

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Domaine : **Sciences et Technologies**

Filière : **ELECTROTECHNIQUE**

SPECIALITE : **ENERGIES RENOUVLABLES**

Présenté par

TASSEDA SONIA

BABAS FAIZA

Thème

Localisation des défauts dans un champ photovoltaïque

MEMOIRE SOUTENU PUBLIQUEMENT LE : 02/07/ 2024 DEVANT LE JURY COMPOSE DE :

M. CHAFIK BIROUCHE

MAA, UMMTO, Présidente

M. Arezki DICHE

MAA, UMMTO, Encadrant

M. Mohamed Lamine HAMIDA

MCA, UMMTO, Examineur

Année universitaire : 2023/2024

Remerciements

S'il faut beaucoup de motivation, de rigueur et d'enthousiasme pour mener à bien ce mémoire, alors, ce travail d'initiation à la recherche a eu besoin de la contribution de plusieurs personnes. Tout d'abord, il n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de **M. DICHE Arezki** nous le remercions pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant la préparation de ce mémoire.

Nous tenons à remercier **M. BIROUCHE CHAFIK** maitre-assistant au département d'électrotechnique qui nous a fait honneur de présider le jury.

Nous remercions également **M. HAMIDA Mohamed Lamine** maitre de conférence classe A d'avoir accepté d'examiner notre travail et tous ce qui ont contribué de près ou loin à la réalisation de ce travail

Dédicaces

A l'homme de ma vie, mon exemple éternel mon soutien morale et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir que de Dieu te garde dans son vaste paradis à toi

PAPA

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie, mon bonheur ; **MAMAN** que j'adore.

A mes cher frères et sœurs **Kahina, Dyhia, Khaled** et **Syphax** pour leurs soutien moral.

Je remercie aussi ma cousine **Kamelia** pour sa présence dans ma vie et a tous mes amis surtout **Lydia, Moumouh** et **Mustapha**.

Sonia

Dédicace

À mes parents chéris Merci pour tout l'amour, le soutien et les sacrifices que vous avez faits pour moi. Votre sagesse, votre patience et votre bienveillance m'ont façonnée et m'ont permis de devenir la personne que je suis aujourd'hui. Vous êtes ma force et mon inspiration, et je vous suis infiniment reconnaissante pour tout ce que vous avez fait.

À mes frères adorés (Madjid et Massinissa) Merci d'avoir été à mes côtés à chaque étape de ma vie. Votre camaraderie, vos rires et votre soutien inconditionnel ont rendu chaque jour plus lumineux. Vous êtes mes confidents, mes complices et mes amis pour la vie.

À ma chère sœur Lila, qui a toujours été là pour moi, je veux exprimer ma profonde gratitude et mon amour. Tu es une source d'inspiration, de force et de tendresse. Ta générosité et ta bienveillance illuminent nos vies. **À vos petits trésors (Massy, Elyes et la petite ange Céline)** et à son mari (**Farid**).

À mes amis Ainsi qu'à tous mes amis avec qui j'ai partagé une partie de mon parcours et avec qui j'ai vécu des moments inoubliables de joie et de folie au cours de ces années universitaires. Votre complicité et votre amabilité ont été précieuses. Merci du fond de mon cœur (**Ryma, khadidja, Linda, Hakima, Amel, Rachida, Meziane, Moumouh, Lisa,....**).

Faïza

Liste des figures

Figure I-1 : Les coordonnées géographiques	5
Figure I-2 : Gisement solaire en Algérie.....	10
Figure I-3 : Dopage de type N	12
Figure I-4 : Dopage de type P	13
Figure I-5 : Jonction PN.....	14
Figure I-6 : Cellule monocristalline	14
Figure I-7 : Cellule polycristalline	15
Figure I-8 : Cellule amorphe (couche mince)	15
Figure I-9 : Cellule photovoltaïque organique	16
Figure I-10 : Caractéristique courant tension.....	17
Figure I-11 : Caractéristique puissance tension	18
Figure I-12 : Modèle à une diode.....	20
Figure I-13 : Modèle a deux diodes	21
Figure I-14 : Schéma électrique équivalent d'une cellule PV idéal.....	22
Figure I-15 : Caractéristique d'association des cellules en série	23
Figure I-16 : Caractéristique d'association des cellules en parallèle.....	24
Figure I-17 : Champ photovoltaïque.....	26
Figure I-18 : Disposition des différentes protections : la diode By-passe et anti-retour ...	26
Figure I-19 : Caractéristiques I-V d'une cellule solaire ensoleillée et dans l'obscurité ...	28
Figure II-1 : Système photovoltaïque pareillement ombré	30
Figure II-2 : Exemple ombrage direct sur un panneau PV	31
Figure II-3 : Exemple d'ombrage temporaire.....	31
Figure II-4 : Défaut de la diode de by-pass.	33
Figure II-5 : Défaut d'augmentation de la résistance R_s	36
Figure II-6 : Schéma bloc d'un module PV défaillant.....	39

Figure III-1 : Variation de la tension en fonction différentes valeurs de températures.....	43
Figure III-2 : Variation de la puissance en fonction différents valeurs de température	43
Figure III-3 : Caractéristique I (V) d'un module pour différent valeurs d'éclairement	44
Figure III-4 : Caractéristique P(V) d'un module pour différent valeurs d'éclairement	45
Figure III-5 : Démarche de modélisation d'un champ PV en fonctionnement sain.....	47
Figure III-6 : Caractéristiques I(V) et P(V) d'un champ PV à partir d'une cellule saine .	49.
Figure III-7 : La modélisation d'un champ PV en fonctionnement défaillant	50
Figure III-8 : Caractéristique tension courant d'un panneau photovoltaïque avec et sans défaut de température	51
Figure III-9 : Caractéristique tension puissance d'un panneau photovoltaïque avec et sans défaut de température	51
Figure -III10 : Caractéristique tension courant d'un panneau photovoltaïque avec défauts ombrage.....	52
Figure III-11 : Caractéristique tension puissance d'un panneau photovoltaïque avec défauts ombrage.....	52
Figure III-12 : Algorithme pour déterminer la caractéristique I(V) d'une cellule PV	54
Figure III-13 : caractéristique de la diode modèle de bishop	54
Figure III-14 : Caractéristique d'un panneau photovoltaïque avec défauts de diode by-pass cas de court-circuit	56
Figure III-15 : caractéristiques défauts diode by-pass dans un module	57
Figure III-16 : Caractéristique courant tension d'un module photovoltaïque défaut impédance	58
Figure 1-III7 : Caractéristiques I-V d'un string PV lors de défaut de module.....	60

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques.....	10
Tableau II-2 : Différents défauts dans la boîte de jonction	34
Tableau II-3 : Classification de défauts et d'anomalies d'un champ PV	40
Tableau III-4 : Caractéristique électrique du module photovoltaïque.....	45
Tableau III-5 : Configuration revenue pour la modélisation.....	48

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale..... 1

Chapitre I : Etat de l'art sur le photovoltaïque.

Introduction	3
I.1 Définition de l'énergie photovoltaïque	3
I.2 L'énergie solaire	3
I.3 Coordonnées terrestres.....	4
I.3.1 Longitude	5
I.3.2 La latitude	5
I.3.3 L'altitude.....	6
I.4 Les coordonnées du soleil.....	6
I.4.1 Coordonnées équatoriales	6
I.4.2 Coordonnées horizontales	8
I.5 Rayonnement solaire.....	9
I.5.1 Le rayonnement direct	9
I.5.2 Le rayonnement diffus	9
I.5.3 Le rayonnement réfléchi ou l'albédo	9
I.5.4 Le rayonnement global.....	9
I.6 Gisement solaire en Algérie.....	10
I.7 Les panneaux solaires	11
I.7.1 Définition	11
I.7.2 La cellule PV.....	11
I.7.3 Principe d'une cellule photovoltaïque	11
I.7.4 Le dopage.....	12

I.7.5 La jonction PN	13
I.8 Type de cellule	14
I.8.1 Cellules en silicium monocristallin.....	14
I.8.2 Cellules en silicium polycristallin.....	15
I.8.3 Cellules en silicium amorphe	15
I.8.4 Cellules organiques	16
I.9 Caractéristique des cellules.....	16
I.10 Modèle des cellules photovoltaïques	19
I.10.1 Modèle à une seule diode	19
I.10.2 Modèle à deux diodes	21
I.10.3 Modèle d'une cellule photovoltaïque idéal	22
I.11 Modules photovoltaïques	23
I.11.1 Association de module	23
I.12 Le panneau photovoltaïque	24
I.13 Le string photovoltaïque	25
I.14 Le champ photovoltaïque.....	25
I.15 Système de Protection.....	26
I.15.1 La diode By-passe	27
I.15.2 La diode Anti-Retour	27
Conclusion.....	28

Chapitre II : Etude des différents types des défauts.

Introduction	29
II.1 Définition.....	29
II.2 Les défauts liés au système photovoltaïque.....	29
II.2.1 Défaut d'ombrage	30
II.2.2 Défaut de la diode By-passe et diode anti retour.....	32

II.2.3 Pannes au niveau de la boîte de jonction	33
II.2.4 Défaut de mismatching	35
II.2.5 Le défaut de la résistance série R_s	36
II.2.6 Le défaut de la résistance parallèle R_p	37
II.2.7 Défaut de terre	37
II.2.8 Défaut de module.....	38
II.2.9 Défaut au niveau de générateur	39
Conclusion.....	40

Chapitre III : Modélisation en fonctionnement défaillant d'un champ PV

Introduction	41
III.1 Méthode Newton-Raphson	41
III.2 Application à une cellule modèle réel	41
III.3 Influence de la température	42
III.4 Influence de l'éclairement.....	44
III.5 Classification des défauts pour un champ photovoltaïque	45
III.6 Simulation du panneau photovoltaïque en fonctionnement sain	46
III.7 Modélisation et simulation d'un champ PV en fonctionnement défaillant	49
III.8 Résultat de simulation de défauts de température	51
III.9 Résultats de la simulation d'un défaut d'ombrage	52
III.10 Résultat d'une simulation d'un défaut de la diode by-pass	53
III.11 Modèle de Bishop.....	53
III.12 Résolution du module de la cellule	54
III.13 Défaut de module	59
Conclusion.....	60
Conclusion générale	61

Références bibliographiques

Introduction générale

L'énergie est un élément crucial pour la vie humaine et un moteur du développement des sociétés. Depuis des millénaires, l'humanité utilise l'énergie pour répondre à ses besoins vitaux.

Depuis le premier choc pétrolier en 1973, face à une demande croissante d'énergie et à l'augmentation de la pollution environnementale, les pays industrialisés se tournent progressivement vers les énergies nouvelles et renouvelables [1,2]. Ces sources d'énergie, telles que le soleil, le vent, la chaleur terrestre, les chutes d'eau et les marées, sont non seulement illimitées mais aussi peu ou pas polluantes. Le solaire, l'éolien et l'hydroélectricité, par exemple, ne produisent aucune pollution lorsqu'ils génèrent de l'énergie [3].

L'énergie électrique est essentielle pour la société moderne et industrielle. De nos jours, l'énergie photovoltaïque est parfois considérée comme la plus prometteuse parmi les énergies renouvelables pour remplacer le charbon, le pétrole, le gaz et même le nucléaire [4]. Au cours des dix dernières années, le marché du photovoltaïque a connu une croissance remarquable, stimulée par la réduction des coûts de production et les politiques de soutien, rendant ainsi le retour sur investissement d'une installation photovoltaïque de plus en plus attractif.

Cependant, comme tous les processus industriels, un système photovoltaïque peut connaître divers défauts et anomalies au cours de son fonctionnement, ce qui peut réduire ses performances voire le rendre totalement indisponible. Ces conséquences défavorables diminuent la productivité de l'installation et donc son profit, sans compter les coûts de maintenance nécessaires pour rétablir le système [1].

Les installations photovoltaïques, comme tous les systèmes électriques et électroniques, peuvent tomber en panne et se dégrader au fil du temps. Il est donc nécessaire de mettre en place un diagnostic dont l'objectif principal est de détecter les défauts et de maximiser la production énergétique du système photovoltaïque. Diagnostiquer avec précision, détecter et localiser les défauts dans une installation photovoltaïque augmentent la productivité et réduisent les coûts de maintenance en augmentant le taux de disponibilité des installations et en optimisant leur rendement. L'ajout de fonctions avancées de surveillance, de diagnostic et de supervision ne doit pas être perçu comme une charge par l'exploitant [5,6].

À partir des éléments précédemment discutés, et afin de proposer une analyse concrète, ce mémoire est structuré en trois chapitres, chacun avec un objectif précis :

Le premier chapitre offre une vue d'ensemble de l'état de l'art du photovoltaïque, incluant les définitions essentielles, les principes de fonctionnement, les différents types de systèmes photovoltaïques, et les technologies disponibles.

Le deuxième chapitre explore les divers défauts susceptibles de se produire dans un système photovoltaïque.

Le troisième chapitre présente les résultats des simulations réalisées, analyse les implications de ces résultats et propose des recommandations pour l'optimisation et la maintenance des systèmes photovoltaïques.

L'objectif de notre travail c'est d'identifier et de diagnostiquer rapidement les problèmes afin d'optimiser et de réduire la perte d'énergie .la détection précoce permet une maintenance préventive et prolonge la durée de vie de système tout en assurant la sécurité en évitent des risques comme les incendies...

Chapitre I

Etat de l'art sur le photovoltaïque

Introduction

L'énergie photovoltaïque représente un enjeu majeur de la politique énergétique du XXI^e siècle. Elle consiste en la conversion directe de la lumière solaire en énergie électrique à travers l'utilisation de cellules solaires, également appelées cellules photovoltaïques. Ces cellules sont fabriquées à partir de semi-conducteurs, similaires à ceux utilisés dans les transistors ou les puces électroniques des ordinateurs[1].

Généralement constituées de silicium cristallin, les cellules photovoltaïques demeurent la technologie dominante sur le plan industriel et technologique. Cette prédominance s'explique par le fait que le silicium est l'un des éléments les plus abondants sur Terre, principalement sous forme de silice non toxique [1,2].

I.1 Définition de l'énergie photovoltaïque

Le terme "photovoltaïque" est dérivé du grec ancien, où "photos" signifie lumière, et du nom du physicien italien Alessandro Volta, célèbre pour son invention de la pile électrique et qui a également donné son nom à l'unité de mesure de la tension électrique, le Volt.

L'énergie solaire photovoltaïque est produite par la conversion directe de l'énergie lumineuse du soleil en électricité grâce à une cellule photovoltaïque. Les modules photovoltaïques exploitent uniquement le rayonnement solaire, c'est-à-dire l'énergie lumineuse, pour générer de l'électricité, sans recourir à la chaleur solaire comme intermédiaire dans le processus de production d'électricité photovoltaïque [3].

I.2 L'énergie solaire

L'énergie solaire provient de la fusion nucléaire qui se produit au cœur du soleil. Elle se propage à travers le système solaire et l'univers principalement sous forme de rayonnement électromagnétique composé de photons et de rayonnement infrarouge[4]. La quantité d'énergie solaire reçue en un point donné de la Terre dépend de la latitude, la saison et l'heure, qui influent sur la hauteur du soleil et donc sur l'énergie reçue au sol par unité de surface, ainsi que sur la nébulosité en fonction du climat local [5].

La distance entre la Terre et le Soleil est d'environ 150 millions de kilomètres, et la vitesse de la lumière est un peu plus de 300 000 kilomètres par seconde. Par conséquent, les rayons du Soleil mettent environ 8 minutes à nous parvenir. La constante solaire représente la

densité d'énergie solaire qui atteint la limite externe de l'atmosphère terrestre exposée au Soleil, et sa valeur est généralement considérée comme égale à 1360 W/m².

Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est réduite à environ 1000 W/m² en raison de l'absorption dans l'atmosphère. Albert Einstein a découvert, lors de ses travaux sur l'effet photoélectrique, que la lumière n'avait pas uniquement un caractère ondulatoire, mais que son énergie était également portée par des particules appelées photons.

L'énergie d'un photon étant donnée par la relation suivant :

$$E = \frac{h \times c}{\lambda} \quad (1)$$

λ : la densité d'énergie solaire = 1370 W/m².

h : la constante de Planck = $6,62607015 \times 10^{-34}$ m² kg/s.

c : la vitesse de la lumière = 299 792 458 m / s

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Une façon commode d'exprimer cette énergie est :

$$E = \frac{1.26}{\lambda} \quad (2)$$

I.3 Coordonnées terrestres

La Terre est essentiellement une sphère en rotation autour d'un axe qui traverse les pôles Nord et Sud. Chaque point de la surface terrestre est défini par sa latitude et sa longitude, qui déterminent ses coordonnées géographiques, ainsi que par son altitude [6].

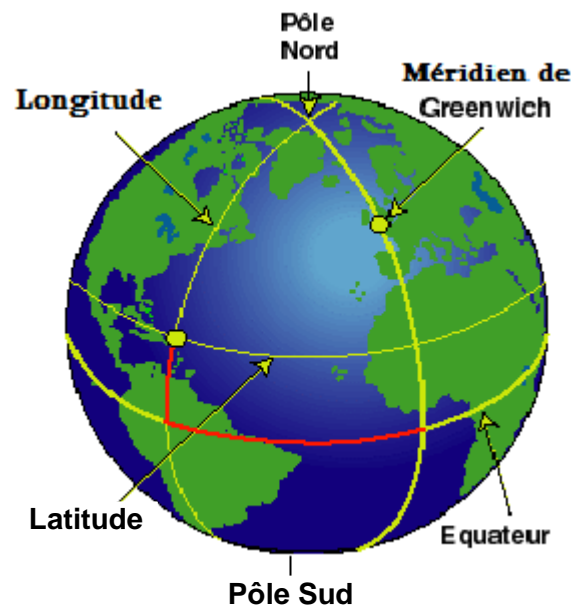


Figure I-1 : Les coordonnées géographiques [6]

I.3.1 Longitude

La longitude est définie comme l'angle entre le méridien de Greenwich et le méridien du lieu observé. Elle varie de -180° à $+180^\circ$, où les valeurs négatives indiquent l'ouest et les valeurs positives l'est. Étant donné que la Terre effectue une rotation complète en 24 heures (360°), chaque heure correspond à un écart de longitude de 15° . Par conséquent, chaque degré de longitude représente 4 minutes. Dans cette notation, la longitude est représentée par la lettre λ [7].

- Longitude OUEST $\lambda_0 < 0^\circ$
- Longitude EST $\lambda_0 > 0^\circ$

I.3.2 La latitude

La latitude d'un lieu (φ) sur Terre est l'angle entre l'équateur et le rayon terrestre passant par ce lieu. Elle est mesurée de 0° à $+90^\circ$ dans l'hémisphère nord.

La latitude influence significativement les variations saisonnières : les jours d'été s'allongent à mesure que l'on s'éloigne de l'équateur, et le soleil est plus bas à midi solaire. En revanche, les jours d'hiver sont plus courts, et le soleil se trouve encore plus bas qu'à l'équateur.

En d'autres termes, l'intensité maximale du rayonnement solaire (à midi) ainsi que la quantité totale de rayonnement solaire (G) sur un plan horizontal diminuent avec l'augmentation de la latitude [4].

I.3.3 L'altitude

L'altitude d'un point correspond à la distance verticale entre ce point et une surface de référence théorique (niveau moyen de la mer), on l'exprime généralement en mètre.

I.4 Les coordonnées du soleil

Pour chaque lieu, la position du soleil est déterminée à tout moment de la journée et de l'année en utilisant deux systèmes de coordonnées distincts [8] :

- Par rapport au plan équatorial de la Terre (système de coordonnées équatorial).
- Par rapport au plan horizontal du lieu (système de coordonnées horizontal).

I.4.1 Coordonnées équatoriales

Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan équatorial de la terre à l'aide de deux angles (δ , H) [7, 4, 8].

a) Déclinaison solaire δ

L'angle entre la direction du soleil et le plan équatorial terrestre est appelé la déclinaison. Les latitudes de l'hémisphère Nord sont positives, allant de 0° à $+90^\circ$ au pôle Nord, tandis que celles de l'hémisphère Sud sont négatives, allant de 0° à -90° au pôle Sud. La déclinaison varie tout au long de l'année entre deux valeurs extrêmes, $\pm 23.45^\circ$.

