

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A. MIRA de Bejaïa  
Faculté de technologie  
Département de Génie Electrique



## ***Mémoire de fin d'étude***

***En vue de l'obtention du diplôme de Master en  
Electrotechnique***

***Spécialité : Energies Renouvelables***

### ***Thème***

**Étude de l'effet des défaillances sur la  
production des panneaux photovoltaïques**

Réalisé par :

- BENAMARA Aghiles
- YAZLI Ghilas

Encadré par :

- Mme ABDELLI. R
- Mme RIKIOUA. D

Année universitaire : 2023/2024



# Remerciements

Avant tout, nous remercions ALLAH tout puissant de nous avoir accordé la force, le courage, la patience et la chance d'étudier et de suivre le chemin de la science.

Nos remerciements les plus sincères s'adressent en premier lieu à nos encadreurs, Mme RIKIOUAD Jamila et Mme ABDELI Radia, pour leurs conseils judicieux et leurs appuis tout au long de cette étude, ainsi que pour leurs nombreuses critiques constructives. Votre sérieux, vos compétences et votre sens du devoir nous ont énormément marqués.

Nos remerciements vont également à tous les membres du jury qui ont bien voulu accepter de juger ce modeste travail, en particulier à Mme BELAID Sofia qui nous a fait l'honneur de présider ce jury, et à Mme SERIR Chafia qui nous a honorés en examinant ce travail.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches et amis pour leur soutien constant.



# Dédicace

Le présent travail, fruit de longues années d'efforts et de persévérance est dédié A toutes personnes qui nous sont chères surtout à nos familles qui nous ont beaucoup donné pour être que nous sommes et nos amis.

Aghiles.....Ghilas

# Sommaire

Liste des figures.....	i
Liste des tableaux.....	ii
Liste des symboles et d'abréviations .....	iii
Introduction générale .....	1

## Chapitre I

### Etat de l'art sur les systèmes photovoltaïques

I.1. Introduction .....	3
I.2. Histoire du photovoltaïque .....	3
I.3. Présentation de l'effet photovoltaïque .....	4
I.4. La cellule photovoltaïque .....	5
I.4.1. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	6
I.4.2. Les principales technologies de la cellule solaire photovoltaïque .....	7
I.5. Caractéristiques électriques .....	9
I.6. Modélisation d'une cellule PV .....	10
I.6.1. Modèle d'une cellule PV idéale .....	11
I.6.2. Modèle d'une cellule PV à une diode.....	12
I.7. Caractérisation d'une cellule photovoltaïque .....	13
I.7.1. Caractéristiques $I = f(V)$ , $P = f(V)$ d'une cellule photovoltaïque.....	13
I.7.2. Le courant de court-circuit .....	14
I.7.3. Puissance maximale .....	15
I.7.4. Influence de la température sur les caractéristiques (I-V) et (P-V).....	16
I.7.5. Influence de l'éclairement sur les caractéristiques (I-V) et (P-V).....	17
I.7.6. Puissance crête d'une cellule PV.....	18
I.7.7. Tension du circuit ouvert.....	18
I.7.8. Facteur de forme.....	18
I.7.9. Rendement de conversion .....	19
I.7.10. Le rendement quantique .....	19
I.8. Les différents branchements des panneaux PV .....	20
I.8.1. Branchement en série .....	20
I.8.2. Branchement en parallèle .....	21
I.8.3. Association hybride (en série et en parallèle).....	21
I.9. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire.....	22
I.9.1. Avantages .....	22
I.9.2. Inconvénients .....	22
I.10. Conclusion .....	23



# Sommaire

## Chapitre II

### Défaillances liées aux panneaux photovoltaïques

II.1. Introduction .....	24
II.2. Défaillances des panneaux photovoltaïques.....	24
II.2.1. Défaut de mismatch et l'effet d'ombrage.....	25
II.2.2. Les points chauds ou Hot-spots.....	25
II.2.3. Jaunissement et brunissement « la décoloration » .....	26
II.2.4. Bulle d'air .....	27
II.2.5. Fissures dans les cellules.....	27
II.2.6. Délaminage .....	28
II.2.7. Défaut de revêtement anti -reflet (ARC).....	29
II.2.8. Module arraché ou cassé .....	29
II.2.9. Défauts de la diode de by-pass et diode anti-retour .....	30
II.2.10. L'augmentation de la résistance série $R_s$ .....	30
II.2.11. Diminution de la résistance parallèle $R_p$ .....	31
II.2.12. Le DIP - Dégradation Potentielle Induite.....	31
II.2.13. Autres Défauts.....	32
II.3. Classification des défauts pour la modélisation .....	32
II.4. Défauts dans les systèmes photovoltaïques.....	33
II.4.1. Défauts dans le générateur photovoltaïque .....	33
II.4.2. Défauts dans la boîte de jonction .....	35
II.4.3. Défauts dans le système de câblage .....	35
II.4.4. Défauts dans le système de protection .....	36
II.4.5. Défauts de l'onduleur.....	37
II.4.6. Défauts dans le système d'acquisition des données .....	38
II.5. Systèmes de diagnostic.....	38
II.5.1. Etape de diagnostic .....	38
II.5.2. Objectifs du diagnostic.....	39
II.5.3. Architecture de diagnostic.....	40
II.5.4. Méthodes de détection et de diagnostic des défauts d'un système PV.....	41
II.6. Conclusion.....	42



# Sommaire

## Chapitre III Évaluation des Défaits et de leur influence sur les Panneaux PV

III.1. Introduction.....	43
III.2. Partie simulation sous Matlab Simulink.....	43
III.2.1. Simulation du GPV en fonctionnement sain.....	44
III.2.2. Simulation du GPV en fonctionnement défaillant .....	45
III.3. Partie pratique .....	48
III.3.1. Description de la plateforme expérimentale .....	48
III.3.2. Présentation des différents essais réalisés .....	50
III.3.3. Calcul des rendements ( $\eta$ ) et du Facteur de Forme (FF) : .....	58
III.4. Conclusion .....	61
<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>63</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>64</b>

# Liste des figures

<b>Figure I.1:</b> Diagramme de bandes d'énergie au voisinage de la jonction.....	5
<b>Figure I.2:</b> Structure basique d'une cellule solaire.....	6
<b>Figure I.3:</b> Principe de la cellule photovoltaïque.....	7
<b>Figure I.4:</b> Caractéristique I-V d'une cellule PV.....	9
<b>Figure I.5:</b> Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale.....	11
<b>Figure I.6:</b> Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode.....	13
<b>Figure I.7:</b> Courbe $I=f(V)$ d'une cellule photovoltaïque.....	14
<b>Figure I.8:</b> Courbe $P=f(V)$ d'une cellule photovoltaïque.....	14
<b>Figure I.9:</b> Points de la puissance maximale $P_m$ et $P_{m, idéal}$ .....	15
<b>Figure I.10:</b> Courbes $I=f(V)$ sous différentes températures.....	16
<b>Figure I.11:</b> Caractéristique $P=f(V)$ sous différentes températures.....	17
<b>Figure I.12:</b> Courbes $I=f(V)$ sous différents niveaux d'éclairement.....	17
<b>Figure I.13:</b> Courbes $P=f(V)$ sous différents niveaux d'éclairement.....	17
<b>Figure I.14:</b> Cellules ou modules photovoltaïques en série.....	20
<b>Figure I.15:</b> Cellules ou modules photovoltaïques en parallèle.....	21
<b>Figure I.16:</b> Caractéristiques d'un générateur à $n_s-n_p$ cellules identiques.....	22
<b>Figure II.1 :</b> Défaut de point chaud.....	26
<b>Figure II.2 :</b> Modules photovoltaïques avec des cellules décolorées.....	27
<b>Figure II-3 :</b> Défaut de bulles d'air.....	27
<b>Figure 2.4 :</b> Fissures dans les cellules PV.....	28
<b>Figure II.5 :</b> Défaut de délaminage.....	28
<b>Figure II.6 :</b> Défaut de revêtement anti-reflet.....	29
<b>Figure II.7 :</b> Module cassé.....	30
<b>Figure II.8 :</b> Défaut de la diode de by-pass.....	30
<b>Figure II.9 :</b> Défaut d'augmentation de la résistance $R_s$ .....	31
<b>Figure II.10 :</b> Organigramme de diagnostic des défauts.....	39

# Liste des figures

<b>Figure. II.11</b> : Schéma global de détection et de diagnostic des défauts .....	40
<b>Figure.II.12</b> : Différentes méthodes de diagnostic .....	41
<b>Figure II.13</b> : Techniques de détection de défauts pour les systèmes PV autonomes .....	41
<b>Figure III.1</b> : Fiche signalétique du panneau utilisé.....	43
<b>Figure III.2</b> : Modèle d'un panneau photovoltaïque sous Matlab Simulink.....	44
<b>Figure.III.3.</b> Caractéristique (I-V) d'un module PV en fonctionnement sain sous Matlab Simulink....	44
<b>Figure III.4</b> : Caractéristique (P-V) d'un module PV en fonctionnement sain.....	44
<b>Figure III.5</b> : Schéma d'un panneau photovoltaïque avec ombrage sous Matlab Simulink.....	45
<b>Figure III.6</b> : Caractéristique (I-V) avec l'effet de l'ombrage.....	46
<b>Figure III.7</b> : Caractéristique (P-V) avec l'effet de l'ombrage.....	46
<b>Figure III.8</b> : Caractéristiques (I-V) avec défaut de mismatch type $R_s$ .....	47
<b>Figure III.9</b> : Caractéristiques (P-V) avec défaut de mismatch type $R_s$ .....	47
<b>Figure III.10</b> : Matériels utilisés.....	49
<b>Figure III.11</b> : Schéma électrique du montage utilisé.....	49
<b>Figure III.12</b> : Défauts d'ombrage avec différents pourcentages.....	50
<b>Figure III.13</b> : Caractéristiques (I-V) pour défaut de l'ombrage.....	51
<b>Figure III.14</b> : Caractéristiques (P-V) pour défaut de l'ombrage.....	51
<b>Figure III.15.</b> Défaut de couverture par les feuilles d'arbre.....	52
<b>Figure III.16</b> : Caractéristiques (I-V) du défaut de couverture avec feuilles d'arbre.....	52
<b>Figure III.17</b> : Caractéristiques (P-V) du défaut de couverture avec feuilles d'arbre.....	52
<b>Figure III.18</b> : Défaut de salissure poussière et sable.....	54
<b>Figure III.19</b> : Caractéristiques (I-V) du défaut de salissure avec de la poussière et du sable.....	54
<b>Figure III.20</b> : Caractéristiques (P-V) du défaut de salissure avec du sable.....	54
<b>Figure III.21</b> : Défaut de salissure avec de la terre.....	55
<b>Figure III.22</b> : Caractéristiques (I-V) dans le cas de salissure avec de la terre.....	56
<b>Figure III.23</b> : Caractéristiques (P-V) dans le cas de salissure avec de la terre.....	56
<b>Figure III.24</b> : Différents pourcentages de couverture avec carton.....	57





# Liste des figures

**Figure III.25** : Caractéristiques électrique (I-V) d'un module PV lors de défaut de couverture avec carton.....57

**Figure III.26** : Caractéristiques électriques (P-V) d'un module PV dans le cas du défaut de couverture avec carton.....58



# Liste des tableaux

<b>Tableau I.1 :</b> Différents types des cellules photovoltaïques.....	8
<b>Tableau I.2 :</b> Différents modèles électriques de cellule photovoltaïque.....	10
<b>Tableau II.1 :</b> Classification de défauts.....	32
<b>Tableau II.2 :</b> Impact des différents défauts sur les paramètres de la cellule.....	33
<b>Tableau II.3:</b> Différents défauts dans le générateur photovoltaïque.....	34
<b>Tableau II.4:</b> Différents défauts dans la boîte de jonction.....	35
<b>Tableau II.5:</b> Différents défauts dans le système de câblage.....	35
<b>Tableau II.6:</b> Différents défauts dans le système de protection.....	36
<b>Tableau II.7:</b> Différents défauts de l'onduleur.....	37
<b>Tableau II.8:</b> Différents défauts dans le système d'acquisition des données.....	38
<b>Tableau III.1:</b> Résumé des résultats trouvés dans le cas de la variation de la résistance série.....	48
<b>Tableau III.2:</b> Paramètres du panneau.....	49
<b>Tableau III.3:</b> Résultats du 1 <sup>er</sup> essai.....	60
<b>Tableau III.4:</b> Résultats du 2 <sup>ème</sup> essai.....	61



## Liste des symboles et d'abréviations

- $c$  : La vitesse de la lumière.
- CIGS : (cuivre, indium, gallium et sélénium).
- CIS : (cuivre, indium, sélénium).
- $E$  : L'énergie du photon.
- EQE : Le rendement quantique.
- EVA : Ethylène Vinyle Acétate.
- FF : Facteur de forme.
- $G$  : L'éclairement.
- GPV : Générateur photovoltaïque.
- $h$  : La constante de Planck.
- $I$  : Courant délivré par la cellule.
- $I_d$  : Le courant de saturation inverse.
- $I_m$  : Le courant au point de puissance maximale.
- IPCE : Incident Photon to Current Efficiency.
- $I_{ph}$  : Le photo-courant.
- IR : Infrarouge.
- $I_{sat}$  : Le courant de saturation.
- $I_{sc}$  : Le courant de court-circuit.
- $K$  : La constante de Boltzmann ( $K=1.38 * 10^{-23}$  J/K).
- NOCT : La température normale de fonctionnement de la cellule (Normal Operating CellTempérature).
- $N_p$  : Nombre des cellules en parallèle.
- $N_s$  : Nombre des cellules en série.
- $P$  : Puissance délivré par la cellule.
- PID : Dégradation Potentielle Induite.
- $P_{in}$  : Puissance incidente.
- $P_m$  : Puissance maximale.
- $P_{m-idéal}$  : Puissance maximale idéale.



## Liste des symboles et d'abréviations

- $P_{\max}$  : Puissance maximale.
- PV : Photovoltaïques.
- $q$  : La charge absolue d'un électron ( $1.6 * 10^{-19}$  coulomb).
- $R_p$  : Résistance parallèle.
- $R_s$  : Résistance série.
- $R_{sh}$  : Résistance shunt.
- STC : Conditions de test standard.
- $T$  : Température absolue en Kelvin.
- $T_a$  : Température ambiante.
- $T_c$  : Température de la cellule.
- $V$  : Tension délivré par la cellule.
- $V_m$  : Tension au point de puissance maximale.
- $V_{oc}$  : Tension de circuit ouvert.
- $V_{out}$  : Tension aux bornes de la jonction.
- $V_s$  : Tension de seuil.
- $\eta$  : Le rendement.
- $\lambda$  : La longueur d'onde.
- $\phi$  : Flux lumineux.



# **Introduction Générale**

## **Introduction générale**



# Introduction Générale

Les demandes d'énergie des pays ne cessent de croître. Aujourd'hui, une grande partie de l'énergie mondiale est produite à partir de combustibles fossiles. Consommer ces sources de manière irrationnelle entraîne des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. En outre, une surconsommation des stocks de ressources naturelles entraîne leur épuisement, privant ainsi les générations futures de ce type d'énergie. Il est de plus en plus nécessaire de recourir à d'autres sources d'énergie. Les énergies renouvelables aspirent à être la meilleure option. Ces questions sont d'une importance capitale pour la communauté des chercheurs et pour les États [1].

La source d'énergie la plus prometteuse et la plus puissante est l'énergie solaire [2]. Grâce à l'arrivée sur Terre d'environ 125 000 000 milliards de watts de puissance solaire à tout moment [2], l'énergie solaire pourrait effectivement être la future source d'énergie renouvelable.

Au cours des dernières années, la plupart des États se sont concentrés sur les énergies renouvelables. Toutefois, l'industrie photovoltaïque a connu une croissance significative dans les pays industrialisés [1]. L'Algérie est contrainte d'investir davantage dans ce secteur lucratif en raison de son riche gisement solaire d'une part, et de sa situation géographique d'autre part. Sa croissance et sa position parmi les pays en dépendent [3].

De plus, pendant son utilisation, un générateur photovoltaïque peut être confronté à des défauts et des anomalies qui peuvent l'affecter et réduire ses performances en matière de production d'énergie [4]. Afin de résoudre ces problèmes, il est essentiel de mettre en œuvre un système de détection et de localisation des défauts. En effet, plusieurs études de recherche et validations expérimentales ont été menées sur le diagnostic des systèmes photovoltaïques. Étant donné la variété des défauts présents dans les systèmes photovoltaïques, les méthodes et les appareils permettant de les détecter et de les localiser sont également diversifiés.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier la production d'énergie électrique à partir de panneaux solaires en examinant plusieurs situations défavorables : des panneaux solaires maintenus en parfait état, c'est-à-dire propres et non ombragés, et des panneaux solaires soumis à des conditions moins idéales, telles que l'ombrage ou la saleté. Cette étude vise à quantifier et comparer les performances énergétiques des deux configurations afin de mieux comprendre



# Introduction Générale

l'impact de l'entretien et de l'environnement sur l'efficacité des panneaux solaire en espérant obtenir des résultats qui permettront de formuler des recommandations pour optimiser la production d'énergie solaire en tenant compte des différentes variables environnementales et de maintenance.

En vue d'explorer les différentes facettes du sujet, ce mémoire est structuré de la manière suivante :

Le premier chapitre explorera les principes de base de l'effet photovoltaïque, en se concentrant sur l'élément essentiel des générateurs photovoltaïques : la cellule photovoltaïque. Nous examinerons diverses configurations de connexion des cellules photovoltaïques pour la construction de générateurs. De plus, nous analyserons les caractéristiques électriques des cellules photovoltaïques et l'impact de paramètres météorologiques spécifiques sur ces caractéristiques.

Le chapitre deux se concentrera sur les différents problèmes et défaillances des panneaux photovoltaïques. Nous aborderons les facteurs qui peuvent affecter leur performance, tels que l'ombrage, la saleté et les variations de température. En examinant ces aspects, nous chercherons à comprendre comment ces problèmes peuvent être détectés, atténués ou corrigés pour améliorer la fiabilité et l'efficacité des systèmes PV. Cette analyse est essentielle pour développer des solutions pratiques visant à prolonger la durée de vie des panneaux photovoltaïques et à optimiser leur rendement énergétique.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons et discuterons des résultats des essais pratiques menés sur deux types de panneaux solaires : ceux qui sont complètement ensoleillés et propres, considérés comme étant en bon état, et ceux qui ont été exposés à diverses conditions défavorables. Nous effectuerons également des calculs pour évaluer les rendements et les facteurs nécessaires afin de comparer les différents cas étudiés.



