallèle de cellules PV sera la somme des courants de chaque cellule. L'ombrage est donc moins critique dans le cas d'une mise en parallèle que lors d'une mise en série. En revanche ce sont les différences de température qui vont occasionner des hétérogénéités au niveau des tensions optimales des modules et donc des pertes lors d'une mise en parallèle.

Quel que soit le type d'interconnexion entre les cellules, l'assemblage de cellules PV provoque donc des pertes par mismatch.

On dira enfin que le défaut d'ombrage n'est finalement qu'un cas particulier du défaut mismatch [2]. Nous présentons ci-dessous l'impact des défauts sur les différents paramètres.

Nature des défauts	Paramètres affectés
Ombrage (feuilles, neige, sable.....)	Variation de I_{ph}
Échauffement des cellules	Variation de T
Fissure, Corrosion des liaisons....	Variation de R_s
Humidité, Modules de performances différentes, Détérioration des cellules.....	Variation de tous les paramètres des cellules

Dans notre étude de modélisation qui suit nous examinerons juste le comportement d'un champ PV pour les différentes variations possibles de ces paramètres, tout en sachant que ces variations ne sont pas forcément réalistes [2].

III.5.1.2- Modélisation

D'après la définition présentée en haut le défaut de mismatch et d'ombrage peut être modélisé par la variation des différents paramètres de la cellule.

Cependant à cause de la différence des différentes cellules et donc de leurs paramètres, le principe de la somme arithmétique ne peut être appliqué dans notre étude, on remarque par exemple que lors de la mise en série, la tension n'est plus la même pour un même courant, et

lors de la mise en parallèle, le courant délivré par chaque branche n'est plus égale pour une même tension.

C'est pour cela, que nous allons en quelque sorte dévisser la modélisation en plusieurs étapes, en commençant par la cellule, puis Groupe, Module, String, et en fin Champ.

Etape 1 : Obtention de la caractéristique I-V pour une Cellule.

Toujours de la même manière, c'est-à-dire en reprenant la procédure et l'algorithme de Newton-Raphson. On fixe le courant sur un intervalle souhaité, puis on cherche la tension correspondante, nous allons Modéliser cela sous Matlab.

Cependant nous avons dit que dans le cas de mismatch, pour un courant quelconque, la tension produite par les cellules n'est pas forcément égale car leurs paramètres ne sont pas les mêmes.

Pour bien expliquer cela nous allons reprendre l'exemple précédent d'un fonctionnement d'un champ sain et nous allons supposer qu'une cellule est à 50% ombrée, donc d'après le tableau donné ci-dessus nous allons diminuer I_{ph} de 50% ce qui correspondra à la valeur de 2.5 A. Les Figures suivantes illustrent l'allure d'une cellule (ombrée) et celle d'une cellule (bonne).

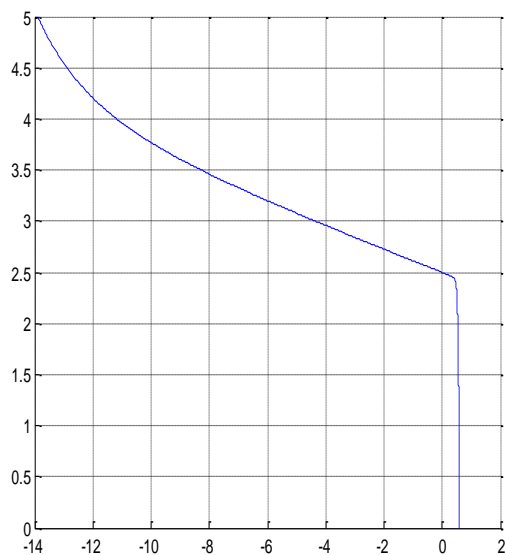


FIG.III.1 CARACTÉRISTIQUE I-V D'UNE CELLULE OMBRÉE

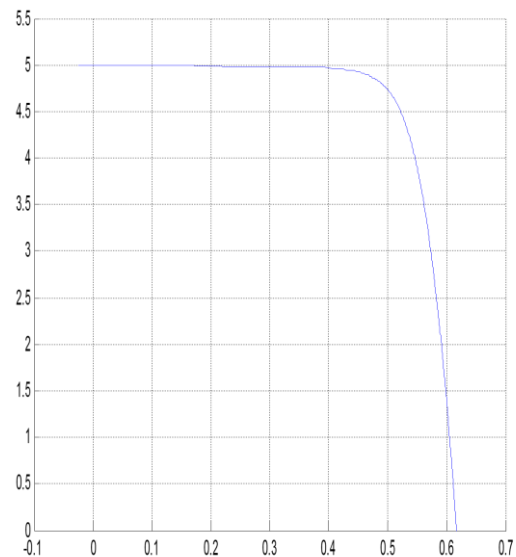


FIG.III.2 CARACTÉRISTIQUE I-V D'UNE CELLULE BONNE

Interprétation

On remarque très bien que le courant de la cellule ombrée a chuté à 2.5 A c'est-à-dire de 50 % par rapport au courant initial de la cellule bonne, en plus de cela nous avons obtenu un fonctionnement dans la zone 2, qui correspond à un fonctionnement en mode récepteur, ou la cellule est forcée par un circuit extérieur, dans notre cas c'est I_{ph} .

Etape 2 : Obtention de la caractéristique I-V pour un groupe

La caractéristique de la cellule obtenue précédemment, nous renvoie à déchiffrer quelques résultats notamment dans la zone 2.

Lorsque une cellule est traversée par un courant supérieur à son courant de court-circuit, elle produit une tension négative, ce qui veut dire qu'au sein d'un groupe la somme des tensions peut être aussi négative.

C'est dans cette situation que la diode de By-pass intervient et joue son rôle en devenant passante afin de dévier le courant, la fig.III.3 ci-dessous illustre le phénomène.

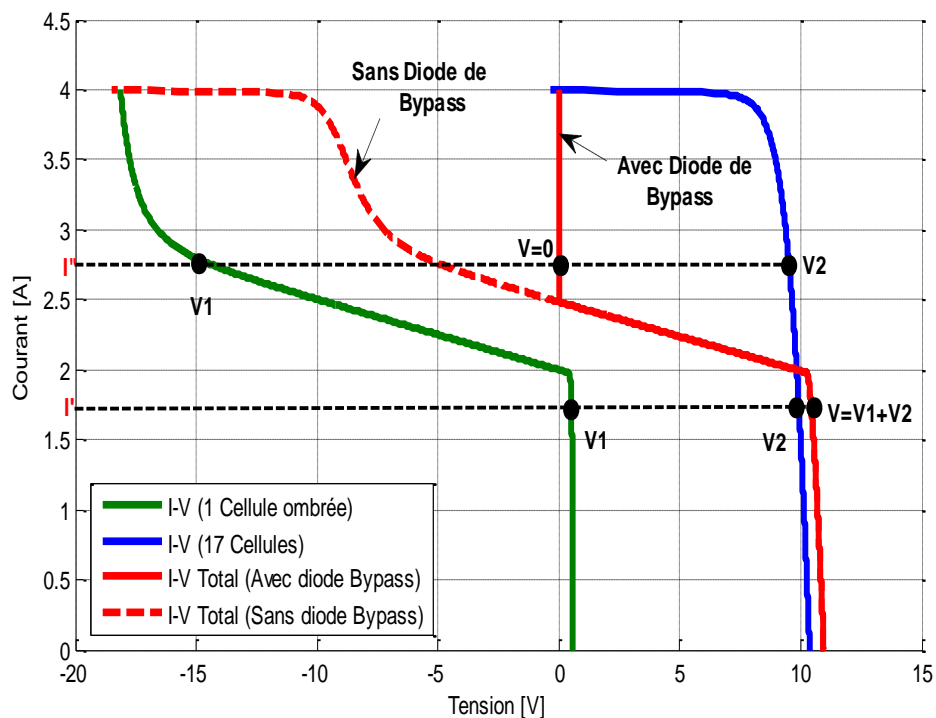


FIG.III.3 CARACTÉRISTIQUE D'UN GROUPE DE CELLULES PROTÉGÉ PAR LA DIODE BY-PASS

Afin d'obtenir le courant et la tension du j^{eme} groupe de cellules on appliquera les relations **(III.0) : [2]**

$$I_{\text{groupe}j} = I_{\text{cellule}} + I_{\text{bypass}}$$

$$V_{\text{groupe}j} = \sum_{i=1}^{N_{\text{cellule}}} V_{\text{cellule},i} \text{ si } \sum_{i=1}^{N_{\text{cellule}}} V_{\text{cellule},i} \geq 0 \quad \text{(III.0)}$$

$$V_{\text{groupe}j} = 0 \text{ si } \sum_{i=1}^{N_{\text{cellule}}} V_{\text{cellule},i} < 0$$

Continuons à présent notre étude, les deux figures suivantes montrent l'allure d'un groupe de 18 cellules, dans lequel une cellule est ombrée Fig.III.5 et une allure d'un groupe bon Fig.III.4

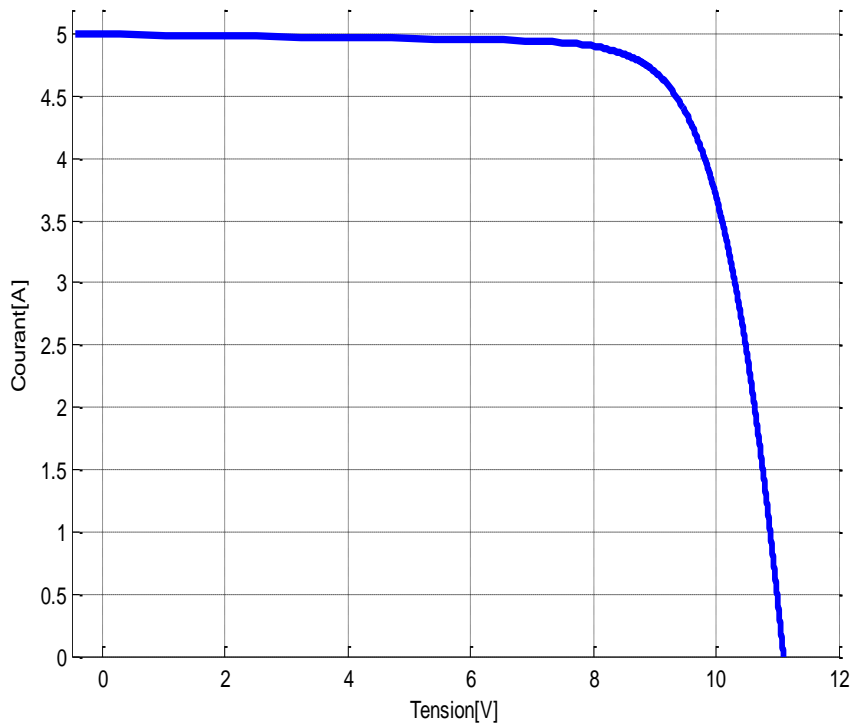


FIG.III.4 CARACTÉRISTIQUE I-V D'UN GROUPE « BON »

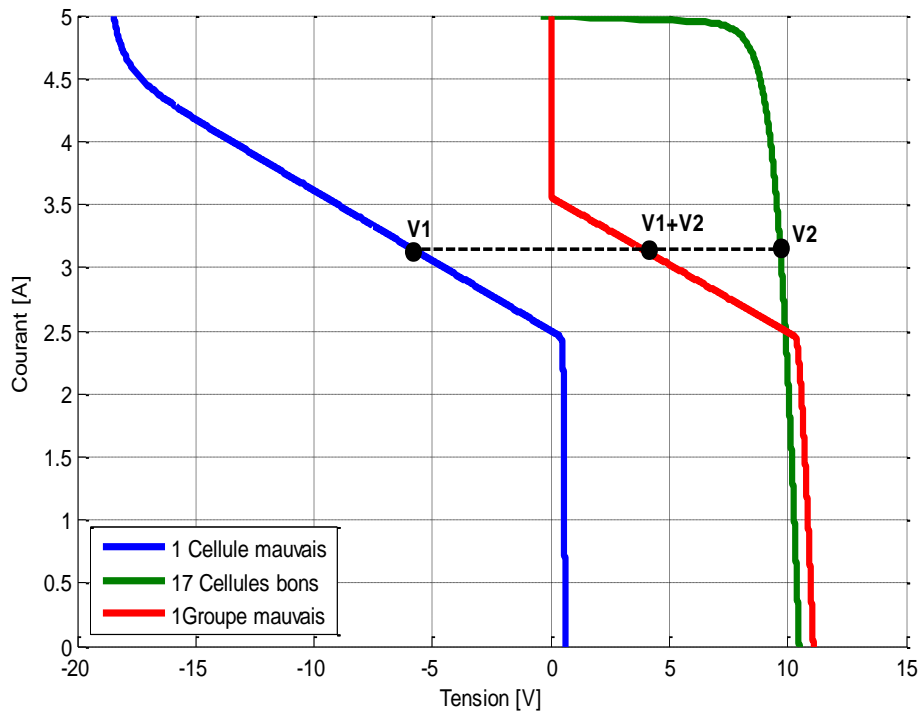


FIG.III.5 CARACTÉRISTIQUE I-V D'UN GROUPE «MAUVAIS »

Etape 3 : Obtention de la caractéristique I-V pour un Module

Le courant et la tension du k^{eme} module d'un string est donné par la relation **(III.1)** [2].

$$I_{\text{module},k} = I_{\text{groupe}} \tag{III.1}$$

$$V_{\text{module},k} = \sum_{j=1}^{N_{\text{groupe}}} V_{\text{groupe},j}$$

L'allure d'un module qui contient un groupe de cellules (Mauvais) et l'allure du module (bon) est montrée dans les Fig.III.6 et Fig.III.7

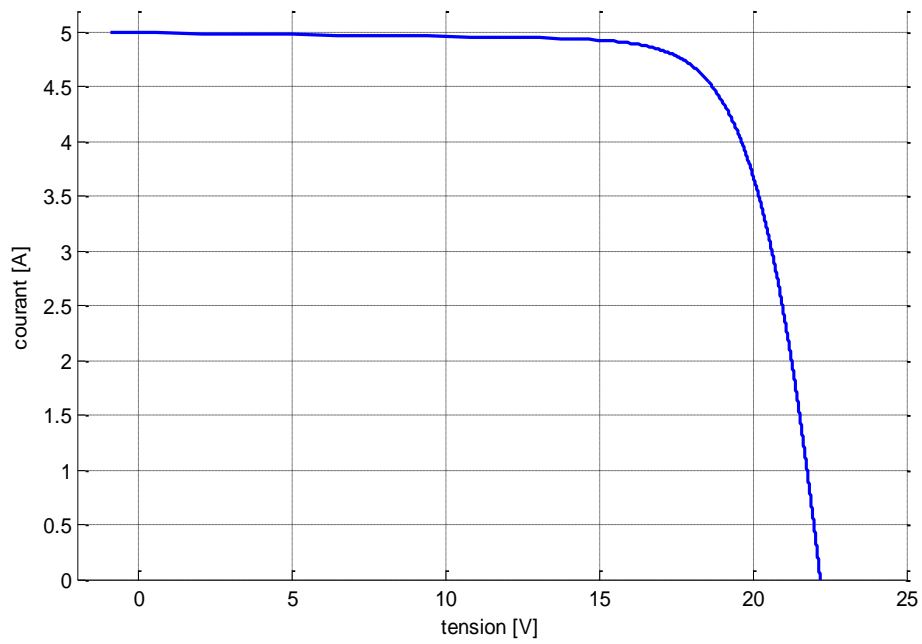


FIG.III.6 CARACTÉRISTIQUE I-V D'UN MODULE « BON »