Les lois du mouvement relatif entre la Terre et le Soleil permettent de calculer les variations de la déclinaison au fil de l'année. Pour des applications pratiques, une formule d'approximation est souvent suffisante, exprimée par l'équation suivante [3,2].

$$\delta = 23.45 \times \sin\left(\frac{360}{365}(J - 80)\right) \quad (3)$$

Avec J le numéro du jour de l'année compté à partir du 1^{er} janvier, c'est-à-dire, il varie de 1 à 365 ou 366 selon l'année.

δ varie entre deux valeurs extrêmes - $\delta_0 < \delta < + \delta_0$

Avec $\delta_0 = 23.45$

- Au solstice d'hiver, la déclinaison solaire est de $-23,45$ degrés, et cet événement coïncide avec le 21 décembre
- $\delta = 0$ Les équinoxes sont les deux moments de l'année où le Soleil traverse le plan équatorial. L'équinoxe automnal, le 23 septembre, marque le début de la diminution de la durée du jour, tandis que l'équinoxe hivernal, le 21 mars, marque le début de l'augmentation de la durée du jour.
- Lors du solstice d'été, avec une déclinaison solaire de $+23,45$ degrés, qui se produit le 21 juin, nous constatons que le soleil atteint son point le plus haut dans le ciel. Cet événement marque le début de l'été dans l'hémisphère nord.

b) Angle horaire du soleil H

L'angle horaire du soleil représente l'angle entre les projections de la direction du soleil et la direction du méridien du lieu. Cet angle varie à chaque instant de la journée, et il est déterminé par une relation spécifique.

$$H = 15(TSV - 12) \quad (4)$$

$$TSV = TI - TU + \left(\frac{\Delta t + 4\lambda}{60}\right) = TL - \left(TU - \frac{\lambda}{15}\right) + \frac{\Delta t}{60} \quad (5)$$

$$\Delta t = 9.87 \sin 2\left(\frac{360}{365} \times (J - 81)\right) - 7.35 \cos\left(\frac{360}{365} \times (J - 81)\right) - 1.5 \sin\left(\frac{360}{365} \times (J - 81)\right) \quad (6)$$

Avec

- *TSV* (Temps Solaire Vrai) : Temps repéré de façon que le soleil se trouve au zénith à midi.
- *TU* (Temps Universel) : Le décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich.
- *TL* (Temps Légal) : Temps donné par une montre.
- Δt : Correction de l'équation du temps.
- λ : longitude du lieu.

- L'angle horaire H varie de -180° à $+180^\circ$

On prend:

- $H > 0$ après midi.
- $H < 0$ le matin
- $H = 0$ midi TSV

I.4.2 Coordonnées horizontales

Le repère horizontal est constitué du plan de l'horizon astronomique et du plan vertical du lieu. Dans ce système de coordonnées, les coordonnées sont définies par la hauteur (h) et l'azimut (a).

a) La hauteur du soleil (h)

L'angle de hauteur du soleil représente l'écart entre la direction réelle du soleil et sa projection sur le plan horizontal. Cette hauteur solaire varie constamment en fonction du moment de la journée et de l'année, conformément à la relation suivante

$$\sin(h) = \cos(\delta) \times \cos(\varphi) \cdot \cos(H) + \sin(\varphi) \times \sin(\delta) \quad (1)$$

Avec:

h : varie entre -90° à $+90^\circ$.

On prend : $h > 0$ le jour, $h < 0$ la nuit et $h = 0$ aux lever et coucher

b) Azimut du soleil (a)

C'est l'angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du Sud. L'azimut du soleil varie à chaque instant de la journée selon la relation suivante :

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \times \sin(H)}{\cos(h)} \quad (2)$$

Avec : a : varie entre -180° à $+180^\circ$

On prend : $a > 0 \Rightarrow$ vers l'ouest, $a < 0 \Rightarrow$ vers l'est et $a = 0 \Rightarrow$ direction du sud.

I.5 Rayonnement solaire

Notre soleil est une étoile naine qui se compose de 74% d'hydrogène, 25% d'hélium et d'une fraction d'éléments plus lourds, sa température à la surface est d'environ 5530°C[9].

I.5.1 Le rayonnement direct

Le rayonnement direct est la lumière solaire reçue directement du Soleil. Il peut être quantifié à l'aide d'un pyréliomètre. Le rayonnement direct reçu dans le plan du capteur est directement mesuré :[10]

I.5.2 Le rayonnement diffus

Rayonnement qui vient de partout dans le ciel. Il est causé par l'absorption, la diffusion et la réflexion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et les nuages. Pour mesurer ce rayonnement, on peut utiliser un pyranomètre avec un écran qui bloque le soleil [11].

Dans le plan du capteur le rayonnement diffus est donné par :

I.5.3 Le rayonnement réfléchi ou l'albédo

C'est le rayonnement qui est renvoyé par le sol ou les objets à sa surface. On appelle cela l'albédo. L'albédo peut être important lorsque le sol est très réfléchissant, comme l'eau ou nuage. Cela peut avoir un impact sur le climat et l'énergie solaire absorbée par la terre [9].

$$\text{L'albédo} = \frac{\text{enregie refléchie}}{\text{energie reçue}}$$

I.5.4 Le rayonnement global

Rayonnement global ou sol dépend de la composition et de l'épaisseur de l'atmosphère traversée par les rayons lumineux tout au long de la journée et c'est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran [9,11].

Dans le cas d'une surface horizontale, le rayonnement global s'écrit :

$$G = I \times \sin(h) + D_h$$

Pour un plan quelconque, le rayonnement global est :

I.6 Gisement solaire en Algérie

Le gisement solaire en Algérie est une collection de données qui décrit comment le rayonnement solaire évalue sur une période donnée. Ces données sont utilisées pour simuler le fonctionnement des systèmes solaires et les dimensionner de manière précise. Lorsqu'on installe un système de capacité solaire, il est important de choisir le meilleur emplacement en tenant compte du niveau d'ensoleillement et de l'orientation par rapport au soleil. En inclinant les capteurs solaires selon un angle égal à l'altitude de lieu et en les orientant vers le sud, on peut maximiser la qualité d'énergie captée. On peut également utiliser la technique de poursuite du soleil pour optimiser encore davantage la captation solaire [12].

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la figure suivante :

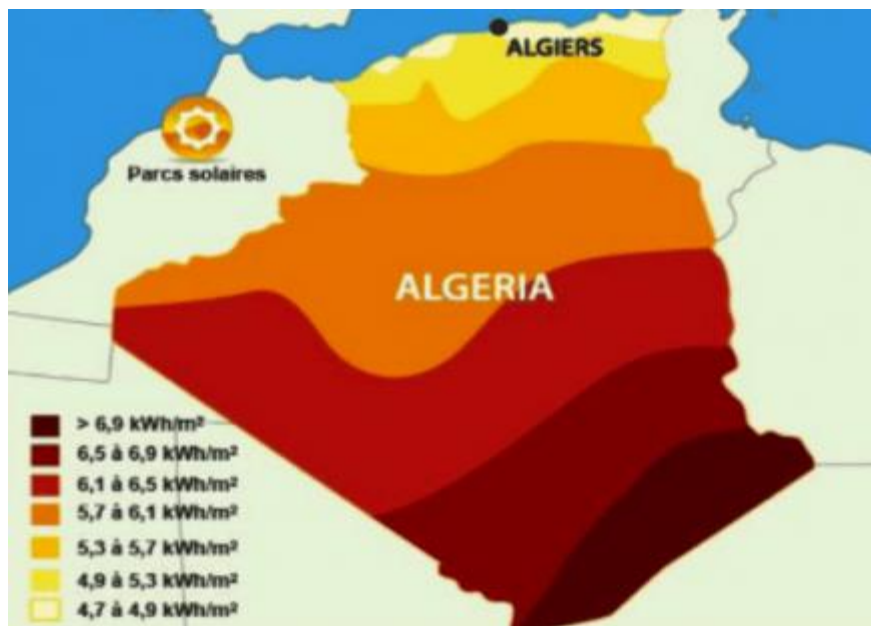


Figure I-2 : Gisement solaire en Algérie [12].

Tableau I-1 : Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques [11].

Région	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m²/an)	1700	1900	2650

Sur la quasi-totalité du territoire national, l'insolation excède généralement 2000 heures par an et peut même atteindre 3900 heures dans les hauts plateaux et le Sahara. La quantité d'énergie solaire reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 mètre carré avoisine les 5 kWh dans la plupart des régions, ce qui équivaut à environ 1700 kWh/m²/an dans le Nord et 2650 kWh/m²/an dans le Sud du pays [11].

I.7 Les panneaux solaires

I.7.1 Définition

La cellule photovoltaïque, parfois appelée photopile, est la composante essentielle des panneaux solaires photovoltaïques. Elle est chargée de convertir la lumière du soleil en électricité utilisable. Les cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs spéciaux qui réagissent à la lumière en produisant un courant électrique. Lorsque plusieurs cellules sont connectées en série, leur tension s'additionne, tandis que lorsqu'elles sont connectées en parallèle, leur courant s'additionne. Cette configuration permet d'obtenir la tension souhaitée pour répondre aux besoins spécifiques des applications solaires [13].

I.7.2 La cellule PV

La cellule photovoltaïque est l'élément de base des panneaux solaires qui produit l'électricité, l'utilisation des cellules solaires a débuté dans les années quarante dans le domaine spatial, les recherches d'après-guerre ont permis d'améliorer leurs performances et leur taille [14].

I.7.3 Principe d'une cellule photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique découvert par le physicien français Edmond Becquerel en 1839. Il est le résultat de la collision entre les photons et le matériau semi-conducteur qui compose le panneau solaire. L'énergie des photons est entièrement transmise aux électrons de valence qui passent d'un niveau d'énergie inférieur (bande de valence) à un niveau d'énergie supérieur (bande de conduction). Cette excitation de l'électron implique la création d'une paire électron-trou de même énergie électrique. Dans la majorité des cas, la paire électron-trou revient à l'équilibre en convertissant son énergie électrique en énergie thermique, d'où l'élévation de température du panneau quand il est exposé au soleil. L'objectif clé de la conversion photovoltaïque est ainsi de récupérer un maximum de cette énergie sous forme électrique. Pour cela, il faut séparer les paires électron-trou en les obligeant à passer par

un circuit extérieur. Ceci est faisable, puisque les paires électron-trou ont des charges de signes opposés (+q ; -q). Ainsi lorsque les paires sont soumises à un champ électrique, les forces qui s'exerceront sur elles seront des sens opposés, ceci facilitant la séparation : c'est l'effet photovoltaïque. Ainsi, avec une cellule solaire qui est l'association de deux semi-conducteurs respectivement de type P et N, ce phénomène physique sera favorisé [13,14].

I.7.4 Le dopage

Le dopage du semi-conducteur, tel que le silicium dans notre cas, est une étape essentielle pour permettre au panneau solaire final de produire de l'énergie électrique. En effet, un silicium non dopé ne peut générer de courant électrique. Bien que les électrons du semi-conducteur se mettent en mouvement au contact du rayonnement solaire, ce mouvement est chaotique entre les atomes et ne conduit pas à la création d'un courant électrique. Pour qu'un courant électrique puisse se former, les électrons doivent circuler dans une direction spécifique, d'où la nécessité de doper le silicium. Le dopage d'un semi-conducteur consiste à introduire de petites quantités d'impuretés (atomes d'un autre matériau) dans sa structure pour modifier ses propriétés de conductivité [3].

A. Le dopage de type N

Le processus de dopage vise à introduire un excès d'électrons dans la couche dopée. Prenons l'exemple du dopage du silicium, où la méthode la plus courante consiste au dopage négativement avec des atomes de phosphore (P) qui possèdent 5 électrons de valence. Étant donné que le silicium n'en possède que 4, le phosphore peut former des liaisons avec 4 atomes de silicium tout en conservant un électron supplémentaire. Ces électrons libres résultants créent un surplus d'électrons dans toute la plaque dopée, conférant ainsi une charge globale négative [15].

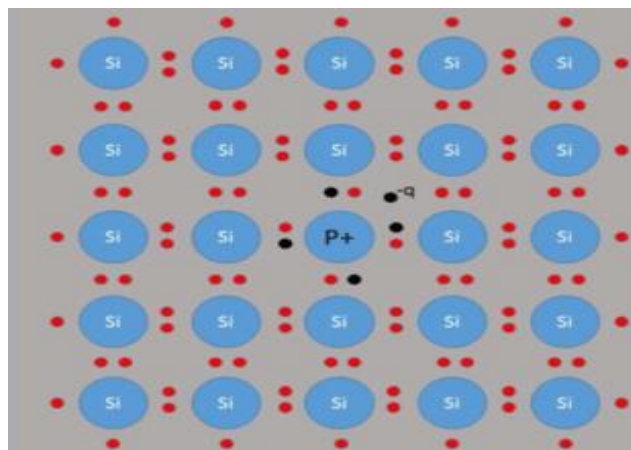


Figure I-3 : Dopage de type N [11].

B. Le dopage de type P

Contrairement au dopage précédent, celui-ci vise à induire un déficit d'électrons, ce qui conduit à un excès de ce que l'on appelle des « trous », considérés comme des charges positives. Le dopage positif du silicium est généralement effectué avec des atomes de bore (B). Ces atomes ne possèdent que 3 électrons dans leur couche électronique externe. Lorsqu'ils s'associent avec 4 atomes de silicium, un « trou » est créé pour chaque atome de bore, ce qui se traduit par un manque d'électrons. Ainsi, la plaque de silicium dopée positivement acquiert une charge globale positive [15].

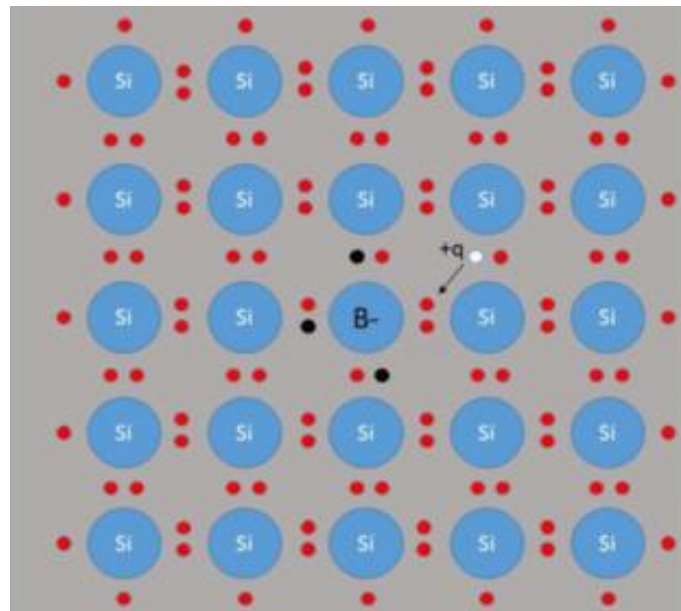


Figure I-4 : Dopage de type P [11].

I.7.5 La jonction PN

En juxtaposant une plaque dopée P et une plaque dopée N, une jonction PN est formée, créant ainsi une cellule photovoltaïque. Lorsque la couche dopée N est exposée au soleil en premier, les photons solaires transfèrent leur énergie, arrachant ainsi des électrons à la couche N par effet photoélectrique et créent des trous. Lorsqu'un électron rebouche un trou près de la jonction PN, un champ électrique se forme, repoussant les électrons vers la couche dopée N et les trous vers la couche dopée P. En connectant les couches dopées N et P, un flux continu d'électrons est établi, générant ainsi un courant électrique. Toutes les cellules constituant le panneau sont disposées en série, ce qui permet l'addition des tensions, et en parallèle pour l'addition des courants [16].

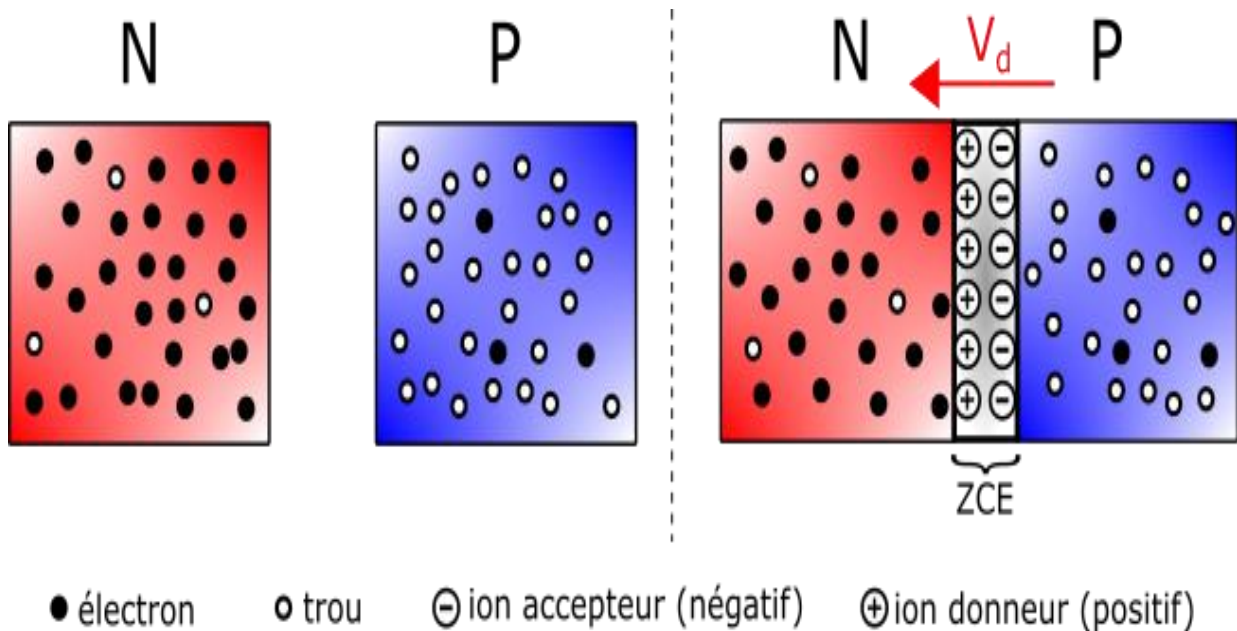


Figure I-5 : Jonction PN [11].

I.8 Type de cellule

Actuellement, les cellules à base de silicium sont les plus largement employées, tandis que d'autres types de cellules sont encore en phase de recherche et développement, ou bien sont considérées comme trop coûteuses et réservées à des applications où leur prix n'est pas un frein. En outre, les technologies utilisées permettent de les distinguer [17].

I.8.1 Cellules en silicium monocristallin

Il s'agit de cellules construites à partir d'un seul cristal de silicium, offrant le meilleur rendement compris entre 12 et 18%. Elles sont cependant les plus coûteuses en raison de leur processus de fabrication complexe [4].

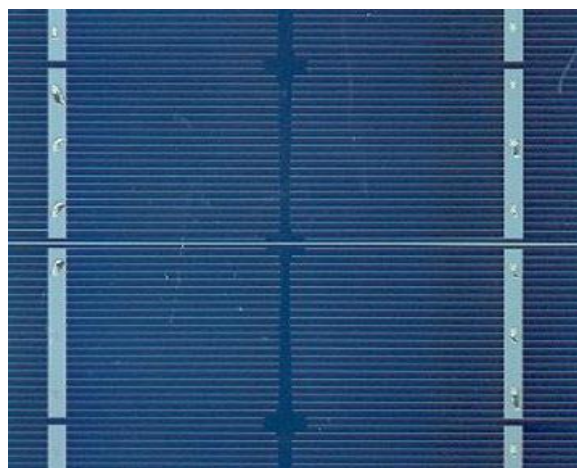


Figure I-6 : Cellule monocristalline [26].