# **Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes photovoltaïques**

## **Chapitre I**

### **Etat de l'art sur les systèmes photovoltaïques**



# Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes photovoltaïques

## I.1. Introduction

L'énergie solaire, produite à partir de la lumière du soleil, est la source d'énergie renouvelable la plus importante. Elle est convertie en énergie électrique à l'aide de panneaux solaires constitués de nombreuses cellules photovoltaïques. Les cellules photovoltaïques sont les principaux composants qui convertissent directement l'énergie solaire en énergie électrique et sont composées de matériaux semi-conducteurs.

Ce chapitre passe en revue les bases de l'effet photovoltaïque, en mettant l'accent sur l'élément fondamental d'un générateur photovoltaïque : la cellule photovoltaïque. Nous discuterons des différentes configurations de connexions de cellules photovoltaïques pour construire un générateur photovoltaïque. Nous étudierons également les propriétés électriques des cellules photovoltaïques et l'influence de certains paramètres météorologiques sur ces propriétés.

## I.2. Histoire du photovoltaïque

La découverte de l'effet photovoltaïque remonte à 1839, année où le physicien français Alexandre Edmond Becquerel a découvert la possibilité de produire de l'électricité grâce à la lumière et à la présence de matériaux semi-conducteurs comme le silicium [5].

Après 1913, les premières cellules photovoltaïques voient le jour, mais ce n'est qu'en 1916 que Robert Millikan parvient à produire un courant continu. Le premier véritable panneau solaire, avec un rendement de 6 %, est développé en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell [5].

Les panneaux solaires sont apparus, mais ils sont encore trop coûteux. La recherche spatiale s'empare du sujet afin d'équiper ses satellites qui ont besoin d'une source d'énergie durable. Suite à la prouesse des laboratoires Bell, qui ont réussi à atteindre un rendement de 6 %, la recherche progresse jusqu'à obtenir un rendement de 9 %. En 1958, les premières cellules voyagent à bord du satellite Vanguard 1. Puis, en 1959, c'est au tour des premiers panneaux solaires, fixés sur le satellite Explorer 6 [6].

La recherche continue son travail pour adapter les panneaux solaires à une utilisation sur Terre. L'Université du Delaware est à l'origine de la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques en 1973 [6].

# Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes photovoltaïques

Plusieurs facteurs font de l'énergie solaire une ressource de plus en plus sollicitée : l'augmentation du coût des énergies fossiles et la prise de conscience de l'épuisement des ressources naturelles en font partie. L'utilisation domestique des panneaux solaires se développe chaque année. Selon l'ADEME, environ 20 000 foyers résidentiels étaient équipés d'un système d'autoconsommation solaire en 2017 [7].

## I.3. Présentation de l'effet photovoltaïque

Le terme est composé du mot grec ancien « photos » (qui signifie lumière, clarté) et du nom de famille « Volta » du physicien italien Alessandro Volta, qui a défini le volt comme une unité de mesure de la tension électrique. L'énergie photovoltaïque fait référence à l'énergie qui capte la lumière du soleil à travers des panneaux photovoltaïques et la convertit directement en énergie électrique. C'est le résultat de la conversion directe des photons en électrons dans les semi-conducteurs.

La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique repose sur l'effet photoélectrique, c'est-à-dire sur la capacité des photons à créer des porteurs de charge (électrons et trous) dans un matériau. Lorsqu'un semi-conducteur est illuminé par un rayonnement de longueur d'onde appropriée (l'énergie des photons doit être au moins égale à celle du gap énergétique du matériau), l'énergie des photons absorbés permet des transitions électroniques depuis la bande de valence vers la bande de conduction du semi-conducteur. Cela génère des paires électron-trou qui peuvent contribuer au transport du courant (photoconductivité) à travers le matériau lorsqu'il est polarisé [8].

Si l'on illumine maintenant une jonction PN, les paires électron-trou créées dans la zone de charge d'espace de la jonction sont immédiatement séparées par le champ électrique présent dans cette région, et sont entraînées vers les zones neutres de chaque côté de la jonction. Si le dispositif est isolé, une différence de potentiel apparaît aux bornes de la jonction (tension photovoltaïque) ; s'il est connecté à une charge électrique extérieure, on observe un courant qui circule sans qu'aucune tension ne soit appliquée au dispositif. C'est le principe de base d'une cellule photovoltaïque [8].

# Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes photovoltaïques

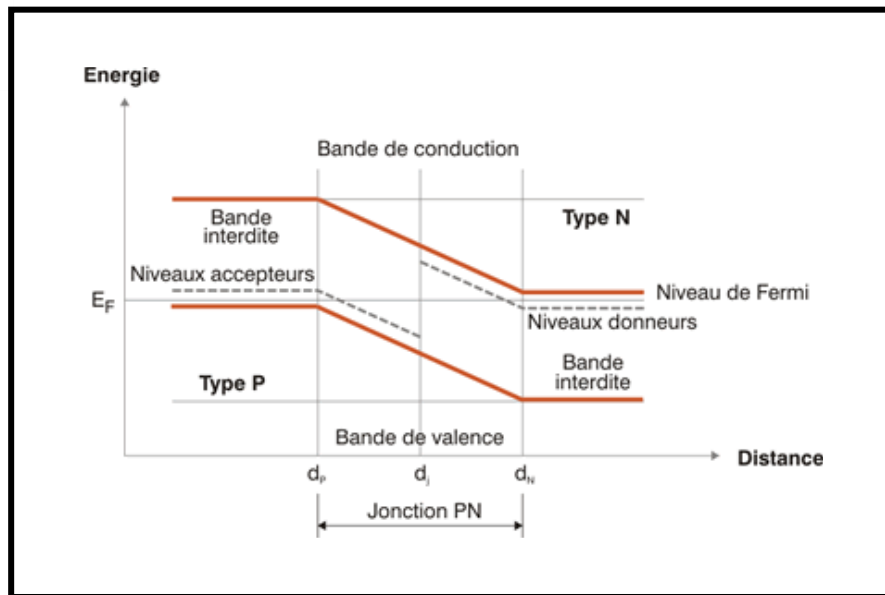


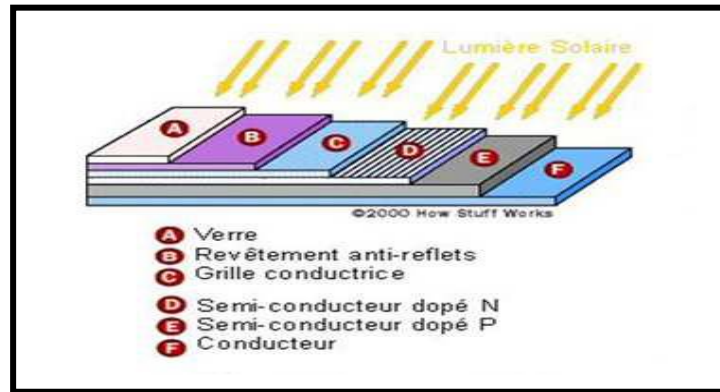
Figure I.1 : Diagramme de bandes d'énergie au voisinage de la jonction [8].

## I.4. La cellule photovoltaïque

La cellule PV, ou photopile, est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées de :

- D'une fine couche semi-conductrice (un matériau possédant une bande interdite, qui agit comme une barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont les propriétés électroniques peuvent être modifiées), tel que le silicium, qui présente une conductivité électrique relativement bonne.
- D'une couche anti-reflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires,
- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode,
- Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissantes juste en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps à l'intérieur pour améliorer le rendement [8].

# Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes photovoltaïques



**Figure I.2:** Structure basique d'une cellule solaire [8].

Une cellule photovoltaïque repose sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque, qui consiste à générer une force électromotrice lorsque sa surface est exposée à la lumière. La tension produite peut varier entre 0,3 V et 0,7 V, selon le matériau utilisé, sa disposition, ainsi que la température et le vieillissement de la cellule.

## I.4.1. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

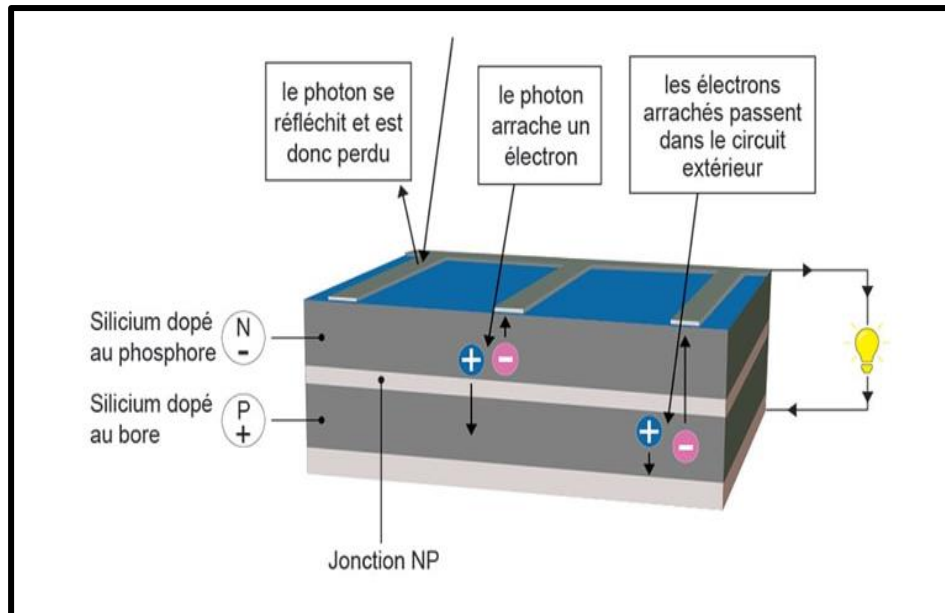
Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque repose sur les propriétés des semi-conducteurs qui, lorsqu'ils sont percutés par les photons de la lumière, mettent en mouvement un flux d'électrons. Les photons sont des particules élémentaires qui transportent l'énergie solaire à une vitesse de 300 000 km/s et qu'Albert Einstein appelait dans les années 1920 les « quanta de lumière ». Lorsqu'ils heurtent un semi-conducteur tel que le silicium, ils arrachent des électrons à ses atomes. Ces électrons se mettent alors en mouvement de manière désordonnée, à la recherche d'autres « trous » où ils peuvent se repositionner [9].

Pour qu'il y ait un courant électrique, il est nécessaire que ces mouvements d'électrons se dirigent tous dans la même direction. Pour faciliter cela, on utilise deux types de silicium. La face exposée au soleil est « dopée » avec des atomes de phosphore qui contiennent plus d'électrons que le silicium, tandis que l'autre face est dopée avec des atomes de bore qui contiennent moins d'électrons. Cette double face devient ainsi une sorte de pile : le côté très chargé en électrons devient la borne négative (N), et le côté avec moins d'électrons devient la borne positive (P). Entre les deux, il se crée un champ électrique [9].

Quand les photons excitent les électrons, ceux-ci migrent vers la zone N grâce au champ électrique, tandis que les « trous » se déplacent vers la zone P. Les électrons sont collectés par des contacts électriques déposés à la surface des deux zones, avant de passer dans le circuit

# Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes photovoltaïques

extérieur sous forme d'énergie électrique. Cela crée un courant continu. Une couche anti-reflet est utilisée pour éviter que trop de photons ne se perdent en étant réfléchis par la surface [9].




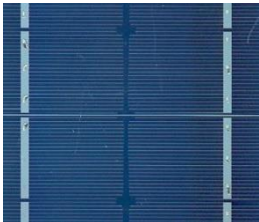
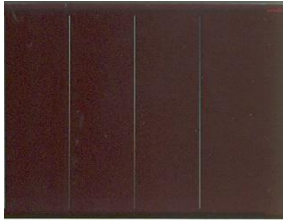
**Figure I.3:** Principe de la cellule photovoltaïque [9].

## I.4.2. Les principales technologies de la cellule solaire photovoltaïque

Composée de semi-conducteurs, une cellule photovoltaïque absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Une cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau) [10].

# Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes photovoltaïques

Il existe plusieurs types de cellules. Chaque type est caractérisé par son rendement et son coût. Nous intéressons sur la technologie du silicium :

Types	Avantages	Inconvénients	Rendements
<p>Silicium polycristallin</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Bon rendement (environ 100 Wc/m<sup>2</sup>).</li> <li>-Durée de vie importante (+/- 30 ans).</li> <li>-Moins cher que le monocristallin.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Rendement faible sous un faible éclairement.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Rendement module commercial 11 à 15%.</li> <li>-Rendement record en laboratoire environ 20%.</li> </ul>
<p>Silicium monocristallin</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Meilleur rendement que le polycristallin (environ 150 Wc/m<sup>2</sup>).</li> <li>-Durée de vie importante (+/- 30 ans).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Plus cher que le polycristallin</li> <li>-Rendement faible sous un faible éclairement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Rendement module commercial 12 à 20%</li> <li>-Rendement record en laboratoire environ 25%</li> </ul>
<p>Silicium amorphe</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Fonctionnent avec un éclairement faible</li> <li>-Bon marché par rapport aux autres types de cellules</li> <li>-Moins sensible aux températures élevées</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Durée de vie courte (+/- 20 ans) par rapport aux panneaux solaires monocristallins et polycristallins.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Rendement faible 5 à 9%.</li> <li>-Rendement record en laboratoire environ 13,4%.</li> </ul>

**Tableau I.1 :** Différents types des cellules photovoltaïques.

## I.5. Caractéristiques électriques

Dans cette figure, on peut remarquer deux points de fonctionnement importants : le courant de court-circuit (ISC) et la tension de circuit ouvert (VOC). Comme son nom l'indique, le courant de court-circuit correspond au courant lorsque la cellule est court-circuitée. Ce courant est proportionnel à la surface de la cellule qui capture la lumière, et pour une surface donnée, il dépend de l'intensité de la lumière absorbée par la cellule. La tension de circuit ouvert est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'il n'y a pas de courant. Sa valeur est de l'ordre de 0,6 V pour une cellule de type cristallin. Ces deux points (ISC et VOC) délimitent le fonctionnement de la cellule en trois zones différentes [11].

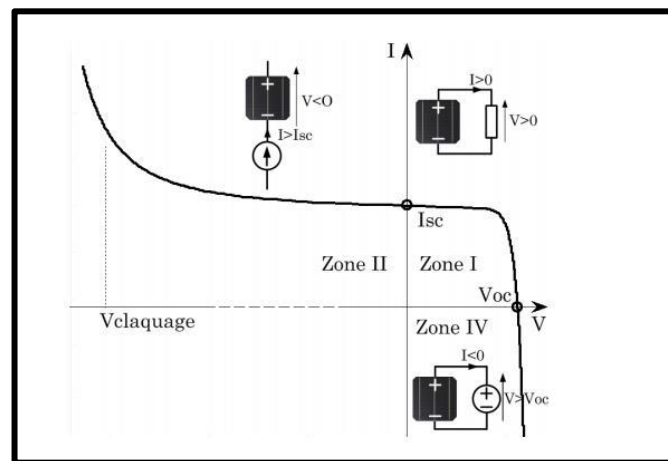


Figure I.4: Caractéristique I-V d'une cellule PV [11].

- **La zone I** de la Figure I.4 correspond au fonctionnement en générateur de la cellule avec  $0 \leq I \leq I_{sc}$  et  $0 \leq V \leq V_{oc}$ . C'est le fonctionnement dit normal de la cellule dans lequel elle débite la puissance produite à la charge.
- **La zone II** correspond au fonctionnement en récepteur de la cellule avec  $I > I_{sc}$  et  $V < 0$ . **Quand** le courant traversant la cellule est forcé par un circuit extérieur à dépasser son courant de court-circuit, la cellule produit une tension négative à ses bornes. La croissance en courant provoquera l'endommagement de la cellule si la tension à ses bornes atteint une limite : la tension de claquage ( $V_{claquage}$ ). L'étude expérimentale sur différentes cellules de type cristallin a montré que la valeur de la tension de claquage varie entre  $-10$  V et  $-30$ .
- **La zone IV** correspond de nouveau au fonctionnement en récepteur de la cellule, mais avec cette fois-ci  $I < 0$  et  $V > V_{oc}$ . Quand la tension aux bornes de la cellule est amenée à dépasser

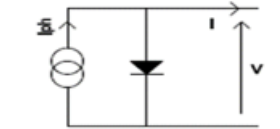
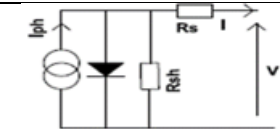
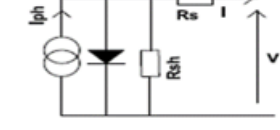
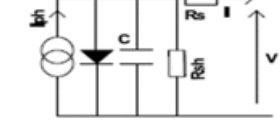

# Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes photovoltaïques

sa tension de circuit ouvert, un courant inverse circule dans la cellule. Si ce courant inverse dépasse une limite, la cellule sera irrémédiablement endommagée [11].

## I.6. Modélisation d'une cellule PV

Une évaluation du fonctionnement des modules PV et la conception des systèmes d'énergie sont basées sur la caractéristique électrique courant-tension des modules sous différents niveaux de rayonnement et différentes températures de la cellule PV. La modélisation des cellules PV et des modules peut être effectuée au moyen d'équations qui fournissent différents degrés d'approximation du dispositif réel.

Plusieurs modèles électriques ont été proposés dans la littérature afin de simuler les cellules PV opérant dans diverses conditions. La complexité des modèles dépend du nombre de paramètres ( $R_s$ ,  $R_{sh}$ , etc.) à identifier. Chaque modèle est essentiellement une amélioration du modèle idéal, qui contient une source de courant représentant la puissance solaire incidente et une diode représentant la jonction PN. Des éléments supplémentaires peuvent être ajoutés pour mieux rendre compte du comportement de la cellule PV dans certains quadrants de fonctionnement [12]. Les modèles les plus courants sont présentés et comparés dans le tableau I.2.

Modèle	Schéma	Nombre paramètres	Précision
Idéal		3	Faible
Une diode		5	Bien
Bishop		8	Bien, avec la représentation en régime inverse
Dynamique à une diode		6	Bien, avec la représentation en régime dynamique
Deux diodes		7	Très bien

**Tableau I.2 :** Différents modèles électriques de cellule photovoltaïque [12].



## Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes photovoltaïques

Le modèle à une diode est le plus répandu pour les cellules PV et les modules PV en raison de sa simplicité et de sa bonne précision dans le quadrant de production d'énergie. L'évolution du modèle à une diode a conduit à des modèles plus précis, tels que le modèle de Bishop [13], qui décrit le comportement d'une cellule PV en polarisation inverse.