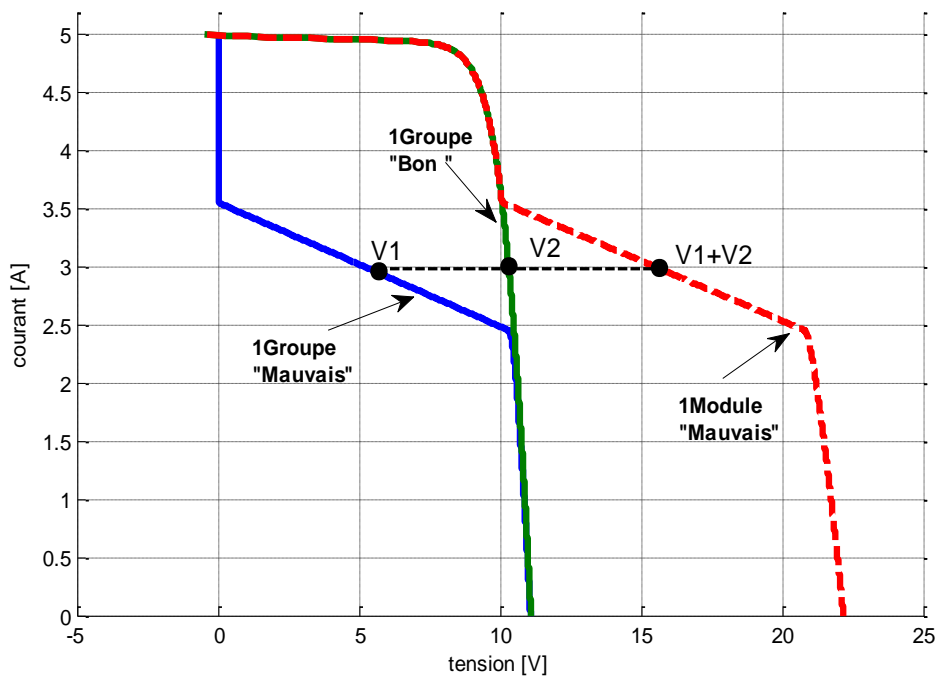


FIG.III.7 CARACTÉRISTIQUE I-V D'UN MODULE « MAUVAIS »

Etape 4 : Obtention de la caractéristique I-V pour un String

L'équation (III.2) donne la relation du courant et de la tension du z^{ème} string du champ

$$I_{\text{string},z} = I_{\text{module}} \quad \text{(III.2)}$$

$$V_{\text{string},z} = \sum_{k=1}^{N_{\text{module}}} V_{\text{module},k}$$

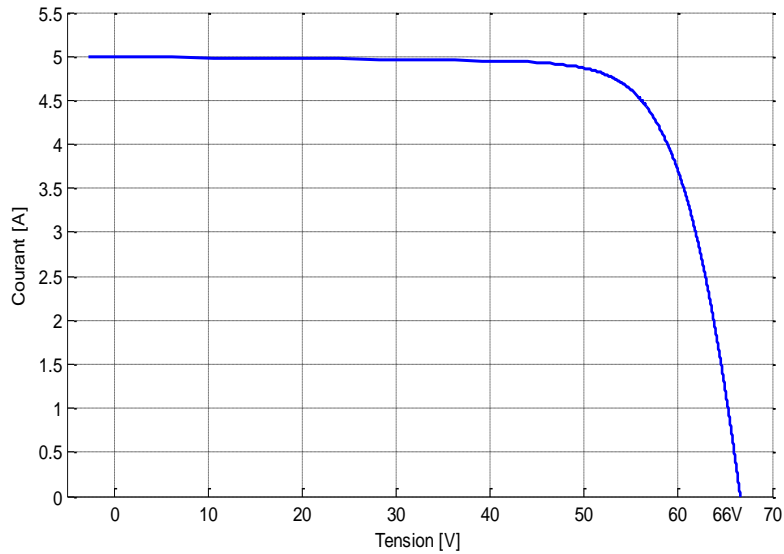


FIG.III.8 CARACTÉRISTIQUE I-V D'UN STRING « BON »

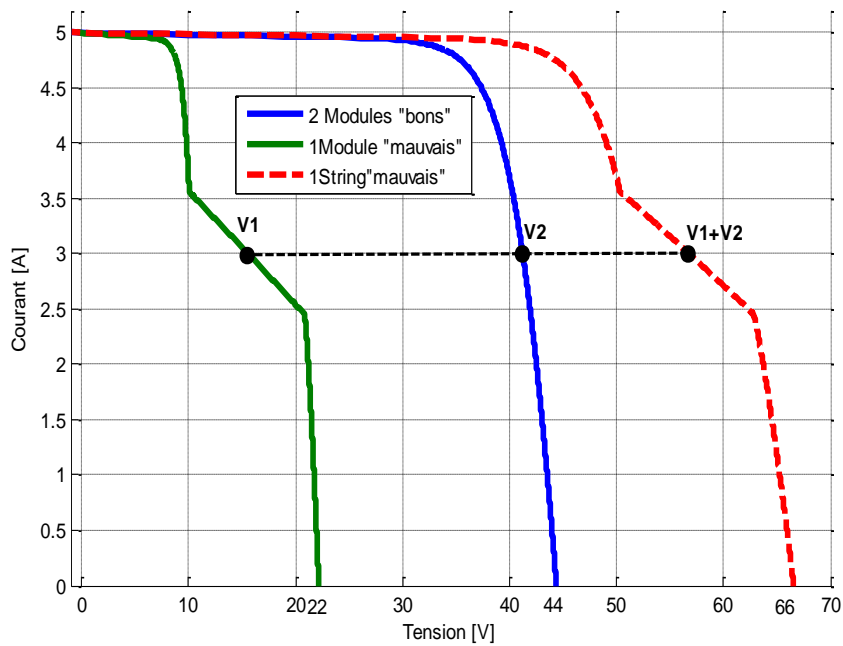


FIG.III.9 CARACTÉRISTIQUE I-V D'UN STRING « MAUVAIS »

Les deux figures (Fig.III.8 et Fig.III.9) données ci-dessus représentent les caractéristiques I-V d'un string contenant un mauvais module et deux bons modules.

Étape 5 : Obtention de la caractéristique I-V pour un Champ

Tous les strings connectés en parallèles doivent respecter la contrainte d'égalité de la tension à leurs bornes. Cependant cela n'implique pas que le courant fourni par chaque string doit être le même.

Pour une valeur attendue de la tension, on pourra déduire celle du courant on faisant une interpolation de la caractéristique du string, tout en respectant que la tension doit être identique [2].

III.5.1.3- Exemple explicatif

On prendra l'exemple de deux strings, dont la caractéristique n'est pas identique, sont mis en parallèle. Pour une tension donnée (V'), on remarque bien que la valeur du courant fourni par chaque string n'est pas la même.

Les valeurs I_1 et I_2 du courant de chaque string sont déduites d'une interpolation de leur caractéristique I-V respective [2].

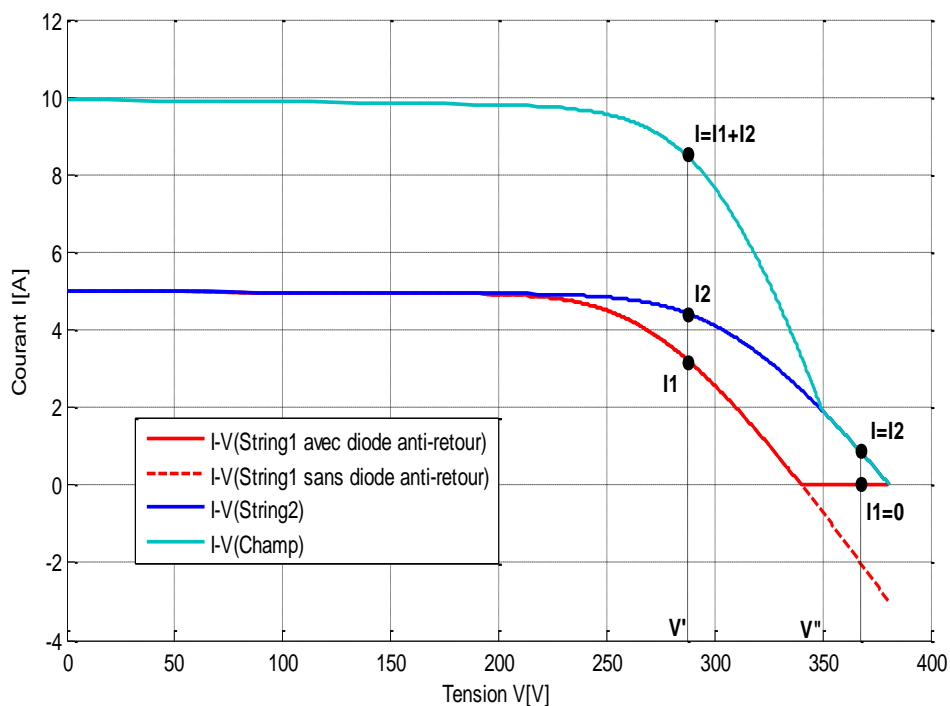


FIG.III.10 CARACTÉRISTIQUE D'UN CHAMP PV PROTÉGÉ PAR LA DIODE ANTI-RETOUR

En fonctionnement normal du champ PV, la diode anti-retour conduit et laisse passer le courant produit par le string. En cas de mismatch, il se peut que cette diode devienne bloquée.

Dans la Fig.III.10 De l'exemple précédent, on voit que la tension de fonctionnement (V') est bien supérieure à la tension de circuit ouvert du string 1.

La diode anti-retour du string 1 est donc bloquée. Ce blocage empêche le courant débité par le string 2 de circuler dans le sens inverse dans le string 1. L'équation (III.3) donne la relation du courant et de la tension du champ [2].

$$V_{\text{champ}} = V_{\text{imposée}}$$

$$I'_{\text{string}, z} = \text{Interpolation}(V_{\text{champ}}, I_{\text{string}, z}, V_{\text{string}, z}) \quad (\text{III.3})$$

$$I_{\text{champ}} = \sum_{z=1}^{N_{\text{string}}} I'_{\text{string}, z} \text{ avec } I'_{\text{string}, z} = 0 \text{ si } V_{\text{string}, z} < V_{\text{champ}}$$

En tenant compte de l'exemple considéré, la caractéristique du champ obtenu à partir de la démarche proposée est montrée dans la figure suivante.

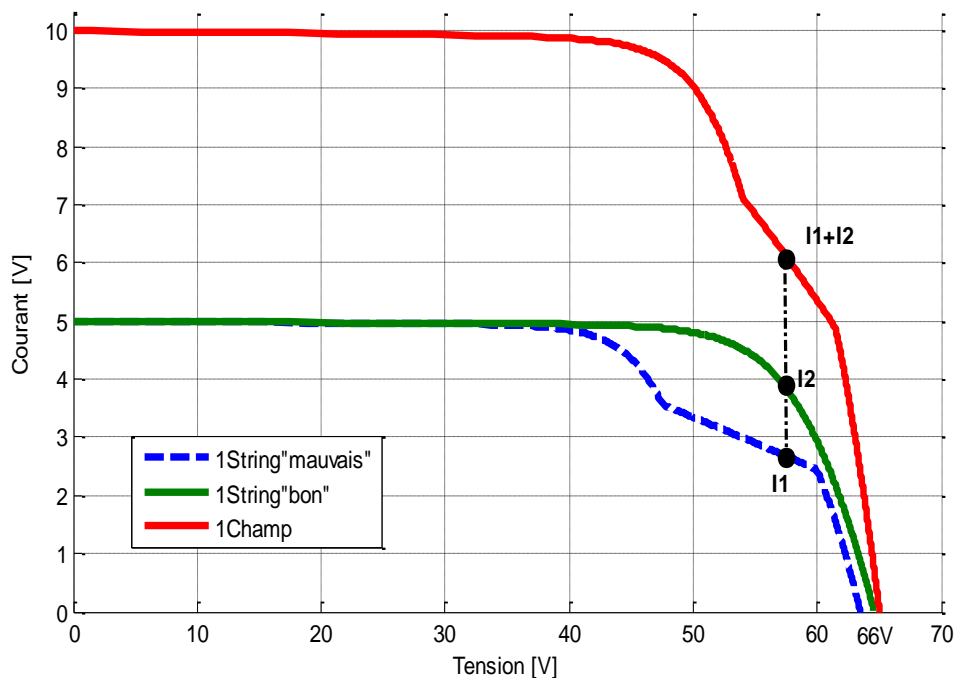


FIG.III.11 FORMATION DE LA CARACTÉRISTIQUE I-V D'UN CHAMP SELON L'EXEMPLE PROPOSÉ

III.5.1.4- Application

Présentation de quelques résultats

Pour illustrer l'impact de chaque paramètre sur la caractéristique du module, un seul paramètre est modifié à la fois.

Les paramètres utilisés dans cette simulation sont indiqués dans le Tableau ci-dessous.

<u>Paramètres</u>	N^{br} Cellules	N^{br} Diodes by-pass	I_{ph}(A)	T_c (°K)	R_s (ohm)	R_p (ohm)	A	I₀(A)
<u>Valeur</u>	72	4	4	298	0.015	5	1.22	2.3^e-8

Les Figures ci-dessous montrent des résultats de simulation d'un module lors d'un défaut de mismatch et d'ombrage.

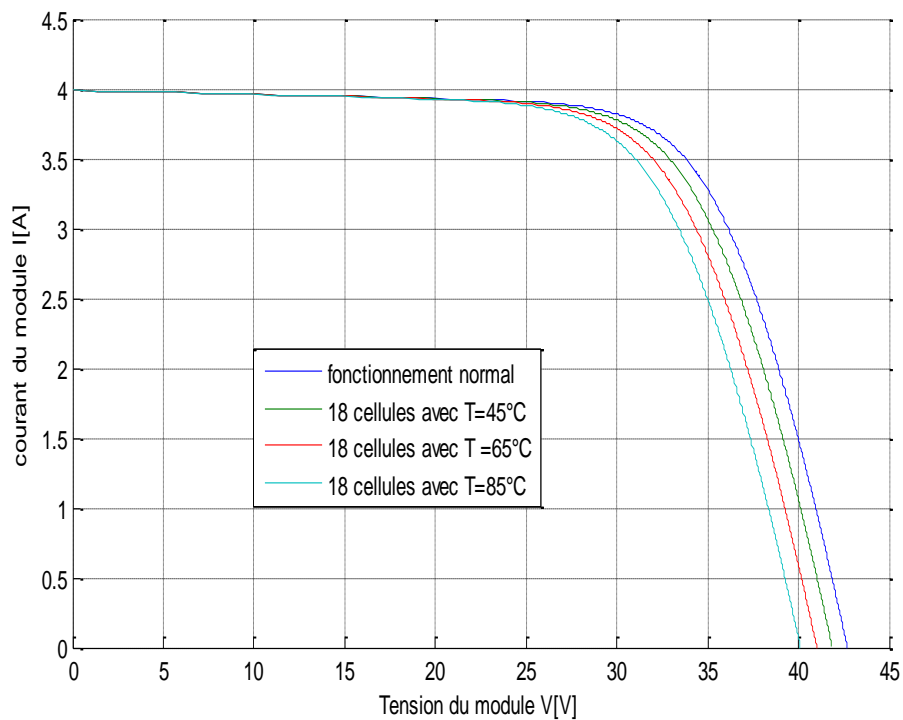


FIG.III.12 MODULE LORS D'UN DÉFAUTS DE MISMATCH TYPES T

Interprétation

La Fig.III.12 représente le cas d'un défaut de Mismatch dû à la dispersion de la température des cellules,

La courbe Bleu représente le fonctionnement des cellules dans les conditions standard, on remarque bien dans la figure, que la tension V_{co} décroît, et que le courant I_{sc} reste inchangé et cela à mesure que la température des cellules augmente. Pour ce qui concerne le facteur de forme plus la température croît, plus le facteur de forme diminue.