I.8.2 Cellules en silicium polycristallin

Ces cellules sont créées en associant des cristaux de silicium, ce qui rend leur structure hétérogène. Leur rendement se situe entre 11% et 15%, légèrement inférieur à celui des cellules en silicium monocristallin. Toutefois, leur processus de fabrication est considérablement plus simple, ce qui se traduit par des coûts de production réduits [17].

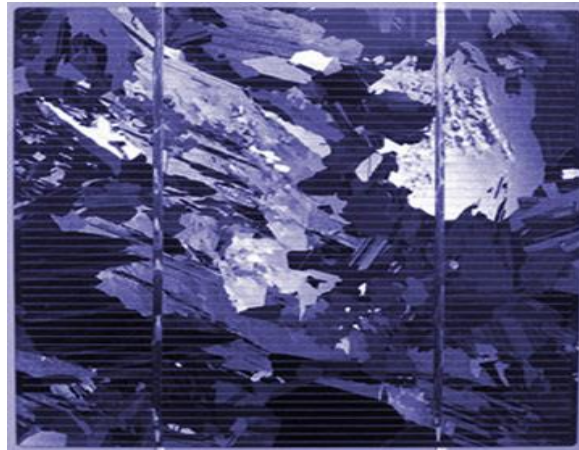


Figure I-7 : Cellule polycristalline [26].

I.8.3 Cellules en silicium amorphe

Les cellules solaires amorphes sont fabriquées en déposant du silicium amorphe, non cristallisé, sur une plaque de verre. Leur processus d'absorption des photons est plus efficace que celui du silicium cristallin, ce qui permet de les fabriquer sous forme de couches minces. Cependant, leur rendement est plus faible, se situant entre 6% et 8%. Cette limitation est compensée par leur coût de production plus bas. Elles sont principalement utilisées dans les calculatrices et les montres solaires [17].

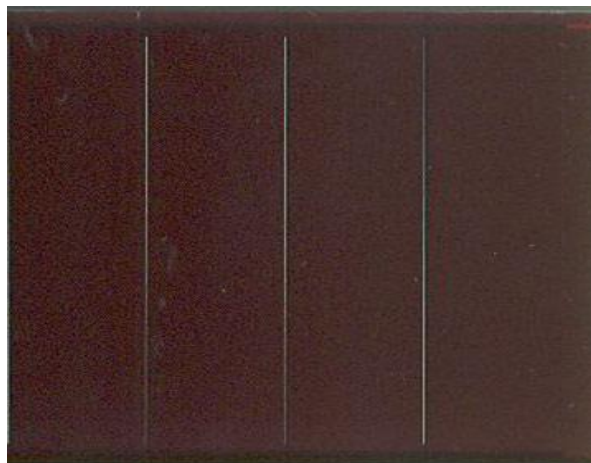


Figure I-8 : Cellule amorphe (couche mince) [26].

I.8.4 Cellules organiques

Une cellule photovoltaïque organique se compose d'une couche photosensible organique, composée de matériaux de type A et D, placée entre deux électrodes. L'une de ces électrodes doit être transparente pour permettre le passage des photons à travers la couche active. Lorsque la lumière est absorbée par la couche active, des porteurs de charges sont créés, puis transportés à travers la couche et collectés au niveau des électrodes. De cette manière, une cellule photovoltaïque organique transforme la lumière en électricité [17,4].

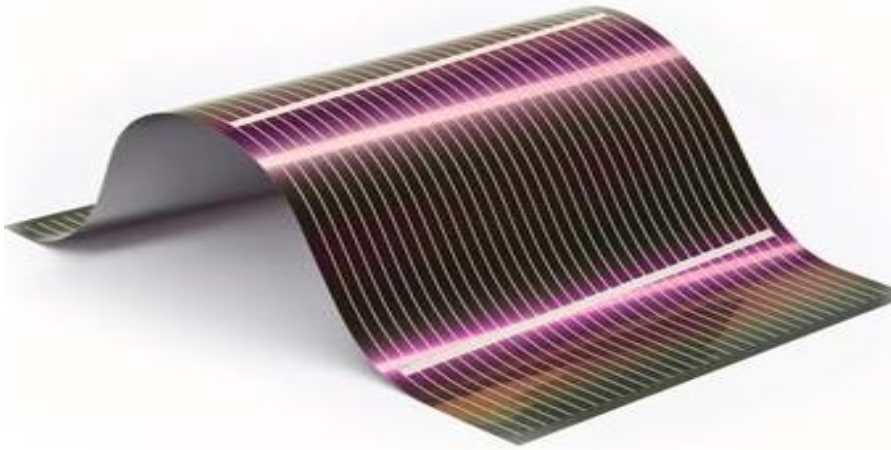


Figure I-9 : Cellule photovoltaïque organique [11].

I.9 Caractéristique des cellules

La puissance électrique produite par une cellule photovoltaïque est le résultat du produit de la tension et du courant qu'elle génère. Ces deux paramètres, courant et tension, sont influencés à la fois par les propriétés électriques de la cellule et par la charge électrique à ses bornes. Les caractéristiques électriques de la cellule sont représentées par un graphique appelé caractéristique courant-tension. Chaque dipôle électrique, y compris une cellule photovoltaïque, possède sa propre caractéristique courant-tension qui lui est propre, comme illustré ci-dessous [13].

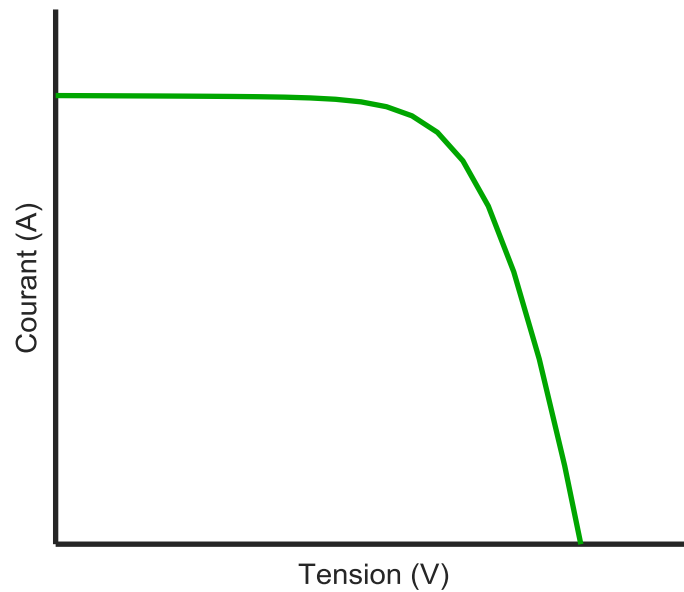


Figure I-10 : Caractéristique courant tension.

Cette caractéristique courant-tension est une relation entre la tension et le courant délivré par la cellule photovoltaïque. Deux données importantes sont à relever [8].

- **Le courant de court-circuit noté I_{cc} :**

Le courant de court-circuit d'une cellule photovoltaïque correspond au courant qui la traverse lorsque ses bornes sont court-circuitées, c'est-à-dire lorsque le pôle positif est relié directement au pôle négatif (ce qui entraîne une tension nulle aux bornes). Dans cette situation, la puissance fournie par la cellule, représentée par $P = U \times I$, est nulle.

- **La tension en circuit ouvert notée U_{co}**

Il s'agit de la tension aux bornes de la cellule lorsque celle-ci est en circuit ouvert, signifiant que le pôle positif et le pôle négatif sont électriquement isolés de tout autre circuit électrique, et par conséquent aucun courant ne la traverse. Dans cette configuration, la puissance fournie par la cellule, calculée par $P = U \times I$, est nulle.

La puissance fournie par la cellule est tout simplement le produit du courant et de la tension. A partir de la caractéristique courant-tension, il est intéressant de dessiner le graphe de la puissance ($P = U \times I$) en fonction de la tension U , qu'on appelle aussi caractéristique puissance-tension Figure I-2 :

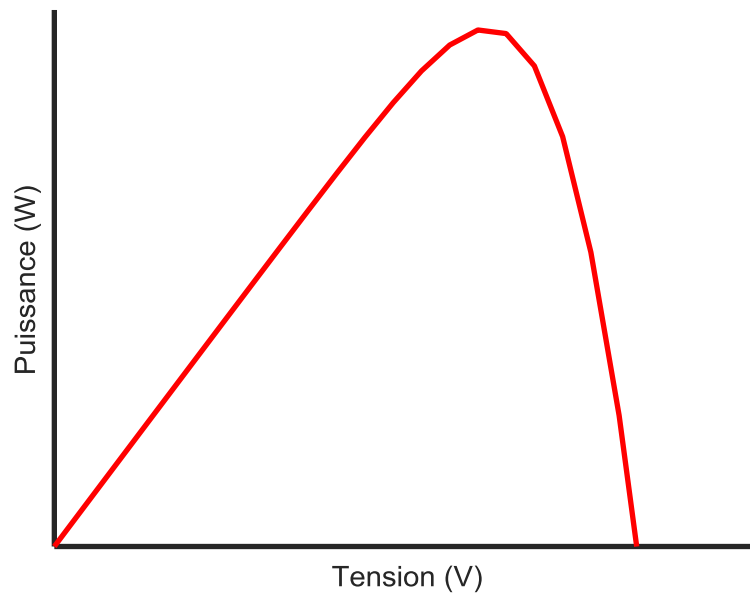


Figure I-11 : Caractéristique puissance tension.

Pour caractériser une cellule photovoltaïque on aura besoin de cinq paramètres majeurs sont :

- Le courant de court-circuit noté I_{cc}
 - La tension à vide notée U_{co}
 - Le courant de puissance maximale noté I_{MPP}
 - La tension de puissance maximale notée U_{MPP}
 - La puissance au point maximale notée $P_{MPP} = I_{MPP} \times U_{MPP}$
- **Facteur de forme (FF)**

Un paramètre essentiel souvent dérivé de la caractéristique $I(V)$ d'une cellule ou d'un générateur photovoltaïque est le facteur de remplissage, aussi appelé fill factor (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule, notée P_{max} , et la puissance formée par le rectangle ($I_{cc} \times U_{co}$). Une valeur élevée de ce facteur indique une meilleure exploitation de la puissance. Ainsi, les meilleures cellules photovoltaïques sont le résultat de compromis technologiques visant à se rapprocher autant que possible des caractéristiques idéales.[8] Le facteur de remplissage est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{U_{max} \times I_{cc}} \quad (9)$$

Avec

$$P_{\max} = I_{\max} \times U_{\max} \quad (10)$$

- **Rendement d'une cellule photovoltaïque**

Le rendement d'une cellule ou d'un module photovoltaïque est le rapport entre l'énergie électrique produite par cette cellule ou module et l'énergie lumineuse reçue sur la surface correspondante

$$\eta = \frac{P_{cu}}{E_{nom} \times S_m} \quad (11)$$

Avec :

P_{cu} : puissance crête unitaire d'un module photovoltaïque en [Watt].

S_m : éclairement nominal standard égal à 1000W/m²

E_{nom} : surface du module photovoltaïque en [m²].

I.10 Modèle des cellules photovoltaïques

I.10.1 Modèle à une seule diode

De nombreux modèles mathématiques ont été proposés pour simuler la caractéristique de tension du courant d'une cellule solaire. Afin de trouver un modèle de générateur PV, il faut d'abord trouver le circuit électrique équivalent pour cette source. La distinction est faite entre ces modèles par la procédure de calcul, précision et nombre de paramètres impliqués habituellement, les cellules solaires photovoltaïques sont conçues comme un circuit électrique Figure I-12 qui contient une diode, une alimentation et de deux résistances [18].

L'équation du courant pour cellule déduite de schéma équivalente :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (12)$$

Avec :

$$I_d = I_0 \left[e^{\left(\frac{q(V_{pv} + R_s \times I_{pv})}{A \times K \times T} \right)} - 1 \right] \quad (13)$$

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{R_{sh}} \quad (14)$$

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[e^{\left(\frac{q(V_{pv} + R_s \times I_{pv})}{A \times K \times T} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{R_{sh}} \quad (15)$$

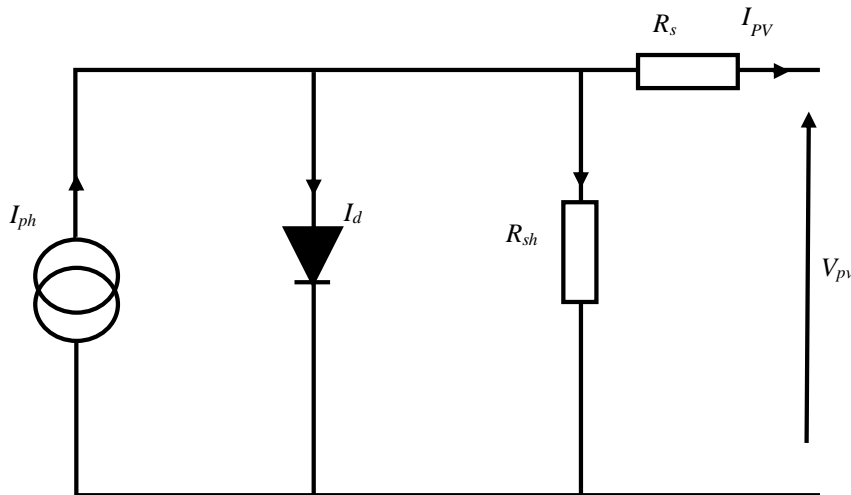


Figure I-12 : Modèle à une diode.

I_{pv} : Le courant délivré par le module (courant de sortie).

I_{ph} : Le courant photo générer.

I_d : Le courant qui travers la diode.

I_{sh} : Le courant circulant dans la résistance de shunt.

V_{pv} : La tension de sortie de la cellule.

R_s : Résistance série.

R_{sh} : Résistance shunt de la sortie de la cellule.

q : charge de l'électron ($q=1.602 \cdot 10^{-19}$ C).

A : facteur d'idéalité de la diode ($1 < A < 3$).

T : température de la jonction en k.

K : constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ j/k).

I_0 : courant de fuite de la diode.

I.10.2 Modèle à deux diodes

Nous avons cette fois-ci, deux diodes pour représenter les phénomènes de polarisation de la jonction PN. 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 suivant présente le modèle de la cellule photovoltaïque a deux diodes [5].

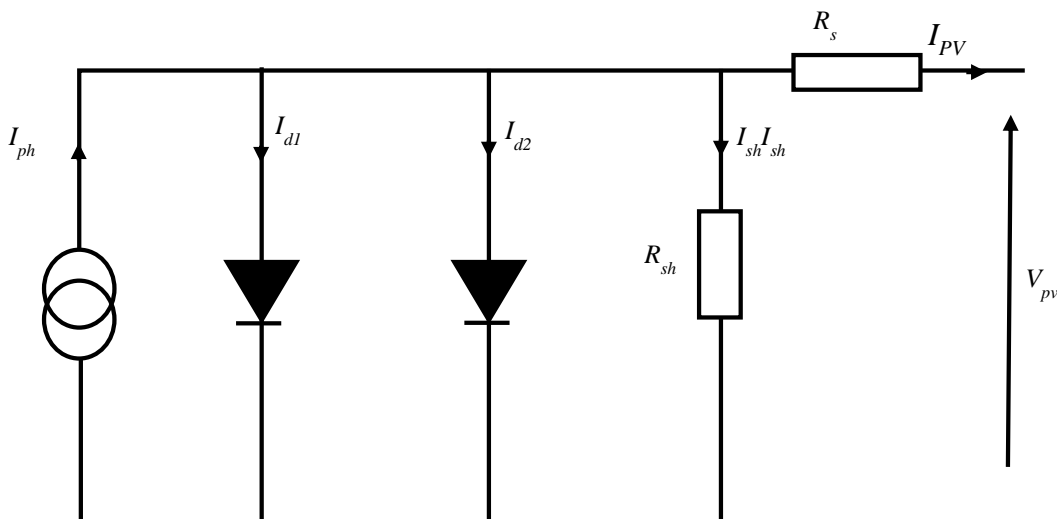


Figure I-13 : Modèle a deux diodes.

L'équation suivante décrit le courant de sortie de la cellule photovoltaïque pour le modèle a deux diodes :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \quad (16)$$

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{01} \left[e^{\left(\frac{q(V_{pv} + R_s \times I_{pv})}{a_1 \times V_{t1}} \right)} - 1 \right] - I_{02} \left[e^{\left(\frac{q(V_{pv} + R_s \times I_{pv})}{a_2 \times V_{t2}} \right)} - 1 \right] \quad (17)$$

I_{d1} : courant de saturation inverse de la diode.

I_{d2} : courant de saturation inverse de la diode.

I.10.3 Modèle d'une cellule photovoltaïque idéal

La photopile est un dispositif semi-conducteur capable de produire un courant lorsqu'il est exposé à la lumière, en convertissant l'énergie des photons en courant électrique. En simplifiant, on peut le considérer comme une source de courant en circuit fermé, similaire à une diode [19].

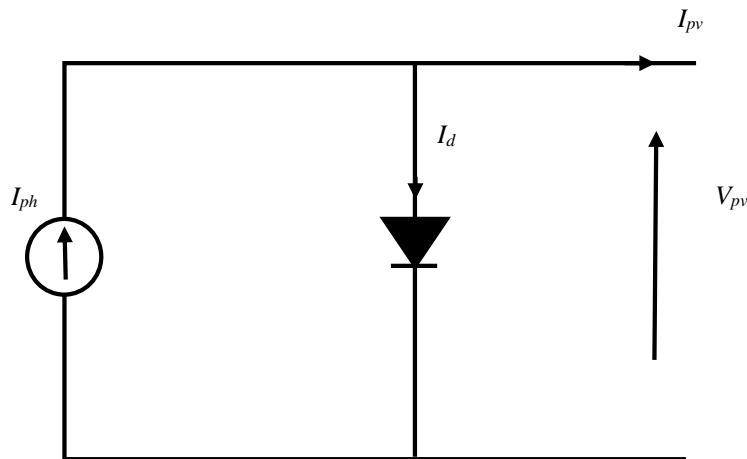


Figure I-14 : Schéma électrique équivalent d'une cellule PV idéal.

L'équation de courant pour une cellule déduite de schéma équivalent :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (18)$$

Avec :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[e^{\left(\frac{q \times V_{pv}}{A \times K \times T} \right)} - 1 \right] \quad (19)$$

I.11 Modules photovoltaïques

La cellule photovoltaïque de base produit une puissance très faible comparée aux besoins des applications domestiques ou industrielles. Une seule cellule, de quelques dizaines de centimètres carrés, peut générer seulement quelques watts à une tension inférieure à un volt (tension de jonction PN). Pour augmenter la puissance, plusieurs cellules sont assemblées pour former un module ou un panneau photovoltaïque. Ces modules sont composés d'un groupe de cellules connectées en série, ce qui permet de convertir la lumière solaire en électricité. Ils sont ensuite combinés en série et en parallèle pour former un système photovoltaïque ayant une puissance maximale définie selon des conditions précises d'ensoleillement, de température et de spectre solaire. La plupart des modules disponibles sur le marché sont composés de deux à quatre groupes de cellules en silicium cristallin connectés en série [2].

I.11.1 Association de module

- Association série

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (Modules) en série [3].