Le modèle à deux diodes permet d'améliorer le modèle à une diode en prenant en compte les pertes résistives et les mécanismes de recombinaison dans les différents composants électriques du circuit [14].

En outre, des modèles dynamiques ont été proposés en introduisant une capacité pour modéliser le comportement dynamique de la cellule PV [12].

Ces modèles diffèrent par le nombre de paramètres nécessaires pour calculer la caractéristique I-V [15].

Dans ce chapitre, nous avons principalement utilisé le modèle à une diode que nous décrirons plus en détail.

### I.6.1. Modèle d'une cellule PV idéale

Le circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque est fréquemment utilisé pour décrire son comportement électrique à l'aide de composants électriques élémentaires tels que des sources, des résistances, des diodes, etc. L'expérience montre qu'une cellule solaire suit le comportement d'une diode classique : elle commence à conduire lorsque la tension appliquée est supérieure à la tension de seuil  $V_s$ .

Ce modèle décrit le comportement de la cellule PV par le circuit équivalent montré dans la figure I.5 L'avantage majeur de ce modèle est le nombre limité de paramètres qui peuvent être facilement trouvés dans les fiches techniques des constructeurs [16].

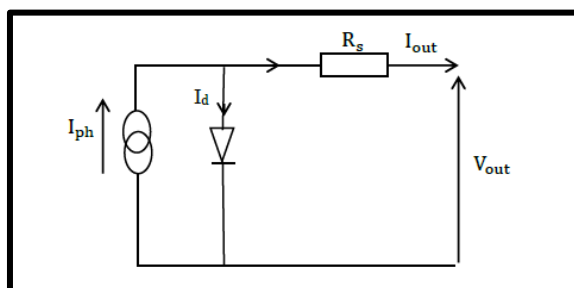


Figure I.5: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale.

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

$$I = I_{ph} - I_d$$

1

# Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes photovoltaïques

Avec :

- $I$  : Courant de court-circuit ;
- $I_{ph}$  : Le photo-courant ;
- $R_s$  : La résistance série ;
- $I_d$  : le courant de saturation inverse ;
- $V_{out}$  : La tension aux bornes de la jonction.

Dans le cas d'une cellule idéale a l'obscurité, la caractéristique I-V peut être représenté par la relation suivante :

$$I_d = I_{sat} \left[ e^{\left( \frac{V+R_s*I}{V_{th}} \right)} - 1 \right] \quad 2$$

Avec :

- $I_{sat}$  : Le courant de saturation en Ampère (A) ;
- $V_{th}$  : Le potentiel thermique en Volt (V).

Il est donné par :  $V_{th} = \frac{A*K*T}{q}$  3

- $K$  : la constante de Boltzmann ( $1.380649 \times 10^{-23}$  J/K) ;
- $A$  : le facteur d'idéalité de diode ;
- $T$  : la température absolue en Kelvin (K) ;
- $q$  : la charge absolue d'un électron en coulomb ( $1.602 \times 10^{-19}$  C).

Sous éclairement, un terme  $I_{ph}$ , tenant compte du photo-courant généré, est rajouté. On obtient le circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale sous éclairement qui est représenté par l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left[ e^{\left( \frac{V+R_s*I}{V_{th}} \right)} - 1 \right] \quad 4$$

## I.6.2. Modèle d'une cellule PV à une diode

Le fonctionnement d'un module photovoltaïque est décrit par le modèle « standard » à une diode, les propriétés de la jonction PN et la réaction du semi-conducteur au rayonnement mènent au schéma du circuit équivalent idéal simplifié d'une cellule photovoltaïque représentée sur la figure (1.11). C'est le modèle le plus cité dans la littérature, le module photovoltaïque est caractérisé par son schéma électrique équivalent qui se compose d'une source de courant

# Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes photovoltaïques

qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique, une résistance shunt  $R_{sh}$  et une conséquence de l'état le long de la périphérie de la surface de la cellule, une résistance série  $R_s$  représentant les diverses résistances de contact et de connexions, une diode en parallèle qui modélise jonction PN [16].

- $R_{sh}$  : La résistance parallèle.

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

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad 5$$

$$I_{out} = I_{ph} - I_{sat} \left[ e^{\left( \frac{V + R_s * I}{V_{th}} \right)} - 1 \right] - \left( \frac{V_{out} + R_s * I}{R_{sh}} \right) \quad 6$$

## I.7. Caractérisation d'une cellule photovoltaïque

Le modèle de circuit équivalent a été initialement développé pour comprendre les caractéristiques courant-tension (I-V) des cellules PV. Ce modèle utilise plusieurs éléments de base d'un circuit électrique, chacun représentant différents processus dans le fonctionnement d'une cellule PV.

Pour tenir compte des limitations de la cellule PV et calculer le courant réellement délivré sur la charge du circuit extérieur, on introduit un modèle comportant une résistance série  $R_s$  et une résistance parallèle  $R_{sh}$ .

La figure 1.11, montre un schéma du circuit équivalent, qui se compose d'une source de courant, d'une diode, et d'une résistance  $R_{sh}$  connectée en série avec une résistance  $R_s$  [16].

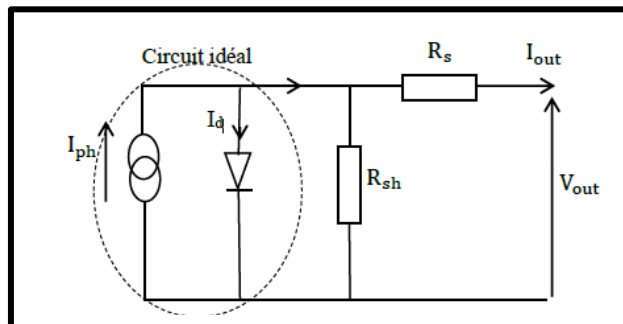


Figure I.6: Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode.

### I.7.1. Caractéristiques $I = f(V)$ , $P = f(V)$ d'une cellule photovoltaïque

La caractéristique courant-tension, illustrée dans la figure I.7, décrit le comportement de la cellule photovoltaïque sous l'influence des conditions météorologiques (niveau d'éclairage et température ambiante).

# Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes photovoltaïques

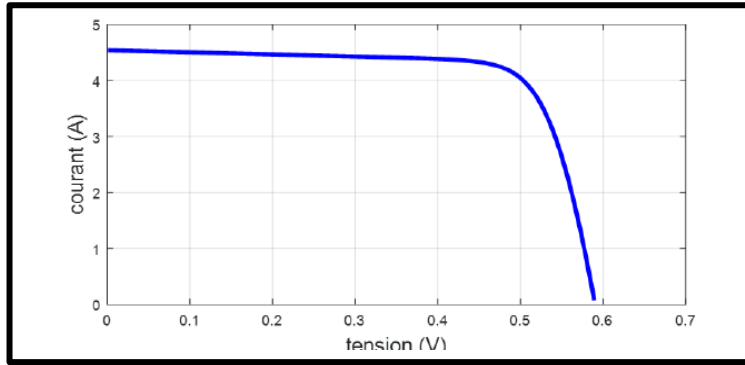


Figure I.7: Courbe  $I= f(V)$  d'une cellule photovoltaïque [17].

La figure I.8 montre bien qu'une cellule photovoltaïque ne peut être assimilée à aucun générateur classique (générateur de courant ou générateur de tension).

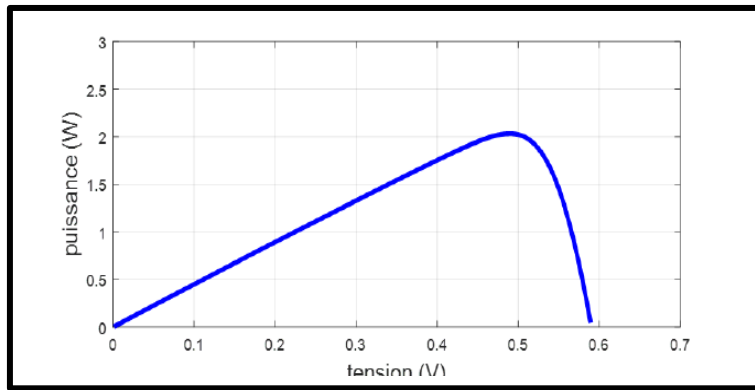


Figure I.8: Courbe  $P= f(V)$  d'une cellule photovoltaïque [17].

## I.7.2. Le courant de court-circuit

Le courant de court-circuit  $I_{cc}$  est le courant qui circule à travers la jonction sous illumination sans application de tension. Il croît avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température. Le modèle électrique réel d'une cellule solaire se compose d'une diode, de deux résistances et d'un générateur de courant [17]. La relation entre la tension  $V$  (Volts) et le courant  $I$  (Ampères) est donné par l'équation suivant d'après la Figure 1.11.

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left[ e^{\left( \frac{q \times V - q \times R_s \times I}{n \times K \times T} \right)} - 1 \right] - \left( \frac{V + R_s \times I}{R_{sh}} \right) \quad 7$$

Avec :

- $n$  : facteur de qualité de la diode ;
- $V$  : tension imposée à la diode ;
- $R_{sh}$  : Résistance shunt du générateur solaire.

# Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes photovoltaïques

Photo courant généré par le générateur solaire sous éclairement  $I_{ph}$  :

$$I_{ph} = (I + (T - 298.15)) \frac{G}{G_{ref}} \quad 8$$

Avec :

- $G = 1000 \text{ W/m}^2$ .

### I.7.3. Puissance maximale

Pour une cellule idéale, la puissance maximale idéale  $P_{m, \text{idéal}}$  aux bornes de la cellule photovoltaïque correspond donc à la tension du circuit ouvert multipliée par le courant de court-circuit.

$$P_{m, \text{idéal}} = V_{co} \times I \quad 9$$

- $P_{m, \text{idéal}}$  : La puissance maximale idéale.

En pratique, la courbe caractéristique d'une cellule photovoltaïque est plus arrondie et la tension au point de puissance maximale  $V_m$  est inférieure à la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , de même que le courant fourni  $I_m$  est inférieur pour cette même tension au courant de court-circuit  $I_{cc}$  [17]. L'expression de la puissance en ce point est :

$$P_m = V_m \times I_m \quad 10$$

Avec :

- $P_m$  : La puissance maximale (W) ;
- $V_m$  : Tension au point de puissance maximale (V) ;
- $I_m$  : Le courant fourni (A).

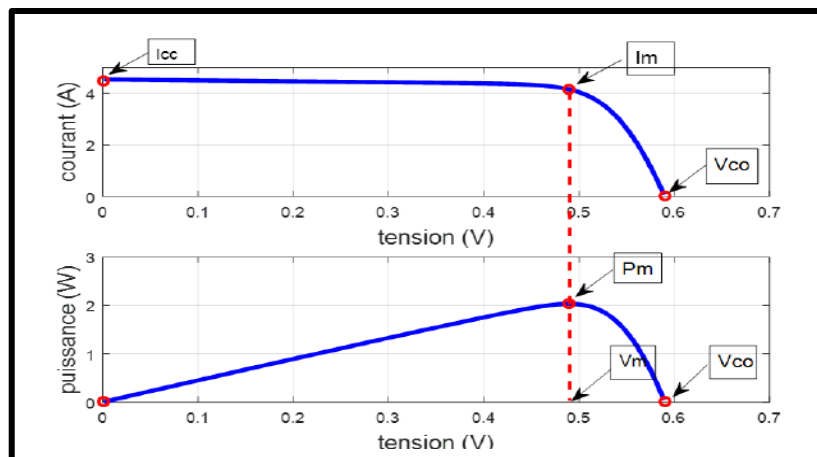


Figure I.9 : Points de la puissance maximale  $P_m$  et  $P_{m, \text{idéal}}$  [17].

# Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes photovoltaïques

## I.7.4. Influence de la température sur les caractéristiques (I-V) et (P-V)

La température de la cellule peut être calculée comme suit :

$$T_c = T_a + \frac{\varphi(N_{oct} - 20)}{800} \quad 11$$

Avec :

- $\varphi$  : Flux lumineux ( $\text{W/m}^2$ ) ;
- $N_{oct}$  : Condition de température nominale de fonctionnement de la cellule donnée par le constructeur (K) ;
- $T_a$  : Température ambiante (K).

La température  $T$  et l'irradiation  $E$  ont un impact direct sur les performances d'une cellule photovoltaïque, comme l'illustre la figure I.10. Lorsque la température des cellules augmente, la tension de circuit ouvert diminue sensiblement, tandis que le courant de court-circuit augmente légèrement. Ainsi, on peut constater que les cellules PV ont de meilleures performances dans un environnement froid avec un ciel dégagé, contrairement à un environnement chaud [16].

La température du générateur photovoltaïque (GPV) dépend non seulement de la température ambiante, mais aussi des effets de l'irradiation sur la cellule. Puisque seule une petite fraction de l'insolation qui atteint le module est convertie en électricité, la majeure partie de l'énergie incidente est absorbée et convertie en chaleur [18].

Pour aider les concepteurs de systèmes à prendre en compte les variations de performances de la cellule avec la température, les fabricants fournissent souvent un indicateur appelé NOCT (Nominal Operating Cell Temperature - température normale de fonctionnement de la cellule).

Quand la température des cellules augmente, la tension de circuit ouvert diminue sensiblement, tandis que le courant de court-circuit augmente légèrement [18].

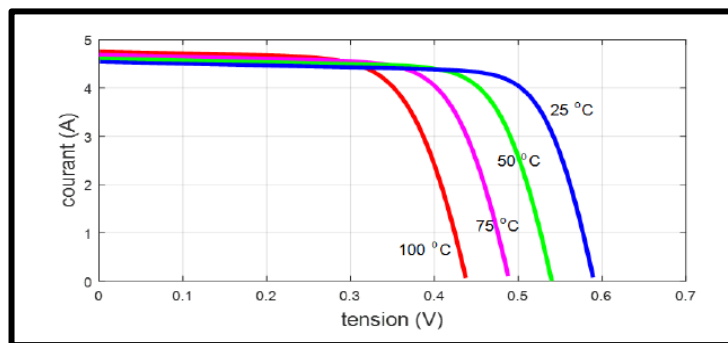


Figure I.10: Courbes  $I=f(V)$  sous différentes températures [18].

# Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes photovoltaïques

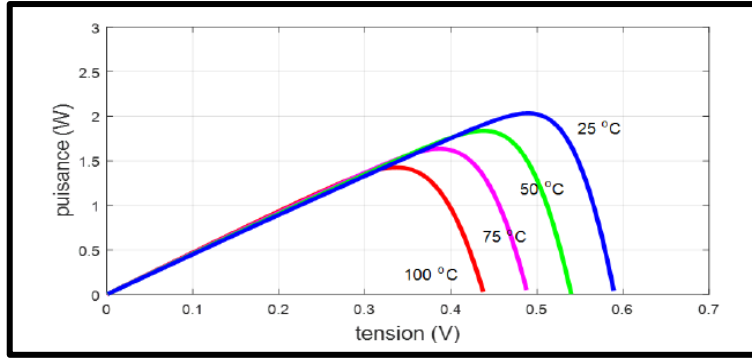


Figure I.11: Caractéristique  $P=f(V)$  sous différentes températures [18].

## I.7.5. Influence de l'éclairement sur les caractéristiques (I-V) et (P-V)

Le niveau d'éclairement correspond à l'intensité de la lumière incidente perpendiculairement à la surface de la cellule photovoltaïque. Cette intensité est mesurée en watts par mètre carré ( $W/m^2$ ). Nous utiliserons  $G$  pour représenter le niveau d'éclairement de la cellule (ou du module). Le courant électrique délivré par la cellule dépend en grande partie du niveau de luminosité. Nous avons découvert que le courant de court-circuit est proportionnel à l'éclairement, tandis que la tension est peu sensible à ce niveau de luminosité.

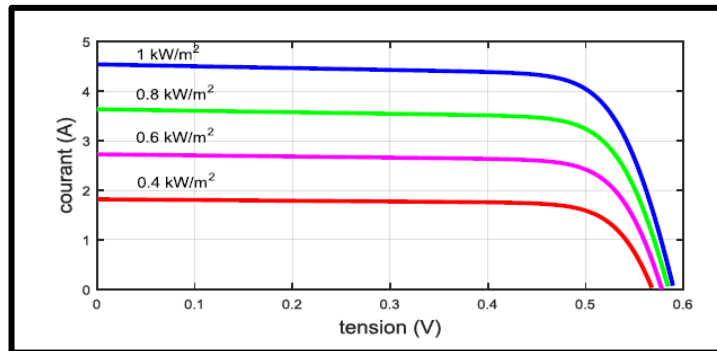


Figure I.12: Courbes  $I=f(V)$  sous différents niveaux d'éclairement [18].

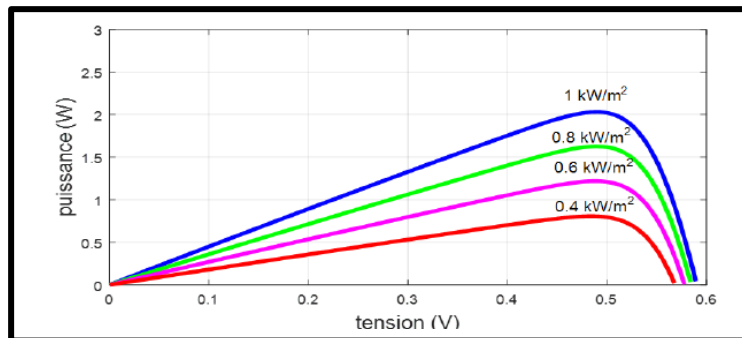


Figure I.13: Courbes  $P=f(V)$  sous différents niveaux d'éclairement [18].

## I.7.6. Puissance crête d'une cellule PV

La partie intéressante de la caractéristique courant-tension pour l'utilisateur est celle qui génère de l'énergie. Ainsi, ce ne sera ni au point de tension de circuit ouvert, ni au point de court-circuit, car ces points ne génèrent aucune énergie. En effet, la puissance est le produit du courant par la tension. Par conséquent, la puissance maximale est générée par la cellule à un point spécifique de la courbe courant-tension.

La puissance crête d'une photopile est la puissance mesurée dans les conditions de test standard "STC", tel que l'éclairement  $G=1000\text{W/m}^2$ , la température  $T= 25^\circ\text{C}$ , avec une répartition spectrale du rayonnement dit AM 1,5 [19].