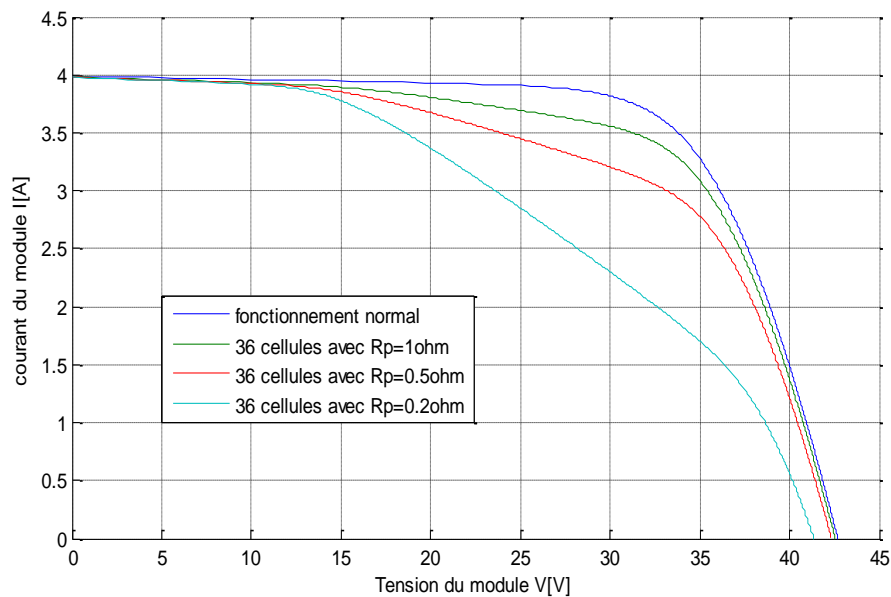


FIG.III.13 MODULE LORS D'UN DÉFAUT DE MISMATCH TYPE R_p .

INTERPRÉTATION

La Fig.III.13 représente le cas d'un défaut de Mismatch dû à la dispersion de la résistance parallèle R_p ,

La courbe Bleu représente le fonctionnement des cellules dans les conditions standard, on remarque que pour une valeur donnée de la tension la chute en courant est beaucoup plus importante à mesure que la résistance diminue. I_{sc} reste inchangée, ainsi que V_{co} pour une sévérité faible,

Le facteur de forme diminue en fonction de la réduction de la valeur de R_p [2].

Si on continue de diminuer la résistance shunt, on obtiendra une ligne droite sans pente, ce qui signifie que la totalité du courant produit par la cellule sera absorbé par la résistance, ce qui est tout à fait normal, car le courant suit toujours le chemin le moins résistif.

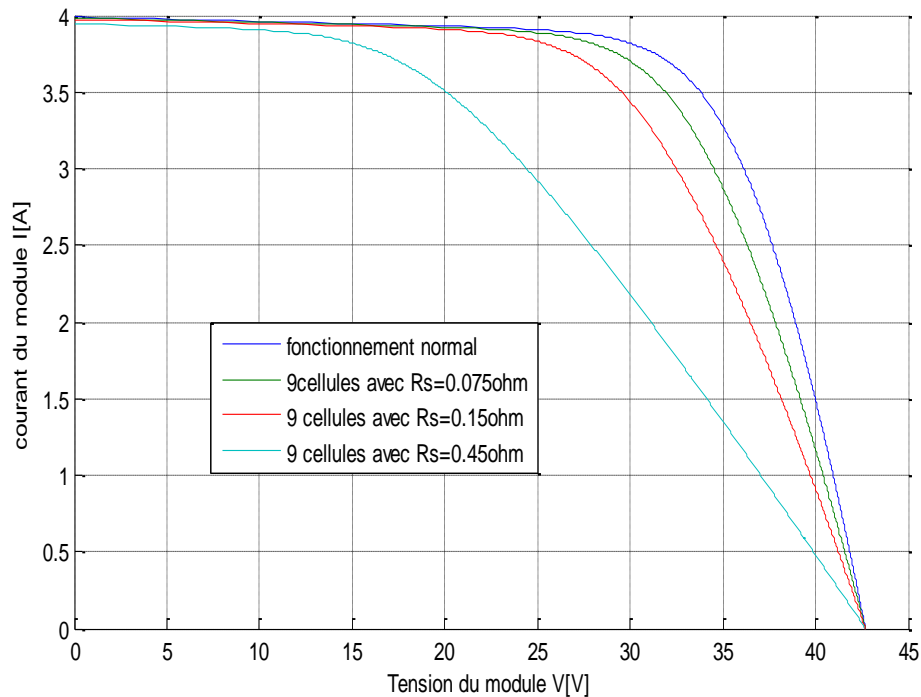


FIG.LLL.14 MODULE LORS D'UN DÉFAUT MISMATCH TYPE R_s

Interpretation

La Fig.III.14 représente le cas d'un défaut de Mismatch dû à la dispersion de la résistance parallèle R_s ,

La courbe Bleu représente le fonctionnement des cellules dans les conditions standard,

On remarque que pour une valeur donnée du courant la chute en tension est beaucoup plus importante à mesure que la résistance série augmente.

On remarque aussi que V_{co} et I_{sc} restent inchangés. Et pour ce qui concerne le facteur de forme plus la résistance croit, plus le facteur de forme diminue.

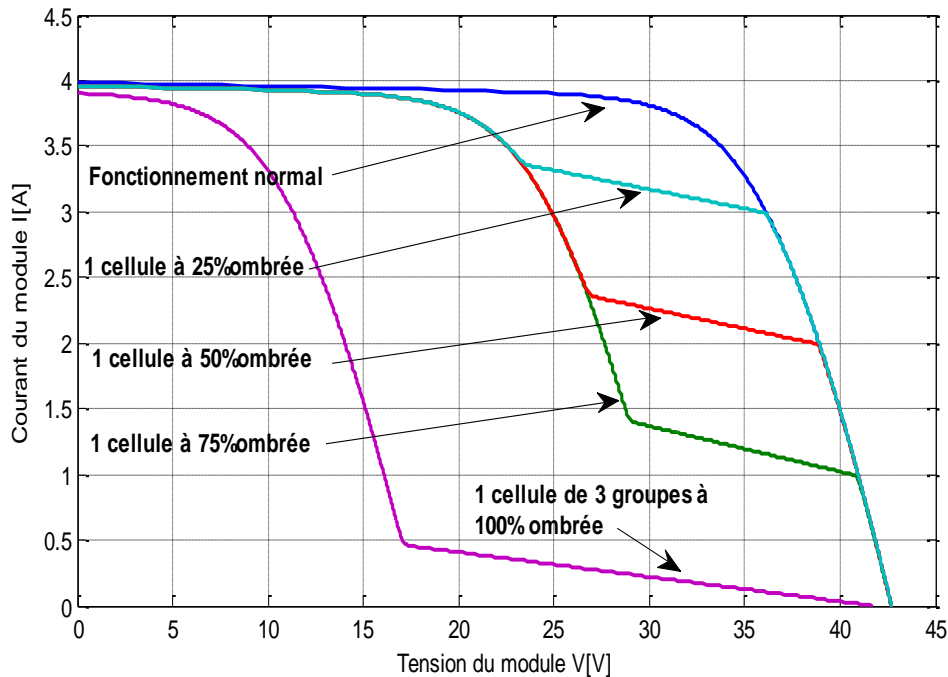


FIG.LLL.15 MODULE PV LORS D'UN DÉFAUT D'OMBRAGE

Interprétation

La Fig.Ill.15 représente un groupe de caractéristiques d'un module lors de différents d'ombrage.

On remarque que le courant I_{sc} reste inchangé, par contre la tension V_{oc} diminue à mesure que le nombre de cellule ombré augmente et aussi à mesure que la surface d'ombrage croit.

Pour ce qui concerne le facteur de forme plus l'ombrage croit, plus le facteur de forme diminue.

Les point d'inflexion présentés dans cette figure sont dues au fait qu'une ou plusieurs diodes de bypass se mettent en conduction.

III.5.2- Défauts de diodes de By-pass

Nous avons dit déjà dans la partie modélisation Étape 2 que lorsque une cellule est traverser par un courant supérieur a sont courant de court-circuit, elle produit une tension négative, ce qui veut dire qu'au sein d'un groupe la somme des tensions peut être aussi négative.

C'est donc dans cette situation que la diode de By-pass devient passante afin de dévier le courant. Dans le cas contraire elle sera bloquée.

Comme tout composant, la diode By-pass subit aussi des défaillances électriques, ces défaillances sont illustrées dans le tableau.III.1

En plus des défauts électriques, la diode pourrait éventuellement claquée au cours de son fonctionnement, et se comporter telle une impédance, la Fig.III.16 Montre un schéma d'un groupe de cellules dans lequel la diode de bypass est remplacée par un élément qui peut, à chaque fois prendre un des états défaillants de la diode. [2]

Défaut de diode de By-Pass	Nature des défauts
	Destruction des diodes
	Absence de Diodes
	Inversion de la polarité des diodes
	Diode mal connectée
	Diode Court-circuité

TABLEAU .III.1 DÉFAILLANCES D'UNE DIODE BY-PASS [2]

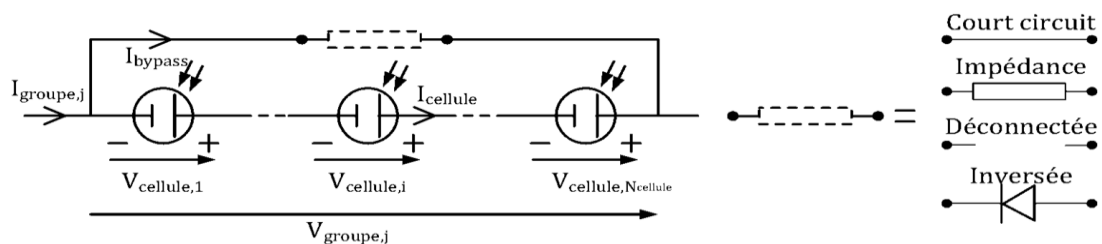


FIG.III.16 ILLUSTRATION D'UN GROUPE DE CELLULES DANS LEQUEL LA DIODE DE BYPASS EST REMPLACÉE PAR UN ÉLÉMENT QUI PEUT, À CHAQUE FOIS PRENDRE UN DES ÉTATS DÉFAILLANTS DE LA DIODE. [2]

III.5.2.1- Modélisation

Nous présenterons ici quelques résultats de simulation d'un module lors de différents défauts de diode de by-pass [2].

Les paramètres utilisés restent inchangés

Cas d'un court-circuit

Lors d'un court-circuit La tension du groupe de cellules s'annule.

Par contre le courant du groupe de cellules est égal à la somme du courant circulant dans les cellules et de celui circulant dans le chemin court-circuitant.

Le courant circulant dans les cellules est égal au courant maximum produit par les cellules et le chemin court-circuitant porte le courant en excès [2].

$$V_{\text{groupe},j} = 0 \quad (\text{III.4})$$

$$I_{\text{groupe}} = I_{\text{by-pass}} + I_{\text{cellule}}$$

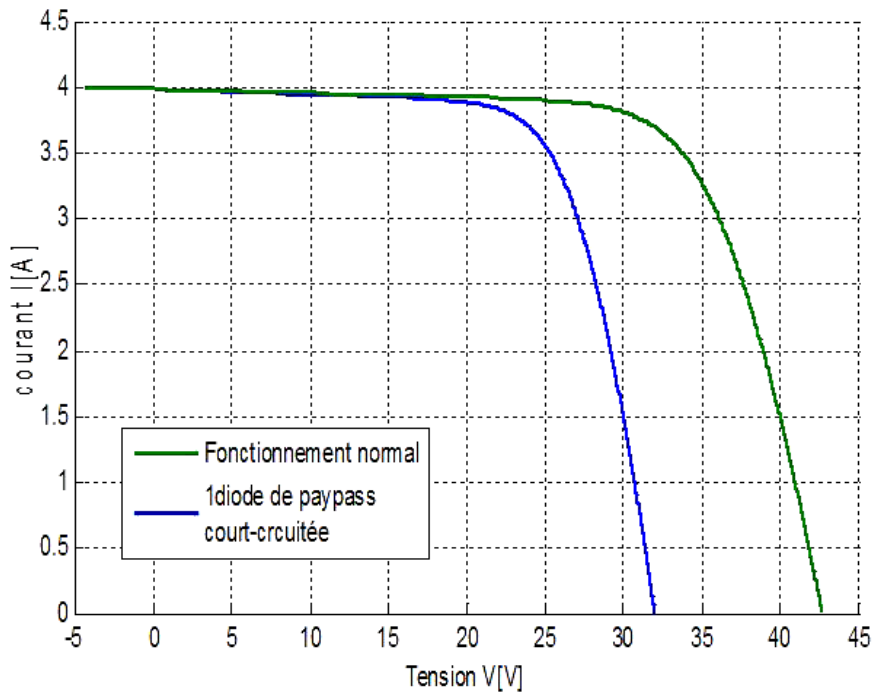


FIG.III.17 DIODE DE BY-PASS COURT-CIRCUITÉE

Interprétation

On remarque que la diode de By-pass provoque une chute de tension de 25 %, Isc reste inchangé, y'a en tout 4 diodes de by-pass dans un module il est donc facile a calculé la chute.

Cas d'une impédance Z

La tension du groupe est égale à la somme de la tension de toutes les cellules dans le groupe. Le courant du groupe est égal à la somme du courant circulant dans le string de cellules et de celui circulant dans l'impédance [2].

$$V_{\text{groupe},j} = \sum_{i=1}^{N_{\text{cellule}}} V_{\text{cellule},i} \quad (\text{III.5})$$

$$I_{\text{groupe}} = I_{\text{cellule}} + V_{\text{groupe},j}/Z$$

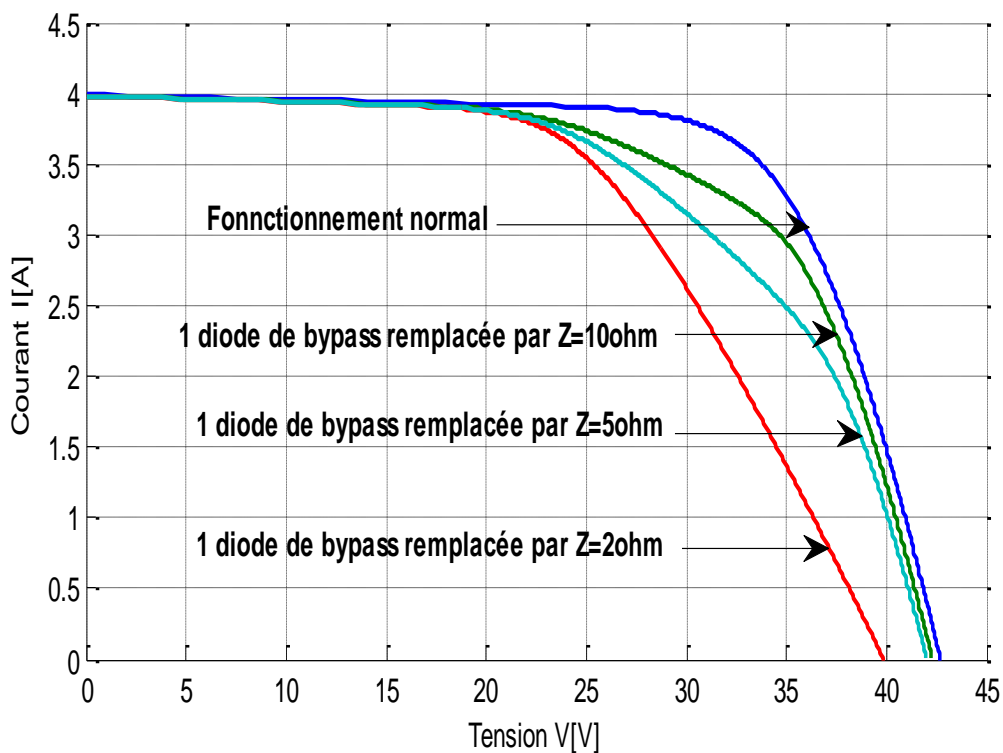


FIG.III.18 DIODE BY-PASS CLAQUÉE

Interprétation

La figure montre le cas où la diode de bypass est en défaut et se comporte comme une impédance. Plus l'impédance diminue, plus elle absorbe le courant produit par le groupe et plus la pente se dévie par rapport à la courbe normale, le courant I_{sc} reste inchangé, et la tension diminue en fonction de l'impédance, quant au facteur de forme il diminue aussi en fonction de l'impédance.