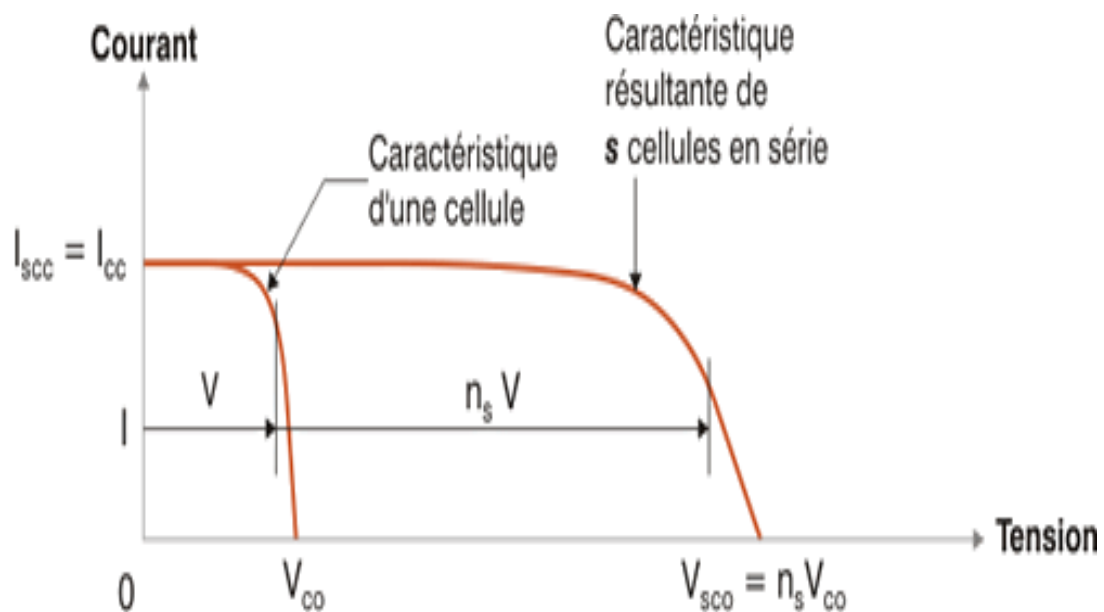


Figure I-15 : Caractéristique d'association des cellules en série [3].

- Association parallèle

Pour augmenter le courant fournit a une charge on connecte les cellules en parallèle. La figure I-16 montre la courbe I(V) d'un groupement de nombre de cellule en parallèle. On ne montre que des cellules ayons la même tension de fonctionnement et les courants la nouvelle courbe est obtenue en multipliant point par point pour chaque valeur de tension le courant I de la cellule élémentaire par nombre de cellules en parallèle [6].

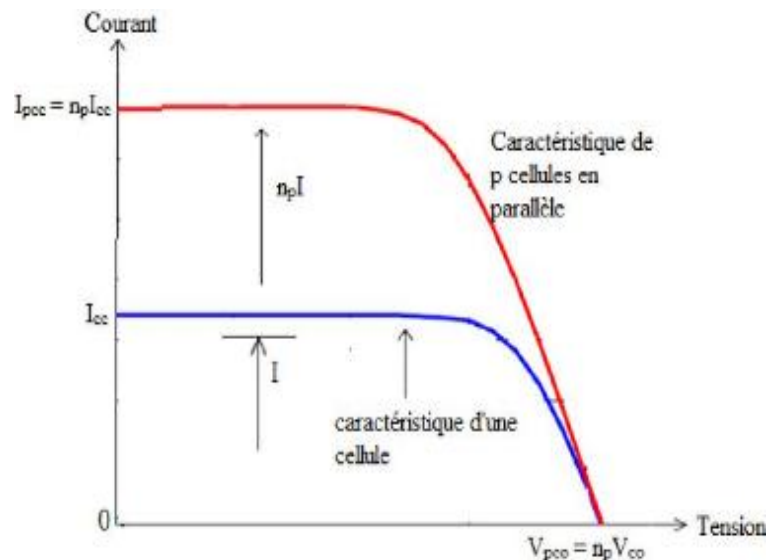


Figure I-16 : Caractéristique d'association des cellules en parallèle [6].

- Association mixte

En combinant les cellules en série et/ou en parallèle, les valeurs du courant de court-circuit (I_{cc}) et de la tension à vide (V_{co}) varient en conséquence. La caractéristique d'un générateur photovoltaïque composé de multiples cellules ressemble globalement à celle d'une cellule individuelle, à condition qu'il n'y ait pas de disparité entre les caractéristiques de chaque cellule, telles que l'irradiation et la température uniformes [3,6].

I.12 Le panneau photovoltaïque

Le panneau photovoltaïque se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique.

I.13 Le string photovoltaïque

Un string photovoltaïque est un groupe de panneaux solaires photovoltaïques connectés électriquement en série. Les principaux avantages des strings photovoltaïques sont :

A) Réduction des pertes de tension dans les câbles

En connectant les panneaux en série, la tension totale du string est plus élevée, ce qui permet d'utiliser des câbles de plus faible section et de réduire les pertes.

B) Simplification de l'installation

Les strings permettent de regrouper les câbles provenant des panneaux en un seul câble qui va vers l'onduleur, rendant l'installation plus simple.

C) Meilleure gestion de l'ombrage

Si un panneau d'un string est partiellement ombragé, cela n'affecte que ce panneau et non tout le string, contrairement à une installation avec un seul onduleur pour tous les panneaux.

Cependant, les strings photovoltaïques présentent aussi quelques inconvénients :

a) Sensibilité à l'ombrage

Si un panneau d'un string est ombragé, cela peut réduire significativement la production de tout le string.

b) Perte de performance globale

Si un panneau d'un string tombe en panne, cela peut affecter la performance de tout le string.

I.14 Le champ photovoltaïque

C'est un regroupement de modules solaires photovoltaïques raccordés entre-deux et destiné à produire de l'électricité, soit à titre autonome (panneaux solaires sur les toits des habitations par exemple), soit dans le cadre d'un raccordement à un réseau public de distribution d'électricité [20].



Figure I-17 : Champ photovoltaïque [11].

I.15 Système de Protection

Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, il est crucial d'assurer sa protection électrique afin de prolonger sa durée de vie et d'éviter les pannes destructrices, notamment celles liées à l'association des cellules et à leur fonctionnement en cas d'ombrage. Pour ce faire, deux types de protections sont couramment utilisés dans les installations modernes :

- La protection en cas de connexion en parallèle de modules photovoltaïques pour prévenir les courants négatifs dans les générateurs photovoltaïques (diode anti-retour).
- La protection lors de la mise en série de modules photovoltaïques, qui permet de ne pas perdre l'intégralité de la chaîne (diode By-pass), tout en évitant la formation de points chauds.

La figure I-18 illustre ces deux types de protections. Dans les paragraphes suivants, nous expliquerons en détail le fonctionnement de chacune de ces protections[3].

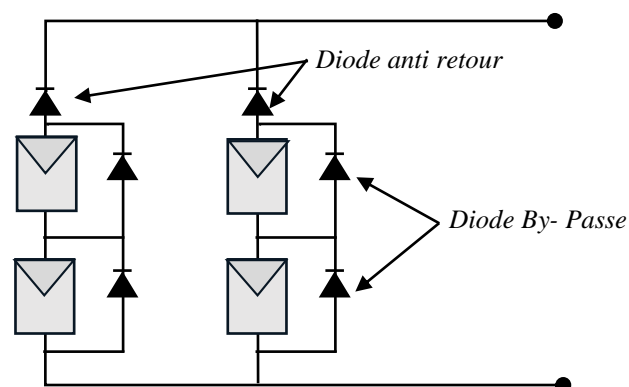


Figure I-18 : Disposition des différentes protections : la diode By-passe et anti-retour [11].

I.15.1 La diode By-passe

Dans certaines situations, telles que l'ombrage ou les variations de température, il est possible que les cellules placées en série ne présentent pas toutes les mêmes caractéristiques. Par conséquent, les cellules ombrées pourraient produire moins de courant que les cellules non ombrées, entraînant des déséquilibres et des risques de surchauffe, voire de déformation ou de rupture de la plaque en verre des panneaux.

De plus, lorsqu'une cellule devient ombrée, sa diode de dérivation se polarise et commence à conduire. Cela signifie que tout le courant excédentaire par rapport au nouveau courant de court-circuit de la cellule ombrée est court-circuité par la diode, ce qui réduit considérablement le chauffage local dans la zone ombrée.

En fin de compte, lorsqu'on assemble des cellules photovoltaïques en série, il est essentiel d'installer une diode de dérivation (diode by-pass) pour empêcher le fonctionnement en inverse (zone II) d'une cellule ombrée et ainsi prévenir sa destruction.

Il convient de noter qu'en pratique, pour des raisons économiques et de facilité de réalisation, une diode de dérivation est généralement placée en parallèle de chaque groupe de 18 cellules constituant le module [21,22].

I.15.2 La diode Anti-Retour

Lorsque plusieurs chaînes de cellules sont connectées en parallèle sur une charge, il existe un risque que les chaînes de cellules éclairées débitent dans les chaînes ombrées ou que la charge se décharge à travers le générateur photovoltaïque (GPV). Pour prévenir cela, des diodes anti-retours sont utilisées en série avec le GPV, comme illustré dans la figure 19. Cette diode est particulièrement cruciale lorsque la charge du module photovoltaïque est une batterie. En effet, elle empêche la batterie de stockage de se décharger à travers le module photovoltaïque pendant la nuit.

La figure I.19 présente les caractéristiques $I(V)$ d'une cellule solaire, ensoleillée d'une part, et dans l'obscurité d'autre part. Comme on peut le constater, lorsque la cellule est plongée dans l'obscurité, une batterie pourrait se décharger à travers la cellule si aucune diode de blocage n'est présente [21,22].

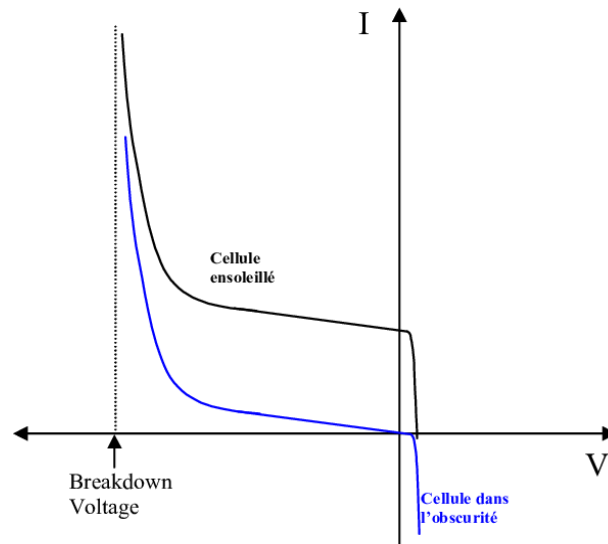


Figure I-19 : Caractéristiques I-V d'une cellule solaire ensoleillée et dans l'obscurité [4].

Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons résumé l'état de l'art sur le photovoltaïque. Nous nous sommes intéressés aux différents types de rayonnement solaire qui peuvent exister et nous avons modélisé les différents types de cellules photovoltaïques et donné leurs équations mathématiques. Le chapitre suivant sera consacré aux différents défauts qui peuvent surgir dans une installation photovoltaïque.

Chapitre II

**Etude des différents types des
défauts**

Introduction

Les systèmes photovoltaïques, bien que généralement fiables, peuvent rencontrer des dysfonctionnements lors de leur fabrication, ce qui entraîne une réduction significative de leur efficacité globale. Tout écart par rapport à la production d'énergie attendue est considéré comme un défaut. Ces incidents peuvent être classés selon divers critères, tels que le composant affecté, les causes, les conséquences et la réaction du système. Par exemple, un défaut peut résulter d'un problème au niveau des cellules solaires, de l'onduleur ou des connexions électriques. Les causes peuvent inclure des erreurs de fabrication, des matériaux défectueux ou des conditions environnementales extrêmes. Les conséquences peuvent aller d'une diminution de la production d'énergie à une panne totale du système. Une détection précoce et une réaction rapide sont essentielles pour minimiser les impacts négatifs sur la performance globale du système photovoltaïque. Ce qui va suivre dans ce chapitre est l'étude des différents défauts qui peuvent surgir dans une installation photovoltaïque.

II.1 Définition**A) Défaut**

Le défaut est toute divergence ou variation que nous attribuons à toute différence entre une caractéristique observée sur un appareil et une caractéristique théorique [23].

B) Détection

Elle implique d'identifier qu'un dispositif est en dysfonctionnement en se basant sur la connaissance de certaines caractéristiques [24].

C) Localisation

La localisation vise à déterminer l'emplacement d'un défaut détecté survenant sur les actionneurs, les capteurs d'instrumentation, la commande ou le système commandé, en précisant quel organe ou composant est impacté par celui-ci [23, 24].

II.2 Les défauts liés au système photovoltaïque

Nous mentionnerons dans cette section les différents défauts qui puissent se produire au niveau d'un système photovoltaïque. Ces derniers peuvent se produire soit en cours de fabrication, soit en raison de mauvaise exploitation ou d'autres conditions climatiques.

II.2.1 Défaut d'ombrage

A) Définition

L'ombrage photovoltaïque peut se produire en raison de divers facteurs tels que les arbres, les bâtiments, le sable, la poussière, les feuilles et les nuages. Il existe deux types d'ombrage : l'ombrage total, qui affecte toutes les cellules, et l'ombrage partiel, qui ne touche que certaines cellules. L'ombrage total peut entraîner une diminution drastique de la production d'énergie, tandis que l'ombrage partiel peut provoquer des inefficacités localisées dans le système. Pour optimiser le rendement des panneaux photovoltaïques, il est crucial de minimiser les sources potentielles d'ombrage et d'installer les panneaux dans des zones bien dégagées [25].



Figure II-1 : Système photovoltaïque pareillement ombré [11].

B) Type d'ombrage

1) Ombrage direct

Ce type d'ombrage, également connu sous le nom d'ombre immédiate, entraîne des pertes de production significatives dans le système photovoltaïque. Plus l'obstacle d'ombrage est proche des modules ou des champs photovoltaïques, plus l'ombre est importante, réduisant ainsi la quantité de lumière atteignant la surface des modules photovoltaïques [26].

Par exemple : les obstructions telles que les cheminées, les paraboles d'antenne, les câbles, les poteaux, les arbres proches et les bâtiments voisins peuvent causer cet effet.



Figure II-2 : Exemple ombrage direct sur un panneau PV [11].

2) Ombrage temporaire

Il est provoqué par des conditions naturelles telles que la neige, les feuilles d'arbre, la poussière et d'autres éléments similaires. Pour faire face à ces conditions, il est nécessaire d'incliner les modules à un angle supérieur à 10 degrés afin de favoriser le nettoyage automatique par l'eau de pluie [24].



Figure II-3 : Exemple d'ombrage temporaire [11].

3) Auto-ombrage

L'auto-ombrage des panneaux solaires photovoltaïques se produit lorsque les parties d'un panneau solaire projettent de l'ombre sur d'autres parties du même panneau. Cela peut se produire à différents moments de la journée en raison de l'angle du soleil par rapport aux panneaux et de la disposition des cellules solaires sur le panneau lui-même [25].

L'ombrage a une influence significative sur la production électrique d'une cellule photovoltaïque. Voici les principaux effets de l'ombrage sur une cellule photovoltaïque [26].

- **Perte de production :** Lorsqu'une cellule photovoltaïque est ombrée, elle ne peut plus capter les photons solaires nécessaires pour produire de l'électricité. Cela entraîne une perte de production électrique proportionnelle à la taille et à la densité de l'obstacle causant l'ombre.
- **Impact sur le rendement global :** Les cellules photovoltaïques sont montées en série. Si une cellule est ombrée, cela peut rendre l'ensemble du module photovoltaïque inefficace, car la cellule la plus faible affecte le rendement des autres cellules.

II.2.2 Défaut de la diode By-passe et diode anti retour

La diode de by-pass est une des solutions pour protéger les cellules de l'ombrage partiel elle évite la polarisation inverse, le hot spot et destruction du module. Cette diode se place, en général, en parallèle avec une branche de dix-huit cellules. On peut constater plusieurs défauts de cette dernière, ces défauts sont en général des défauts de fabrication ces défauts peuvent apparaître suite à la rupture de la connexion de la diode. Donc dans un panneau photovoltaïque on peut trouver une diode déconnectée, une diode équivalente à une impédance quelconque, une diode court-circuitée et une diode inversée. De la même manière que pour la diode de by-pass, la diode anti-retour est exposée aux mêmes types de défauts envisagés pour la diode anti-retour : court-circuit, impédance quelconque, circuit ouvert et diode inversée [27].

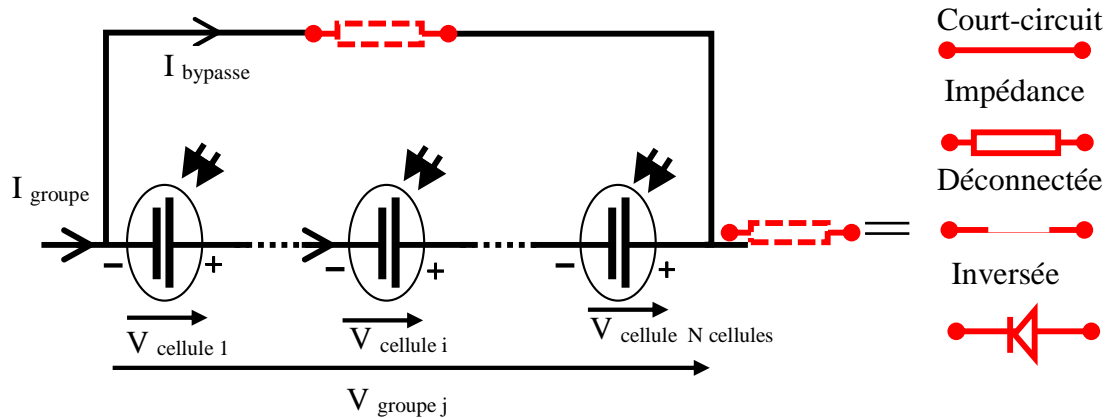


Figure II-4 : Défaut de la diode de by-pass [11].

II.2.3 Pannes au niveau de la boîte de jonction

Les pannes au niveau de la boîte de jonction dans un système photovoltaïque peuvent être causées par plusieurs facteurs : [28]

- 1) **Fuite de liquide** : Lorsqu'une boîte de jonction est endommagée, il est possible que du liquide s'échappe, ce qui peut entraîner une panne électrique. Cela peut être causé par des dégâts des eaux ou des fuites de liquide dans la boîte de jonction.
- 2) **Oxydation progressive** : Lorsqu'une boîte de jonction est exposée à l'eau, cela peut entraîner une oxydation progressive de la visserie et des jonctions, ce qui peut rendre le matériel dangereux et causer des problèmes électriques.
- 3) **Dégradation des jonctions** : Les jonctions peuvent se dégrader avec le temps, ce qui peut entraîner des pannes électriques. Cela peut être causé par des facteurs tels que la corrosion, la fatigue mécanique ou des défauts de fabrication.
- 4) **Mal branchement** : Les fils électriques au niveau des prises peuvent être mal branchés, ce qui peut entraîner des pannes électriques. Il est important de vérifier les connexions électriques pour éviter ces problèmes.
- 5) **Défectuosités de fabrication** : Les défauts de fabrication peuvent également entraîner des pannes au niveau de la boîte de jonction. Cela peut inclure des défauts de qualité des composants, des erreurs de montage ou des problèmes de conception.

- 6) **Diodes bypass grilles** : Si la diode bypass est grillée, elle court-circuitera systématiquement les cellules, même en l'absence de points chauds, ce qui provoquera une baisse de production. La diode bypass doit être remplacée par un professionnel.
- 7) **Points chauds** : Si un point chaud est constaté sur l'installation photovoltaïque, il est important de contacter un installateur photovoltaïque ou un électricien pour dépanner le problème.
- 8) **Surveillance** : Il est essentiel de surveiller les éléments de l'installation photovoltaïque, notamment les boîtes de jonction, pour détecter les problèmes potentiels et les résoudre avant qu'ils ne causent des pannes électriques.
- 9) **Maintenance** : Des opérations de maintenance régulières sont nécessaires pour détecter et résoudre les problèmes potentiels avant qu'ils ne causent des pannes électriques. Cela inclut des vérifications des connexions électriques, des nettoyages des raccordements et des vérifications des disjoncteurs.

Tableau II-2 : Différents défauts dans la boîte de jonction.