## I.7.7. Tension du circuit ouvert

Tension de circuit-ouvert  $V_{co}$  est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse [19].

$$V_{co} = \frac{KT}{q} + \left( \ln \frac{I}{I_s} + 1 \right) \quad 12$$

## I.7.8. Facteur de forme

On appelle facteur de forme (FF) l'efficacité de la cellule solaire, c'est le facteur de remplissage (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la valeur maximale de la puissance pouvant être extraite ( $P_m$ ) de la photopile sous les conditions de mesures standardisées, et le produit ( $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ ) [20].

Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales. Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad 13$$

Pour une cellule de fabrication industrielle, le facteur de forme est de l'ordre de 70% [19].



# Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes photovoltaïques

## I.7.9. Rendement de conversion

Le rendement  $\eta$  des cellules PV, désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport de la puissance électrique maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente  $P_{in}$  [19] :

$$\eta = \frac{FF \cdot V_{co} I_{cc}}{P_{in}} \quad 14$$

$P_{in}$  : Puissance incidente (W) ;

## I.7.10. Le rendement quantique

Le rendement quantique (EQE) est le rapport entre le nombre d'électrons dans le circuit externe et le nombre de photons incidents. Lorsque les photons perdus par réflexion (à la fenêtre de la cellule) et les photons perdus par transmission à travers toute l'épaisseur de la cellule (à cause de l'absorption incomplète) ne sont pas pris en compte, cette grandeur s'appelle alors le rendement quantique interne, IQE (internal quantum efficiency). Dans le cas contraire, ce paramètre s'appelle le rendement quantique externe, EQE (external quantum efficiency) [21]. Le rendement quantique externe est défini comme suit :

$$EQE(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \frac{E(\lambda)}{e} = \frac{I(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \frac{hc}{e\lambda} \quad 15$$

- $\varphi(\lambda)$  : est le flux lumineux incident ;
- $e$  : la charge de l'électron ;
- $E$  : l'énergie du photon.

Avec :

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad 16$$

- $h$  : étant la constante de Planck ;
- $c$  : la vitesse de la lumière ;
- $\lambda$  : la longueur d'onde.

Le rapport  $\frac{I(\lambda)}{\varphi(\lambda)}$  est appelé « réponse spectrale » de la cellule, elle est notée  $SR(\lambda)$ . Elle représente la sensibilité de la cellule pour chaque longueur d'onde. On peut donc redéfinir le rendement quantique externe comme suit :

# Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes photovoltaïques

$$EQE(\lambda) = \frac{I(\lambda) E(\lambda)}{\varphi(\lambda) e} = SR(\lambda) \frac{hc}{e\lambda} \quad 17$$

L'EQE est aussi désigné sous le terme d'IPCE (de l'expression anglaise Incident Photon to Current Efficiency) [21]. En remplaçant les trois constantes par leurs valeurs numériques, on obtient :

$$IPCE(\lambda) = 1.24 \frac{I(\lambda)}{\varphi(\lambda)\lambda} \quad 18$$

## I.8. Les différents branchements des panneaux PV

Le branchement des panneaux solaires au sein d'une installation photovoltaïque a un impact sur la performance et le fonctionnement du système. Il est essentiel de noter que la configuration que vous choisissez dépendra de vos besoins spécifiques et du système que vous concevez.

### I.8.1. Branchement en 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. La figure I.14 montre l'intérêt de l'association des cellules ou modules photovoltaïques identiques en série [22].

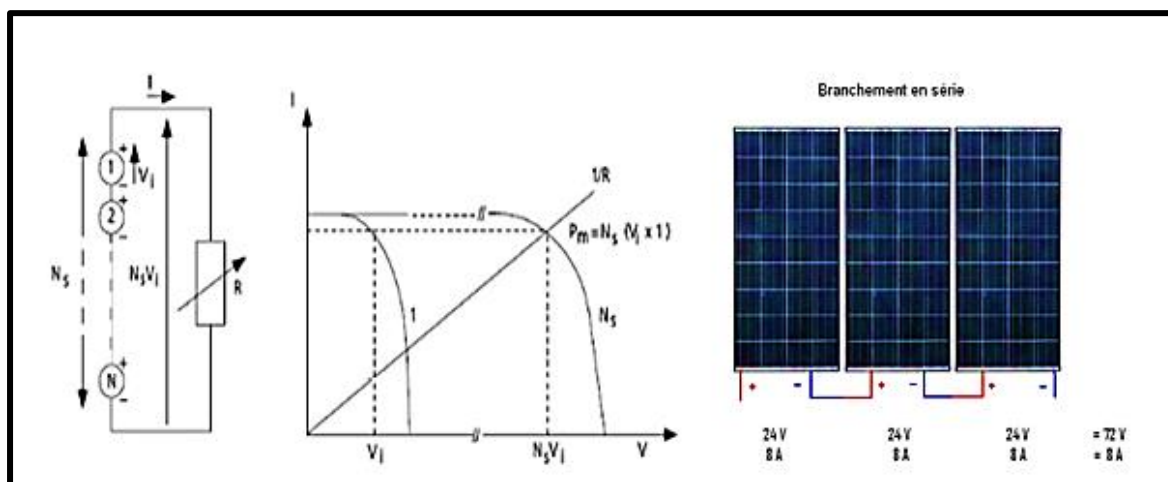


Figure I.14: Cellules ou modules photovoltaïques en série [22].

A noter que, si les tensions s'additionnent systématiquement, c'est l'intensité la plus faible qui prime dans le cas de panneaux solaires différents.

# Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes photovoltaïques

Imaginons que sur ces 3 panneaux l'un d'eux ait une intensité de 4 Ampères, l'Ampérage total serait de 4 Ampères même si les autres sont à 8 Ampères. L'inconvénient du branchement en série c'est qu'il y a une perte de puissance si un seul des panneaux est ombragé (arbre, bâtiment, cheminée...) il va perdre en intensité et c'est cette intensité qui va déterminer celle des autres panneaux.

## I.8.2. Branchement en parallèle

En ajoutant des modules identiques en parallèle, la tension de la branche reste égale à celle de chaque module, tandis que l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche. La figures I.15 illustre l'intérêt de l'association de cellules ou modules photovoltaïques identiques en parallèle [22].

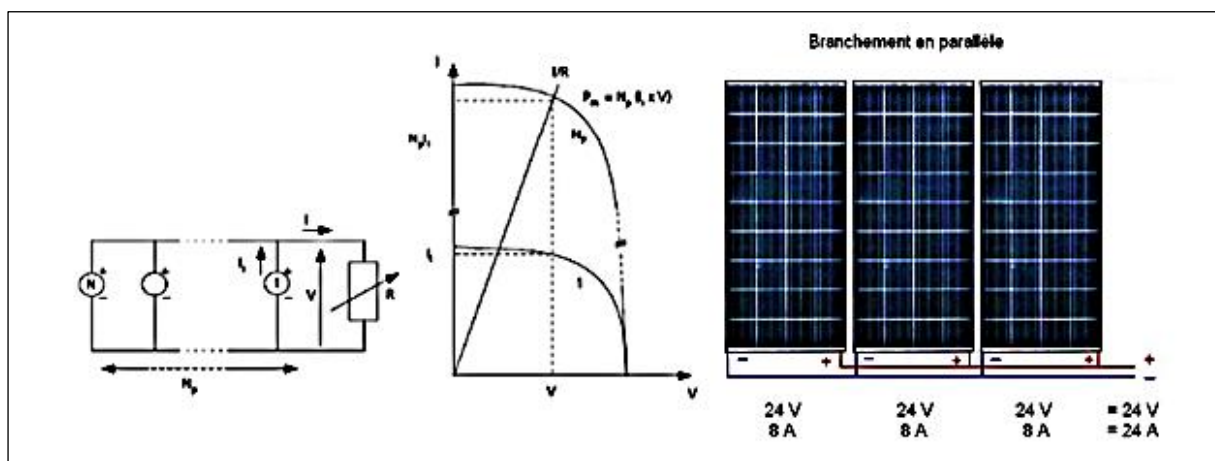


Figure I.15: Cellules ou modules photovoltaïques en parallèle [22].

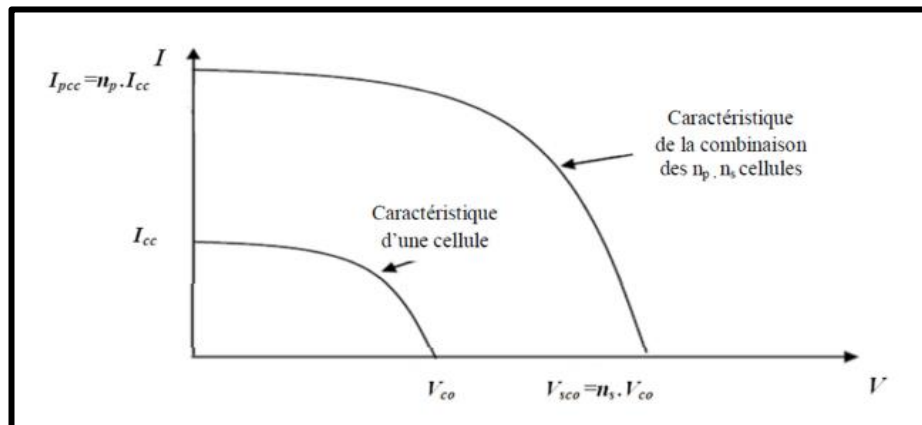
Ce branchement n'est possible qu'avec des panneaux de mêmes tensions. Contrairement au branchement en série, il n'est pas possible d'utiliser des panneaux de 24 V avec d'autres de 18 V, par exemple. Théoriquement, cela est possible, mais la tension la plus faible prévaudra, ce qui présente un risque de surtension et de court-circuit. Dans ce type de branchement, c'est donc l'intensité qui s'additionne. C'est le branchement idéal lorsque l'on a besoin d'une intensité plus élevée.

## I.8.3. Association hybride (en série et en parallèle)

La caractéristique globale courant/tension d'un générateur photovoltaïque se déduit théoriquement de la combinaison de  $n_s$  cellules élémentaires supposées identiques, où  $n_s$  est le nombre de cellules en série et  $n_p$  le nombre de cellules en parallèle. Cette combinaison influence

# Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes photovoltaïques

la caractéristique courant/tension selon le rapport  $n_s$  sur l'axe des tensions et  $n_p$  sur l'axe des courants, comme l'illustre la figure I.16 [23].



## I.9. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire

L'énergie solaire, en tant que source renouvelable et écologique, offre de nombreux avantages, mais elle présente aussi des inconvénients.

### I.9.1. Avantages [24]

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

### I.9.2. Inconvénients [24]

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%.



## Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes photovoltaïques

- Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

### I.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents éléments qui constituent un système photovoltaïque (PV), en mettant l'accent sur les cellules et les modules PV ainsi que leurs différents modes de branchement. Nous avons exploré les différentes technologies utilisées dans la fabrication des éléments constitutifs d'un système PV, offrant une vue d'ensemble sur les innovations et les progrès réalisés dans ce domaine. Enfin, nous avons examiné les avantages et les inconvénients des systèmes PV en général, soulignant leur potentiel pour la production d'énergie propre ainsi que les défis à relever pour maximiser leur efficacité et durabilité.

La compréhension approfondie de ces éléments fondamentaux est cruciale pour appréhender les performances globales d'un système PV. Cependant, pour optimiser l'utilisation des panneaux solaires, il est essentiel d'identifier et de résoudre les divers problèmes et défaillances qui peuvent survenir au cours de leur fonctionnement. Une présentation des principales défaillances des panneaux sera détaillée dans la deuxième partie de ce travail.

**Chapitre II**  
**Défaillances liées aux panneaux photovoltaïques**

### II.1. Introduction

Dans une station solaire photovoltaïque, des centaines voire des milliers de panneaux photovoltaïques sont installés et positionnés selon les exigences du site. Pour transformer l'énergie solaire en électricité utilisable, plusieurs dispositifs entrent en jeu, tels que des convertisseurs, des câblages, des systèmes de protection, etc., afin de former un système complet capable de maximiser la production d'électricité et d'assurer une distribution et un stockage efficaces. Comme toute installation industrielle, une station solaire photovoltaïque présente plusieurs défauts et anomalies qui peuvent affecter négativement sa rentabilité. Ces problèmes sont souvent liés aux défaillances des différents composants de la station et aux perturbations causées par les conditions naturelles. Parfois, ces perturbations et défauts peuvent même entraîner un dysfonctionnement total de la station.

Dans ce chapitre, nous présenterons les défauts courants observés dans les panneaux photovoltaïques et les classerons en fonction de leur impact sur les paramètres des panneaux PV.

### II.2. Défaillances des panneaux photovoltaïques

Dans cette partie, nous décrirons les différents défauts rencontrés dans un système photovoltaïque (PV). Ces défauts peuvent survenir en raison de défauts de fabrication ou des conditions climatiques et du vieillissement, affectant ainsi la puissance de sortie du module PV. Notre objectif est de présenter les principaux défauts et dégradations associés à un système PV.

Dans un système photovoltaïque, on peut rencontrer quatre types de pertes de différentes catégories [25].

- **Défauts prolongés avec rendement nul** : défaillance des composants, système déconnecté (longue durée).
- **Défauts brefs avec rendement nul** : déconnexion temporaire de l'onduleur, système déconnecté (courte durée).
- **Défauts du l'effet d'ombrage** : ombrage.

## Chapitre II : Défaillances liées aux panneaux photovoltaïques

- **Défauts avec rendement non nul et pas d'ombrage** : erreur de MPPT, autres défauts.

Les différentes défaillances liées au mauvais fonctionnement des panneaux solaires sont résumées ci-dessous :

### II.2.1. Défaut de mismatch et l'effet d'ombrage

Le défaut de mismatch est causé par l'association de cellules photovoltaïques non homogènes ou mal assorties (ces cellules présentent des caractéristiques non identiques), ce déséquilibre dégrade le point de puissance maximale et conduit à une baisse de production du module PV. Il est donc essentiel de veiller à ce que les paramètres soient identiques pour l'ensemble des cellules, car toute variation dans l'un de ces paramètres peut entraîner une différence dans les caractéristiques des cellules. Il existe deux types de défauts de mismatch : statique et dynamique.

- Le défaut de mismatch statique est lié à la tolérance de fabrication et au vieillissement des cellules PV.
- Le défaut de mismatch dynamique est causé par le changement de niveau d'irradiance et appelé l'ombrage partiel.

Le défaut de l'effet d'ombrage est un cas particulier du défaut de mismatch, car sa présence conduit à une diminution de l'ensoleillement reçu par les cellules PV. Le mismatch peut résulter d'une légère variance dans les caractéristiques des cellules PV lors de la fabrication, ainsi que des différentes conditions de fonctionnement induites par divers défauts. Pour plus de détails sur l'impact des différents défauts sur les paramètres de la cellule allez au Tableau II.3 [26].

### II.2.2. Les points chauds ou Hot-spots

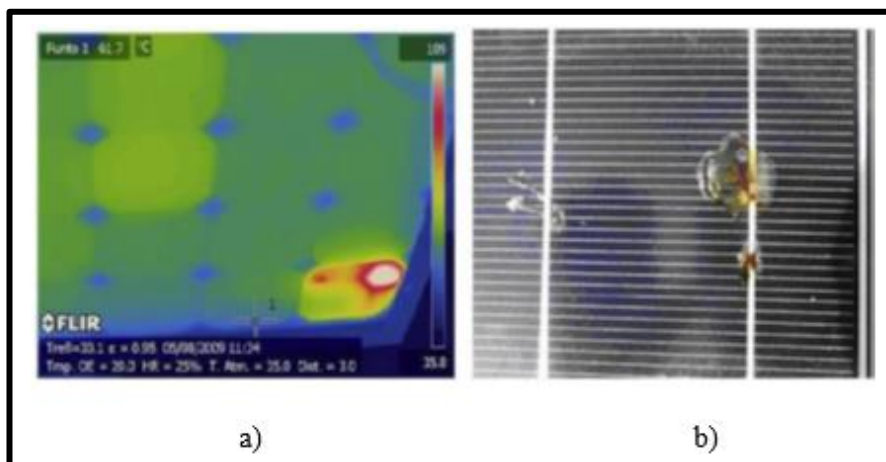
Le phénomène des points chauds est un problème fréquent dans les générateurs photovoltaïques actuels. Il représente un risque pour la durée de vie du module photovoltaïque et diminue son efficacité opérationnelle lorsque des cellules PV sont connectées en série. Dans ce cas, le courant total est limité par celui de la cellule la moins performante ou moins exposée à la lumière. Ainsi, si une cellule reçoit moins de lumière que les autres, elle produit un courant



## Chapitre II : Défaillances liées aux panneaux photovoltaïques

plus faible, phénomène appelé ombrage partiel. Si une cellule est partiellement ombragée, le courant ne peut plus circuler à travers elle. La cellule peut alors chauffer et accumuler le courant, se comportant comme un récepteur. Cela peut entraîner une dissipation de puissance sous forme de chaleur, pouvant dépasser les 100°C, et éventuellement endommager la cellule si le point chaud est causé par un shunt (court-circuit d'une cellule) ou une erreur dans l'interconnexion entre les cellules, provoquant également un shunt [27].

Le point chaud est souvent associé à une erreur de fabrication de la cellule ou du module PV. Il survient lorsque l'une des cellules génère un courant plus faible que les autres (phénomène appelé mismatch). Ce point chaud se manifeste par une cellule fonctionnant à une température plus élevée que les autres. La figure II.1.a peut également être considérée comme une illustration d'une erreur de fabrication du module photovoltaïque. Le hot spot, illustré dans la figure II.1.b, pourrait endommager la cellule ou l'encapsulation en un court laps de temps d'exploitation [27].



**Figure II.1** : Défaut de point chaud [27].

### II.2.3. Jaunissement et brunissement « la décoloration »

La décoloration du module photovoltaïque se manifeste par un changement de couleur du matériau utilisé pour son encapsulation, généralement de l'éthylène vinyle acétate (EVA), ou du matériau adhésif entre le verre et les cellules. Ce changement peut se traduire par un jaunissement ou un brunissement du matériau encapsulant, affectant la transmittance des cellules et donc diminuant la puissance générée par le module [28].

La décoloration peut apparaître dans des zones différentes et non adjacentes d'un même module. Cela peut être dû, d'une part, à des polymères encapsulants d'origines ou de caractéristiques différentes, et d'autre part, à une distribution inégale de l'EVA sur le module. Selon Oreski et Wallner, les principales causes de la décoloration de l'EVA sont les rayons

## Chapitre II : Défaillances liées aux panneaux photovoltaïques

ultraviolets combinés à l'eau à des températures d'exposition supérieures à 50°C, ce qui provoque un changement de la structure chimique du polymère [29].