Cas de Circuit ouvert

La tension du groupe est égale à la somme de la tension des cellules du groupe. Le courant du groupe est égal au courant circulant dans le string de cellules [2].

$$V_{\text{groupej}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{cellule}}} V_{\text{cellule},i} \quad \text{(III.6)}$$

$$I_{\text{groupe}} = I_{\text{cellule}}$$

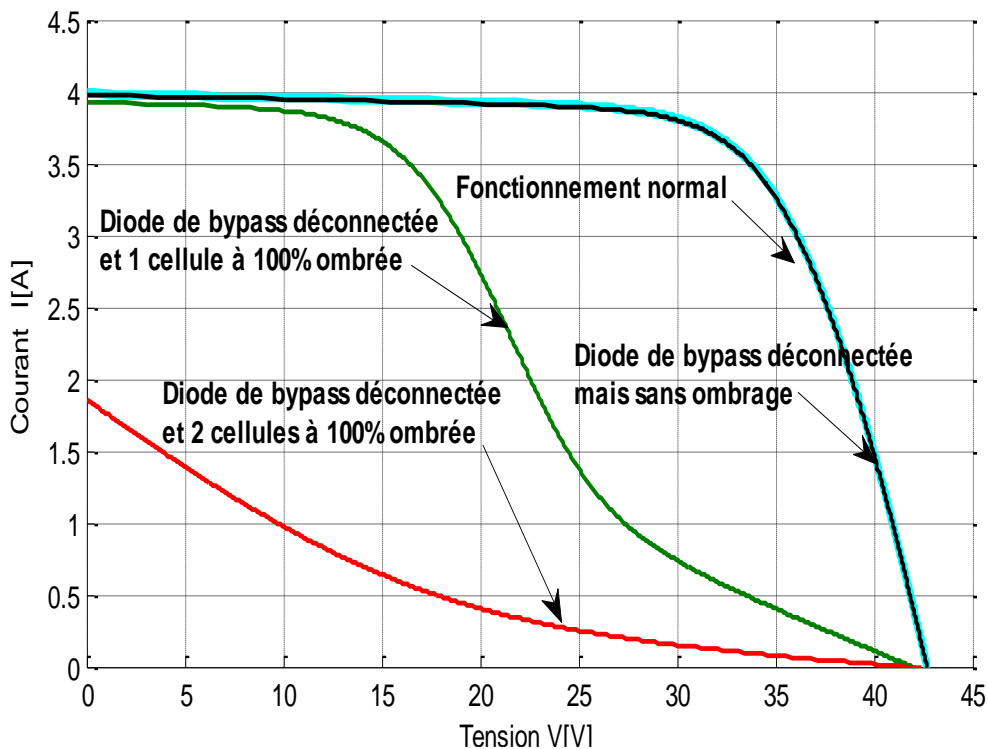


FIG.III.19 DIODE DE BY-PASS DÉCONNECTÉE

Interprétation

La fig.III.19 montre le cas où la diode de by-pass est déconnectée. Sans ombrage, aucune perte de courant ou de tension n'est présente dans le module.

Puis avec un ombrage, la perte en tension augmente en fonction de la croissance de l'amplitude de l'ombrage car il n'y a plus de protection assurée par la diode de by-pass.

On remarque aussi que la tension V_{co} reste inchangé, par contre le courant I_{sc} et le facteur de forme diminue en fonction du nombre de cellule ombrées.

Cas d'inversion de polarisation

Contrairement à son fonctionnement normal, la diode conduit quand la somme de la tension des cellules qu'elle protège est positive et se bloque dans le cas contraire [2].

$$V_{\text{groupej}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{cellule}}} V_{\text{cellule},i} \quad \text{Si} \quad \sum_{i=1}^{N_{\text{cellule}}} V_{\text{cellule},i} < 0$$

$$V_{\text{groupe}} = 0 \quad \text{Si} \quad \sum_{i=1}^{N_{\text{cellule}}} V_{\text{cellule},i} > 0 \quad (\text{III.7})$$

$$I_{\text{groupe}} = I_{\text{cellule}} + I_{\text{By-pass}}$$

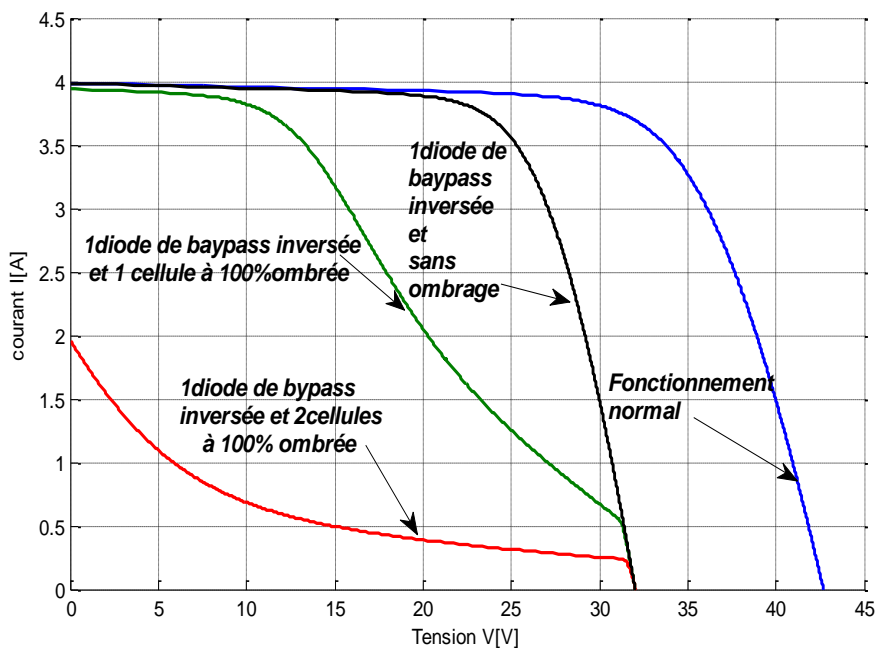


FIG.III.20 DIODE DE BY-PASS INVERSÉE

Interprétation

La fig.III.20 illustre le comportement d'un module quand une diode de by-pass est inversée. Sans ombrage, cette diode de by-pass est passante car la tension à ses bornes est positive. Un quart de la tension du module est perdu. Avec un ombrage.

La tension V_{co} diminue en fonction du nombre de diode inversée, par contre I_{sc} et le facteur de forme diminue en fonction du nombre de cellules ombrées.

III.5.3- Défauts de module

Dans ce cas il s'agit de tous les défauts électriques liés à la connexion d'un module dans un string PV [2].

Ces défauts électriques sont : module C-C, module connecté, module connecté en parallèle avec une impédance, et module inversé.

La Fig.III.21 montre le schéma d'un module avec l'élément qui représente, à chaque fois, un des états défectueux de la connexion du module.

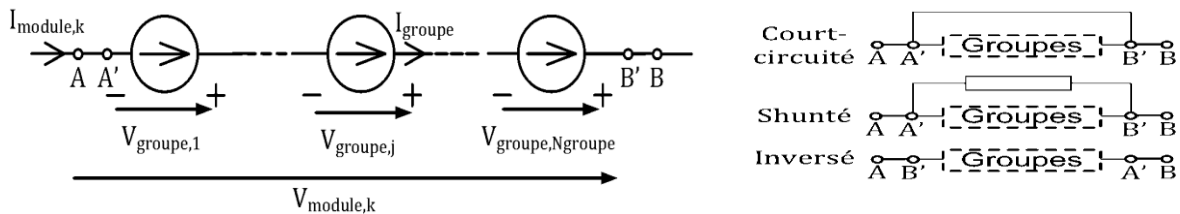


FIGURE.III.21 SCHÉMA BLOC D'UN MODULE PV DÉFAILLANT

III.5.3.1- Modélisation

Cas « module court-circuité »

La tension du module s'annule. Le courant du module est égal à la somme du courant circulant dans les groupes de cellules et de celui circulant dans le chemin du court-circuit. Le courant dans le string est égal au courant maximum produit par les cellules et le chemin court-circuité porte le courant en excès [2].

$$I_{\text{module}} = I_{\text{shunt}} + I_{\text{groupe}} \quad \text{(III.8)}$$

$$V_{\text{module}} = 0$$

Cas « module connecté en parallèle avec une impédance »

La tension du module est égale à la somme de la tension de tous les groupes dans le module. Le courant du module est égal à la somme du courant circulant dans les groupes de cellules et de celui circulant dans l'impédance.

$$V_{\text{module},k} = \sum_{j=1}^{N_{\text{groupe}}} V_{\text{groupe},j} \quad (\text{III.9})$$

$$I_{\text{module}} = I_{\text{groupe}} + V_{\text{module},k}/Z$$

Cas « inversion de la polarité d'un module »

Si un module dans le string PV est inversé, il sera traversé par un courant contraire à celui du string. Dans cette situation, les cellules dans le module inversé sont forcées de fonctionner dans le quadrant IV, et se comportent comme un récepteur avec une tension positive et un courant négatif.

$$V_{\text{module},k} = \sum_{j=1}^{N_{\text{groupe}}} V_{\text{groupe},j} \quad (\text{III.10})$$

$$I_{\text{module}} = -I_{\text{groupe}}$$

III.5.3.2- Application

Prenons l'exemple d'un string PV composé de 9 modules en série, soumis aux différents défauts de module déjà cité.

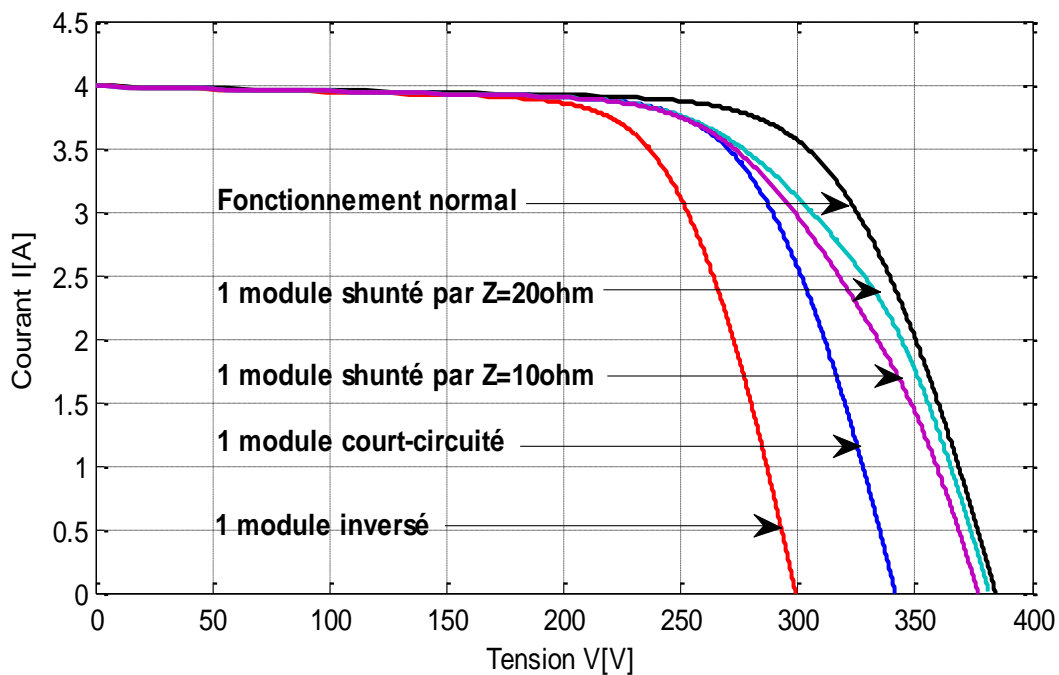


FIG.III.22 CARACTÉRISTIQUES I-V D'UN STRING PV LORS DE DÉFAUT DE MODULE

Interprétation

La courbe noir représente le fonctionnement normal du string, on remarque que le courant I_{sc} est inchangé et que si un module est shunté avec une impédance, pour une tension donnée, la perte en courant devient importante à mesure que l'impédance diminue. Dans le cas d'un court-circuit on a vu que la tension d'un module devient nul, ce qui implique que dans ce cas le string perd la tension d'un module ce qui fait une chute de tension assez considérable, dans le cas d'un module inversé, le string perd deux fois la tension produite par un module car la tension produite par le module inversé sera soustraite de la tension produite par les autres modules.

III.5.4- Défaut de connectique

Ce défaut réside au niveau de la connexion entre deux modules photovoltaïque sur une chaîne de panneaux. Quand les panneaux fonctionnent tous de manière correcte la résistance de connectique est quasi nulle. Par contre dans les cas où deux panneaux ou plus sont considérés dans des cas anormaux (faux contact ou mauvais câblage, corrosion...) cela entraîne l'apparition d'une résistance qui augmente et a des influences non négligeables sur la production d'énergie.

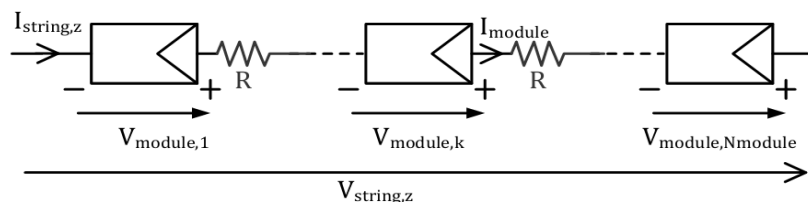


FIG.III.23 SCHÉMA D'UN STRING PV AVEC RÉSISTANCE DE CONNECTIQUE

Afin d'illustrer ce défaut on prendra l'exemple de neuf modules en série, on déterminera la caractéristique I-V pour différentes valeurs de la résistance de connectique [2].

$$V_{string,z} = \sum_{k=1}^{N_{module}} V_{module,k} - R * I_{string,z} \quad (III.10.1)$$

$$I_{string,z} = I_{module}$$

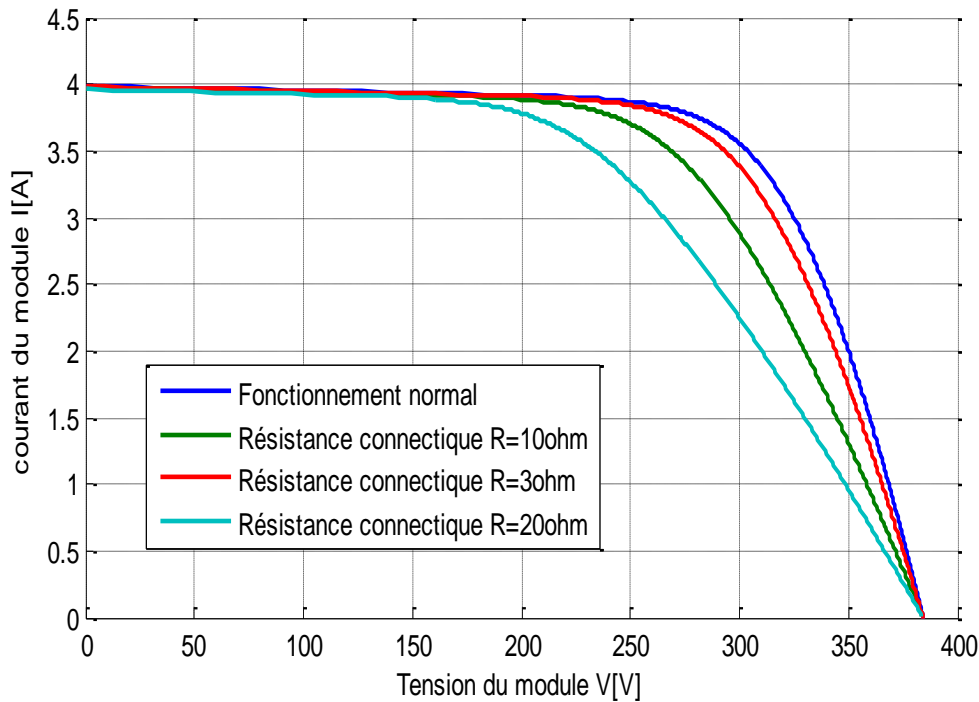


FIG.III.24 CARACTÉRISTIQUES I-V D'UN STRING PV LORS DE DÉFAUTS DE CONNECTIQUE

Interprétation

On remarque que le courant I_{sc} ainsi que la tension V_{oc} restent inchangés, le facteur de forme diminue en fonction de la sévérité. Plus la résistance de connectique augmente plus on a une déviation de la pente vers la gauche.