Défaut	Conséquence
Absence de parafoudre où Protection foudre inadaptée	Destruction en cas de foudre
Presse-étoupe mal serré	Corrosion des contacts, rupture du Circuit électrique
Liaison de mise à la terre non Fixée ou sectionnée	Pas de mise à la terre
Boîte de jonction sans presse-étoupe	Pas d'étanchéité, corrosion des Contacts, rupture du circuit électrique
Presse-étoupe en caoutchouc	Corrosion des contacts, rupture du Circuit électrique
Infiltration d'eau par les vis de Fixation	Corrosion des contacts, rupture du Circuit électrique
Boîte de jonction non repérée	Problème pour contrôle et Maintenance
Déconnexion des soudures	Arc électrique, incendie, diminution

	Des performances
Boîtier infesté d'insectes	Rupture du circuit électrique
Fourreaux non prévus pour Usage extérieur	Destruction de la protection
Liaison sans protection	Destruction de la liaison
Pénétration de l'eau ou de l'humidité	Corrosion des connexions, des diodes, des bornes, incendie

II.2.4 Défaut de mismatching

Le défaut de mismatching dans une cellule photovoltaïque se produit lorsque des cellules photovoltaïques associées ne sont pas homogènes ou ne répondent pas de manière identique aux conditions d'éclairement. Cela peut entraîner une perte de production électrique due à la différence de rendement entre les cellules [29,27].

A) Causes du défaut de mismatching

- 1. Variations de la qualité des cellules :** Les cellules photovoltaïques peuvent avoir des propriétés différentes en termes de rendement, de résistance et de capacité, ce qui peut entraîner des pertes de production électrique.
- 2. Différences d'éclairement :** Les cellules photovoltaïques peuvent être exposées à des intensités de lumière différentes, ce qui peut affecter leur rendement et entraîner des pertes de production.
- 3. Défauts de fabrication :** Les défauts de fabrication, tels que des impuretés ou des inhomogénéités dans la structure de la cellule, peuvent également contribuer au défaut de mismatching.

B) Impact sur la production électrique

Le défaut de mismatching peut entraîner une perte de production électrique significative, car les cellules photovoltaïques ne peuvent pas fonctionner à leur maximum potentiel. Cela peut être particulièrement problématique dans les systèmes photovoltaïques autonomes, où la production électrique est essentielle pour le fonctionnement des équipements [26].

II.2.5 Le défaut de la résistance série R_s

La résistance en série R_s joue un rôle crucial dans les performances des cellules solaires. Son augmentation est souvent due à des facteurs tels que la corrosion des connexions entre les modules PV, des vis de connexion mal serrées ou la corrosion des points de soudure entre les cellules. En conditions normales, cette résistance de connexion est pratiquement insignifiante.

La valeur de cette résistance peut être augmentée dans plusieurs cas anormaux. Au fur et à mesure que la résistance série augmente, le facteur de forme diminue. Cela conduit à une diminution de l'efficacité des cellules.

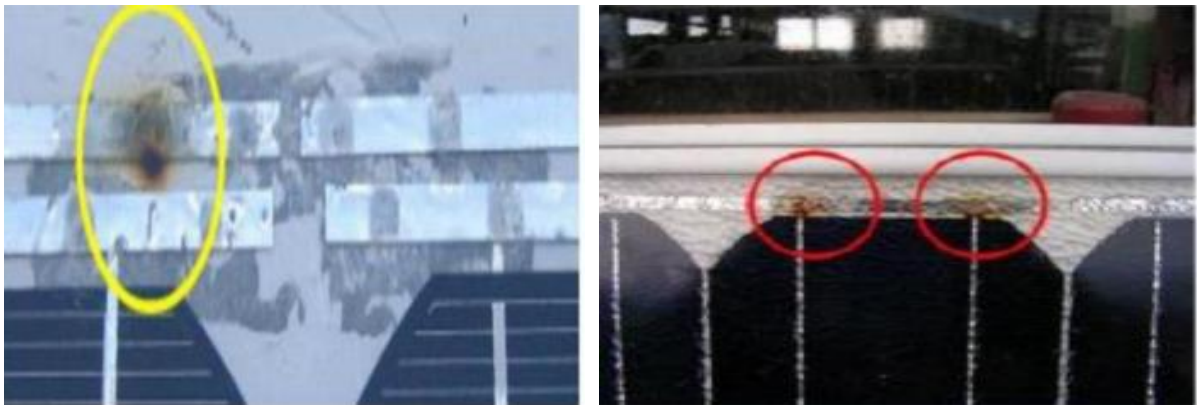


Figure II-5 : Défaut d'augmentation de la résistance R_s [26].

A) Causes du défaut de l'augmentation de la résistance R_s

Les causes du défaut de la résistance série R_s peuvent inclure des défauts de fabrication, des dommages mécaniques, des corrosions et des connexions défectueuses [24].

B) Impact sur la production**1) Perte de puissance**

Un défaut de la résistance série R_s peut entraîner une perte de puissance et une diminution du rendement de la cellule, car une partie du courant se dissipe dans la résistance série plutôt que dans la charge.

2) Réduction de la tension

Une résistance série élevée peut également réduire la tension de sortie de la cellule, ce qui peut affecter la compatibilité avec les autres composants du système photovoltaïque

II.2.6 Le défaut de la résistance parallèle R_p

Les pertes d'énergie significatives dues à la présence d'une résistance shunt R_p sont généralement le résultat d'une conception inadéquate des cellules solaires. Cette résistance shunt représente un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière d'une photopile. En général, elle est bien plus élevée que la résistance série R_s . Une résistance série trop faible peut affecter la tension de circuit ouvert de la photopile. De plus, une photopile avec une résistance shunt trop basse ne produira plus de tension sous faible luminosité [24].

A) Causes

Les causes du défaut de la résistance parallèle R_p peuvent inclure des défauts de fabrication, des dommages mécaniques, des variations de température et des impuretés dans la structure de la cellule.

B) Impact sur la production**1) Perte de puissance**

Un défaut de la résistance parallèle R_p peut entraîner une perte de puissance et une diminution durendement de la cellule, car le courant perdant se dissipe dans la résistance parallèle plutôt que dans la charge.

2) Variations de température

Les variations de température peuvent affecter la résistance parallèle R_p , ce qui peut entraîner des fluctuations de la production électrique.

II.2.7 Défaut de terre

Un défaut de terre dans un système photovoltaïque se produit lorsque le courant continu (CC) de l'installation photovoltaïque est en contact avec la terre, ce qui peut entraîner des risques de choc électrique et de dommages aux équipements. Voici les principaux points à considérer [26].

A) Causes du défaut de terre**1. Défectuosités dans les câbles ou les connexions**

- Les câbles ou les connexions défectueuses peuvent permettre au courant continu de s'échapper vers la terre, entraînant un défaut de terre.
- Vieillesse des câbles : Les câbles peuvent se détériorer avec le temps, ce qui peut entraîner des fuites de courant vers la terre.

2. Problèmes de conception ou de fabrication

- Des défauts de conception ou de fabrication dans les modules photovoltaïques ou les onduleurs peuvent également causer des défauts de terre

B) Impact sur la production et la sécurité

- 1. Perte de production :** Un défaut de terre peut entraîner une perte de production électrique, car l'onduleur peut être mis hors tension pour éviter les risques de choc électrique.
- 2. Risques de choc électrique :** Un défaut de terre peut également entraîner des risques de choc électrique pour les personnes touchant des parties non isolées de l'installation.

II.2.8 Défaut de module

Le défaut de module dans un système photovoltaïque (PV) se réfère à tous les défauts électriques associés à la connexion d'un module dans un string PV. Trois défauts peuvent se produire dans le module[27]:

A) Court-circuit

Un court-circuit se produit lorsque deux conducteurs sont en contact direct, ce qui peut entraîner une augmentation de la puissance dissipée et une perte de production électrique.

B) Shunt

Un shunt se produit lorsque le courant circule par un chemin alternatif, ce qui peut entraîner une perte de puissance et une augmentation de la température des composants.

C) Inverse

Un inverse se produit lorsque les polarités des composants sont inversées, ce qui peut entraîner une perte de puissance et des risques de choc électrique.

Ces défauts peuvent être détectés et résolus en utilisant des outils de diagnostic spécifiques, tels que des mètres de tension, des mètres de courant, des oscilloscopes et des logiciels de diagnostic. Les opérations de maintenance régulières et des vérifications des câbles et des connexions peuvent également aider à détecter et à résoudre ces défauts avant qu'ils ne causent des problèmes plus graves.

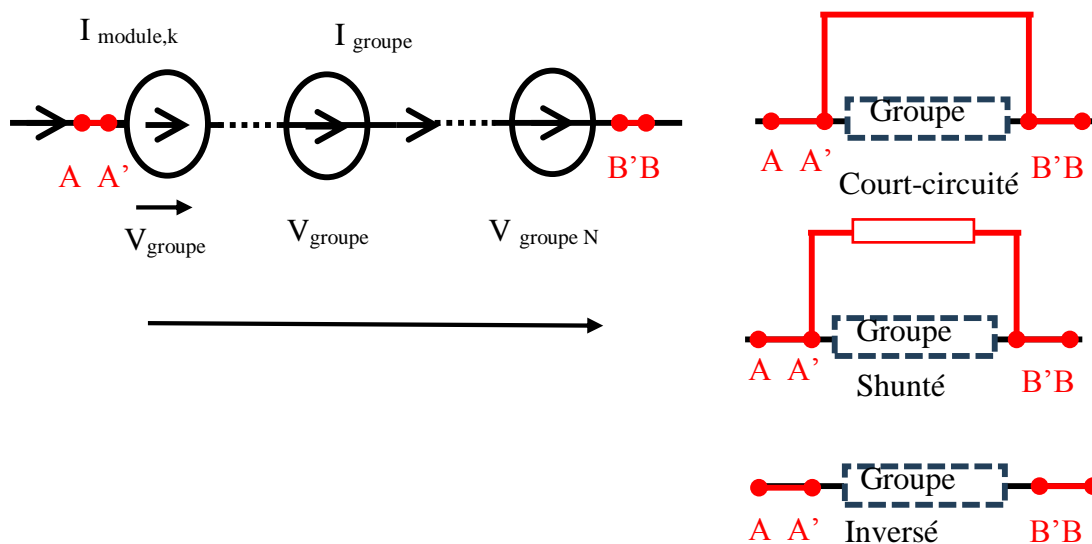


Figure II-6 : Schéma bloc d'un module PV défaillant [11].

II.2.9 Défaut au niveau de générateur

Le générateur photovoltaïque présente plusieurs défauts à différents niveaux, notamment au niveau de la cellule, du groupe de cellules, des modules, des strings et du champ. Ces différents défauts sont détaillés dans le Tableau (II-3), où la première colonne expose la succession des composants pris en compte, la deuxième colonne répertorie les différentes catégories de défauts intervenant à chaque étape, et la dernière colonne décrit les spécificités de chaque défaut pour le générateur photovoltaïque [27].

Tableau II-3 : Classification de défauts et d'anomalies d'un champ PV.

Le niveau de défaut	Dénomination Des défauts	Le défaut
Cellule	Défaut de mismatch et d'ombrage	<ul style="list-style-type: none"> - La résistance série R_s - La résistance parallèle R_{sh} - Courant I_{ph} - la température T - Module arraché ou cassé - Pylônes, cheminée, sable, neige - Échauffement des cellules - Dégradation des interconnexions - Fissure
Groupe	Diode by-pass	<ul style="list-style-type: none"> - Court-circuit. / circuit ouvert. - Impédance Z quelconque. - Inversion de la polarité.
String	Les connexions	<ul style="list-style-type: none"> - Court-circuit. / Circuit-ouvert. - Mauvais câblage. - Détérioration des connexions. - Rupture du circuit électrique - Distraction de la liaison
Champ	Diode anti-retour	<ul style="list-style-type: none"> - Court-circuit. / circuit ouvert. - Impédance Z quelconque. - Inversion de la polarité.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons pu définir les différents défauts qui peuvent affecter une cellule photovoltaïque. Parmi eux, nous citons les défauts de température et d'éclairement. Ces derniers ont un impact sur le rendement de la cellule. Le chapitre suivant sera consacré aux résultats de simulation.

Chapitre III

Modélisation en fonctionnement défaillant d'un champ

PV

Introduction

Ce chapitre sera consacré aux différents résultats de simulations d'un champ photovoltaïque dans leurs modes de fonctionnement sain et défaillant ; effectuées sous Matlab, ces simulations sont basées sur le modèle électrique d'une cellule PV à une seule diode. L'influence des différents paramètres intervenants dans le modèle PV.

III.1 Méthode Newton-Raphson

La méthode de Newton-Raphson est un algorithme utilisé pour trouver les racines d'une fonction, c'est-à-dire les valeurs de x pour lesquelles $f(x)=0$.

Elle nous permet de localiser le point x sur la courbe où $f(x) = 0$, c'est-à-dire le point où la courbe coupe l'axe des abscisses. Alors que résoudre simplement l'équation pourrait sembler une approche directe, certaines fonctions sont trop complexes pour être résolues analytiquement. La méthode de Newton-Raphson propose une solution en utilisant un algorithme itératif, comme décrit ci-dessous.

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$$

x_{n+1} : la mise à jour de la solution de x_n

$f(x_n)$: l'évaluation de la fonction objectif $f(x)$ à la valeur actuelle x_n

$f'(x_n)$: représente l'évaluation de la dérivée de la fonction objectif $f(x)$ dans le point de solution x_n

III.2 Application à une cellule modèle réel

Nous allons résoudre l'équation non linéaire de modèle à une seule diode avec la méthode de Newton-Raphson :

$$f(I_{pv}) = I_{ph} - I_{pv} - I_0 \left[e^{\left(\frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{A \times Kt} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{R_{sh}} \quad (20)$$

Chapitre III : modélisation en fonctionnement défaillant d'un champ PV

La méthode de Newton-Raphson permet de calculer la valeur de courant (I) pour chaque itération par :

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{ph} - I_{pv} - I_0 \left[e^{\left(\frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{A \times k_t} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{R_{sh}}}{-\left(\frac{R_s}{A \times k_t} \right) e^{\left(\frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{A \times k_t} \right)} - \left(\frac{R_s}{R_{sh}} \right)} \quad (21)$$

III.3 Influence de la température

Le facteur qui influe sur le profil de la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque c'est la température. Lorsqu'une cellule photovoltaïque convertit le rayonnement en électricité, son rendement se situe généralement entre 5 % et 16 % selon la technologie utilisée. La partie du rayonnement qui n'est pas convertie en électricité est principalement transformée en chaleur, tandis qu'une fraction résiduelle est réfléchi. Par conséquent, une cellule photovoltaïque mal ventilée connaît une augmentation rapide de sa température.

Pour estimer la température de cellule T_c à partir de la température ambiante T_a on peut utiliser la formule de correction suivant :

$$T_c = T_a + \frac{E_m}{800} (NOCT - 20) \quad (22)$$

Avec :

T_c : la temperature de cellule.

T_a : la temperature ambiante.

E_m : eclairement moyene (en W/m^2).

$NOCT$: 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/m

- L'influence de la température sur la caractéristique $I = f(v)$ représenté sur la figure 1 :

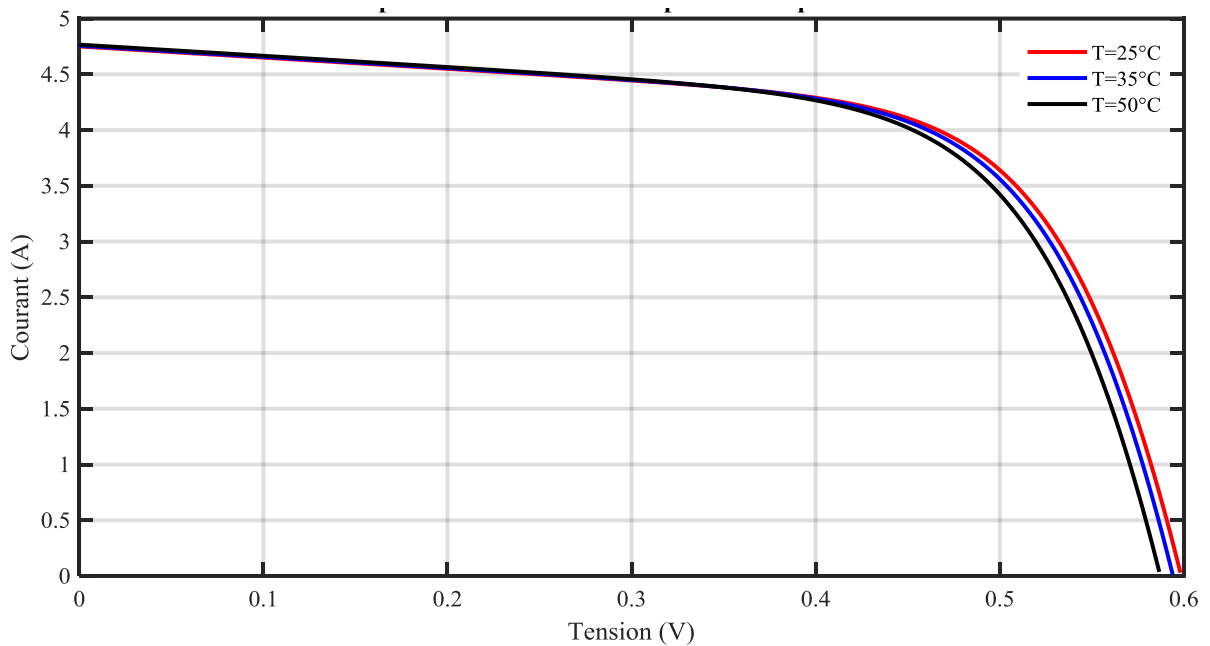


Figure III-1 : Variation de la tension en fonction différentes valeurs de températures.

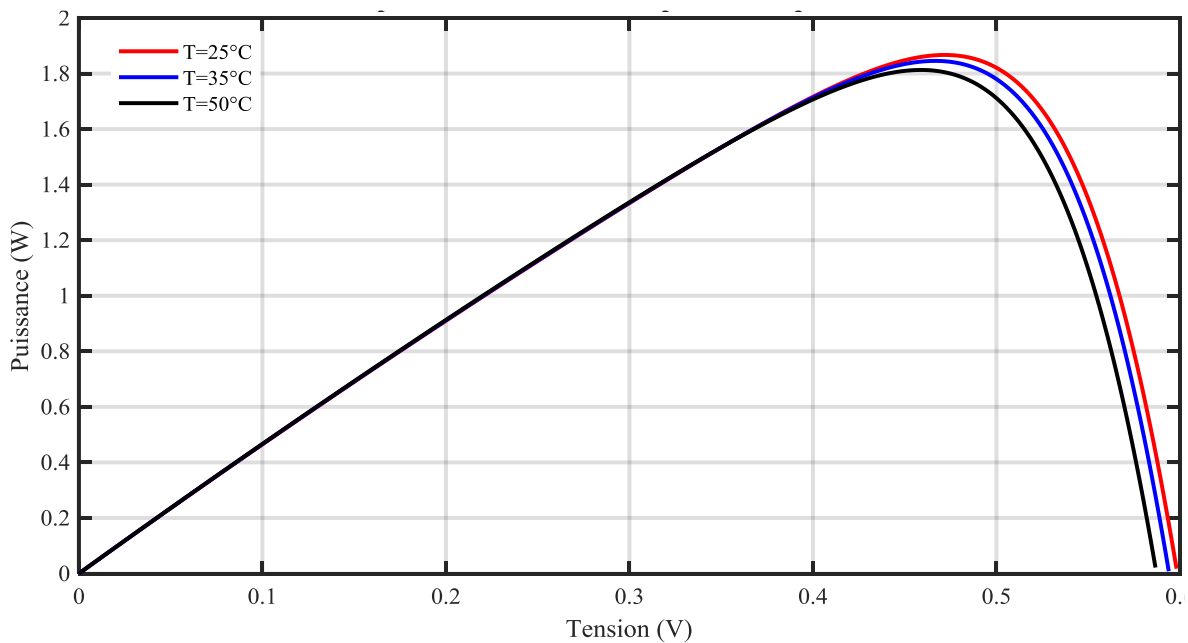


Figure III-2 : Variation de la puissance en fonction différentes valeurs de température.

Interprétation

- On observe que la température de cellule photovoltaïque induit un effet notable sur la tension. Par contre l'effet de la température sur le courant de la cellule est négligeable.
- Il apparaît que plus la température de la cellule augment. Plus la tension à vide diminue.

- La puissance de la cellule égale ou produit de courant et de la tension la mémé règle s'applique sur la puissance (plus la température de la cellule augment plus la puissance cellule diminue).