Ces dernières années, la plupart des publications sur la dégradation des modules PV en silicium cristallin ont principalement porté sur la décoloration de l'EVA [28].



**Figure II.2 :** Modules photovoltaïques avec des cellules décolorées [28].

### II.2.4. Bulle d'air

Ces bulles sont dues à une réaction chimique qui libère des gaz et compromet l'adhérence entre les couches du panneau PV. La formation d'une bulle rend plus difficile la dissipation de la chaleur des cellules, réduisant ainsi le refroidissement et minimisant la durée de vie des PV. Parfois, une bulle ne peut être détectée que par des techniques d'imagerie infrarouge (IR) car elle n'est pas visible lors d'une inspection visuelle seule. Il peut arriver que le détachement de la cellule du verre soit à l'origine de ces bulles. Celles-ci, situées sur la face avant du module, peuvent réduire l'éclairement atteignant le module en réfléchissant une partie de la lumière qui y parvient [30].



**Figure II-3 :** Défaut de bulles d'air [30].

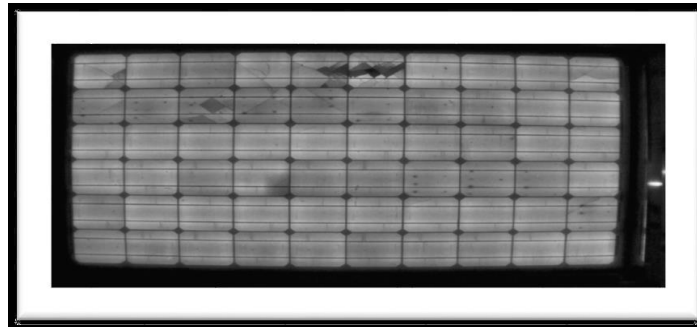
### II.2.5. Fissures dans les cellules

Les fissures représentent un facteur important de dégradation des modules PV. Pour réduire le coût de fabrication des panneaux PV et économiser le silicium, l'épaisseur et la surface des cellules en silicium ont été modifiées (passant de 300  $\mu\text{m}$  à moins de 200  $\mu\text{m}$ ).

## Chapitre II : Défaillances liées aux panneaux photovoltaïques

Cette modification rend les cellules plus fragiles et sensibles aux fractures lors de leur manipulation et de leur stockage [30].

Cependant, le risque de choc électrique et d'humidité augmente. Les cassures, les bris de verre et les fissures sont généralement suivis d'autres types de dégradation tels que la corrosion, la décoloration et la délamination [31].



**Figure 2.4 :** Fissures dans les cellules PV [31].

### II.2.6. Délaminage

Le délaminage résulte de la perte d'adhérence entre les différentes couches du module PV, entraînant le détachement de ces couches. Il peut se produire entre l'encapsulation et les cellules polymères ou entre les cellules et le verre avant. Le délaminage pose un problème majeur, car il peut avoir deux effets : une diminution de la transmission de la lumière, due à une augmentation de la réflexion, ainsi que la possibilité d'une infiltration d'eau à l'intérieur de la structure du module [32].

Le délaminage est plus grave s'il se produit aux extrémités du module, car en plus des pertes de puissance, il présente des risques électriques pour le module et l'installation. La figure II.5 illustre un exemple de la manière dont un décollement important peut endommager un module PV.



**Figure II.5 :** Défaut de délaminage [32].

Jansen et Delahoy ont montré que la pénétration du sel et de l'humidité dans le module photovoltaïque favorise la délamination [33]. D'autre part, ils avancent que la liaison interfaciale peut

## Chapitre II : Défaillances liées aux panneaux photovoltaïques

être chimiquement attaquée par l'acide fluorhydrique formé à partir du fluor et de l'oxyde d'étain présents dans le module.

### II.2.7. Défaut de revêtement anti-reflet (ARC)

En plus des stratégies comme la texturation des surfaces cellulaires, les performances des cellules constituant un module PV peuvent être améliorées par l'ajout d'un revêtement anti-réfléchissant afin de maximiser la lumière atteignant la zone active de la cellule. Lors de l'exposition au soleil, le revêtement anti-reflet (ARC) reçoit un rayonnement qui peut altérer sa couleur, comme illustré à la figure II.6. Les propriétés anti-réfléchissantes peuvent être affectées dans ce cas, ce qui pourrait réduire la quantité de lumière atteignant les cellules par rapport aux prévisions [30].



**Figure II.6 :** Défaillance de revêtement anti-reflet [30].

### II.2.8. Module arraché ou cassé

Les principaux facteurs externes peuvent endommager une cellule solaire et entraîner des panneaux solaires cassés. Les dommages au module interne posent un problème lorsqu'il n'y a pas d'impact externe, comme une tempête endommageant les panneaux solaires. Ce problème peut être causé par une production défectueuse ou une mauvaise sélection d'un ou de tous les composants [33].

Les dommages au module dus à des facteurs externes se produisent généralement pour des raisons météorologiques. Les tempêtes, la grêle, la foudre, les surtensions ou la pression de la neige peuvent endommager un module solaire. De plus, le feu, une chaleur excessive ou même une morsure d'animal peuvent également causer des dommages [33].

L'avantage de ces dommages est qu'ils peuvent souvent être réparés. Cependant, l'ampleur des dégâts causés par des objets volants, des branches cassées, des grêlons de la taille de balles

## Chapitre II : Défaillances liées aux panneaux photovoltaïques

de tennis et des bâtiments effondrés détermine la faisabilité de la réparation. Les tempêtes causent souvent d'énormes dégâts aux panneaux solaires, entraînant des bris de verre, des microfissures, des ruptures de cellules et des cadres de module rayés [33].



Figure II.7 : Module cassé.

### II.2.9. Défauts de la diode de by-pass et diode anti-retour

La diode de by-pass est une des solutions pour protéger les cellules de l'ombrage partiel, en évitant la polarisation inverse, le hot spot et la destruction du module. Cette diode est généralement placée en parallèle avec une branche de dix-huit cellules. Plusieurs défauts peuvent survenir, généralement dus à des erreurs de fabrication, comme une rupture de la connexion de la diode. Dans un panneau photovoltaïque, on peut ainsi trouver une diode déconnectée, une diode équivalente à une impédance quelconque, une diode court-circuitée ou une diode inversée. De la même manière, la diode anti-retour est exposée aux mêmes types de défauts : court-circuit, impédance quelconque, circuit ouvert et diode inversée [30].

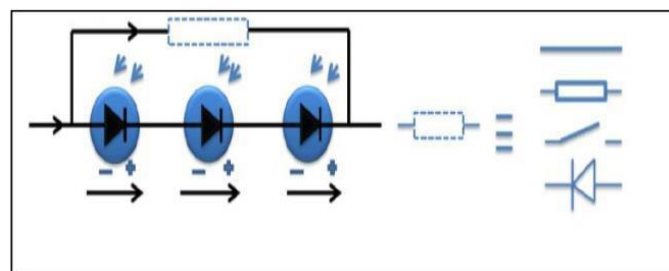


Figure II.8 : Défaut de la diode de by-pass [30].

### II.2.10. L'augmentation de la résistance série $R_s$

La résistance en série est l'un des facteurs les plus importants influençant les performances des cellules solaires. L'augmentation de la résistance en série est généralement causée par la corrosion des connexions entre deux modules PV, une vis de connexion mal serrée, ou la

## Chapitre II : Défaillances liées aux panneaux photovoltaïques

corrosion des points de soudure entre les cellules. En fonctionnement normal, cette résistance de connexion est quasi nulle. Cependant, la valeur de cette résistance peut augmenter dans plusieurs situations anormales. Au fur et à mesure que la résistance en série augmente, le facteur de forme diminue, ce qui conduit à une diminution de l'efficacité des cellules [30].

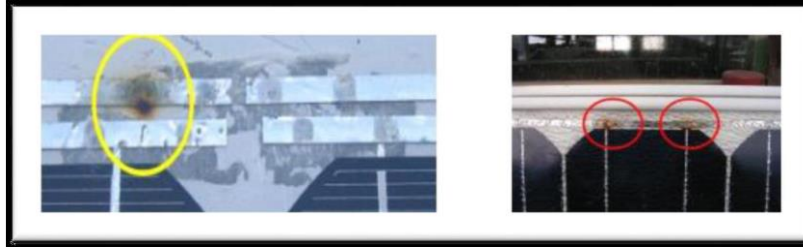


Figure II.9 : Défaut d'augmentation de la résistance  $R_s$  [30].

### II.2.11. Diminution de la résistance parallèle $R_p$

Les pertes d'énergie importantes causées par la présence d'une résistance shunt  $R_p$  sont généralement dues à une mauvaise conception des cellules solaires. Cette résistance caractérise un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière, c'est-à-dire les bornes opposées d'une photopile. Elle est généralement bien supérieure à la résistance série  $R_s$ . Une résistance shunt trop faible aura un impact sur la tension de circuit ouvert de la photopile. En outre, une photopile avec une résistance shunt trop faible ne produira plus de tension sous faible éclairement [27].

### II.2.12. Le DIP - Dégradation Potentielle Induite

Cette « nouvelle maladie » du module photovoltaïque, mise en évidence en 2010, commence à toucher de plus en plus de modules photovoltaïques. Le premier symptôme de ce phénomène est une dégradation rapide et inexplicée de la puissance. Cette diminution du rendement des modules, pouvant atteindre plus de 20 % en quelques mois, n'est ni due à un vieillissement classique des modules, ni à une mauvaise installation du module [33].

Ce phénomène connu sous le nom de dégradation Potentielle Induite (PID) se caractérise par la dégradation progressive des performances des modules photovoltaïques, à base de silicium cristallin, dus à la présence d'un courant électrique induit au cœur même du module [33].

Hacke a montré que le DIP était plus fréquent dans les climats humides que dans les milieux chauds et secs [33].

Les différents travaux ont montré que les principaux facteurs favorisant le PID sont la tension du système dans lequel le module est utilisé, l'humidité et la température de fonctionnement [33].

## Chapitre II : Défaillances liées aux panneaux photovoltaïques

### II.2.13. Autres Défaits

Dans un string PV, on peut rencontrer plusieurs défauts tels que :

- Défaut de connexion du module : module court-circuité, module connecté en parallèle avec une impédance, inversion de la polarité du module ou module arraché.
- Défauts dans la boîte de jonction PV : rupture du circuit électrique, court-circuit du circuit électrique, destruction de la liaison, corrosion des connexions. Les insectes, la poussière et/ou l'humidité à l'intérieur des boîtes.

### II.3. Classification des défauts pour la modélisation

Les défauts présentés dans le tableau II.1 ont été classés en fonction de leur emplacement dans une installation PV (panneau, connexion, câblage, système de protection). Cependant, selon la démarche de modélisation retenue, nous cherchons à classer les défauts selon l'étape à laquelle ils interviennent et s'ils peuvent modifier le comportement du composant à cette étape (cellule, groupe de cellules, modules) [31].

Composant du champ	Nature des défauts	Dénomination de défauts
Cellules	<ul style="list-style-type: none"><li>• Module arraché ou cassé</li><li>• Pylônes, cheminée, sable, neige etc.</li><li>• Echauffement des cellules</li><li>• Dégradation des interconnexions</li><li>• Fissure</li></ul>	Défaut de mismatch et l'effet d'ombrage
Groupes de cellules	<ul style="list-style-type: none"><li>• Absence de diodes</li><li>• Inversion de la polarité des diodes</li><li>• Diode mal connectée</li><li>• Diode court-circuitée</li></ul>	Défaut de diode de by-pass
Module	<ul style="list-style-type: none"><li>• Modules court-circuités</li><li>• Modules shuntés</li></ul>	Défaut de module

**Tableau II.1** : Classification de défauts.

## Chapitre II : Défaillances liées aux panneaux photovoltaïques

Nous présentons ci-dessous (tableau II.2) l'impact des défauts sur les différents paramètres.

NATURE DES DÉFAUTS	PARAMÈTRES AFFECTÉS
<ul style="list-style-type: none"><li>• Module arraché ou cassé</li><li>• Ombrage : Feuille d'arbre, déjections, Sable, pollution, neige etc.</li></ul>	Variation de photo courant ( $I_{ph}$ )
<ul style="list-style-type: none"><li>• Echauffement des cellules</li></ul>	Variation de la température (T)
<ul style="list-style-type: none"><li>• Dégradation des interconnexions Fissure</li><li>• Corrosion des liaisons entre cellules</li></ul>	Variation de la résistance série ( $R_s$ )
<ul style="list-style-type: none"><li>• Modules de performances différentes</li><li>• Détérioration des cellules</li><li>• Pénétration de l'humidité</li></ul>	Variation de tous les paramètres des cellules

**Tableau II.2 :** Impact des différents défauts sur les paramètres de la cellule.

### II.4. Défauts dans les systèmes photovoltaïques

Les défauts que l'on peut retrouver sur une installation photovoltaïque, surviennent autant lors de sa conception, de son installation, que lors de son exploitation. Ils sont alors responsables d'une baisse voire d'un arrêt total de la production photovoltaïque. Une bonne connaissance des différents défauts possibles permet d'assurer une bonne maintenance du système photovoltaïque [34].

Les défauts sont classifiés selon la fonction des différents composants constituant l'installation PV. Sept groupes de défauts ont été formés :

- Défauts dans le générateur photovoltaïque.
- Défauts dans la boîte de jonction.
- Défauts dans le système de câblage.
- Défauts dans le système de protection.
- Défauts de l'onduleur.
- Défauts dans le système d'acquisition des données.

#### II.4.1. Défauts dans le générateur photovoltaïque

Les générateurs photovoltaïques (ou panneaux solaires) peuvent présenter divers défauts qui impactent leur performance et leur durabilité. Voici quelques-uns des défauts les plus courants représentés dans le tableau II.3.



## Chapitre II : Défaillances liées aux panneaux photovoltaïques

Défauts	Conséquences
Salissure (pollution, sable, neige)	Perte de puissance
Inversion des liaisons de sortie	Module mal câblé, diminution des Performances
Air marin, Couple galvanique dû au mélange de matériau de la jonction module/support	Corrosion
Dégradation des modules par Vandalisme	Diminution des performances, Non fonctionnement de l'installation
Vol des modules	Non fonctionnement de l'installation
Mauvaise orientation et/ou inclinaison des modules	Ombrage, diminution des performances
Module mal ou pas ventilé	Échauffement
Module mal fixé	Déplacement du module, diminution des Performances
Modules non câblés	Diminution des performances
Fissure	Perte d'étanchéité, détérioration des cellules, diminution des performances
Rouille par infiltration d'eau	Perte d'étanchéité, détérioration des Cellules
Mauvaise isolation entre modules et onduleur	Court-circuit, destruction du module, Incendie
Détérioration des joints d'étanchéité	Perte d'étanchéité, détérioration des Cellules
Déformation du cadre des Modules	Infiltration d'eau
Corrosion du cadre des modules	Perte d'étanchéité, détérioration des Cellules
Délaminage	Diminution des performances, échauffement
Foudre	Détérioration des modules
Tempête, Faiblesse au vent des Structures	Module arraché, cassé
Pénétration de l'humidité	Hot spot, augmentation du courant de fuite, corrosion, perte d'adhérence et d'isolation, diminution de la résistance de CC à la terre
Foudre sur l'installation	Destruction des modules
Modules de performances Différentes	Diminution des performances du champ
Sortie par le bas des boîtes de connexions impossibles	Mauvais câblage
Support mécanique des modules inadéquat ou mal posé	Efforts mécaniques importants sur les Modules
Inclinaison des modules trop Faible	Stagnation d'eau, dépôt de terre, prolifération de champignons, problème d'étanchéité
Panneaux inaccessibles	Panneaux inaccessibles

## Chapitre II : Défaillances liées aux panneaux photovoltaïques

Chaleur	Échauffement, détérioration des joints
---------	--

**Tableau II.3.** Différents défauts dans le générateur photovoltaïque.

### II.4.2. Défauts dans la boîte de jonction

Une boîte de jonction est une protection pour le câblage qui lie le module PV aux bornes extérieures des autres dispositifs de système PV. Nous présentons ci-dessous (tableau II.4) Différents défauts dans la boîte de jonction et leurs conséquences.

Défauts	Conséquences
Absence de parafoudre ou 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

**Tableau II.4.** Différents défauts dans la boîte de jonction.

### II.4.3. Défauts dans le système de câblage

Les défauts dans un système de câblage peuvent varier selon le type de système et son usage. Voici quelques défauts courants représenté dans le tableau II.5

Défauts	Conséquences
Mauvais dimensionnement des câbles	Chute de tension >3 %, échauffement
Connexion desserrée ou Cassée	Arc électrique, incendie, destruction de la boîte de jonction, destruction des diodes
Principe de câblage en goutte d'eau non respecté	Mauvais câblage
Câbles inter module de section trop faible par rapport au presse-étoupe	Corrosion des contacts, rupture du circuit Electrique
Bornes rouillées	Faux contacts, circuit ouvert, arc Electrique
Câbles non fixes	Boucle de câblage, circuit ouvert

## Chapitre II : Défaillances liées aux panneaux photovoltaïques

Mauvais câblage	Court-circuit, claquage des diodes antiretour, destruction des connecteurs (circuit ouvert), aléas de fonctionnement sur disjoncteur
Toron	Boucle électromagnétique
Câbles d'arrivée des sous-champs entamés lors du dénudage	Mauvais câblage, faux contacts, circuit ouvert, arc électrique
Absence de graisse de Silicone	Humidité
Câble mal dénudé	Mauvais câblage, faux contacts, circuit ouvert, arc électrique
Câble rongé par des rats	Faux contacts, circuit ouvert, arc électrique
Modification du câblage par l'utilisateur non compétent	Mauvais câblage, faux contacts, circuit ouvert, arc électrique
Boîte de connexion décollée	Connexion des cellules en série Endommagée

**Tableau II.5.** Différents défauts dans le système de câblage.

### II.4.4. Défauts dans le système de protection

Les défauts dans un système de protection peuvent se manifester de plusieurs façons et affecter la sécurité et la performance du système. Voici quelques types de défauts courants et leurs conséquences possibles représentés dans le tableau II.6.