III.5.5- Défaut de diode Anti-Retour

Les diodes anti-retour jouent par rapport aux strings en parallèle un rôle symétrique aux diodes by-pass pour les cellules en série. C'est à dire que si un string a une tension trop faible les autres strings continue à fonctionner et imposent leurs tensions.

Et comme tous Diode, et de la même manière donc que pour la diode By-pass on aura besoin de 4 types de défauts : C-C, impédance quelconque, C-O, et inversée.

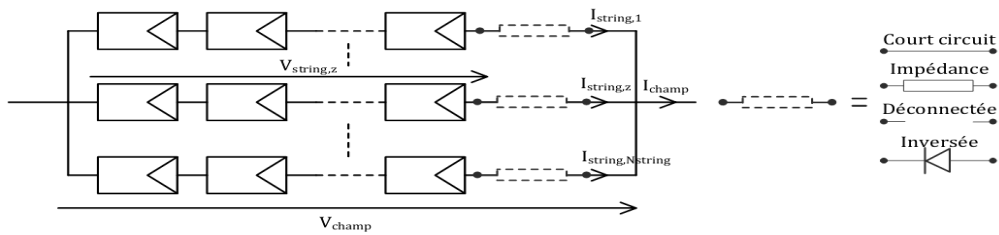


FIG.III.25 SCHÉMA D'UN CHAMP PV AVEC LA DIODE ANTI-RETOUR DÉFAILLANTE

La Fig.III.25 Montre un schéma d'un champ PV dans lequel la diode anti-retour est remplacée par un élément qui peut, à chaque fois, représenter un des états défailants de la diode.

III.5.5.1-Modélisation

Cas « court-circuit »

Dans le cas normal le string fournit du courant et donc de la puissance a la charge, et cela dans un seul et unique sens, car la diode anti retour empêche le phénomène inverse.

Dans le cas où cette diode est court-circuitée le courant du string pourrait en effet circuler dans les deux sens, et dans ce cas-là le string en question peut être amené à absorber du courant [2].

$$V_{\text{champ}} = V_{\text{imposée}}$$

$$I'_{\text{string}, z} = \text{Interpolation} (V_{\text{champ}}, I_{\text{string}}, V_{\text{string}, z}) \quad (\text{III.11})$$

$$I_{\text{champ}} = \sum_{z=1}^{N_{\text{string}}} I'_{\text{string}, z}$$

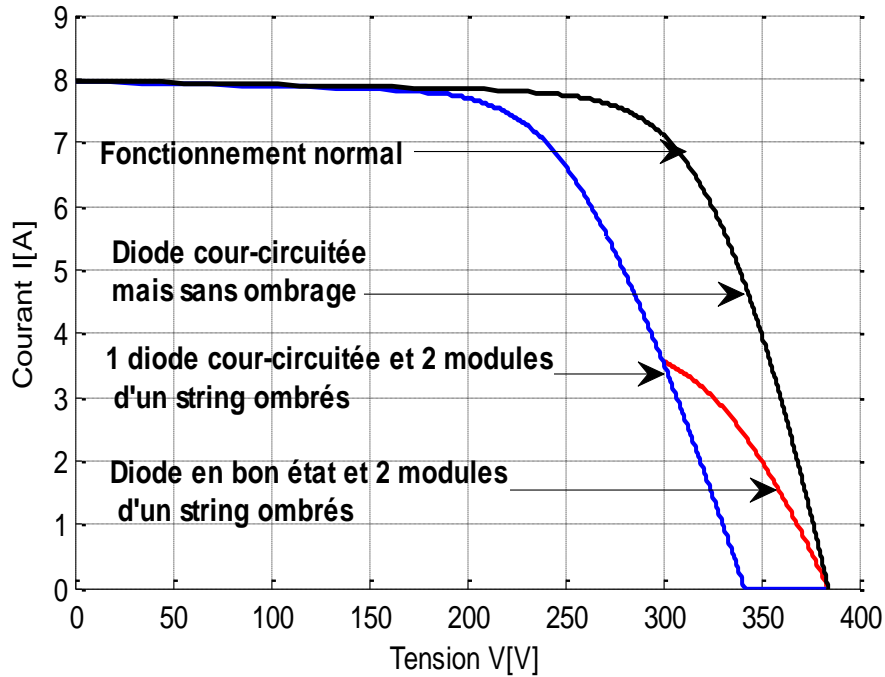


FIG.III.26 CARACTÉRISTIQUE I-V D'UN CHAMP PV LORS DE DÉFAUTS DE DIODE ANTI RETOUR CAS : COURT-CIRCUITÉE

Interprétation

Cette fig.III.26 montre la Caractéristique I-V d'un champ PV lors du cas où une diode anti-retour est court-circuitée. Si la tension des deux strings est équilibrée, le court-circuit de la diode de bypass n'affectera pas le comportement du champ. Si un string produit moins de tension que l'autre, le champ produira plus de courant quand la diode est en bon état que quand elle est court-circuitée.

Cas « impédance Z quelconque »

Le même phénomène que celui du cas précédent apparaît. Sauf que dans ce cas-là on tient compte de la chute de tension due à l'impédance de la diode défailante [2].

$$V_{\text{champ}} = V_{\text{imposée}}$$

$$I'_{\text{string},z} = \text{Interpolation}(V_{\text{champ}}, I_{\text{string}}, V_{\text{string},z} - Z * I_{\text{string},z}) \quad \text{(III.12)}$$

$$I_{\text{champ}} = \sum_{z=1}^{N_{\text{string}}} I'_{\text{string},z}$$

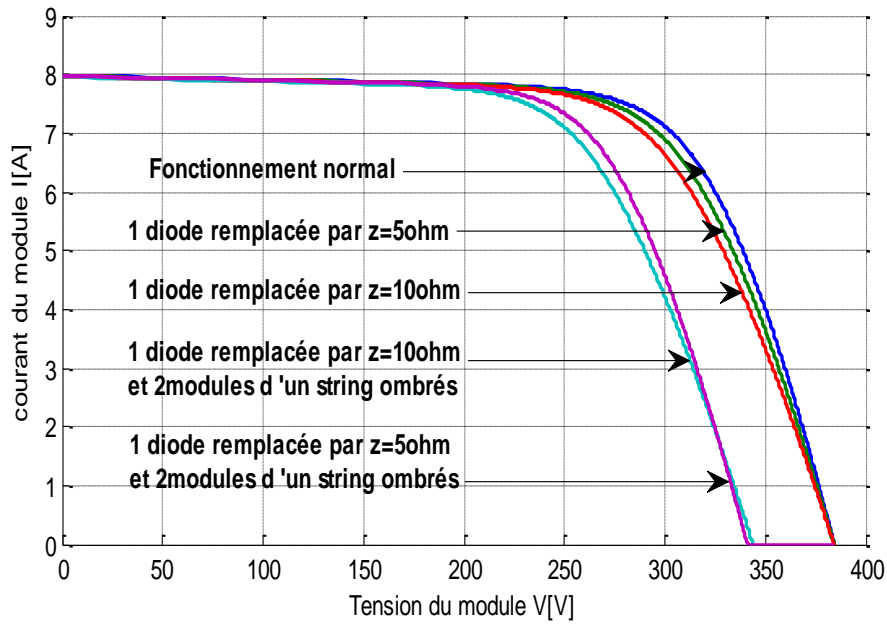


FIG.III.27 CARACTÉRISTIQUE I-V D'UN CHAMP PV LORS DE DÉFAUTS DE DIODE ANTI RETOUR CAS : DÉFAILLANT

Interprétation

Cette fig.III.27 montre la Caractéristique I-V d'un champ PV lors du cas où une diode anti-retour est défailante et devient une impédance.

Si la tension des deux strings est équilibrée, On remarquera que la chute de tension est proportionnelle à l'impédance de la diode anti-retour. En plus si un ombrage intervient, cette chute grandira à mesure que ce dernier croit et provoquera d'avantage de pertes de production.

Cas « circuit ouvert »

Dans ce cas, tout le courant produit par le string, ne parviendra pas à passer, et sera donc perdu [2].

$$V_{\text{champ}} = V_{\text{imposée}}$$

$$I'_{\text{string},z} = \text{Interpolation}(V_{\text{champ}}, I_{\text{string}}, V_{\text{string},z}) \tag{III.13}$$

$$I_{\text{champ}} = \sum_{z=1}^{N_{\text{string}}} I'_{\text{string},z} \quad \text{Avec } I'_{\text{string},z} = 0 \text{ Si la diode est déconnecté .}$$

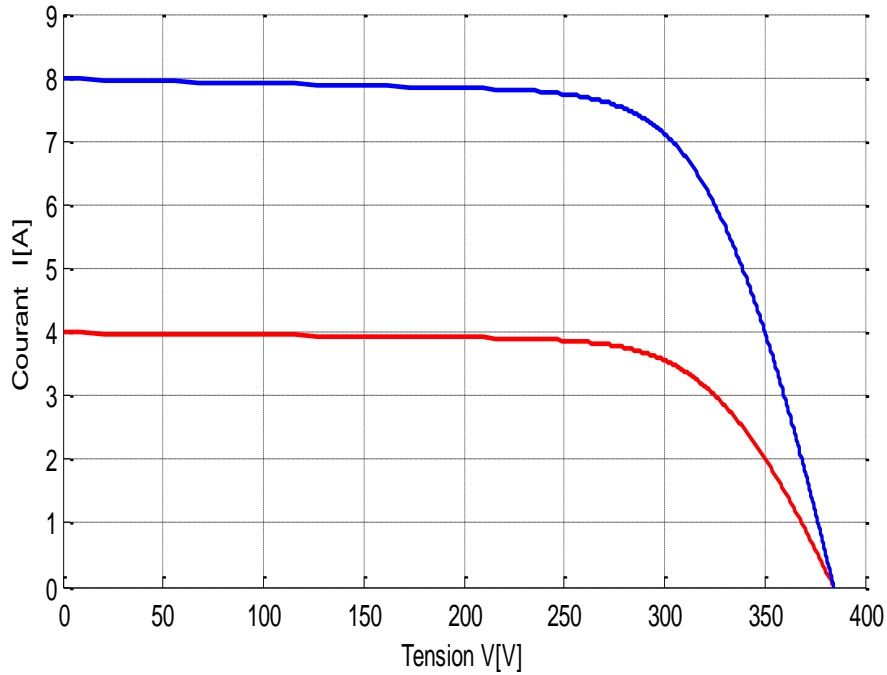


FIG.III.28 CARACTÉRISTIQUE I-V D'UN CHAMP PV LORS DE DÉFAUTS DE DIODE ANTI RETOUR CAS : DÉCONNECTÉE

Interprétation

Cette fig.III.28 montre la Caractéristique I-V d'un champ PV lors d'un défaut de diode anti retour cas : Déconnectée on remarque bien que la tension reste inchangé, par contre le courant chute considérablement, ce qui est tout à fait évident car le champ perd la totalité du courant produit par le string.

Cas « inversée »

Dans ce cas-là il s'agit d'une polarisation d'une diode en inverse , elle bloquera donc le courant produit par le string attaché à cette diode , et l'empêchera d'atteindre la charge , et si la tension de ce string est inférieur a la tension des autres string, la diode permettra un passage du courant venant de ces derniers vers le string qu'elle protège [2].

$$V_{\text{champ}} = V_{\text{imposée}}$$

$$I'_{\text{string},z} = \text{Interpolation}(V_{\text{champ}}, I_{\text{string}}, V_{\text{string},z}) \quad \text{(III.14)}$$

$$I_{\text{champ}} = \sum_{z=1}^{N_{\text{string}}} I'_{\text{string},z} \quad \text{Avec } I'_{\text{string},z} = 0 \text{ Si } V_{\text{string},z} > V_{\text{champ}}$$

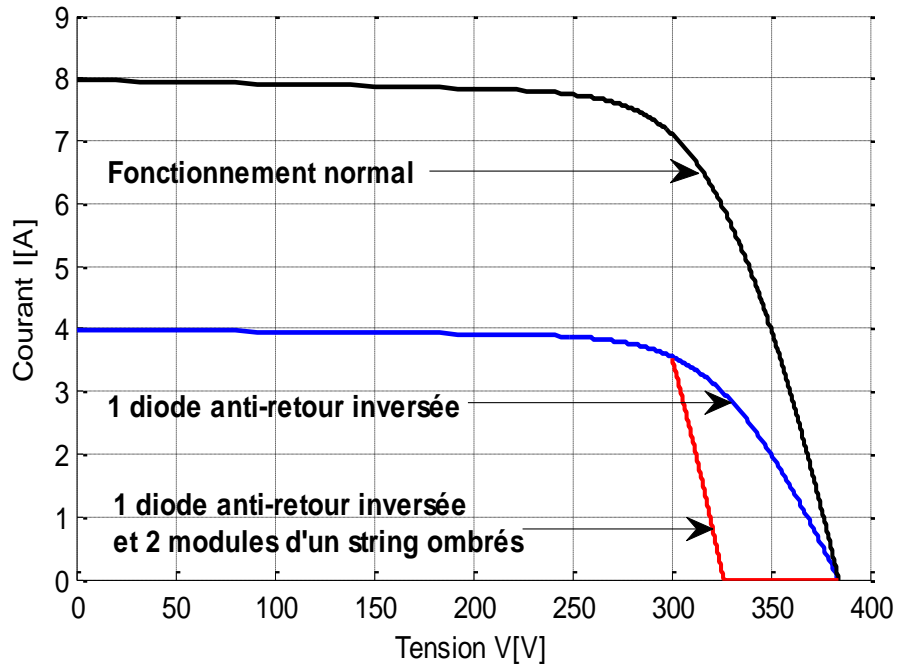


FIG.III.29 CARACTÉRISTIQUE I-V D'UN CHAMP PV LORS DE DÉFAUTS DE DIODE ANTI RETOUR CAS : INVERSÉ

Interprétation

Cette fig.III.29 montre la Caractéristique I-V d'un champ PV lors du cas où une diode anti-retour est inversée. Si la tension des deux strings est équilibrée, On remarquera que le courant produit par le string associer à cette diode sera perdu, car la diode l'empêchera de traversé, par contre dans le cas d'un ombrage, la tension du string associer à la diode sera plus faible que la tension des autres strings, ce qui fera passer le courant venant des autres strings.

III.6- Validation

Pour une validation expérimentale portant sur l'étude de modélisation de défaut sur un champ PV proposée ci-dessus, nous allons exploiter les résultats expérimentaux utilisés dans [2]. En effet une campagne de mesure sur un champ PV réel a été réalisée. Et les défauts présentés dans la liste ont été physiquement créés, un à la fois, et le comportement du champ résultant a été enregistré.

Nous allons donc procéder dans cette partie à une série de comparaison entre quelques caractéristiques courant-tension obtenues dans notre étude de modélisation, et celle obtenues et enregistrés par [2] Aux conditions réelles de température et de rayonnement.

On remarquera une cohérence remarquable entre les courbes que nous avons obtenues et celles enregistrées.