III.4 Influence de l'éclairement

Dans la figure III-3 nous avons représenté les résultats concernant les caractéristiques I (V) et P(V) du panneau à une température constante à 25°C pour diverses valeurs d'éclairement.

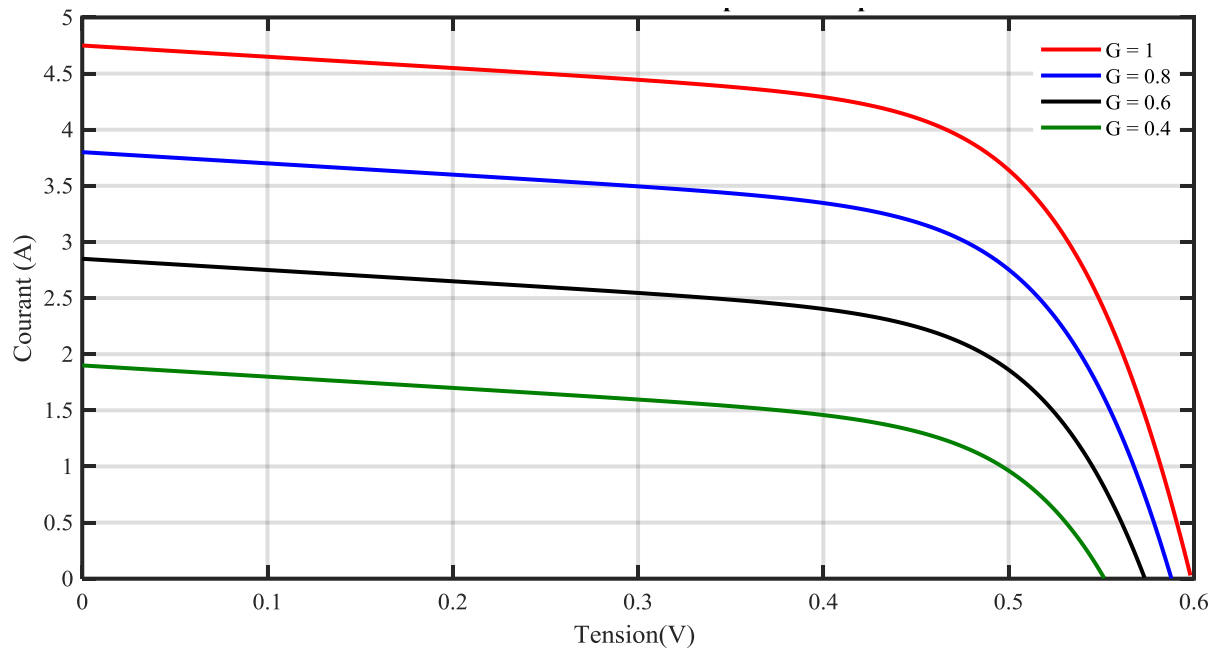


Figure III-3 : Caractéristique I (V) d'un module pour différentes valeurs d'éclairement.

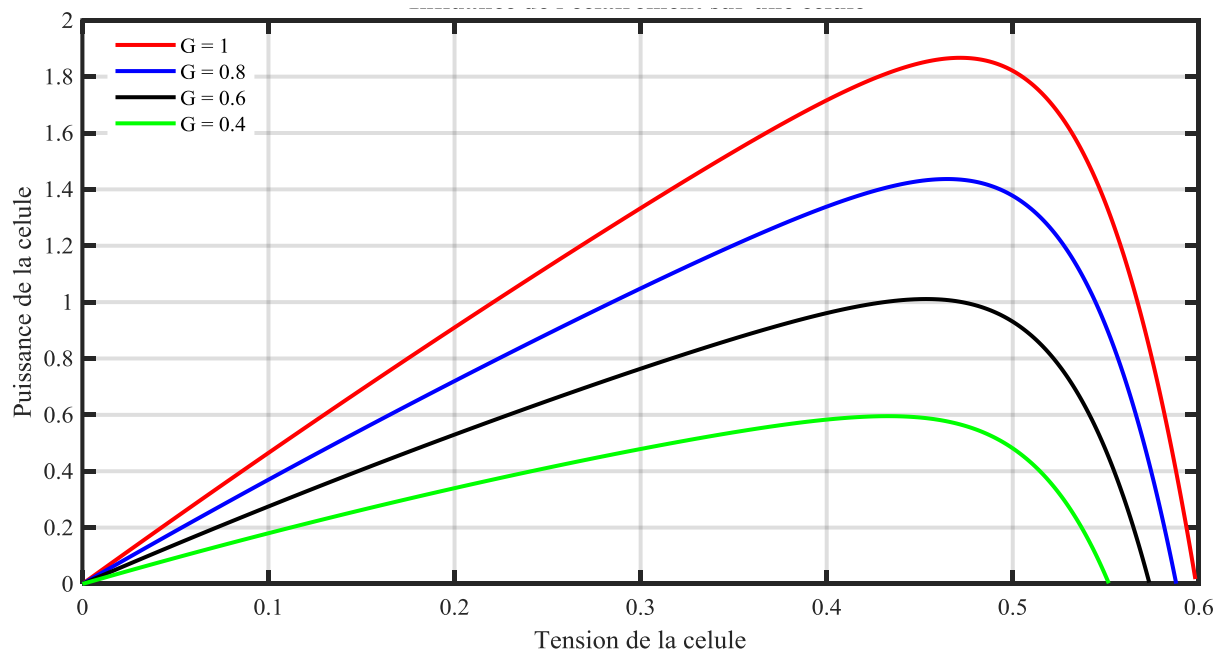


Figure III-4 : Caractéristique P (V) d'un module pour différentes valeurs d'éclairement.

Interprétation

- Chacune de différentes caractéristiques correspond à une puissance que pourrait fournir le panneau.
- La légère diminution de tension du circuit ouvert suite à la diminution de flux lumineux.
- Nous remarquons que le courant est directement proportionnel à l'irradiation a ces niveaux éclairément.

III.5 Classification des défauts pour un champ photovoltaïque

Pour étudier l'effet de défauts sur la caractéristique I (V) et P (V) d'un champ photovoltaïque. Nous allons réaliser des simulations sous environnement Matlab dans deux cas : fonctionnement sain et défaillant.

Nous avant fait la simulation sous Matlab/script du panneau photovoltaïque en considérant les caractéristiques fournis dans le tableau suivant :

Tableau III-4 : Caractéristiques électriques du module photovoltaïque.

Paramètres	Nombre Cellule	Nombre Diode bypass	I_{ph} (A)	$T_c(K)$	$R_s(ohm)$	$R_p(ohm)$	A	$I_0(A)$
Valeur	36	4	4.75	298	0.0051	1000	0.65e-3	2.3539e-6

III.6 Simulation du panneau photovoltaïque en fonctionnement sain

En fonctionnement Sain, toutes les cellules du champ PV sont supposées identiques et soumises aux mêmes conditions de fonctionnement (ensoleillement et température). La démarche présentée par la figure III-5 qui lustre les étapes de la modélisation. Les relations courant-tension du champ PV sont :

$$I_{champ} = N_{string} \times I_{cellule} \quad (23)$$

$$V_{champ} = N_{module} \times N_{groupe} \times N_{cellule} \times V_{cellule} \quad (24)$$

Avec :

I_{champ} : courant champ PV en fonctionnement sain

V_{champ} : tension de champ Pv en fonctionnement sain

Chapitre III : modélisation en fonctionnement défaillant d'un champ PV

N_{string} : nombre des string en parallele

N_{module} : nombre des module en serie dans un string

N_{groupe} : nombre des groupe dans un module

$N_{cellule}$: nombre des cellules en serie dans un groupe de cellule

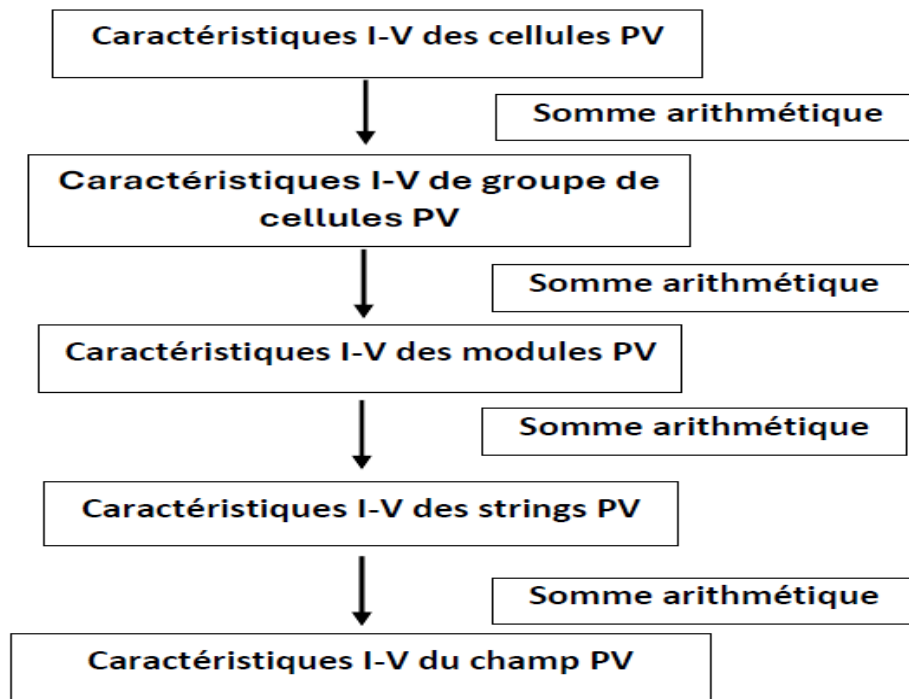
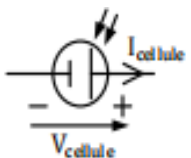
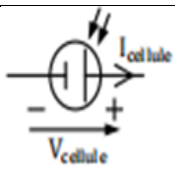
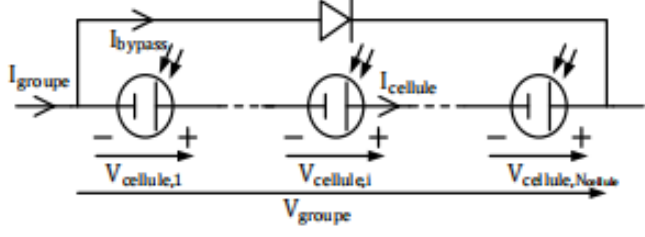
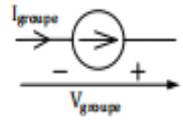
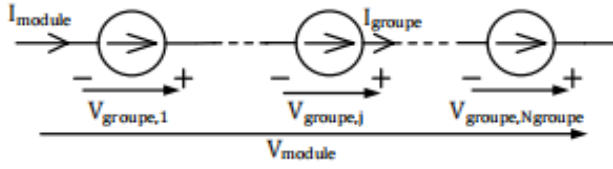
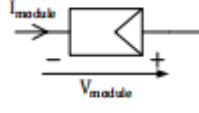
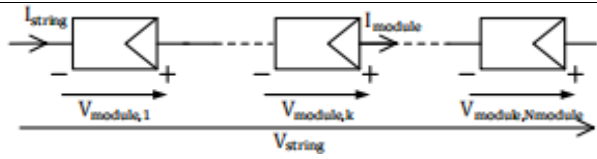
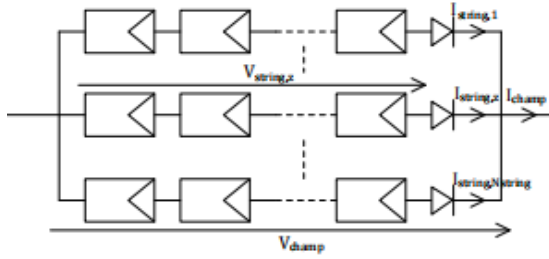


Figure III-5 : Démarche de modélisation d'un champ PV en fonctionnement sain [31].

Chapitre III : modélisation en fonctionnement défaillant d'un champ PV

Nous avons retenu la configuration de champ comme indique dans le tableau suivant :

Tableau III-5 : Configuration revenue pour la modélisation [31].

Composant de champ	Constitution	Symbole
Cellule		
Groupe de cellule		
Module		
String		
Champ		

Simulation

Pour illustrer la démarche, considérons un champ PV constitué de 2 strings en parallèle. Chaque string est composé de 10 modules en série. Chaque module contient 4 groupes de cellules en Parallèle dont chacun est formé de 9 cellules en série.

La figure III-6 montre la caractéristique I-V du champ considéré à partir de celle de la cellule.

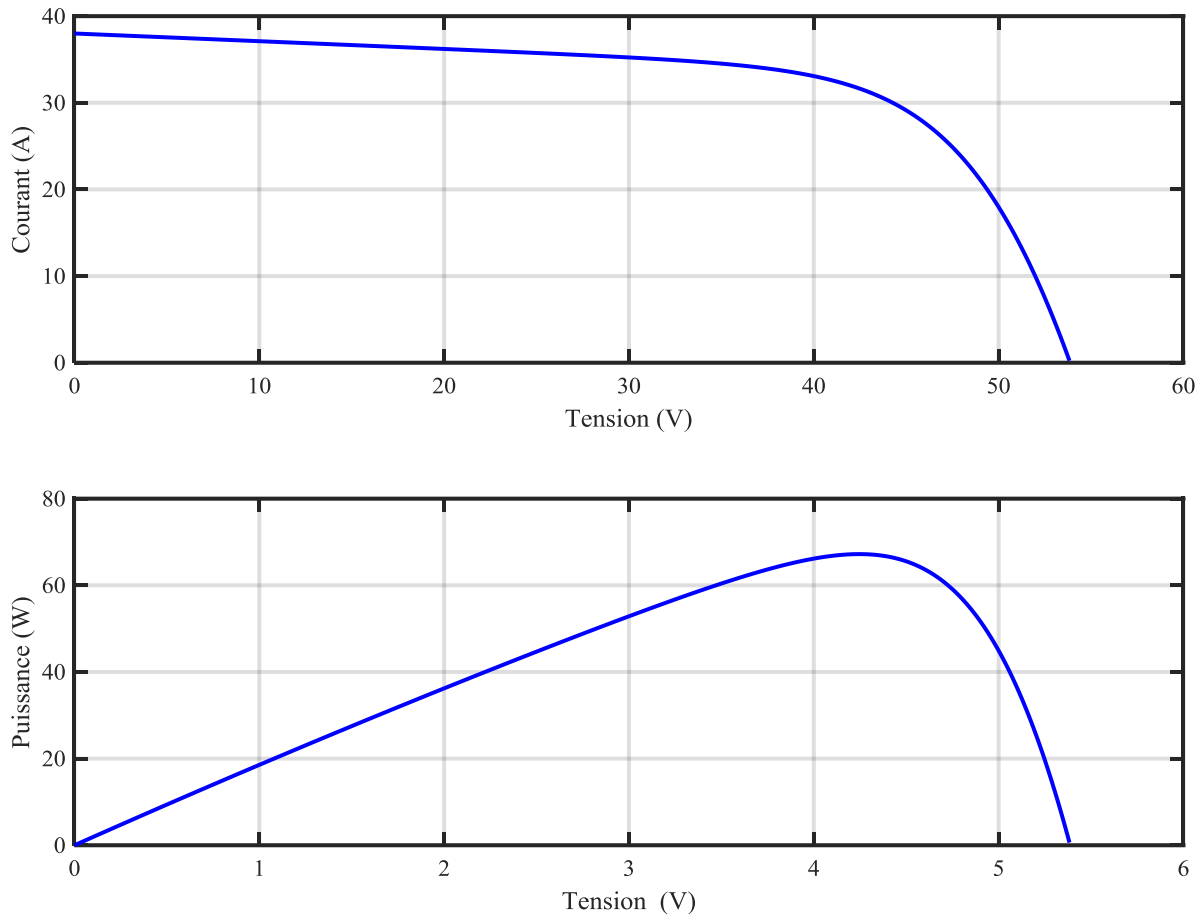


Figure III-6 : Caractéristiques (I_V) et (P_V) d'un champ PV à partir d'une cellule saine.

Interprétation

La multiplication de la tension de la cellule par le nombre de cellules en série dans un string ($N_{module} \times N_{string} \times N_{cellule}$) et le courant par le nombre de string, donne la caractéristique I-V du champ PV.

En fonctionnement sain, le comportement de toutes les cellules est identique, ce qui entraîne le blocage de la diode by-pass et la conduction de la diode anti-retour. Nous verrons dans la partie suivante que ceci n'est plus le cas pour un fonctionnement défaillant.

III.7 Modélisation et simulation d'un champ PV en fonctionnement défaillant

Dans cette partie nous allons subir au champ PV différentes situations des défauts qui peuvent survenir sur les composants de base (cellule PV) et les éléments de protection (diode by-pass...).

Chapitre III : modélisation en fonctionnement défaillant d'un champ PV

Nous présentons tout d'abord la démarche de la modélisation d'un champ PV en fonctionnement défaillant figure III-7. Puis en l'identification de différents défauts intervenant dans le composant du champ PV. Ensuite nous détaillons la modélisation de ces défauts.

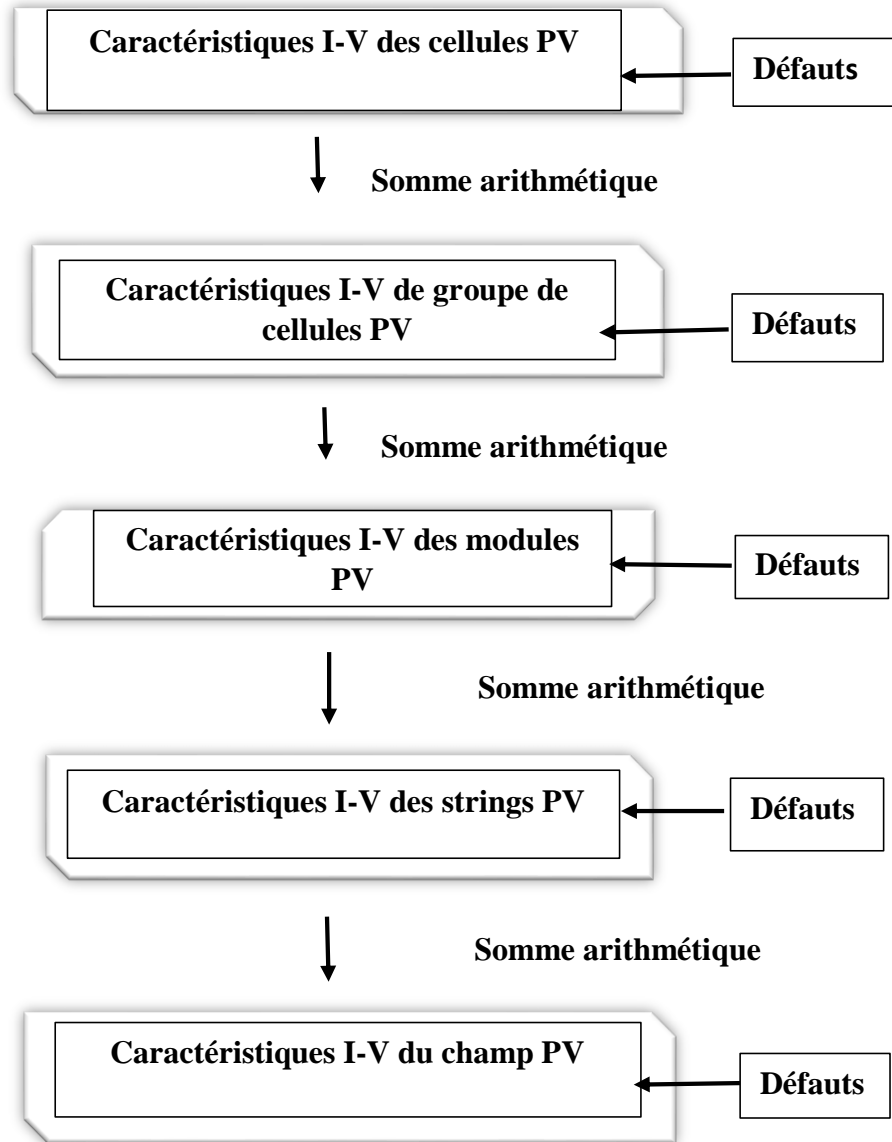


Figure III-7 : La modélisation d'un champ PV en fonctionnement défaillant [31].