Défauts	Conséquences
Protections inappropriées ou mal dimensionnées	Court-circuit, hot spot, incendie, arrêt de l'installation
Interrupteur, disjoncteur Inapproprié	Arc électrique, incendie, destruction à l'ouverture
Disjoncteur différentiel non conforme à la norme	Non déclenchement, tension entre neutre et terre
Parafoudre non connecté à la Terre	Pas de protection
Impossibilité de déconnecter les modules par branche	Problème de sécurité
Pas de possibilités de sectionnement extérieur au coffret	Problème de sécurité
Mauvaise dissipation de la chaleur des diodes	Échauffement
Sous dimensionnement des diodes de bypass	
Absence de protection contre les courants inverses	Hot spot, destruction des diodes, échauffement de la boîte de jonction
Diode mal connectée	Non fonctionnement des diodes, absence de protection contre les courants inverses
Inversion de la polarité des diodes au montage	Non fonctionnement des diodes, court-circuit, hot spot
Phénomènes de résonance	Non fonctionnement des fusibles et des protections de surtension
Dégradation à cause de la Lumière	Non fonctionnement des diodes de Bypass

## Chapitre II : Défaillances liées aux panneaux photovoltaïques

Échauffement des diodes placées dans un endroit mal ventilé	Température de destruction atteinte
Vieillessement des Disjoncteurs	Non fonctionnement des disjoncteurs

**Tableau II.6.** Différents défauts dans le système de protection.

### II.4.5. Défauts de l'onduleur

Les onduleurs jouent un rôle crucial dans les systèmes photovoltaïques (PV) en convertissant le courant continu (CC) produit par les panneaux solaires en courant alternatif (CA) utilisable par le réseau électrique ou par les appareils domestiques. Cependant, comme tout équipement électronique, les onduleurs peuvent présenter des défauts qui peuvent affecter la performance et la fiabilité du système PV [34]. Voici quelques-uns des défauts courants des onduleurs dans les systèmes photovoltaïques représenté dans le tableau II.7

Défauts	Conséquences
Dégradation à cause de la chaleur	Détérioration de l'onduleur, des Connexions
Faux contact, Fusible fondu, Bobine des filtres, thyristors, capacités en défaut	Arrêt de l'onduleur
Surtension	Déconnexion de l'onduleur
Foudre sur le réseau	Surtension, destruction de l'onduleur
Tension du générateur inférieure à la limite basse de l'onduleur	Déconnexion de l'onduleur
Onduleur sous dimensionné	Destruction de l'onduleur
Problème d'interface avec le réseau	Découplage de l'onduleur
Défaut d'isolement	Détérioration de l'onduleur
Surchauffe des onduleurs	Diminution des performances
Onduleur installé dans un lieu non Etanche	Panne de l'onduleur
Onduleur mal fixé	Chute de l'onduleur
Onduleur surdimensionné	Perte de puissance, diminution des performances
Visserie et bouton de commande Oxydés	Réglage impossible
Mauvais choix de la tension nominale d'entrée	Diminution des performances
Pile de sauvegarde HS	Perte de donnée
Témoins de défaut d'intensité allumé en permanence	Mauvaise information sur l'intensité
Onduleur non mis à la terre	Disjoncteur différentiel non Actif
Perte de la mémoire (mauvaise manipulation du technicien)	Perte de données
Afficheur de cristaux liquide endommagé ou illisible	Pas d'information sur le Fonctionnement

**Tableau II.7.** Différents défauts de l'onduleur.

## Chapitre II : Défaillances liées aux panneaux photovoltaïques

### II.4.6. Défauts dans le système d'acquisition des données

Les systèmes photovoltaïques (PV) dépendent d'un système d'acquisition de données pour surveiller et optimiser leur performance. Cependant, plusieurs défauts peuvent survenir dans ce processus, compromettant l'efficacité et la fiabilité du système [34]. Voici quelques-uns des principaux défauts représentés dans le tableau II.8.

Défauts	Conséquences
Coupure de courant	Perte de données
Sonde de température non câblée	Mesure impossible
Sonde d'ensoleillement non câblée	
Défaut de paramétrage	Enregistrement de fausses Données
Mauvais câblage des shunts de mesure	Mesure impossible ou Erronée
Afficheur de données mal placé (trop haut)	Données non visibles
Carte électronique mal positionnée	Touches inactives, défaut de Commande
Non configuré pour l'acquisition des Données	Pas de donnée enregistrée
Armoire fermée par le service de maintenance ou présence d'un code	Lecture des données par l'exploitant impossible
Bornier de mesures et de sonde de température trop proches	Câblage difficile, risque de court-circuit
Acquisition de données vierge	Aucune information Enregistrée
Mesure de données non nulles alors que système PV à l'arrêt	Données non fiables

**Tableau II.8.** Différents défauts dans le système d'acquisition des données.

### II.5. Systèmes de diagnostic

Les systèmes de diagnostic dans les systèmes photovoltaïques (PV) jouent un rôle crucial pour assurer l'efficacité, la fiabilité et la longévité des installations solaires. Voici les étapes importantes de diagnostic pour les systèmes PV :

#### II.5.1. Etape de diagnostic

Tout système est susceptible de présenter des symptômes révélateurs de défauts. Le défi est de pouvoir détecter et localiser ces défauts de manière automatique [35]. Le principe général de surveillance d'un système autonome peut être décrit par la figure II.10. Les étapes sont détaillées comme suit [35] [36]:

## Chapitre II : Défaillances liées aux panneaux photovoltaïques

- **Prise de mesures** : la mesure effectuée sur le système est la seule information permettant de connaître l'évolution du système. Elle se fait à l'aide d'un capteur approprié et nécessite souvent une étape de filtrage.
- **Détection de défauts** : souvent, il s'agit d'un test statistique traitant un signal susceptible de contenir des informations sur l'état du système à surveiller.
- **Localisation de défauts** : c'est souvent une tâche liée aux caractéristiques du système. Il s'agit d'un test qui traite l'information sur l'origine de la provenance du défaut.
- **Identification de défauts** : Il s'agit de caractériser le défaut, d'estimer son importance et son comportement dans le temps.
- **Décision** : c'est une décision sur le type d'action à prendre pour rétablir de système.
- **Correction** : c'est l'action d'arrêter le système et de procéder à une maintenance corrective.
- **Adaptation** : c'est l'action de reconfiguration et d'adaptation de la consigne à injecter dans le système.

### II.5.2. Objectifs du diagnostic

- Réduction des arrêts imprévus
- Réduction des pertes de production
- Eviter les graves dommages
- Planification optimale des opérations de maintenance et limitation des coûts de réparation.

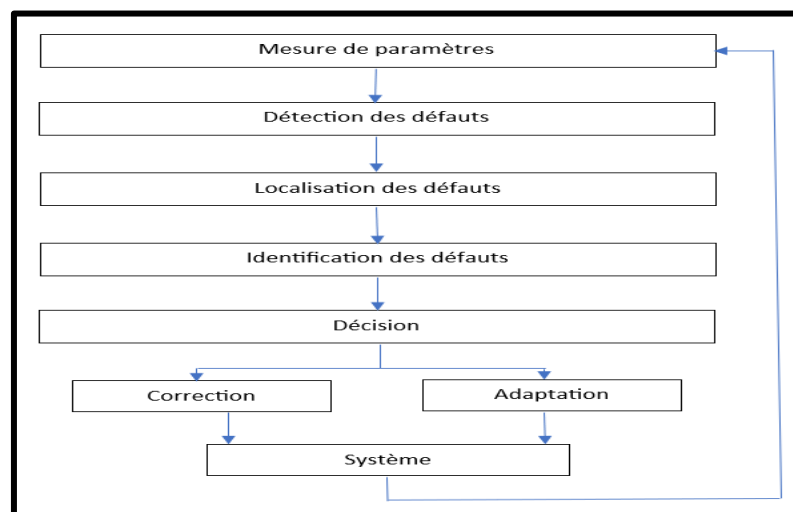


Figure II.10 : Organigramme de diagnostic des défauts.

## Chapitre II : Défaillances liées aux panneaux photovoltaïques

### II.5.3. Architecture de diagnostic

Les principaux objectifs de la surveillance du système PV sont la détection des défaillances, l'évaluation des performances et l'assurance du bon fonctionnement du système. Cela nécessite des données électriques et environnementales des panneaux photovoltaïques [37]. Pour atteindre ces objectifs, des composants dédiés tels que des capteurs, des systèmes d'acquisition de données, des systèmes de communication de données, des logiciels spécialisés et des algorithmes d'analyse de données sont utilisés [38].

La taille du système, son fonctionnement et les coûts d'entretien sont des paramètres déterminants pour choisir le système de surveillance approprié. Ainsi, la taille de l'installation photovoltaïque est cruciale dans la conception du système de surveillance. L'utilisation de capteurs câblés est économique et moins complexe pour les petites installations PV. En revanche, les réseaux sans fil sont plus pratiques pour les installations photovoltaïques de taille moyenne à grande [39].

Selon la figure II.11, le système global de diagnostic peut être divisé en trois niveaux. Dans le premier niveau, on trouve les capteurs, qui sont les principaux composants permettant d'obtenir une base de données précise et fiable [39].

Le deuxième niveau est celui de l'acquisition de données, qui inclut la mesure et le prétraitement des signaux mesurés (pré-processing). À ce niveau, un matériel spécifique ainsi qu'un réseau de communication sont nécessaires [39].

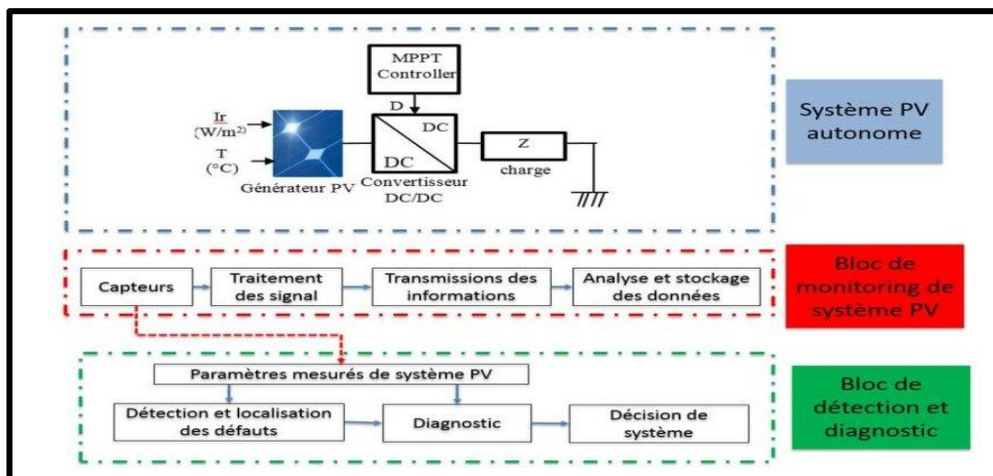


Figure II.11 : Schéma global de détection et de diagnostic des défauts [39].

Le troisième et dernier niveau est le plus flexible. Il consiste à mettre en œuvre des techniques d'analyse qui permettent d'évaluer et d'estimer les performances de ce système photovoltaïque [39].

### II.5.4. Méthodes de détection et de diagnostic des défauts d'un système PV

Les conditions climatiques (effets d'ombrage, encrassement des modules), les conditions d'exploitation (vieillesse des modules PV) ainsi que les défauts de fabrication sont les principales causes des anomalies observées dans les différents niveaux du système photovoltaïque : du module, au câblage et à la protection, jusqu'aux convertisseurs de puissance [40]. Comme pour tous les systèmes industriels, les systèmes de surveillance jouent un rôle essentiel dans les installations photovoltaïques, car ils assurent le contrôle et la détection des défauts [40]. Tout est résumé dans les figures II. 12 et II. 13 suivantes :

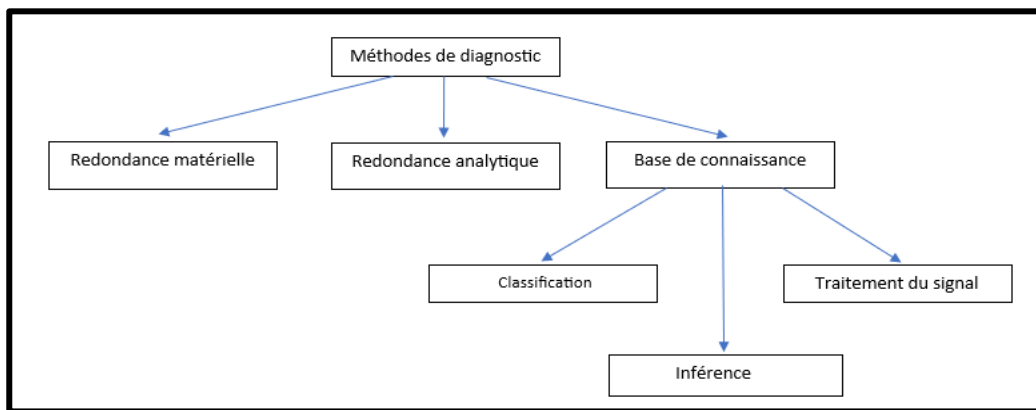


Figure II.12 : Différentes méthodes de diagnostic

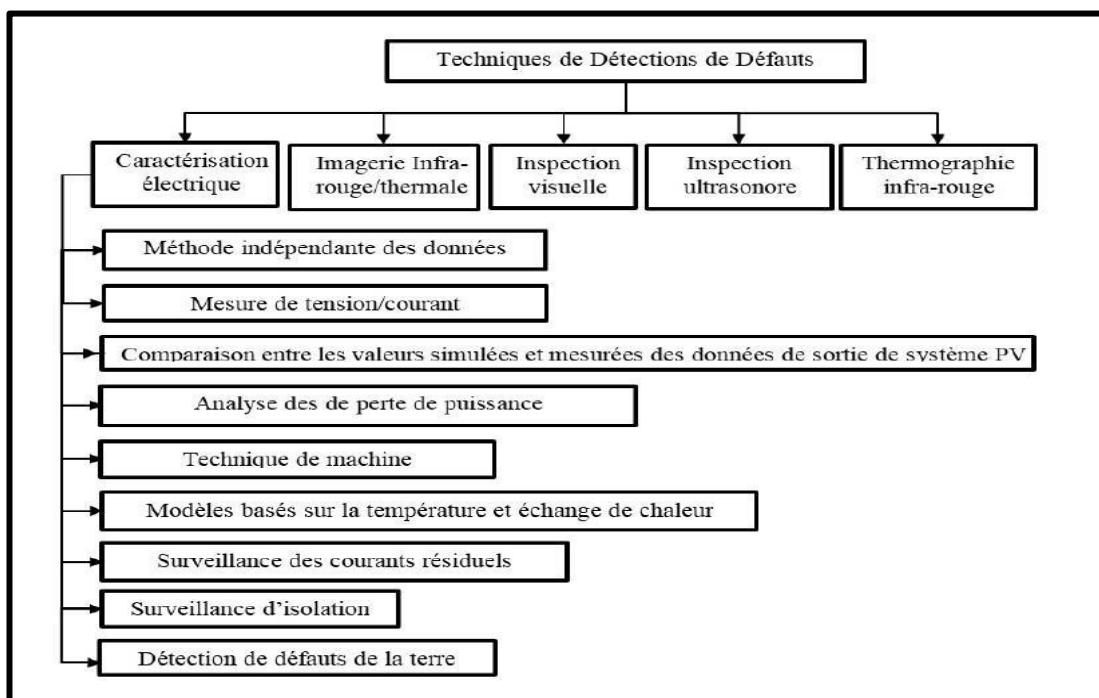


Figure II.13 : Techniques de détection de défauts pour les systèmes PV autonomes [39].



### II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents défauts affectant les panneaux PV. Nous avons montré que ces défauts peuvent être généralement classés en défauts de fabrication, ainsi qu'en défauts dus aux conditions climatiques et d'exploitation. Nous avons également observé que la plupart des défauts électriques, tels que l'augmentation de la résistance série, sont souvent influencés par les conditions climatiques.

Nous avons décrit les divers défauts rencontrés en suivant la hiérarchie des étapes de modélisation proposée (cellule, groupe, string et champ), ainsi que les conséquences potentielles de ces défauts.

Dans le chapitre suivant, Nous présenterons et discuterons des résultats des essais pratiques et de simulations menées sur un panneaux solaires avec plusieurs cas de défauts (propre, ombrages et salissures).



# **Chapitre III : Évaluation des Défauts et de Leur influence sur les Panneaux PV**

## **Chapitre III**

### **Évaluation des Défauts et de leur influence sur les Panneaux PV**

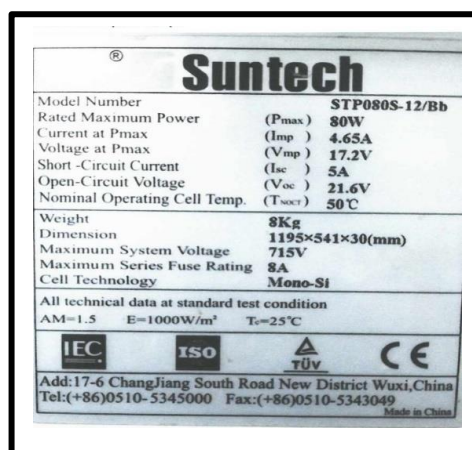
# Chapitre III : Évaluation des Défauts et de Leur influence sur les Panneaux PV

## III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons certains défauts rencontrés dans un système photovoltaïque, plus précisément dans un panneau photovoltaïque. Nous discuterons également des résultats obtenus lors de la caractérisation de ces défauts à l'aide de Matlab-Simulink, en utilisant un modèle de panneau de 80 Wc que nous avons utilisé dans nos essais pratiques.

## III.2. Partie simulation sous Matlab Simulink

La modélisation du panneau photovoltaïque est essentielle pour comprendre et prédire son comportement sous différentes conditions d'exploitation. Dans ce chapitre, nous nous basons sur un panneau de 80 Wc dont les caractéristiques électriques sont présentées sur la figure III.1 suivante. Les paramètres clés incluent la tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ), le courant de court-circuit ( $I_{sc}$ ), la tension à la puissance maximale ( $V_{mp}$ ), le courant à la puissance maximale ( $I_{mp}$ ), et le facteur de forme (FF). Ces valeurs sont utilisées pour créer un modèle précis dans Matlab-Simulink, permettant de simuler la performance du panneau sous diverses conditions d'ensoleillement et de température. Le modèle ainsi obtenu sert à analyser les impacts de quelques défauts identifiés, tels que les ombrages partiels et les augmentations de la résistance série, sur le rendement global du panneau. Les résultats de ces simulations fournissent des insights précieux pour l'amélioration de la conception et de la maintenance des systèmes photovoltaïques.