III.6.1- Comparaison dans le cas d'un module

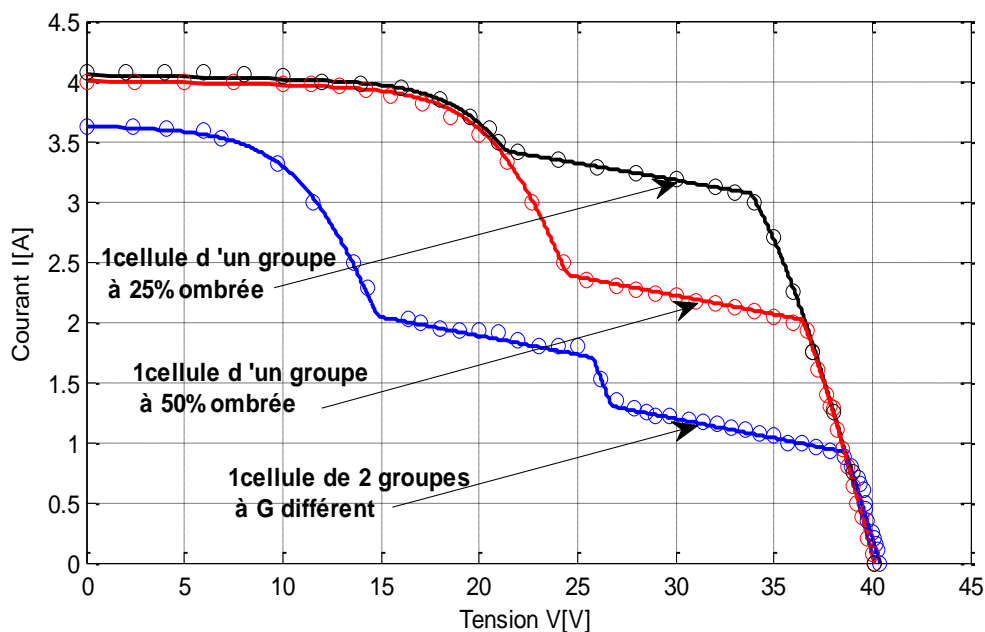


FIG.III.30 DÉFAUTS D'OMBRAGE

La Fig.III.30 représente le comportement défaillant dans le cas d'ombrage d'un module. Les différents obtenus (intensité de l'ombrage et position de l'ombrage) par simulation ont été confrontés aux résultats expérimentaux fournis par [2]. Une bonne concordance des résultats peut être relevée. Cela nous permet de conclure à la validité de notre code de calcul mis en œuvre sous environnement MATLAB.

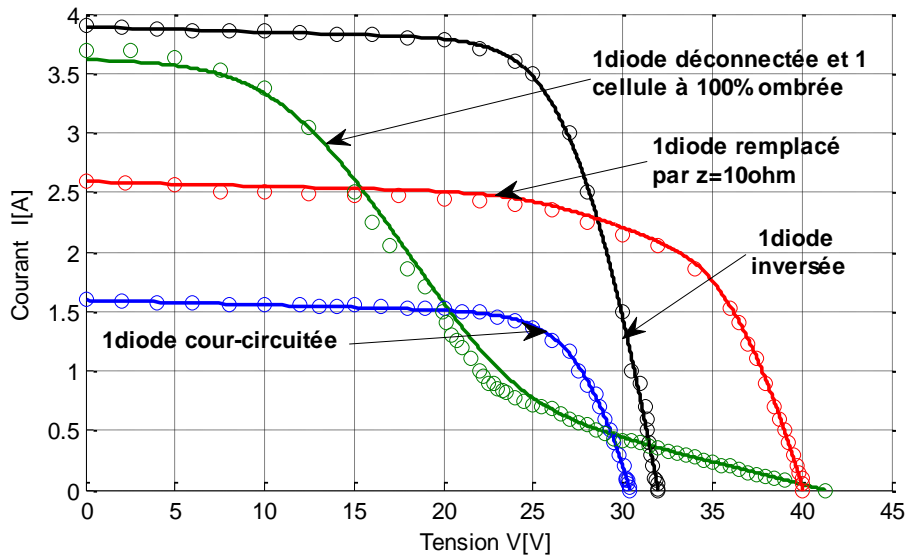


FIG.III.31 DÉFAUTS DE DIODE DE BYPASS

La Fig.III.31 représente le comportement défaillant de la diode de bypass dans le cas d'un module. Les différents obtenus par simulation ont été confrontés aux résultats expérimentaux fournis par [2]. Une bonne concordance des résultats peut être relevée. Cela nous permet de conclure à la validité de notre code de calcul mis en œuvre sous environnement MATLAB.

III.6.2- Comparaison dans le cas d'un string

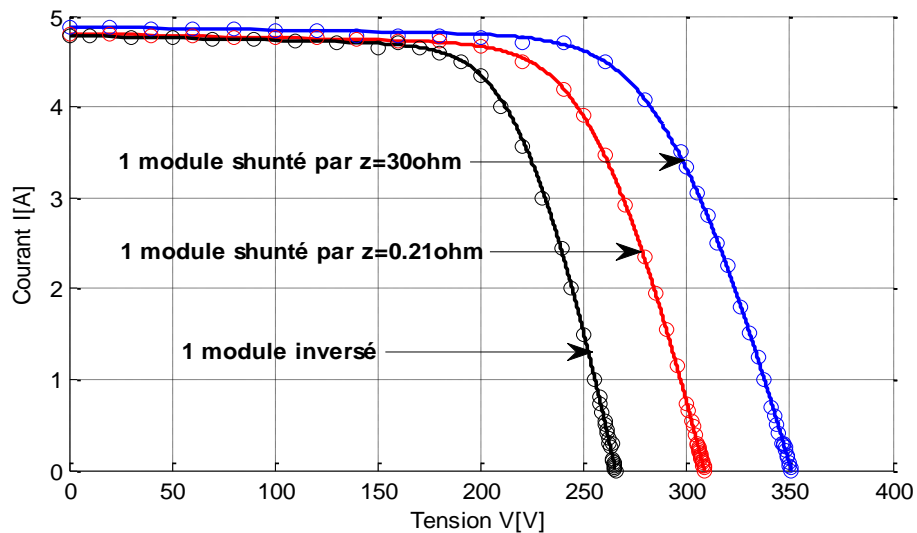


FIG.III.32 DÉFAUTS DE MODULE

La Fig.III.32 représente le comportement défaillant dans le cas d'un string. Les différents obtenus par simulation ont été confrontés aux résultats expérimentaux fournis par [2]. Une bonne concordance des résultats peut être relevée. Cela nous permet de conclure à la validité de notre code de calcul mis en œuvre sous environnement MATLAB.

III.7- Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons procédé à une série de simulations sur Matlab, nous avons choisi de travailler sur le modèle Bishop, car il est considéré comme étant le mieux pour une représentation de cellule tant en régime de fonctionnement normal qu'en régime inverse. Le but était d'obtenir la caractéristique I-V du système PV (cellule, module, string, champ) pour les différents défauts proposés et considérés dans la liste à savoir :

- Défauts de mismatch et d'ombrage
- Défauts de la diode de bypass
- Défauts de module
- Défauts de connectique
- Défauts de la diode anti-retour

Vu que la cellule est considérée comme un élément de base sur lesquelles les champs PV sont construits, nous avons donc choisi l'approche de l'ajout des caractéristiques suivant la hiérarchie proposée (cellule, groupe, module, string, champ) afin d'obtenir celles qui illustrent un champ.

Cette étude de modélisation est validée par une comparaison entre quelques courbes obtenues suite à notre simulation et celles utilisées et obtenues par. [2]

Chapitre IV

*Commande pour la recherche du
point de puissance maximale*

CHAPITRE 4

COMMANDE POUR LA RECHERCHE DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE (MPPT)

IV.1- Introduction

L'exploitation de l'énergie solaire présente un potentiel énorme. C'est dans cette optique que sont conçus les panneaux photovoltaïques. Même s'il est connu que les rendements sont relativement peu élevés (de l'ordre de 30 à 40%), [23], la recherche de la puissance maximale est nécessaire. Or, les panneaux photovoltaïques sont soumis à des conditions changeantes au niveau de l'ensoleillement et de la température qui modifie la puissance extractible.

En effet, sous ces conditions changeantes, la puissance extractible est variable et fonction de la tension (ou du courant) imposée aux bornes du panneau photovoltaïque. Il est donc nécessaire que le système d'exploitation s'adapte pour extraire le plus de puissance possible : c'est ainsi que naît en quelque sorte l'idée de MPPT (Maximum Power Point Tracker).

Le suivi du point de puissance maximale (MPPT) est donc utilisé dans les systèmes photovoltaïques (PV) afin de maximiser la puissance de sortie du générateur photovoltaïque indépendamment des conditions de température et d'irradiation.

IV.2- PROCÉDURE

IV.2.1- APPLICATION DE LA MÉTHODE (P&O)

L'algorithme implanté dans le programme, et celui étudié dans notre mémoire est basé sur une méthode de type P&O (Perturb and Observe) qui repose sur la perturbation [ici une augmentation ou une diminution] de la tension V_{ref} , ou du courant I_{ref} , et l'observation de la conséquence de cette perturbation sur la puissance mesurée ($P=VI$). Cette méthode a été choisie pour sa simplicité, ses résultats corrects et sa facilité d'intégration.

IV.2.2- Explication

Nous devons chercher le point de puissance maximal, pour cela nous comparons un point de puissance (P_2) mesuré à l'instant (t) avec un point de puissance (P_1) mesuré à l'instant ($t-1$).

Fig.IV.0

- Si $P_1 < P_2$, la dérivée est positive, cela signifie que nous nous rapprochons du point de puissance maximal.
- Si la dérivée de puissance est négative, cela veut dire que nous avons dépassé le point de puissance maximal

Ainsi, au démarrage du système, la recherche de PPM se fait progressivement, en cherchant le premier maximum.

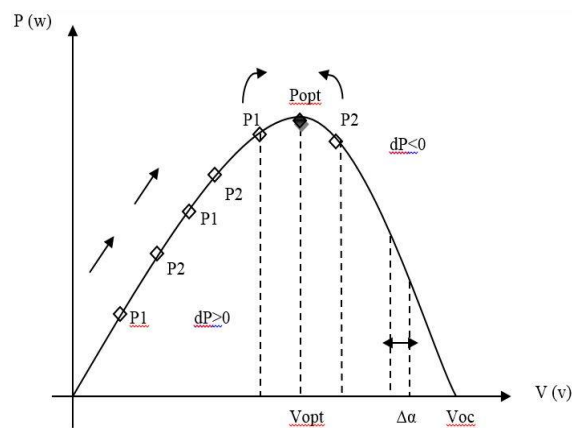


FIG.IV.0 : RECHERCHE DU MPPT PAR LA MÉTHODE P&O

La tension de sortie du convertisseur étant fixée par le bus continu, cette méthode est une technique itérative pour obtenir le point de puissance maximale (MPP). Basée sur la perturbation du système à travers l'augmentation ou la diminution de V_{ref} ou encore la variation du rapport cyclique influence directement la tension d'entrée donc sur le point de fonctionnement du module PV [3, 16]. Et le point maximum donc est atteint quand $dP/dV=0$.

Ce sont donc ces variables qui vont être utilisées pour piloter le point de fonctionnement.

L'algorithme fait varier le point de fonctionnement du convertisseur de $\Delta\alpha$. Cette variation déplace le point de fonctionnement du module PV de V (Fig.IV.0). Puis par l'observation des effets de ces perturbations sur la puissance de sortie du panneau.

Si la variation de puissance est positive entre ces deux points, c'est-à-dire si $P(k) > P(k-1)$, l'algorithme poursuit les variations (perturbations) dans ce sens, sinon il change de sens. Finalement, le système se place en oscillation autour du point de puissance maximale.

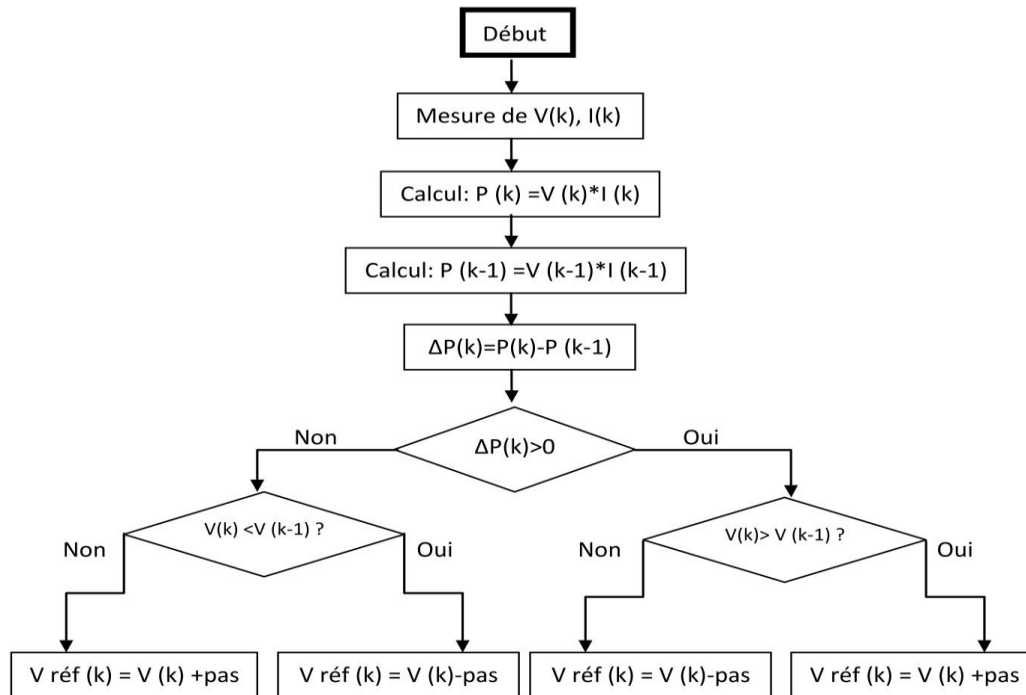


FIG.IV.1 ORGANIGRAMME DE L'ALGORITHME PERTURBATION ET OBSERVATION.

Interprétation

- Si : $dP = P_k - P_{k-1} < 0$ et Si : $dV_{réf} = V_{réf,k} - V_{réf,k-1} < 0$ On augmente $V_{réf}$.
- Si : $dV_{réf} > 0$, On diminue $V_{réf}$.
- Si : $dP > 0$ et Si : $dV_{réf} < 0$, On diminue $V_{réf}$.
- Si : $dV_{réf} > 0$, On augmente $V_{réf}$.

Résumé

$\Delta P_{réf}$	$V_{réf}$
> 0	+ (augmentation)
< 0	- (Diminution)

IV.3- Modélisation

Comme nous l'affirmons en introduction, les panneaux photovoltaïques sont soumis à des conditions variables au niveau de l'ensoleillement et de la température qui modifie la puissance extractible. Ainsi sous ces conditions changeantes, la puissance extractible est variable et fonction de la tension (ou du courant) imposée aux bornes du panneau photovoltaïque.

C'est ce que nous essayerons dans cette partie d'étudier, de concrétiser grâce à l'outil Matlab, et l'application de la méthode P&O et par la suite d'interpréter les résultats.