Élément	Défaut à modéliser	Cause de défauts
Cellule	-Ombrage -Température	-Arbre, le poussier, le nuage -Echauffement des cellules...
Diode by-pass	-Court-circuit -Circuit ouvert -Impédance -inverse	-Diode court circuité -Destruction des diodes -Diode mal connecte -Inversion de la polarite -Absence de diode
Module	-Court circuité -Connecte en parallèle avec une impédance (Z) -Inversion de la polarite	-Mise en contact des bornes du module -Faut d'installation du module

III.8 Résultat de simulation de défauts de température

La température T a un impact direct sur la performance d'une cellule photovoltaïque.

Les résultats de simulation relative au défaut de l'effet de température sont donnés dans la figure III-8 :

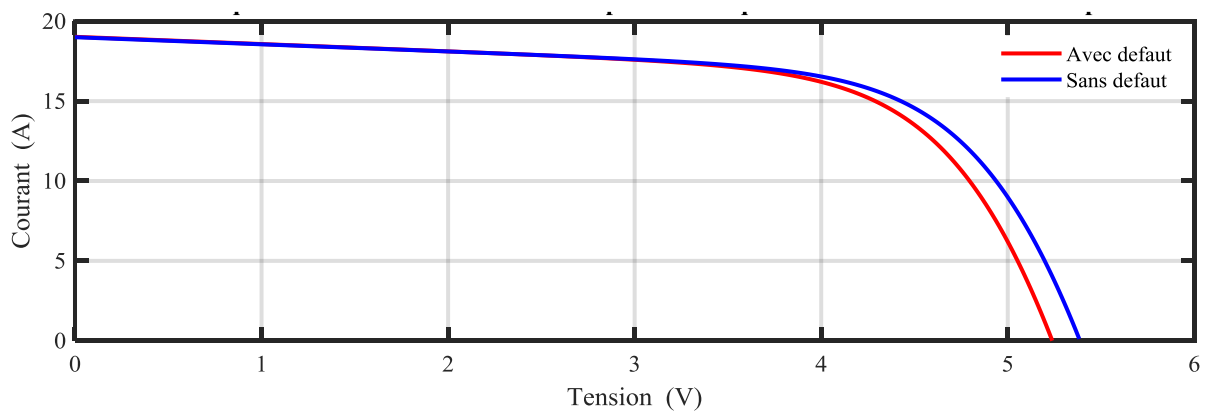


Figure III-8 : Caractéristique tension courant d'un panneau photovoltaïque avec et sans défaut de température.

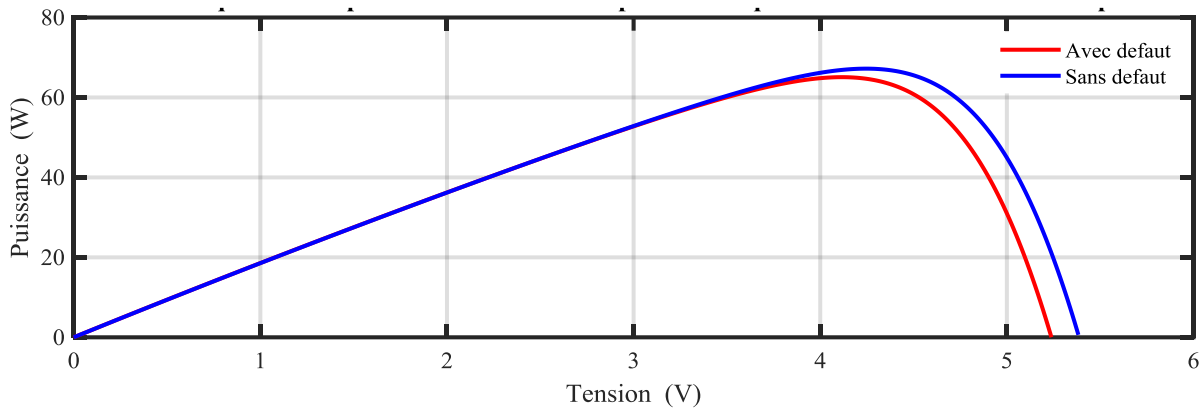


Figure III-9 : Caractéristique tension puissance d'un panneau photovoltaïque avec et sans défaut de température.

Interprétation

On remarque :

- Dans un panneau avec défaut la tension de circuit ouvert diminue sensiblement tandis que le courant de court-circuit ne change pas dans la caractéristique $I(V)$ par rapport au panneau sain.
- Dans un panneau avec défaut le point maximal de puissance diminue légèrement et aussi la tension de circuit ouvert par rapport au panneau sain.

III.9 Résultats de la simulation d'un défaut d'ombrage

L'ombrage photovoltaïque peut se produire en raison de : arbre, bâtiment, poussier, nuage, feuilles ...etc. il y a deux types de l'ombrage : l'ombrage total touche toutes les cellules et l'ombrage partiel ne touche que certaines cellules.

Les résultats de simulation relative au défaut de l'effet d'ombrage sont donnés dans la **Figure III-10 et III-11 :**

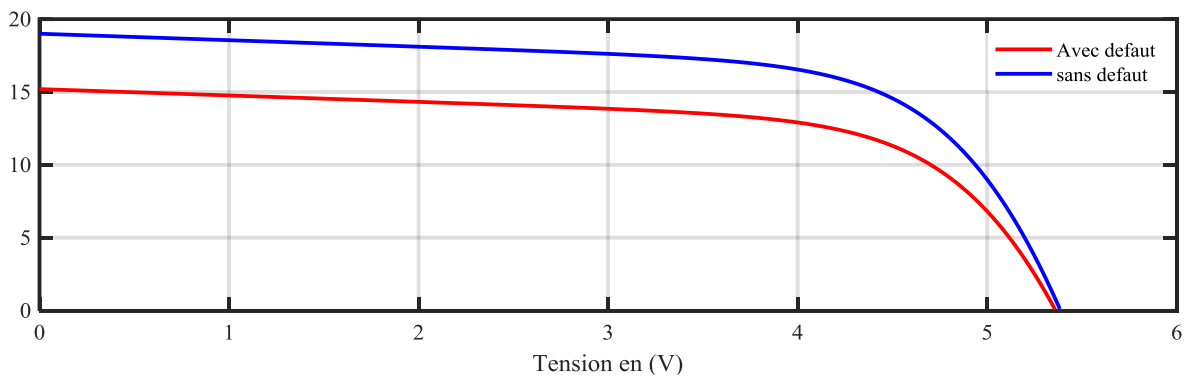


Figure -III10 : Caractéristique tension courant d'un panneau photovoltaïque avec défauts ombrage.

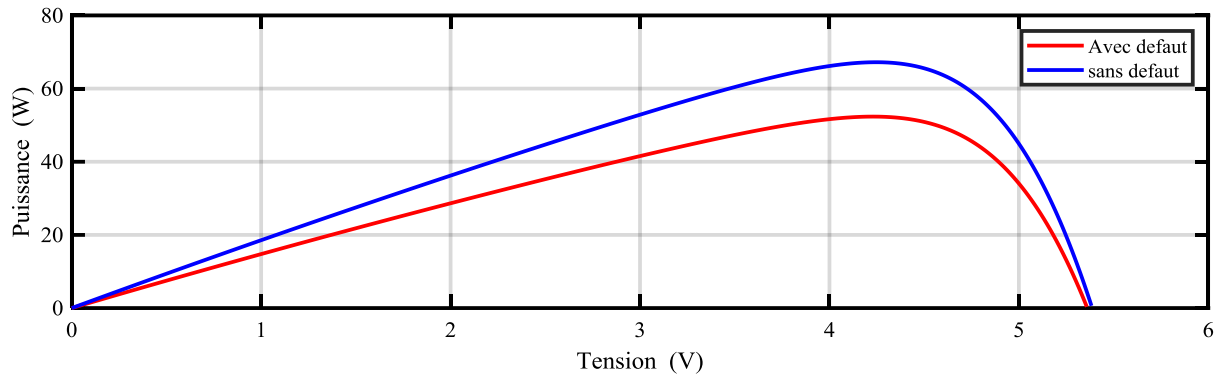


Figure III-11 : Caractéristique tension puissance d'un panneau photovoltaïque avec défauts ombrage.

Interprétation

- La réduction du courant de court-circuit (I_{cc}) en fonction de la tension d'un panneau photovoltaïque présentant des défauts d'ombrage, par rapport à son fonctionnement normal.
- La caractéristique $P(V)$ illustre la diminution du point de puissance maximale (PPM).

III.10 Résultat d'une simulation d'un défaut de la diode by-pass

La diode de by-pass est une solution pour protéger les cellules de l'ombrage partiel elle évite la polarisation inverse le hot spot et destruction du module. Cette diode se place en général en parallèle avec une branche de cellules. On peut constater plusieurs défauts de ce derrière généralement ces défauts sont de fabrication et pouvant être apparus suite à la rupture de la connexion de la diode, donc dans un panneau photovoltaïque on peut trouver une diode déconnecte, équivalente à une impédance quelconque, un court-circuit et une diode inverse.

Dans notre cas on va modéliser tous ces défauts.

III.11 Modèle de Bishop

Lorsque la cellule PV est occultée, elle fonctionne dans le régime inverse (dans la région négative). Le modèle à une diode ne suffit pas de représenter le comportement de la cellule dans cette région il doit être amélioré en ajoutant un facteur multiplicatif $M(V)$ représentant l'effet d'avalanche en série avec la résistance de shunt.

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V+R_s I}{V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} * (1 + M(V)) \quad (25)$$

Avec :

$$M(V) = K \left(1 - \frac{V+R_s I}{V_b} \right)^{-n} \quad (26)$$

- V_b : tension de claquage de la cellule (-10V a - 30V)
- n c'est la valeur constante donne dans le modèle de Bishop

Sachant que 'a' est compris entre 3.4 à 4 et n ≈ 0.1

$$V_t = A \cdot K \cdot T / q \quad (27)$$

T : la température de cellule

A : le facture d'idéalité de la diode

K : constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23} J/K$)

q : charge d'électron ($1,602 \cdot 10^{-19} C$)

III.12 Résolution du module de la cellule

Le point de fonctionnement de la cellule peut être déterminé par la résolution de l'équation de module de Bishop. Il consiste à calculer la Valeur de la tension en fonction de courant.

L'équation 2 mise sous la forme $f(V)=0$ et puis on va dériver par rapport à la tension (V) en obtienne :

$$Fp = -\frac{I_0}{V_t} \exp\left(\frac{V+R_s I}{V_t}\right) - \frac{1}{V_{sh}} - \frac{K}{R_{sh}} \left(1 - \frac{V+R_s I}{V_b} \right)^{-n} - K \left(\frac{V+R_s I}{R_{sh}} \right) \cdot \left(-n \cdot \frac{-1}{V_b} \right) \cdot \left(1 - \frac{V+R_s I}{V_b} \right)^{-n-1} \quad (28)$$

Le pas d'excursion de la caractéristique (ΔI) est choisi en fonction de la résolution souhaitée de la caractéristique. Ce processus se poursuit jusqu'à l'obtention de la caractéristique $I(V)$. Selon organigramme suivant :

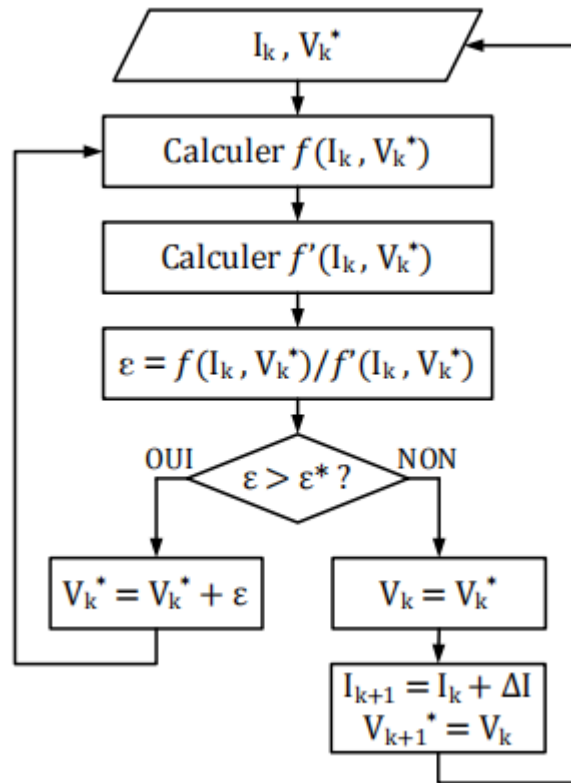


Figure III-12 : Algorithme pour déterminer la caractéristique I(V) d'une cellule PV

Resultat obtenue a propos de cette algorithme

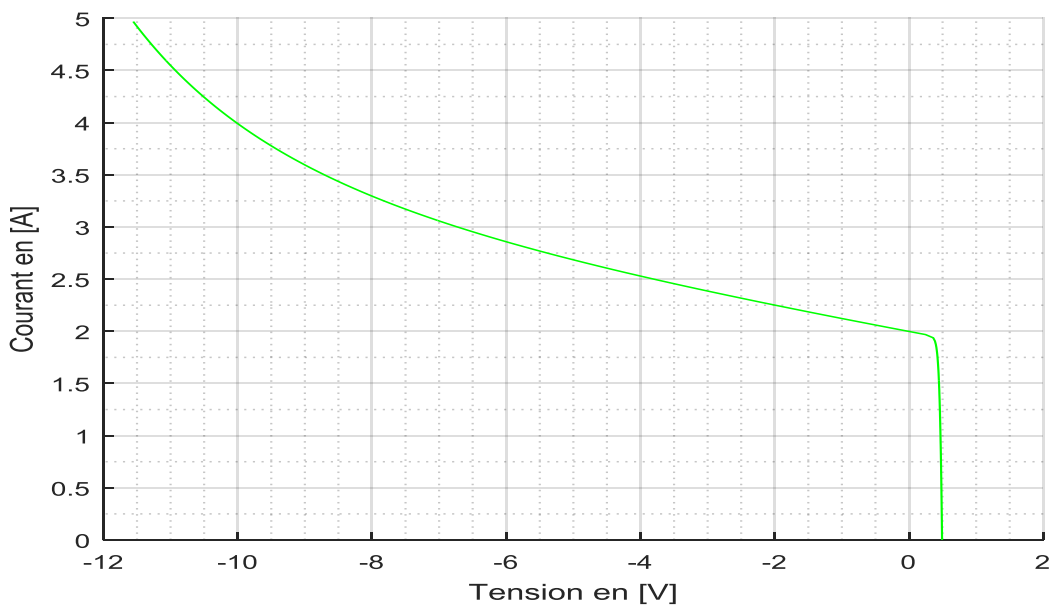


Figure III-13 : caractéristique de la diode modèle de bishop

A : Cas de court-circuit :

Tension : La tension totale du groupe de cellules est nulle.

$$V_{groupe} = 0 \quad (29)$$

Courant : Le courant total du groupe de cellules est la somme du courant circulant dans les cellules individuelles et du courant circulant dans le chemin de court-circuit interne. Le courant dans les cellules est égal au courant maximal qu'elles peuvent produire, tandis que le chemin de court-circuit draine le courant excédentaire.

$$I_{groupe} = I_{diode\ by-pass} + I_{cellule} \quad (30)$$

Résultat de simulation

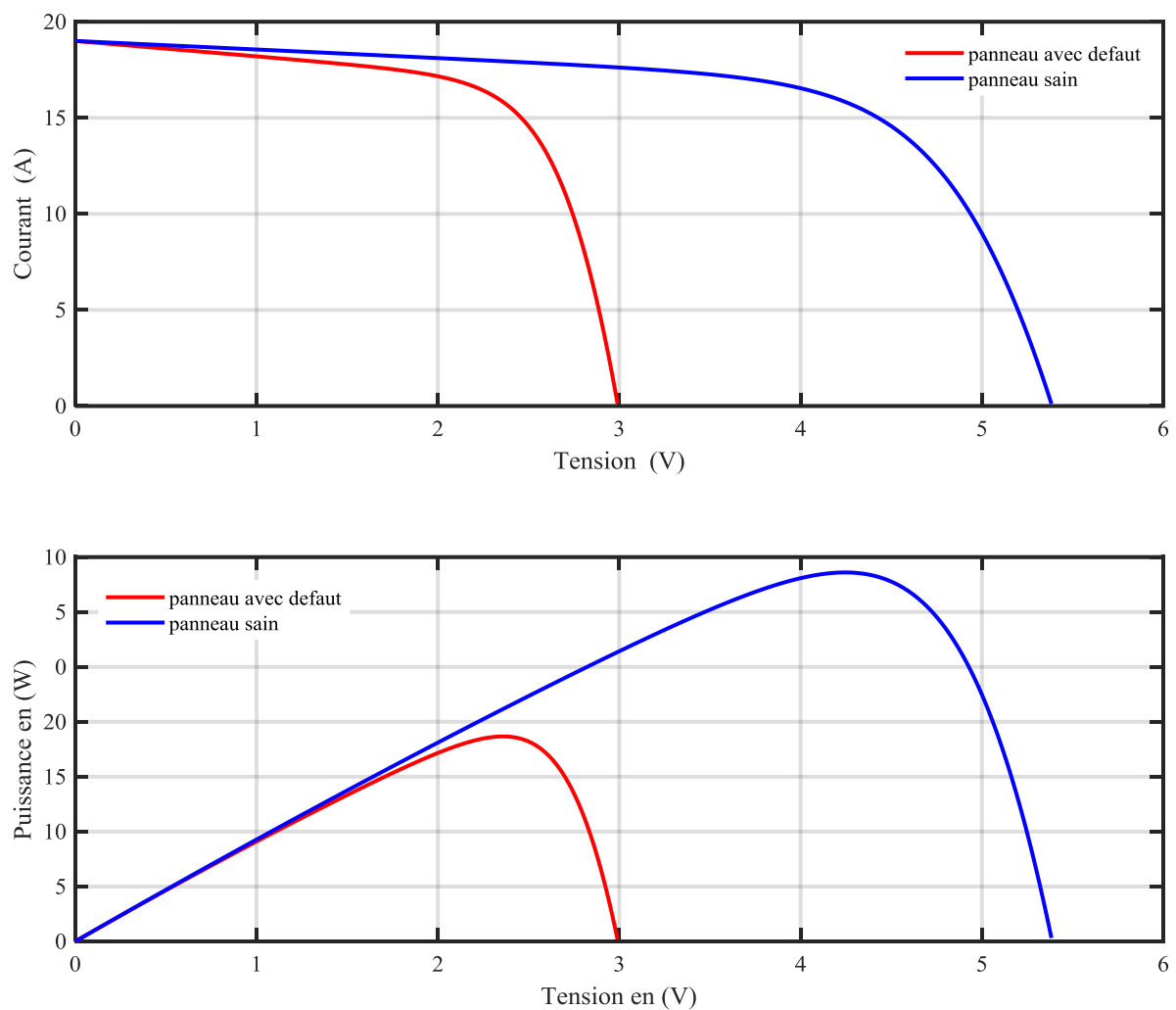


Figure III-14 : Caractéristique d'un panneau photovoltaïque avec défauts de diode by-pass cas de court-circuit.

Interprétation

La perte de la tension est proportionnelle à l'étendue de l'ombrage car la diode by-pass ne peut plus compenser.