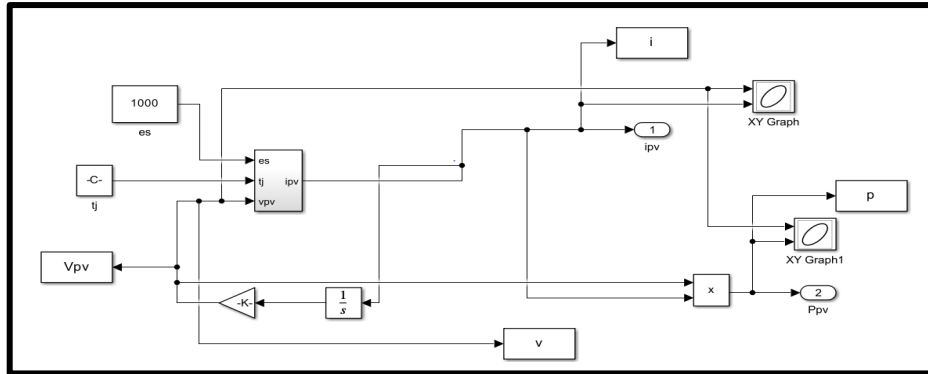
Suntech	
Model Number	STP080S-12/Bb
Rated Maximum Power	( $P_{max}$ ) 80W
Current at Pmax	( $I_{mp}$ ) 4.65A
Voltage at Pmax	( $V_{mp}$ ) 17.2V
Short-Circuit Current	( $I_{sc}$ ) 5A
Open-Circuit Voltage	( $V_{oc}$ ) 21.6V
Nominal Operating Cell Temp.	( $T_{soct}$ ) 50°C
Weight	8Kg
Dimension	1195×541×30(mm)
Maximum System Voltage	715V
Maximum Series Fuse Rating	8A
Cell Technology	Mono-Si
All technical data at standard test condition	
AM=1.5	E=1000W/m <sup>2</sup> T <sub>c</sub> =25°C
IEC ISO TÜV CE	
Add:17-6 ChangJiang South Road New District Wuxi,China	
Tel:(+86)0510-5345000 Fax:(+86)0510-5343049	
Made in China	

Figure III.1 : Fiche signalétique du panneau utilisé.

# Chapitre III : Évaluation des Défauts et de Leur influence sur les Panneaux PV

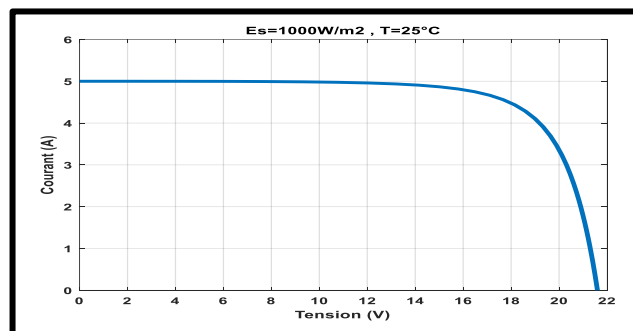
## III.2.1. Simulation du GPV en fonctionnement sain

Nous avons réalisé le modèle d'un panneau photovoltaïque sous Matlab pour la Simulation comme montre la figure III.2.

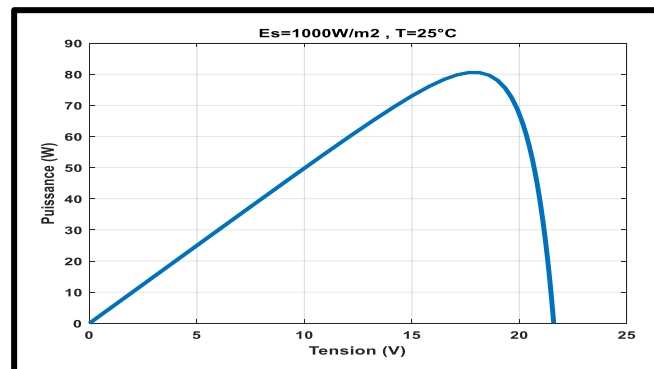


**Figure III.2 :** Modèle d'un panneau photovoltaïque sous Matlab Simulink.

Les résultats de simulation des caractéristiques (I-V) et (P-V) en l'absence de défauts sont présentés dans les Figures III.3 et III.4 suivantes :



**Figure III.3 :** Caractéristique (I-V) d'un module PV en fonctionnement sain sous Matlab Simulink.



**Figure III.4 :** Caractéristique (P-V) d'un module PV en fonctionnement sain.

## Chapitre III : Évaluation des Défauts et de Leur influence sur les Panneaux PV

A partir de La caractéristique (I-V) et (P-V), nous pouvons tirer les points particuliers suivants

- Le courant de court-circuit  $I_{cc}=5A$ .
- La tension de circuit ouvert  $V_{co}=21.6V$ .
- Le point de puissance maximale  $P_{max}=80W$ .

### III.2.2. Simulation du GPV en fonctionnement défaillant

Dans cette section, nous modélisons les défauts d'ombrage et de mismatch. L'ombrage étudié ici se produit lorsque certaines cellules d'un panneau photovoltaïque sont couvertes. Cela peut entraîner une baisse significative de la puissance générée par le panneau. Le défaut de mismatch, quant à lui, survient lorsque les cellules photovoltaïques d'un module ne sont pas parfaitement identiques en termes de caractéristiques électriques. Cette disparité peut résulter de variations de fabrication ou de conditions de fonctionnement hétérogènes, affectant ainsi le rendement global du module.

Pour modéliser ces défauts, nous utilisons l'outil de simulation Matlab-Simulink, en intégrant les paramètres caractéristiques des cellules et des modules photovoltaïques. Ces simulations nous permettent d'analyser l'impact de l'ombrage partiel et du mismatch sur la courbe courant-tension (I-V) et la courbe puissance-tension (P-V) des panneaux solaires. Les résultats obtenus offrent une compréhension approfondie des effets de ces défauts et aident à concevoir des stratégies de mitigation pour améliorer l'efficacité des systèmes photovoltaïques.

#### ❖ Défaut d'ombrage

Le modèle du panneau photovoltaïque donné par la figure III.5 permet de simuler le problème d'ombrage partiel (couverture d'un pourcentage de la surface du panneau).

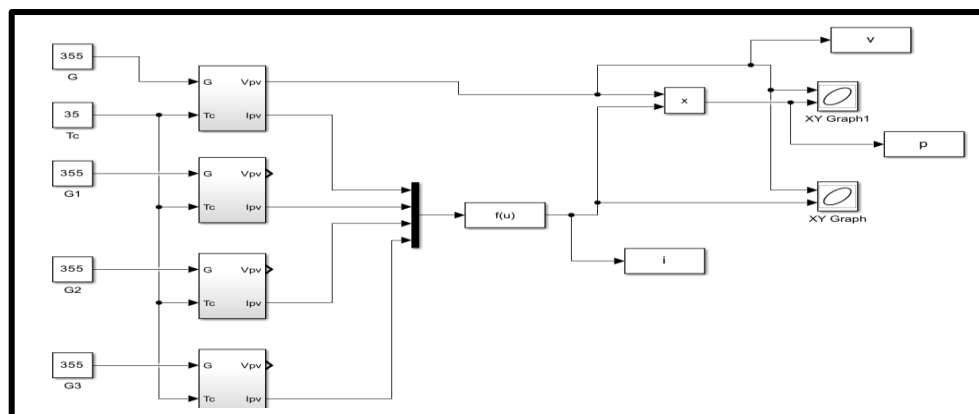


Figure III.5 : Schéma d'un panneau photovoltaïque avec ombrage sous Matlab Simulink.

## Chapitre III : Évaluation des Défauts et de Leur influence sur les Panneaux PV

Les résultats de simulation relatives au défaut de l'effet d'ombrage pour chaque pourcentage (25% , 50% , 75% et 100%) sont donnés dans les figures III.6 et III.7:

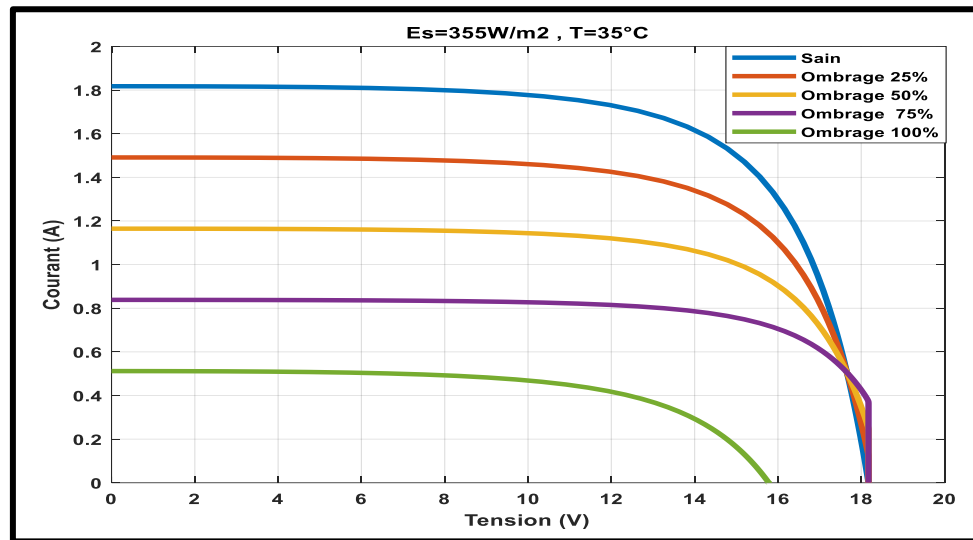


Figure III.6 : Caractéristique (I-V) avec l'effet de l'ombrage.

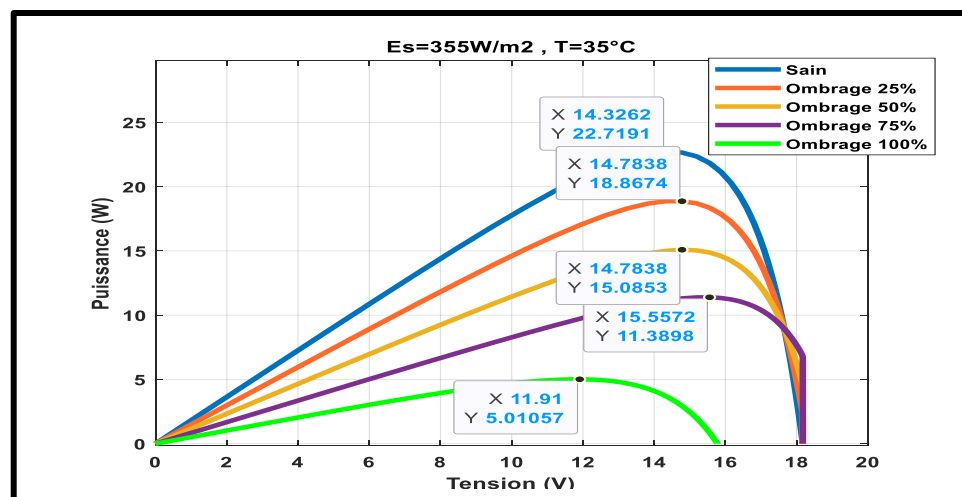


Figure III.7 : Caractéristique (P-V) avec l'effet de l'ombrage.

Figure III.6: Caractéristique (I-V) avec l'effet de l'ombrage

- Ombrage 0% (Sain) : Le courant est le plus élevé ici.
- Ombrage 25% : L'effet de l'ombrage commence à réduire le courant.
- Ombrage 50% : La réduction du courant devient plus significative.
- Ombrage 75% : Le courant diminue encore plus.
- Ombrage 100% : Le courant est le plus bas, montrant une réduction drastique de la performance.

## Chapitre III : Évaluation des Défauts et de Leur influence sur les Panneaux PV

Figure III.7: Caractéristique (P-V) avec l'effet de l'ombrage

- Ombrage 0% (Sain) : La puissance est maximale ici.
- Ombrage 25% : La puissance diminue par rapport à l'état sain.
- Ombrage 50% : Une baisse significative de la puissance est observée.
- Ombrage 75% : La puissance continue de baisser fortement.
- Ombrage 100% : La puissance est minimale, démontrant l'impact négatif total de l'ombrage.

### ❖ Défaut de Mismatch type $R_s$

Pour modéliser l'effet de variation de la résistance  $R_s$ , on utilise le modèle représenté dans la figure III.2 en variant la résistance  $R_s$  selon les valeurs données dans la légende de la figure III.8.

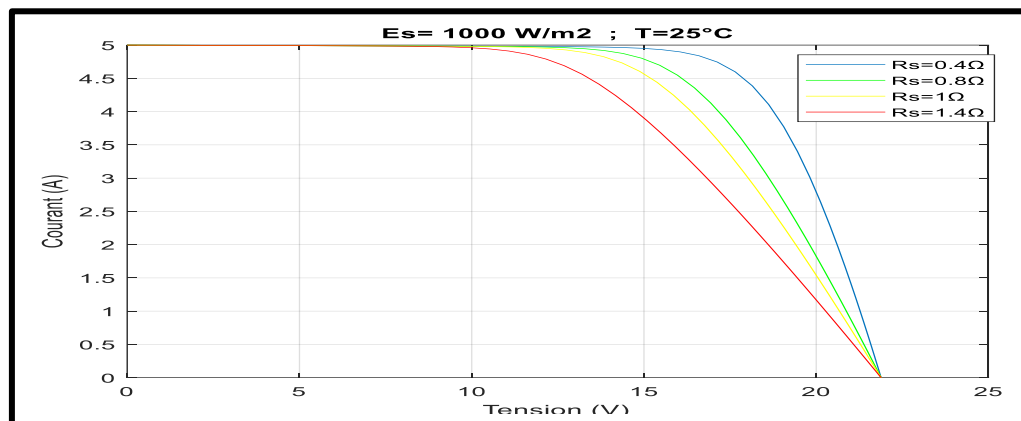


Figure III.8 : Caractéristiques (I-V) avec défaut de mismatch type  $R_s$ .

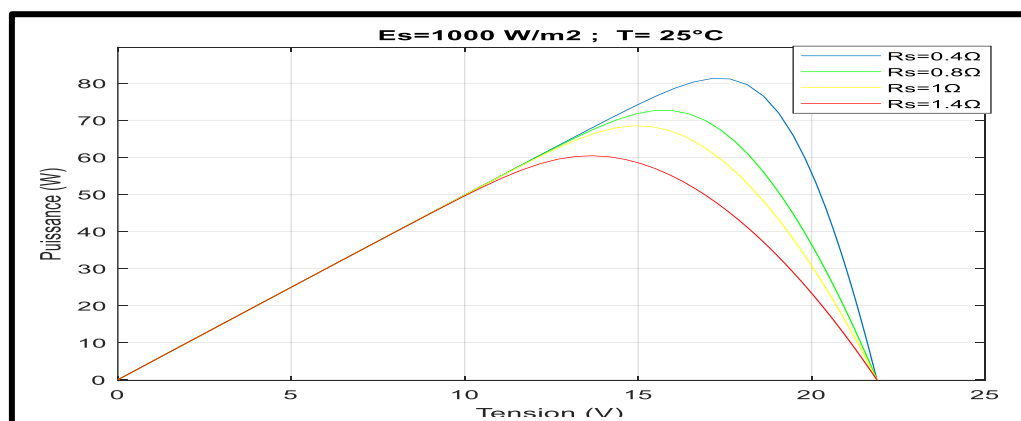


Figure III.9 : Caractéristiques (P-V) avec défaut de mismatch type  $R_s$ .

## Chapitre III : Évaluation des Défauts et de Leur influence sur les Panneaux PV

La Figure III.8 et III.9 illustrent le cas de défaut de mismatch dû à la dispersion de la résistance série. On observe que la perte de tension pour un courant donné augmente à mesure que la résistance série augmente. Au-delà d'une certaine limite, cette perte de tension peut devenir suffisamment importante pour rendre la tension du groupe négative et activer la diode de bypass en mode passant. On remarque également que chaque augmentation de la résistance série entraîne une diminution de la puissance du panneau, et inversement.

<b>Rs</b>	<b>Icc</b>	<b>Vco</b>	<b>Pmax</b>
<b>0.40</b>	5	21.85	80
<b>0.8</b>	5	21.85	72.1
<b>1</b>	5	21.85	68
<b>1.4</b>	5	21.85	60

**Tableau III.1.** Résumé des résultats trouvés dans le cas de la variation de la résistance série.

### III.3. Partie pratique

Nous avons effectué différents essais avec le panneau photovoltaïque de 80 Wc de type Suntech STP080S-12/Bb à l'extérieur du nouveau laboratoire L.T.I.I. Le panneau a été exposé plein sud avec un angle d'inclinaison de 45°.

#### III.3.1. Description de la plateforme expérimentale

Comme montré dans la figure III.10, le matériel utilisé est constitué d'un panneau photovoltaïque de 80 Wc de type Suntech STP080S-12/Bb, d'une résistance variable, de voltmètres et ampèremètres, d'un solarimètre et d'un luxmètre.



## Chapitre III : Évaluation des Défaits et de Leur influence sur les Panneaux PV



Figure III.10 : Matériels utilisés.

Le schéma électrique du montage réalisé est donné par la figure III.11 suivantes :

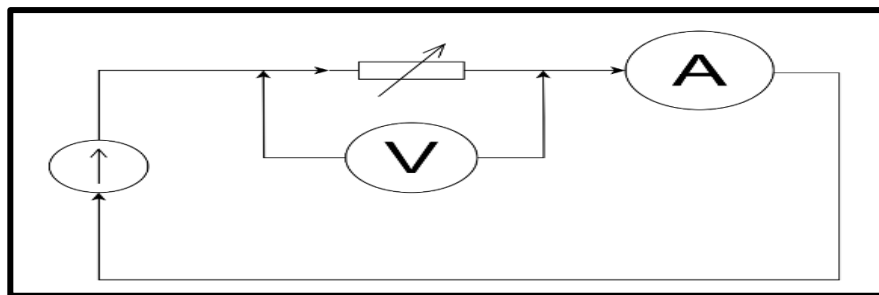


Figure III.11 : Schéma électrique du montage utilisé.

Les paramètres du panneau étudié sont donnés sur le tableau suivant :

$P_{max}$ (W)	$I_{mpp}$ (A)	$V_{mpp}$ (V)	$I_{cc}$ (A)	$V_{co}$ (V)	$\alpha_{cc}$ (mA)	$\beta_c$ (mV)	$T_{stc}$ (°C)
80	4.65	17.2	5	21.6	3	-150	25

Tableau III.2. Les paramètres du panneau

Dans cette partie du travail, nous nous intéressons aux défauts d'ombrage et de salissure. Nous avons réalisé différents essais sur un panneau ombré à 25%, 50%, 75%, et 100%. Les figures suivantes illustrent un panneau ombré à divers pourcentages, un panneau pollué par du sable et de la terre, ainsi qu'un panneau couvert par des feuilles d'arbres.