IV.3.1- 1^{ère} Condition (Variation de l'éclairement)

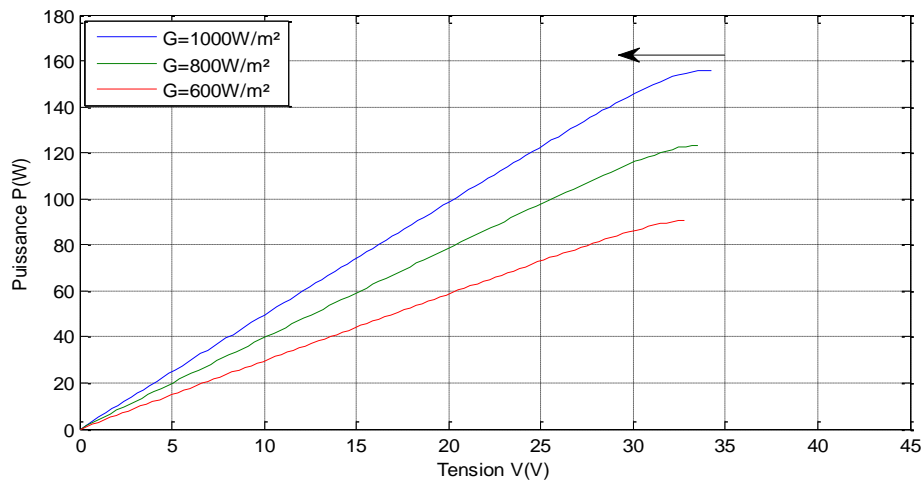


FIG. IV.2 FLUCTUATIONS DE P POUR T CONSTANT ET G VARIABLE

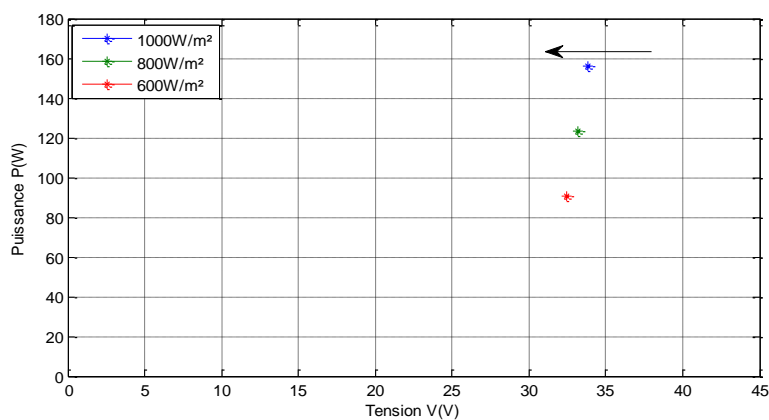


FIG. IV.2 (ZOOM FIG. IV.2)

IV.3.2- 2^{ÈME} Condition (Variation de la température)

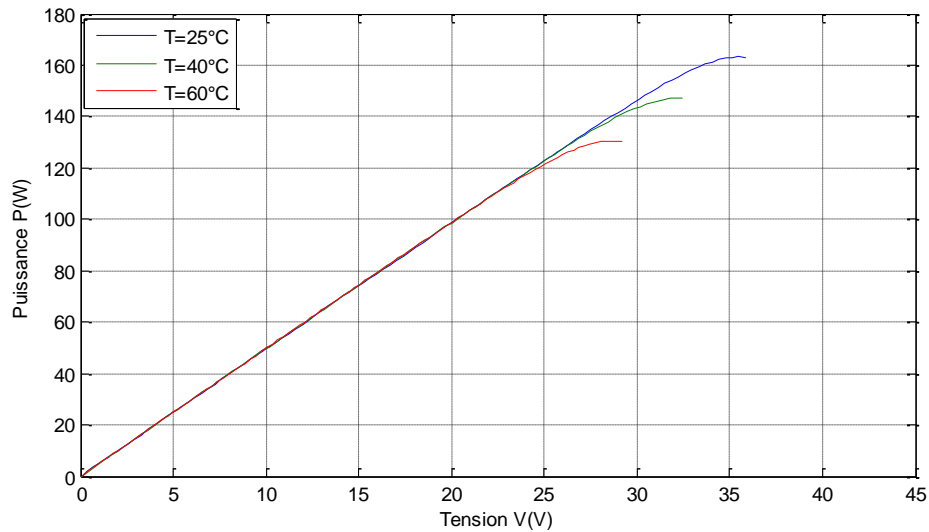


FIG.IV.3 : FLUCTUATIONS DE P POUR G CONSTANT ET T VARIABLE

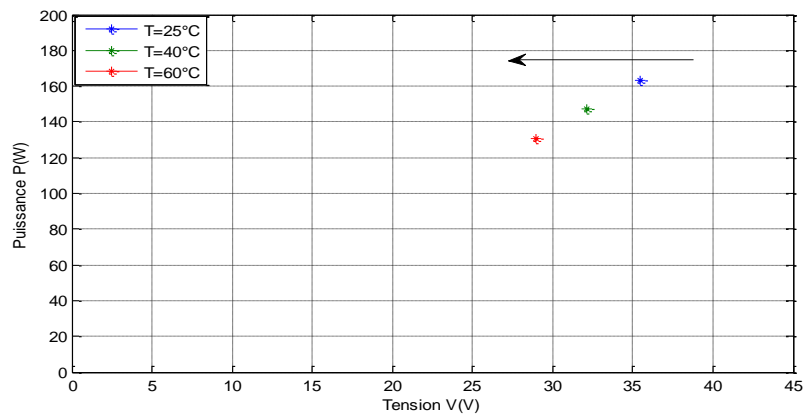


FIG.IV.3 (ZOOM FIG.IV.3)

Interprétation

Les courbes obtenues sont pour un fonctionnement sans défauts, avec bien entendu la variation de la température et de l'éclairement, à ce niveau nous avons obtenus les **puissances de références optimales** pour des valeurs de températures et d'éclairement fixe (3 Valeurs différentes pour chacun).

On remarque dans le cas de l'ensoleillement qu'à chaque fois qu'on diminue l'éclairement la puissance décroît, et dans le cas de la température à chaque fois qu'on augmente cette dernière la puissance optimale chute, grâce à la méthode (P&O) nous extrairons à chaque moment et pour chaque valeur la puissance maximale.

IV.4- Conclusion

La commande MPPT présente finalement un bon compromis de rendement en statique et dynamique mais aussi de robustesse sont basées sur une continuelle évaluation de la puissance et une comparaison de la perturbation avec l'état à l'instant précédent.

Cet algorithme donne de bons résultats malgré la possibilité de rester bloqué sur un maximum local et la nécessité d'avoir deux capteurs (un de courant et un de tension) pour mesurer la puissance de sortie.

Chapitre V

Localisation de défauts sur un système photovoltaïque.

CHAPITRE 5

LOCALISATION DE DÉFAUTS SUR UN système PHOTOVOLTAÏQUE

V.1- Introduction

Tout système est susceptible de présenter des symptômes révélateurs de défauts, le défi est de pouvoir détecter et localiser ces défauts. Les étapes sont brièvement expliquées comme suit : [24]

- **Prise de mesures** : La mesure qu'on fait sur le système est la seule information qu'on a sur l'évolution du système. Elle se fait à l'aide d'un capteur approprié.
- **Détection de défauts** : Souvent, il s'agit d'un test traitant un signal susceptible de contenir des informations sur l'état du système à surveiller, dans notre cas le signal représente la caractéristique I-V, la variance de ce signal révèle un éventuel défaut dans le système.
- **Localisation de défauts** : C'est souvent une tâche liée aux caractéristiques du système. Il s'agit d'un test logique qui nous informe sur la provenance du défaut.
- **Identification de défauts** : Il s'agit de caractériser le défaut, d'estimer son importance et son comportement dans le temps.

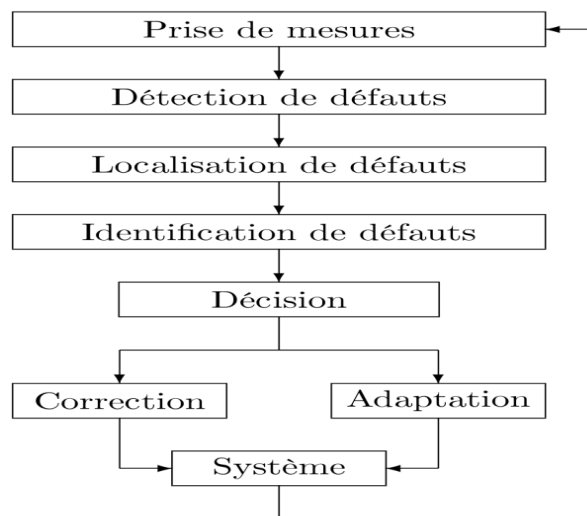


FIG.V.0 PROCESSUS DE DÉTECTION ET DE LOCALISATION

V.2- But de l'étude

La localisation de défaut consiste souvent en un test logique qui nous permet d'isoler le défaut. L'objectif donc de ce chapitre est de développer un algorithme de localisation de défauts qui joue le rôle d'un superviseur dans un champ photovoltaïque. Les défauts qui peuvent affecter le système sont supposés connus (chapitre précédent). Autrement dit, l'objectif est de voir quels défauts sont localisables grâce à l'algorithme que nous allons proposer.

Cet algorithme est implémenté sous Matlab et les résultats obtenus sont commentés

V.3- Procédure

Dans le chapitre précédent nous avons obtenu « pour un fonctionnement sain (sans défauts)», la puissance de référence optimale **Préf_opt** pour des valeurs de températures et d'éclairement variable.

Maintenant pour la localisation nous allons procéder de la même manière, c'est-à-dire nous allons essayer d'obtenir une seconde puissance que nous renommerons Puissance optimale (**Popt**), mais cette fois-ci pour un fonctionnement défectueux (par exemple défaut d'ombrage) dans la simulation un seul défaut est considéré, et par la suite comparer les deux puissances (**Préf_opt** et **Popt**).

- si l'écart est nul, donc il n'y a aucun défaut, le système PV est sain.
- si l'écart est différent de zéro donc il ya un défaut.

Pour déterminer la nature du défaut nous allons examiner et analyser les puissances, tensions et les courants obtenus dans le but d'identifier les symptômes potentiels qui permettent de remonter à la nature du défaut.

Par la suite nous allons définir 3 groupes de défauts à partir de la base de connaissance du comportement défaillant du champ PV [2], traité les symptômes afin de classer le défaut dans le groupe de défauts qui lui correspond.

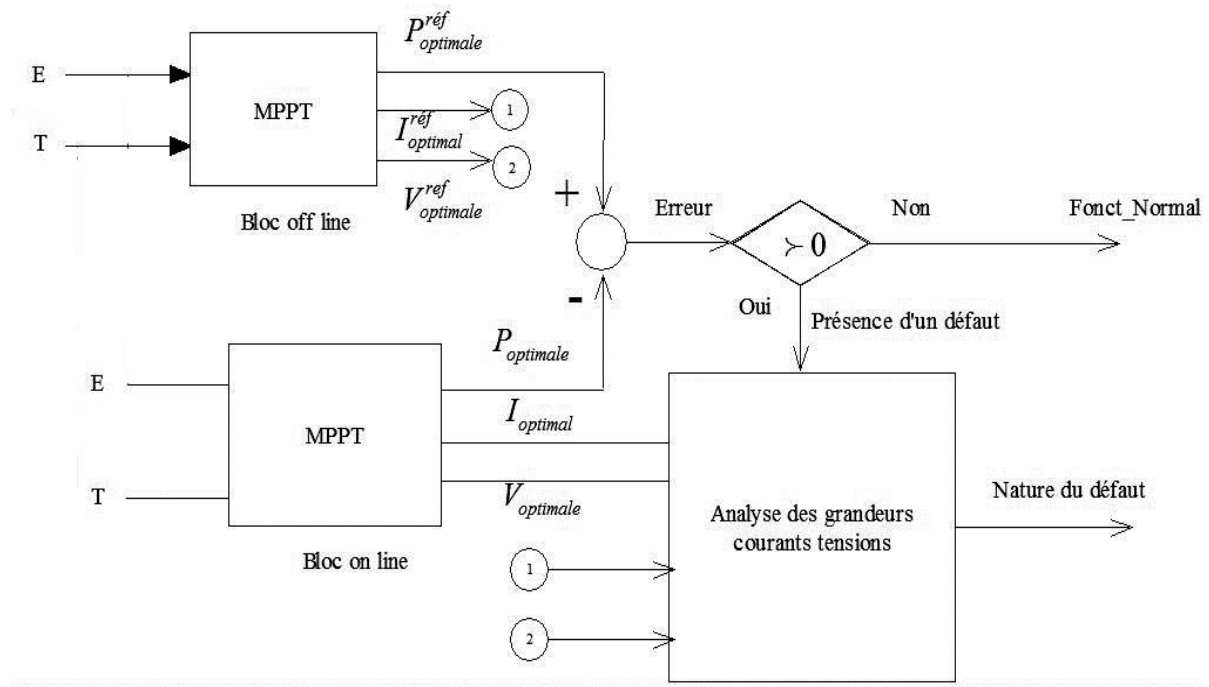


FIG.V.1 EXEMPLE D'UN SUPERVISEUR

V.3.1- Identification des symptômes

La comparaison entre les différents comportements et résultats de simulation entre un fonctionnement sain et défectueux ont montré qu'il est possible d'identifier des symptômes qui peuvent nous aider à remonter à la nature d'un défaut [2].

Un défaut quelconque pourrait générer un seul ou plusieurs symptômes mais certains symptômes sont communs à plusieurs défauts. Donc, la combinaison des symptômes identifiés, appelée également signature de défauts, permet d'identifier le défaut ou un groupe de défauts responsables du comportement examiné [2].

La comparaison de la caractéristique d'un système PV en défaut avec celle en fonctionnement normal peut conduire à l'identification des symptômes potentiels pour faire le diagnostic [2].

La FIG.V.2 montre les symptômes identifiés et retenus dans les différentes zones de la caractéristique d'un module en défaut.

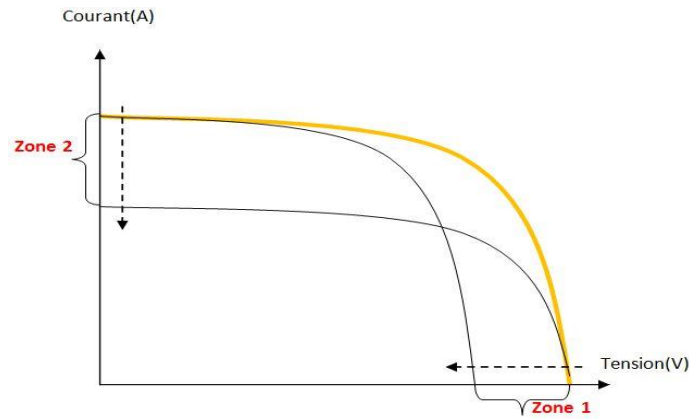


FIG.V.2 CARACTÉRISTIQUES DÉFAILANTES D'UN MODULE PV

V.3.2- Symptômes retenus pour notre étude

Symptôme	Zone de la caractéristique I-V	Nom du Symptôme
S1	-	Réduction de la puissance maximale
S2	Zone 2	Réduction de la tension de circuit ouvert
S3	Zone 3	Réduction du courant de court-circuit

TABLEAU .V.0 : DIFFÉRENTS SYMPTÔMES RETENUS DANS NOTRE ÉTUDE [2].

Le symptôme « s1 »

Est le tout premier symptôme que l'on puisse extraire de cette comparaison car il semble évident qu'un défaut quelconque, une fois apparu, entraînera une perte de la puissance produite. Par contre, cette constatation n'est pas toujours vraie car certains défauts, lorsqu'ils apparaissent tout seul (défauts simples), ne conduisent à aucune perte de puissance. On peut citer comme exemple la déconnexion de la diode de bypass.

Le symptôme « s2 »

Est l'écart entre la tension de circuit ouvert du système PV en fonctionnement normal et celle en fonctionnement défailtant (voir zone 1 de la [FIG.V.2](#)).

Le symptôme « s3 »

Est l'écart entre le courant de court-circuit du système PV en fonctionnement normal et celui en fonctionnement défailtant (voir zone 2 de la [FIG.V.2](#)).

V.3.1- Signatures de défauts retenus pour un cas de Module

Nous avons cité précédemment trois symptômes pour analyser la manifestation des défauts lors du fonctionnement d'un système PV [2].

Dans ce paragraphe nous allons donner quelques signatures de quelques défauts qui existent. Ces signatures de défauts sont établies en regardant pour chaque défaut la présence ou l'absence des symptômes retenus auparavant [2].

Nature de défauts	S1	S2	S3	
Aucun défaut	0	0	0	} Groupe N° 01
Diode de by-pass déconnectée	0	0	0	
Diode de by-pass court-circuité	1	1	0	} Groupe N° 02
Diode de by-pass inversée	1	1	0	
Cellule court-circuité (Rp=0)	1	1	0	
Mismatch type (ombrage complet)	1	1	0	
Mismatch type (température)	1	1	0	} Groupe N° 03
Module court-circuité	1	1	1	
Module inversé	1	1	1	

TABLEAU.V.1 : TABLEAU DE SIGNATURES RETENUS DE DÉFAUTS POUR UN MODULE

V.4- Modélisation

On a remarqué que le symptôme s1 (réduction de la puissance maximale) apparaît pour tous les défauts étudiés. Cela revient à dire que tous ces défauts considérés peuvent être détectés en observant uniquement ce symptôme. Autrement dit, ce symptôme n'apporte aucune contribution à la discrimination de défauts. Il est donc exclu de l'analyse de localisation de défauts.