B : Cas d'un circuit ouvert

Tension : La tension totale du groupe de cellules est la somme des tensions individuelles de chaque cellule qui le compose.

$$V_{groupe} = \sum_{i=1}^{N_{cellule}} V_{cellule} \quad (31)$$

Courant : Le courant traversant le groupe de cellules est identique au courant circulant dans la chaîne de cellules (string) qu'il forme

$$I_{groupe} = I_{cellule} \quad (32)$$

Résultat de simulation

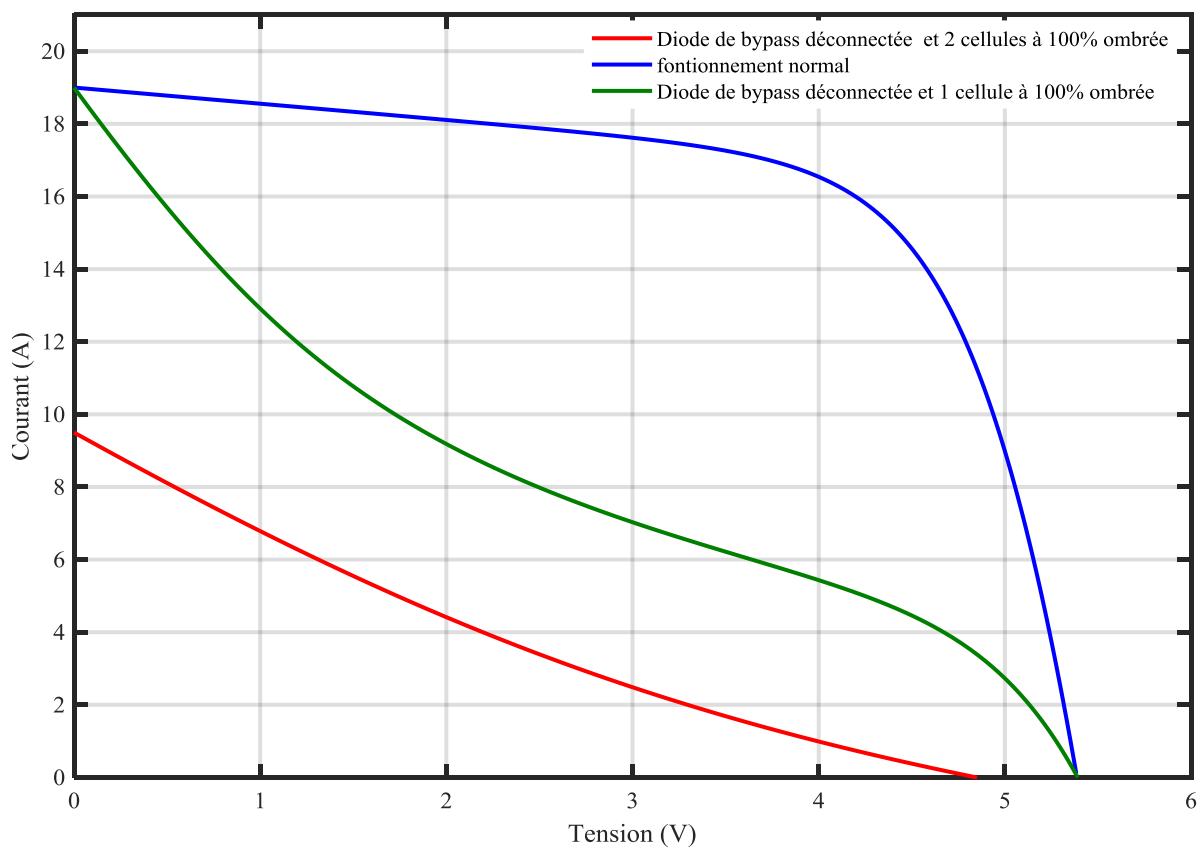


Figure III-15 : caractéristiques défauts diode by-pass dans un module

Interprétation

La perte de la tension est proportionnelle à l'étendue de l'ombrage car la diode by-pass ne peut plus compenser.

C : cas d'une impédance « Z »

Tension du groupe : La tension totale du groupe de cellules est obtenue en additionnant la tension individuelle de chacune des cellules qui le composent.

$$V_{groupe} = \sum_{i=1}^{N_{cellule}} V_{cellule} \quad (33)$$

Courant du groupe : Le courant traversant le groupe de cellules est la somme de deux courants distincts : Courant dans le string (Ce courant correspond à la circulation de l'électricité au sein de la chaîne de cellules, c'est-à-dire le courant principal) et Courant dans l'impédance (Ce courant circule à travers une résistance appelée impédance. Il représente une perte de puissance inévitable dans le système).

$$I_{groupe} = I_{cellule} + \frac{V_{cellule}}{Z} \quad (34)$$

Résultat de simulation

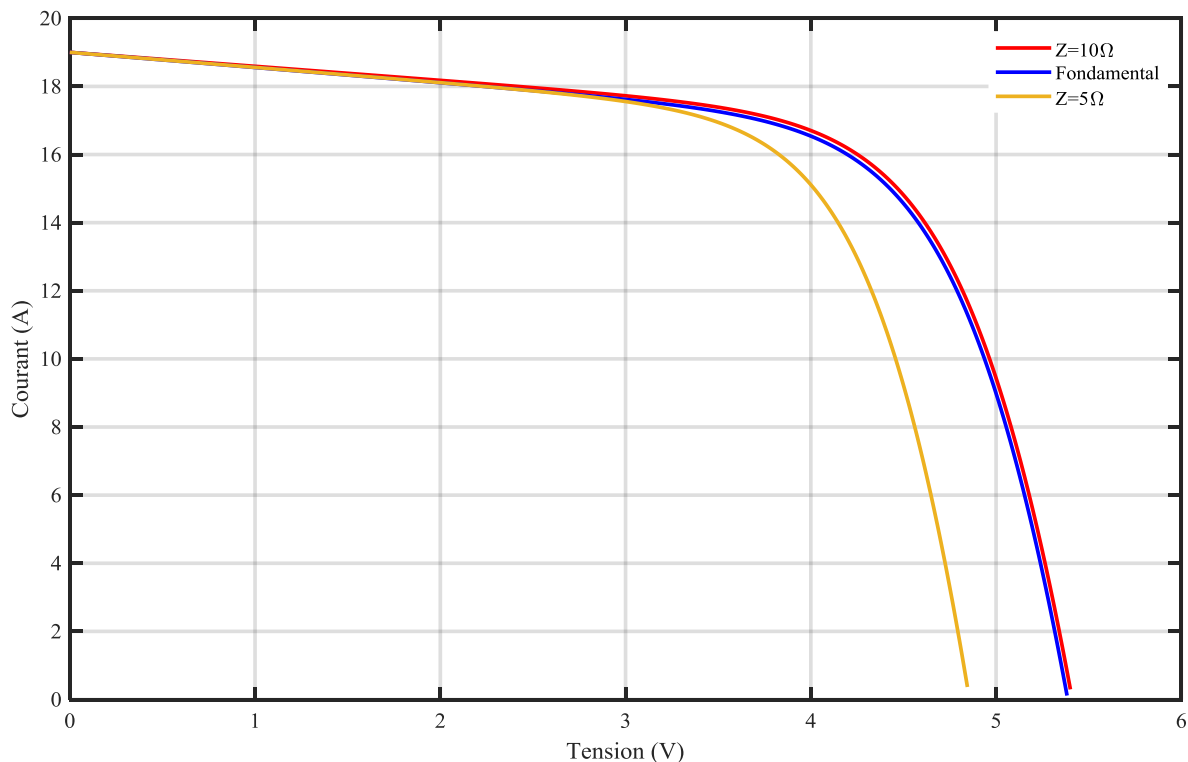


Figure III-16 : Caractéristique courant tension d'un module photovoltaïque défaut impédance

Interprétation

Ce type de défaut présente des caractéristiques communes avec un défaut d'ombrage. La réduction d'impédance entraîne une dérivation du courant produit par groupe vers l'élément défectueux réduisant ainsi la quantité de courant fournie à la charge.

III.13 Défaut de module

Les défauts observés au niveau des cellules individuelles peuvent également se manifester au niveau des modules PV, une fois ceux-ci assemblés. Cependant, d'autres types de défauts sont spécifiques aux modules eux-mêmes.

Les diodes by-pass jouent le rôle de protection des cellules contre les risques du point chaud. Leur dysfonctionnement entraîne l'apparition d'autres défauts (court-circuit

Lorsque le module PV est mal connecté, celui-ci peut se retrouver en mode défaillant (module court-circuit, inverse de la polarité du module, module connecté en parallèle avec une impédance Z)

- **Cas de module court circuité**

Tension du module : Elle s'annule, ce qui signifie qu'il n'y a pas de différence de potentiel électrique entre les bornes du module.

$$V_{module} = 0 \quad (35)$$

Le courant du module : C'est la somme du courant normal et du courant de court-circuit. Le courant dans le string est le courant maximum produit par les cellules et le chemin de court-circuit protège le module en cas de court-circuit.

$$I_{module} = I_{groupe} + I_{shunt} \quad (36)$$

- **Cas de module connecté en parallèle avec impédance « Z »**

Tension de module : c'est la somme de la tension de tout le groupe.

$$V_{module} = \sum_{i=1}^{N_{cellule}} V_{groupe} \quad (37)$$

Courant de module : c'est l'addition de courant circulant dans le groupe des cellules et celui circulant dans l'impédance.

$$I_{module} = I_{groupe} + \frac{V_{module}}{Z} \quad (38)$$

Résultat de la simulation

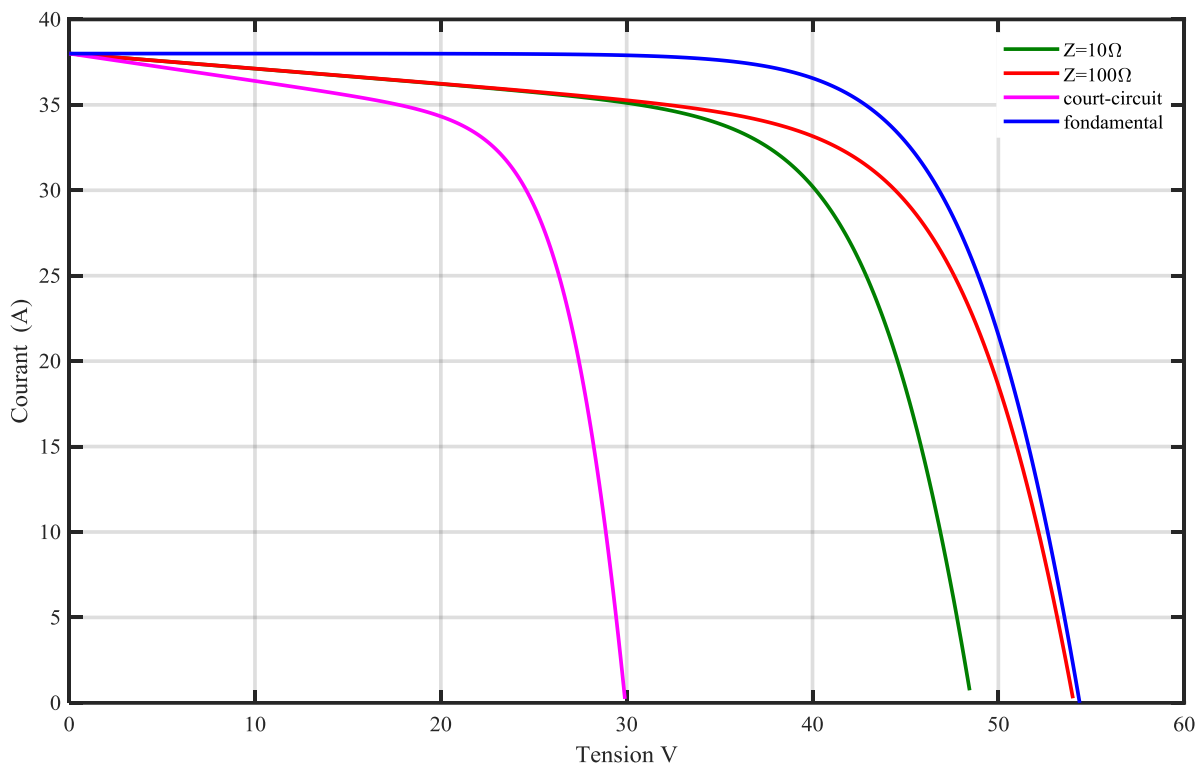


Figure 1-III7 : Caractéristiques I-V d'un string PV lors de défaut de module.

Interprétation des résultats de module

- Lorsque le module est connecté en parallèle avec une impédance la perte de courant dans le string augmente à mesure que l'impédance diminue.
- Si le module est court-circuité le string perd la tension d'un module.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé les défauts des panneaux photovoltaïques (défaut de cellule, module, champ...) qui représente un pas important vers l'amélioration de la fiabilité et la

Chapitre III : modélisation en fonctionnement défaillant d'un champ PV

performance des systèmes photovoltaïque. Elle souligne l'importance de la détection précoce et de la maintenance proactive pour maximise la production d'énergie et garantir la durabilité des installations. Les perspectives de recherche future incluent l'intégration des nouvelles technologies de détection et l'amélioration continue des modèles prédictifs pour anticiper et mitiger les défauts de manière plus efficace.

Conclusion générale

Ce travail constitue une initiation à la recherche sur les panneaux photovoltaïques, en mettant l'accent sur les divers défauts pouvant survenir dans ce système. Dans ce mémoire, nous nous sommes principalement focalisés sur la détection des défauts dans un champ photovoltaïque, en utilisant une approche basée sur l'analyse de la caractéristique I-V par la méthode numérique de Newton-Raphson. Cette caractéristique a été largement utilisée pour évaluer l'impact des différents défauts sur les performances du champ photovoltaïque.

Pour diagnostiquer un champ photovoltaïque défaillant à partir de la caractéristique I-V, une brève revue bibliographique des différentes approches théoriques de modélisation a été réalisée. La méthode la plus simple c'est l'utilisation de l'analyse numérique dans notre cas la méthode de Newton Raphson qui a montré son efficacité pour la localisation des défauts comme l'influence de la température et de l'ombrage est les défauts de la diode by passe.

En conclusion, en comparant la caractéristique I-V d'un champ photovoltaïque en bon état de fonctionnement avec celle d'un champ présentant des défauts, pour différents types de défauts inclus dans la base de connaissances, cinq symptômes ont été retenus pour la localisation des défauts parmi eux on cite :

- Défaut d'ombrage.
- Défaut de température.
- Défaut de diode by Pass (court-circuit, circuit-ouvert et impédances).
- Défaut de module.

Pour approfondir cette recherche, il serait intéressant d'explorer l'intégration des techniques d'intelligence artificielle pour améliorer la précision et l'efficacité des algorithmes de localisation des défauts. De plus, la mise en place de systèmes de surveillance en temps réel pourrait permettre une localisation plus rapide et automatique des anomalies, réduisant ainsi les temps d'arrêt et les pertes de production des installations photovoltaïques.

Références bibliographiques

- [1] L. Bun, « Détection et localisation de défauts pour un système PV », thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2011.
- [2] S. Vighetti, « Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion », thèse de doctorat , Université de Grenoble, 2011.
- [3] L. Merino, « Modélisation du rayonnement solaire pour la simulation thermique en milieu urbain », Thèse de doctorat, Compiègne, 2013.
- [4] B. Zerguine, « Modelisation d'un systeme de production électrique par la cellule photovoltaïque», Mémoire de magistère Université Annaba, 2010.
- [5] L. Bun, « Détection et localisation de défauts dans un système photovoltaïque ».thèse de doctorat Université de Grenoble, 2011.
- [6] « Fault detection and diagnosis methods for photovoltaic systems: A review - ScienceDirect ». Thèse de doctorat de l'université de Lyon 2017
- [7] A. H. Eldin, M. Refaey, et A. Farghly, « A review on photovoltaic solar energy technology and its efficiency », in *Conference paper*, 2015.
- [8] S. Busquet, « Étude d'un système autonome de production d'énergie couplant un champ photovoltaïque, un électrolyseur et une pile à combustible : réalisation d'un banc d'essai et modélisation », Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2003.
- [9] A. C. Pastor, « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques », Thèse de doctorat, INSA de Toulouse, 2006.
- [10] K. Helali, « Modélisation d'une cellule photovoltaïque », mémoire de Magistère université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou, 2012.
- [11] A. Aziz, « Propriétés électriques des composants électroniques minéraux et organiques. Conception et modélisation d'une chaîne photovoltaïque pour une meilleure exploitation de l'énergie solaire », Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2006.
- [12] T. Mambrini, « Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies », Thèse de doctorat, Paris 11, 2014.

- [13] S. Petibon, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2009. Consulté le: 6 avril 2024.
- [14] D. Mida, « Contribution à la Modélisation d'un Système de Production d'Energie Electrique Hybride «Eolien-Photovoltaïque» », Université Mohamed Khider-Biskra, 2019.
- [15] A. Moumami, N. Hamani, N. Moumami, et Z. Mokhtari, « Estimation du rayonnement solaire par deux approches semi empiriques dans le site de Biskra », *Une*, vol. 3, n° 4, 2006.
- [16] R. Tadili et M. N. Bargach, « Une méthode d'estimation du rayonnement solaire global reçu par une surface inclinée-Application aux sites marocains », *La météorologie*, vol. 2005, n° 50, p. 46-50, 2005.
- [17] D. Benatallah « Détermination du gisement solaire par imagerie satellitaire avec intégration dans un système d'information géographique pour le sud d'Algérie », thèse de doctorat , Université Ahmed Draïa -Adrar, 2019.
- [18] L. Boudier, « Conception et réalisation d'une cellule photovoltaïque pour l'intégration dans un système hybride photovoltaïque-thermoélectrique », Thèsedoctorat , Université de Toulouse 2023
- [19] F. Zouache, « Etude de La concentration solaire sur les performances des systèmes photovoltaïques », Mémoire de magister en Electronique, Université Mentouri de Constantine 2009.
- [20] A. Veau, « Intégration de jonctions ultra minces avec passivation tunnel: application aux générations avancées de cellules PV silicium homojonction », Université Grenoble Alpes, 2020.
- [21] S. R. C. Guilbert, « Les cellules solaires photovoltaïques : optimisation et extension des cellules au silicium amorphe : préparation à l'introduction de nouvelles technologies », Thèse de doctorat, Lille 1, 2003.
- [22] Y. Xue et S. Wang, « Photovoltaic cell modeling and the maximum power point tracking simulation », in *2013 International Conference on Materials for Renewable Energy and Environment*, IEEE, 2013, p. 119- 123.
- [23] A. Mirecki, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » These de doctorat Université Toulouse , 2005.

- [24] A. Benzagmout, A. Zaher, O. Fruchier, T. Talbert, D. Gachon, et T. Martire, « Signatures électriques de modules photovoltaïques », in *Symposium de Génie Electrique*, 2018, p. (8 pages).
- [25] V. Boitier, R. Baget, et C. Alonso, « Caractérisation de panneaux photovoltaïques », *article Revue 3EI*, vol. 55, p. 54-61, 2008.
- [26] I. E. Kaid, A. Hafaifa, M. Guemana, N. Hadroug, A. Kouzou, et L. Mazouz, « Photovoltaic system failure diagnosis based on adaptive neuro fuzzy inference approach: South Algeria solar power plant », *Journal of Cleaner Production*, vol. 204, p. 169-182, déc. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.09.023.
- [27] A. Mellit, G. M. Tina, et S. A. Kalogirou, « Fault detection and diagnosis methods for photovoltaic systems: A review », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 91, p. 1- 17, août 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.03.062.
- [28] M. Mesrouk et A. H. Arab, « Effet de la poussière sur le rendement des modules photovoltaïques », 2014.
- [29] A. Ndiaye, « Étude de la dégradation et de la fiabilité des modules photovoltaïques - Impact de la poussière sur les caractéristiques électriques de performance », Thèse de doctorat, Ecole Supérieure Polytechnique (ESP) - UCAD, 2013.
- [30] A.Farco, "La sécurité des installation photovoltaïques raccorde au réseau" Antoine FARCOT – A.C.E. ENERGIES – 4 Domaine de Pavie – 31450 DEYME - FRANCE
- [31] K. Eddine, A . Hafiafa, G. Mouloud, N. Nadji hadroug, K. Abdllah et L.Mazouz "Photovoltaic system failure diagnosis based on adaptive neuro fuzzy inference approach:"south Algeria solar power plant "*journal of cleaner production*, vol.204,sep.2018,doi:10.1016/j.jclepro.2018.09.023