Ce constat nous amène à découper l'algorithme de détection et de localisation de défauts en deux étapes successives : détection de défauts en observant le symptôme « s1 » puis localisation de défauts en utilisant les symptômes « s2 – s3 ». L'algorithme de détection et de localisation de défauts pour un système PV est présenté alors dans la Fig.V.3 .

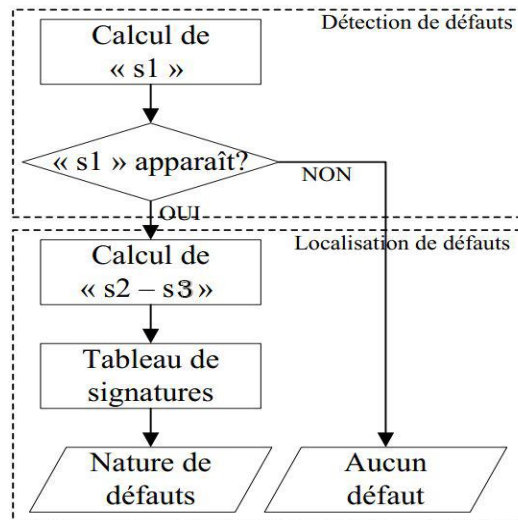


FIG.V.3 ALGORITHME DE DÉTECTION ET DE LOCALISATION DE DÉFAUTS POUR UN SYSTÈME PV

Selon l'algorithme présenté dans la Fig.V.3 le calcul du symptôme « s2 – s3 » ne s'effectue qu'après la détection d'un défaut quelconque, donc qu'après l'apparition du symptôme « s1 ». [2]

V.4.1- Calcul des symptômes

Dans le tableau de signature de défauts dans le paragraphe précédent, deux états discrets, « 0 » et « 1 », ont été attribués à chaque symptôme pour représenter respectivement leur absence et leur présence pendant l'apparition d'un défaut quelconque.

- **Calcul du symptôme « s1 »**

Il s'agit de l'écart entre la puissance maximale produite par le système PV actuel $P_{\max(\text{défaut})}$ et la puissance attendue $P_{\max(\text{sain})}$. L'expression de cet écart est donnée par l'équation suivante.

$$\Delta P_{\max} = P_{\max(\text{sain})} - P_{\max(\text{défaut})} \quad (\text{V.0})$$

- **Calcul du symptôme « s2 »**

Ce symptôme peut être exprimé par l'écart entre le courant de court-circuit du système PV en fonctionnement normal $I_{sc(\text{sain})}$ et celui en fonctionnement défaillant $I_{sc(\text{défaut})}$, dont l'expression est donnée par l'équation suivante.

$$\Delta I_{sc} = I_{sc(\text{sain})} - I_{sc(\text{défaut})} \quad (\text{V.1})$$

- **Calcul du symptôme « s3 »**

C'est l'écart entre la tension de circuit ouvert du système PV en fonctionnement sain $V_{oc(sain)}$ et celle en fonctionnement en défaut $V_{oc(défaut)}$. Cet écart est exprimé par l'équation suivante.

$$\Delta V_{oc} = V_{oc(sain)} - V_{oc(défaut)} \quad (\text{V.2})$$

V.4.2- Application

Afin de considérer les groupes de défauts cités précédemment et dans le but de localiser les défauts et de valider notre étude, nous avons développé un algorithme qui nous permettra d'afficher l'état du système (sain ou défectueux) ainsi que les signatures cités ci-dessus.

Exemple	01 Module Sain		01 Module Défectueux		Défaut considéré
	Nombre de Cellule Bonne	Nombre de Cellule mauvaise	Nombre de Cellule Bonne	Nombre de Cellule mauvaise	
Exemple N° 01	72	0	72	0	Aucun
Exemple N° 02	72	0	71	1 à 100 % Ombrée	Ombrage
Exemple N° 03	72	0	-	-	Module c-c

V.4.3- Résultat

Exemple	Fonctionnement	Symptômes Affichés			Attribution de Groupe
		S1	S2	S3	
Exemple N° 01	Sain	0	0	0	Groupe N° 01
Exemple N° 02	Défectueux	1	1	0	Groupe N° 02
Exemple N° 03	Défectueux	1	1	1	Groupe N° 03

V.5- Conclusion

Dans ce chapitre nous avons développé un algorithme de détection et de localisation de défauts d'un Module photovoltaïque.

La première étape de cette méthode consiste à établir une base de connaissance du comportement défaillant d'un champ PV.

En comparant la caractéristique I-V d'un champ PV en fonctionnement sain et celle en fonctionnement défaillant pour les différents défauts considérés dans la base de connaissance. Trois symptômes ont été retenus dans notre travail pour faire la détection et la localisation de défauts. Ces symptômes sont :

- « s1 » : Réduction de la puissance maximale
- « s2 » : Réduction de la tension de circuit ouvert
- « s3 » : Réduction du courant de court-circuit

Nous avons ensuite donné quelques signatures de quelques défauts qui existent. Ces signatures de défauts sont établies en regardant pour chaque défaut la présence ou l'absence des symptômes retenus auparavant.

Afin de considérer les groupes de défauts cités précédemment et dans le but de localiser les défauts et de valider notre étude, nous avons développé un algorithme qui nous permettra d'afficher l'état du système (sain ou défectueux) ainsi que les signatures cités précédemment.

CONCLUSION

GÉNÉRALE

Conclusion Générale

Avant d'aborder la problématique de la détection et localisation de défauts sur les systèmes PV. Nous avons tout d'abord étudié le contexte et la problématique de l'énergie PV. En présentant dans un premier temps, des généralités sur les systèmes PV, un bref historique donc a été proposé, puis on a parlé du principe de fonctionnement d'une cellule PV ainsi que sa structure et la formation de la jonction PN qui est l'élément principal de la cellule PV, par la suite nous avons abordé le principe de l'effet photovoltaïque.

Nous avons vu aussi que la cellule PV présente une caractéristique $I(V)$ non linéaire, et qu'elle peut être modélisée par différents circuits électriques (modèle à une diode et le modèle à deux diodes ainsi que le modèle Bishop). De ce fait, nous avons élaboré des programmes de calculs sous environnement Matlab qui permettent la résolution de l'équation caractéristique non linéaire d'une cellule PV en utilisant la méthode de Newton –Raphson, permettant de déterminer la caractéristique I-V pour différentes valeurs d'éclairement et de température, ainsi que pour l'interconnexion de cellules PV en série/parallèle et mixte, et voir ainsi l'augmentation de la tension ou courant, ou les deux ce qui nous aidera à augmenter la puissance et améliorer les performances.

D'après les résultats de la simulation obtenus, on peut dire que :

- Les performances d'un système PV se dégradent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'intensité de l'éclairement et les variations de la charge.

En fin pour entamer notre travail, il fallait procéder aussi à quelques brèves définitions sur les éléments de protection comme (diode by-pass, et anti retour) qui sont primordiaux dans une installation PV.

Tout ceci s'avérerait nécessaire pour acquérir une connaissance générale du comportement des phénomènes PV.

L'objectif du présent travail est de proposer, un algorithme ou une piste pour détecter et localiser des défauts conduisant à une baisse de production dans un générateur photovoltaïque.

Suite à une étude bibliographique [2], portant sur le diagnostic de défauts dans un champ PV, l'analyse de la caractéristique I-V a été retenue et suivie pour des fins d'évaluation des

différents défauts sur la performance du champ PV, mais sans pour autant l'utiliser pour remonter à la nature des défauts.

La démarche de modélisation suivie pour l'obtention de la caractéristique I-V du système PV (cellule, module, string, champ) pour les différents défauts considérés repose sur le principe d'addition de la caractéristique I-V des composants constituant le champ PV.

Le modèle de Bishop a été choisi pour simuler le comportement de la cellule PV. Ce choix réside sur le fait que ce modèle peut représenter une cellule PV tant en régime de fonctionnement normal qu'en régime inverse. [2]

Les défauts considérés sont : (Défauts de mismatch et d'ombrage, Défauts de la diode de by-pass, Défauts de module, Défauts de connectique, Défauts de la diode anti-retour).

Les panneaux PV sont soumis à des conditions variables au niveau de l'ensoleillement et de la température qui modifie la puissance extractible. Cela représente un inconvénient majeur pour la production et les performances de l'installation dans le cas où ces variations ne sont pas prises en charge.

C'est ce que nous avons donc considéré, modélisé et concrétisé grâce à l'outil Matlab, et l'application de la méthode P&O «perturbation et observation». Cette commande MPPT utilise directement la tension ou le courant du panneau photovoltaïque pour chercher le point de fonctionnement maximal, en ajustant la tension avec un pas bien spécifique. Ainsi notre système fonctionnera à chaque moment et à chaque perturbation à sa puissance maximale et aussi améliorer d'une manière considérable le rendement des installations PV.

En fin dans la dernière phase nous avons essayé de localiser quelques défauts déjà étudiés et cités auparavant. Pour cela, nous avons procédé par un test logique qui nous a permis d'isoler quelques défauts.

Avant cela nous avons développé un algorithme de localisation de défauts qui joue le rôle d'un superviseur dans un champ photovoltaïque.

Les défauts qui peuvent affecter le système ont été supposés connus (chapitre-3). Autrement dit, l'objectif était de voir quels défauts sont localisables grâce à l'algorithme que nous avons proposé.

L'idée était simple : dans un premier temps nous avons obtenus « pour un fonctionnement sain (sans défauts)», la puissance de référence optimale $P_{\text{réf_opt}}$ pour des valeurs de température et d'éclairement variables.

Pour la localisation on a procédé de la même manière, c'est-à-dire nous avons essayé d'obtenir une seconde puissance qu'on a renommé Puissance optimale (P_{opt}), mais pour un fonctionnement défectueux (par exemple défaut d'ombrage) dans la simulation un seul défaut est considéré, et par la suite on a comparé les deux puissances ($P_{réf_opt}$ et P_{opt}).

- si l'écart est nul, donc il n'y a aucun défaut, le système PV est sain.
- si l'écart est différent de zéro donc il y'a un défaut.

Après un bref examen des puissances, tensions et courants obtenus nous avons identifié trois symptômes potentiels qui nous ont permis de remonter largement à quelques natures des défauts.

Par la suite, on a défini trois groupes de défauts à partir de la base de connaissance du comportement défaillant du champ PV extrait de [2], et en fin traité les symptômes afin de classer le défaut dans le groupe de défauts qui lui correspondent.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. Angel Cid Pastor «Conception Et Réalisation De Modules Photovoltaïques Electriques» Thèse Doctorat Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse_29 septembre 2006.
- [2] Long Bun « Détection et Localisation de Défauts pour un Système PV » Thèse Doctorat DE Université de Grenoble_04/11/2011.
- [3] Stéphane VIGHETTI «Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau: Choix et dimensionnement des étages de conversion» Doctorat Université de Grenoble-Institut polytechnique de Grenoble _24 septembre 2010.
- [4] Production d'énergie électrique : Energie Solaire Photovoltaïque, Revue Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07.
- [5] Bendjellouli Zakaria «Contribution à la Modélisation d'une cellule solaire» Mémoire de Magistère Université de BECHAR Faculté des Sciences et Technologie _28/06/2009.
- [6] <http://pveducation.org/pvcdrom> Christiana Honsberg et Stuart Bowden.
- [7] N.Seddaoui, « Modélisation et extraction automatique des paramètres d'un générateur photovoltaïque connectée au réseau électrique », thèse de magistère, Université de Sétif UFAS (Algérie) _ (2009).
- [8] A. Hadj Arab, «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque de faible puissance», HCR, Thèse de Magister _(1989).
- [9] M. PETIBON Stéphane « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques » Doctorat Université de Toulouse_ 20 Janvier 2009.
- [10] Livre « Le Pompage Photovoltaïque » IEPF/Université d'Ottawa/EIER/CREPA _ Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens par : Jimmy Royer-Thomas Djiako-Eric Schiller-Bocar Sada Sy.
- [11] Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°3 (2008) 473 – 483 « Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque » A. Ould Mahmoud et I. Youm _ reçu le 19 Juillet 2008 – accepté le 30 Septembre 2008.
- [12] Dezsö Séra «Real-time Modelling, Diagnostics and Optimised MPPT for Residential PV systems» Aalborg University, Institute of Energy Technology Denmark, January 2009.

- [13] Corinne ALONSO «Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie » MÉMOIRE En vue de l'obtention de L'HABILITATION À DIRIGER LES RECHERCHES_12 Décembre 2003.
- [14] MOHAMED ARROUF « Optimisation De L'Ensemble Onduleur, Moteur Et Pompe Branché Sur Un Générateur Photovoltaïque» Thèse Doctorat, Université MENTOURI DE CONSTANTINE _25/12/2007.
- [15] Akihiro Oi, «*Design and simulation of photovoltaic water pumping system*», Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo, September 2005.
- [16] SALAH MOHAMED AIT-CHEIKH «Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques » Thèse Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique _ Décembre 2007.
- [17] Antonio Luque and Steven Hegedus, «Handbook of Photovoltaic Science and Engineering », John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [18] F. Kininger, «Photovoltaic Systems Technology», University of Kassel, 2003.
- [19] Adedamola Omole « Analysis, Modeling and Simulation of Optimal Power Tracking of Multiple-Modules of Paralleled Solar Cell Systems » THE FLORIDA STATE UNIVERSITY_ Fall Semester, 2006.
- [20] Idris Hadj Mahammed, « *Modélisation du générateur photovoltaïque* », Electricité Solaire, Ecole Nationale Polytechnique, Décembre 2002.
- [21] ANDREAS WAGNER, “*Peak-Power and Internal Series Resistance Measurement under Natural Ambient Conditions*“, University of Applied Sciences Dortmund, Dortmund, Germany, 2000.
- [22] Evaluating MPPT Converter Topologies Using a Matlab PV Model, Geoff Walker, Dept. of Computer Science and Electrical Engineering, University of Queensland, Australia.
- [23] Panneau photovoltaïque et algorithme MPPT à base de logique floue - Rapport rédigé dans le cadre de l'UV BA04 – Energie renouvelables, Céline BERNARD, Carolina SEBRAO– OLIVEIRA, Bernard LAVAL, Clément VAUDOUEUR Automne 2009 - Responsable UV : Fabrice LOCMONT.
- [24] Samir Hachour « Approche décentralisée pour la détection et la localisation de défauts dans une ferme photovoltaïque » _ 07 septembre 2011.

Titre

Détection et localisation de défauts dans un système photovoltaïque

Résumé

Comme tout processus industriel, un système photovoltaïque peut être soumis, au cours de son fonctionnement, à différents défauts et anomalies conduisant à une baisse de la performance du système et voire à son indisponibilité. Permettre de diagnostiquer finement et de faire de la détection et de localisation de défauts dans une installation PV réduit les coûts de maintenance et surtout augmente la productivité.

Dans ce travail de mémoire, nous nous intéressons spécifiquement à la détection et la localisation de défauts côté DC du système PV, c'est-à-dire du côté générateur PV.

L'objectif de ce mémoire est de proposer, une méthode et un algorithme pour détecter et localiser des défauts conduisant à une baisse de production.

Pour cela, le choix s'est porté sur l'analyse de la caractéristique I-V du générateur PV pour les différents modes de fonctionnement considérés. Cela a conduit à utiliser la méthode de Newton-Raphson pour la simulation et la modélisation afin de caractériser les différents défauts.

La démarche et les résultats obtenus ont été validés par rapport aux expérimentations, et simulations en temps-réel et hors temps-réel, effectuées sur site par l'auteur Long BUN [2].

Par la suite procéder à l'application de la commande (MPPT) et l'implantation de la méthode (P&O) pour une mise en place d'un superviseur, et pour effectuer le diagnostic de l'installation.

Mots-clefs

Générateur photovoltaïque, Modélisation, Diagnostic, Simulation, Détection défauts, Localisation défauts, Énergie renouvelable, Énergie solaire, Superviseur.