## Chapitre III : Évaluation des Défaits et de Leur influence sur les Panneaux PV

### III.3.2. Présentation des différents essais réalisés

Nous avons effectué les tests suivants :

- **Test N°1** : Température  $T=41.6^{\circ}\text{C}$ , Ensoleillement  $E_s=482\text{W/m}^2$ . Effectué le 26/05/2024 à 13h30mn.
- **Test N°2** : Température  $T=35^{\circ}\text{C}$ , Ensoleillement  $E_s=355\text{W/m}^2$ . Effectué le 24/06/2024 à 11h00mn.

#### ❖ Défaut d'ombrage

Nous avons conduit des tests d'ombrage à différents pourcentages (25%, 50%, 75%, et 100%), comme illustré dans la figure III.12, et nous avons déduit les caractéristiques (I-V) et (P-V) en utilisant la méthode voltampèremétrique. Les résultats de ces mesures sont présentés de manière détaillée dans les figures III.13 et III.14.



Figure III.12 : Défauts d'ombrage avec différents pourcentages.

## Chapitre III : Évaluation des Défauts et de Leur influence sur les Panneaux PV

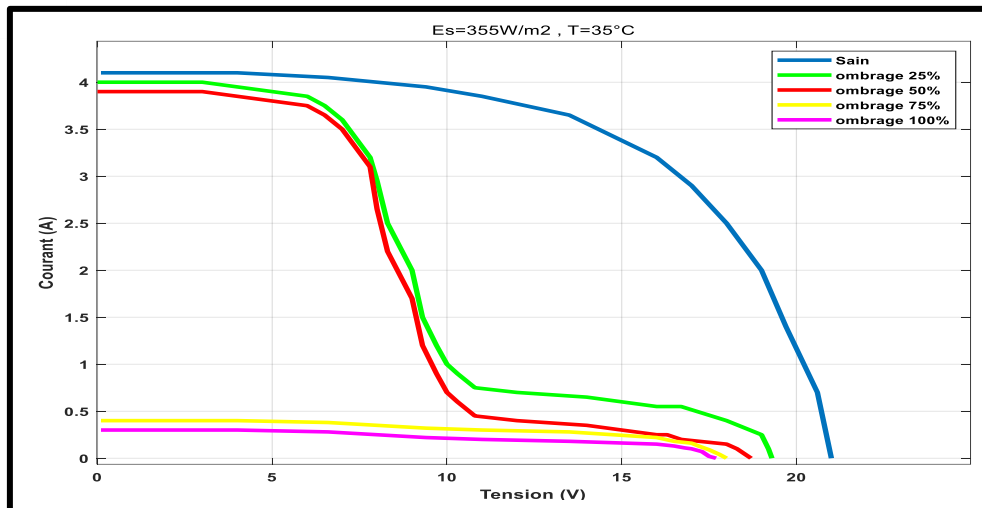


Figure III.13 : Caractéristiques (I-V) pour défaut de l'ombrage.

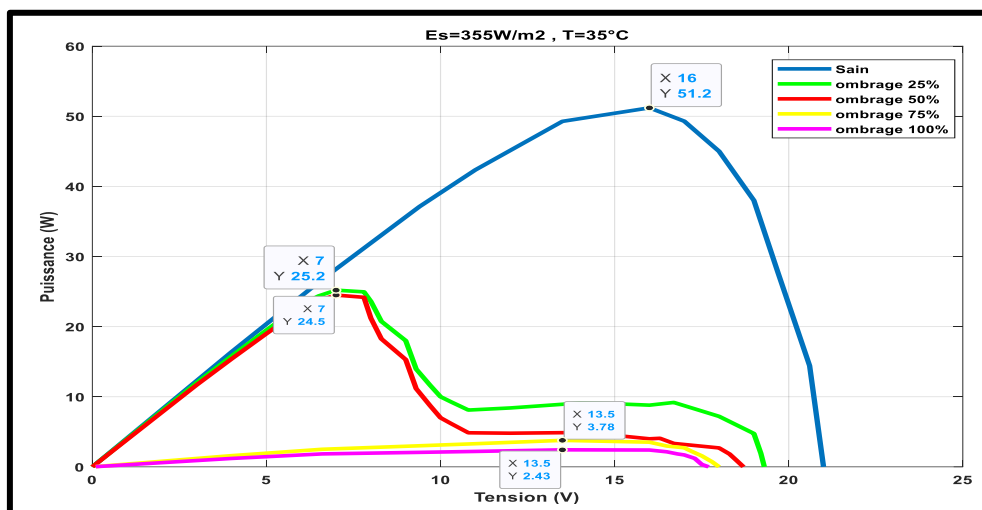


Figure III.14 : Caractéristiques (P-V) pour défaut de l'ombrage.

- La figure III.13 illustre les courbes courant-tension (I-V) pour différents niveaux d'ombrage. Les courbes montrent une diminution du courant maximal ( $I_{\max}$ ) avec l'augmentation de l'ombrage, ce qui est conforme aux attentes théoriques.
- La figure III.14 présente les courbes puissance-tension (P-V) pour les mêmes niveaux d'ombrage que la figure précédente. Comme pour les courbes I-V, on observe une réduction de la puissance maximale ( $P_{\max}$ ) avec l'augmentation de l'ombrage.

### ❖ Défaut de couverture par des feuilles d'arbre

Nous avons effectué un essai pour chaque niveau de couverture aléatoire avec des feuilles d'arbre, comme le montre la figure III.15. Les mesures ont été réalisées avec la méthode voltampèremétrique pour obtenir les caractéristiques (I-V) et (P-V), présentées dans les figures III.16 et III.17.

## Chapitre III : Évaluation des Défaits et de Leur influence sur les Panneaux PV



Figure III.15. Défaut de couverture par les feuilles d'arbre.

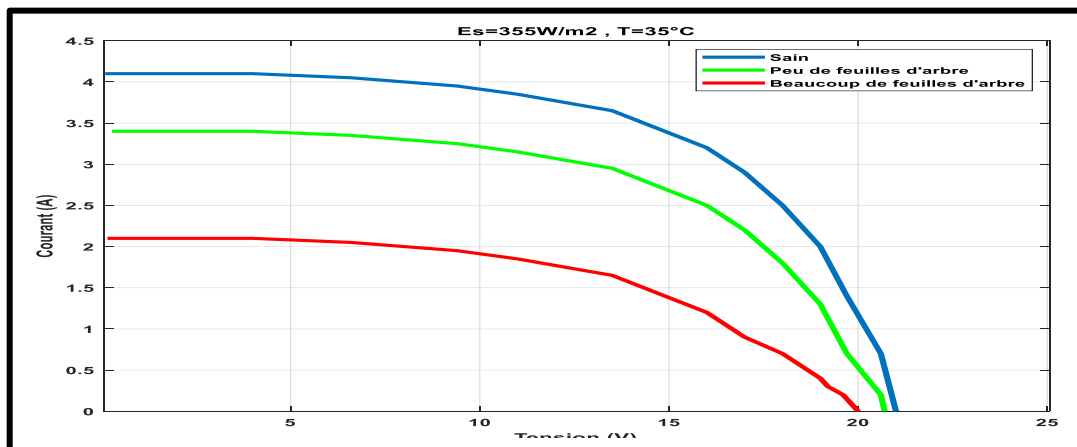


Figure III.16 : Caractéristiques (I-V) du défaut de couverture avec feuilles d'arbre.

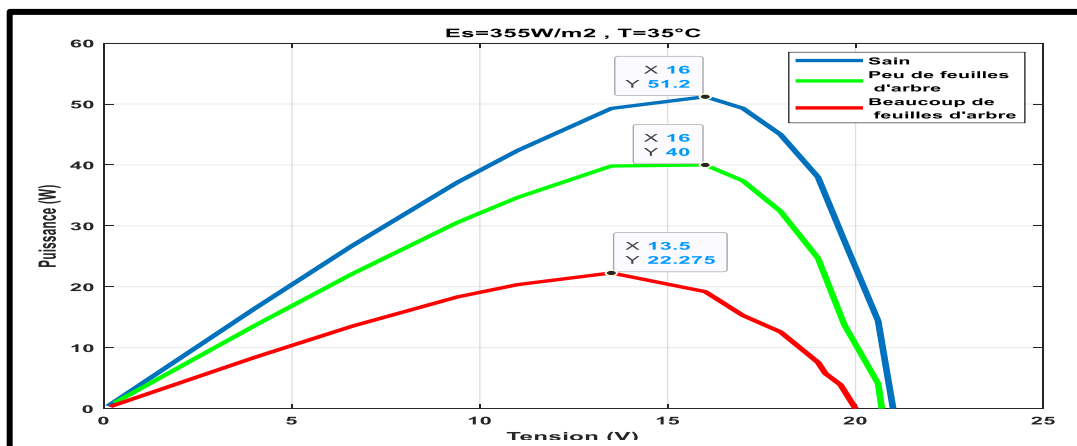


Figure III.17 : Caractéristiques (P-V) du défaut de couverture avec feuilles d'arbre.

## Chapitre III : Évaluation des Défauts et de Leur influence sur les Panneaux PV

Les figures présentées dans le document analysent les effets de la couverture partielle par des feuilles d'arbres sur les performances photovoltaïques. Voici un commentaire sur chaque figure :

- **Figure III.15** : Cette figure illustre visuellement le défaut de couverture causé par des feuilles d'arbres. Cela souligne l'importance de cette variable dans l'étude, montrant comment une couverture partielle peut être une condition fréquente pour les panneaux solaires installés en milieu arboré.
- **Figure III.16** : Les caractéristiques courant-tension (I-V) sous différentes conditions de couverture par les feuilles d'arbres sont présentées ici. Les courbes illustrent l'impact significatif des feuilles sur les performances électriques. Avec une faible couverture, le courant reste élevé. À mesure que la couverture par les feuilles augmente, le courant diminue, ce qui indique une réduction de l'efficacité du panneau.
- **Figure III.17** : Cette figure présente les caractéristiques puissance-tension (P-V) dans les mêmes conditions. Elle illustre comment la puissance maximale diminue à mesure que la couverture par les feuilles augmente. Ceci est crucial pour comprendre les pertes potentielles de production énergétique dues aux obstacles naturels tels que les feuilles.

Ces figures sont essentielles pour visualiser l'impact des conditions environnementales sur la performance des panneaux solaires, soulignant ainsi l'importance d'un entretien régulier pour optimiser leur efficacité.

### ❖ Défaut de salissure

↳ Défaut de salissure avec de la poussière et du sable

Nous avons effectué un essai pour chaque cas avec du sable et de la poussière comme le montre la figure III.18. Nous avons mesuré les caractéristiques (I-V) et (P-V) à l'aide de la méthode voltampèremétrie, présentées respectivement dans les figures III.19 et III.20.

## Chapitre III : Évaluation des Défauts et de Leur influence sur les Panneaux PV

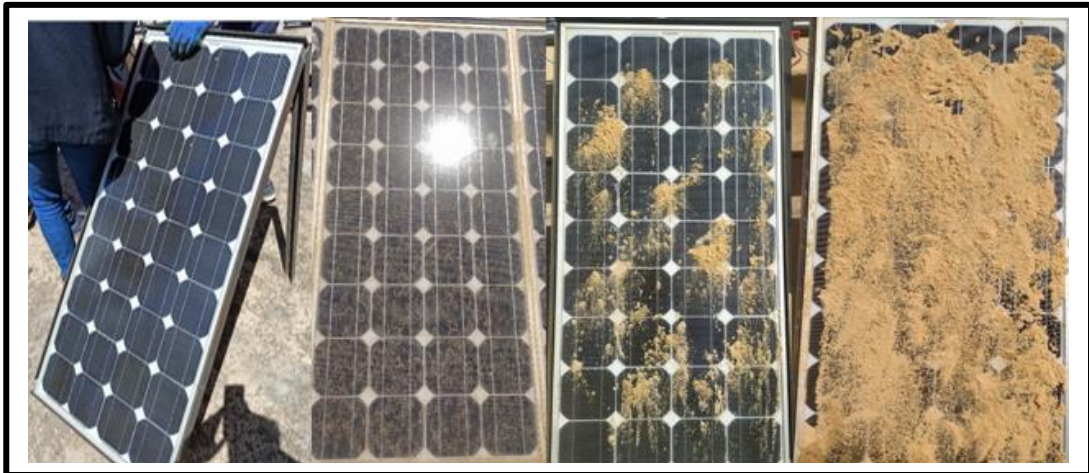


Figure III.18 : Défaut de salissure poussière et sable.

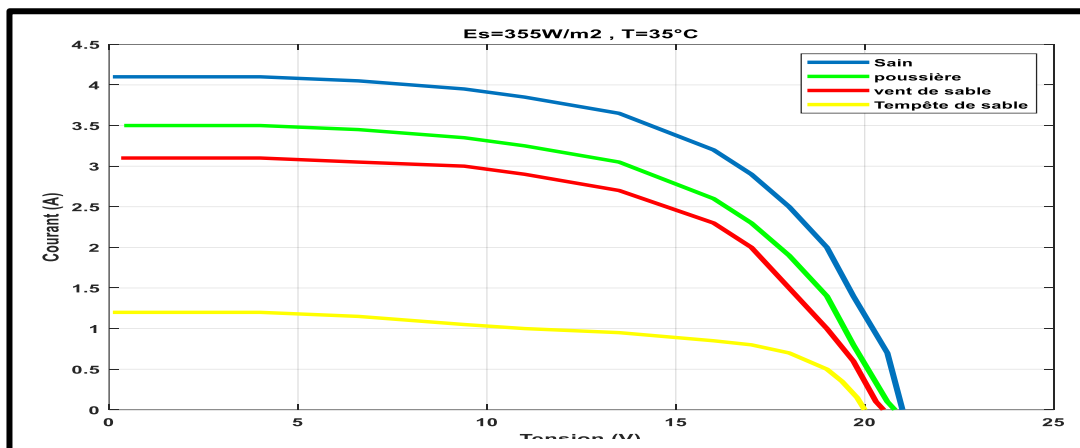


Figure III.19 : Caractéristiques (I-V) du défaut de salissure avec de la poussière et du sable.

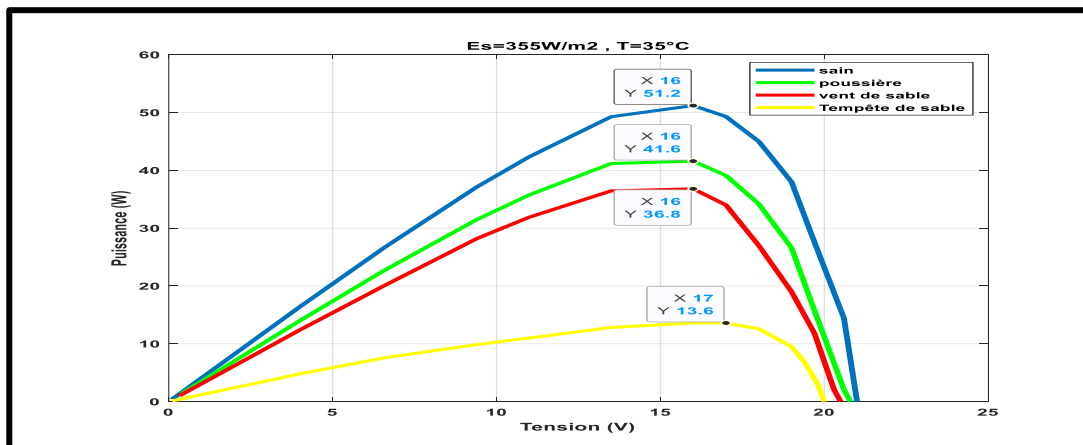


Figure III.20 : Caractéristiques (P-V) du défaut de salissure avec du sable.

## Chapitre III : Évaluation des Défauts et de Leur influence sur les Panneaux PV

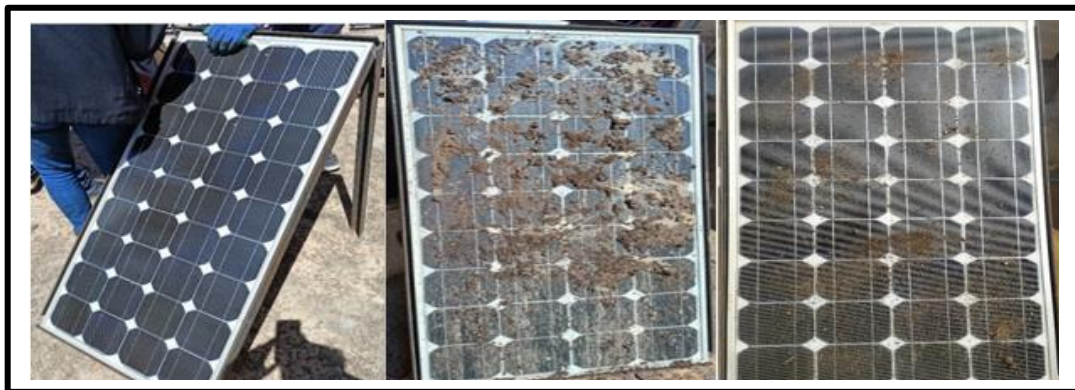
La figure III.19 présente les caractéristiques courant-tension (I-V) des panneaux solaires soumis à différentes conditions de salissure. Les courbes montrent les variations de performance entre un panneau propre et ceux affectés par de la poussière, du vent de sable, et une tempête de sable. Les résultats révèlent une diminution significative de la performance du panneau avec l'augmentation de la salissure.

La figure III.20 présente les caractéristiques puissance-tension (P-V) des panneaux solaires soumis aux mêmes conditions de salissure. Les résultats suivent une tendance similaire à ceux de la figure III.19, montrant une réduction significative de la puissance générée par les panneaux lorsque ceux-ci sont couverts de salissure.

Ces figures démontrent clairement l'impact négatif de la salissure sur la performance des panneaux solaires, soulignant l'importance de maintenir les panneaux propres pour assurer une performance optimale.

↳ Défaut de salissure avec de la terre

Nous avons réalisé un essai pour chaque cas avec de la terre de manière aléatoire, comme le montre la figure III.21. Nous avons mesuré les caractéristiques (I-V) et (P-V) à l'aide de la méthode voltampèremétrie, dont les résultats sont présentés dans les figures III.22 et III.23.



**Figure III.21** : Défaut de salissure avec de la terre.

## Chapitre III : Évaluation des Défauts et de Leur influence sur les Panneaux PV

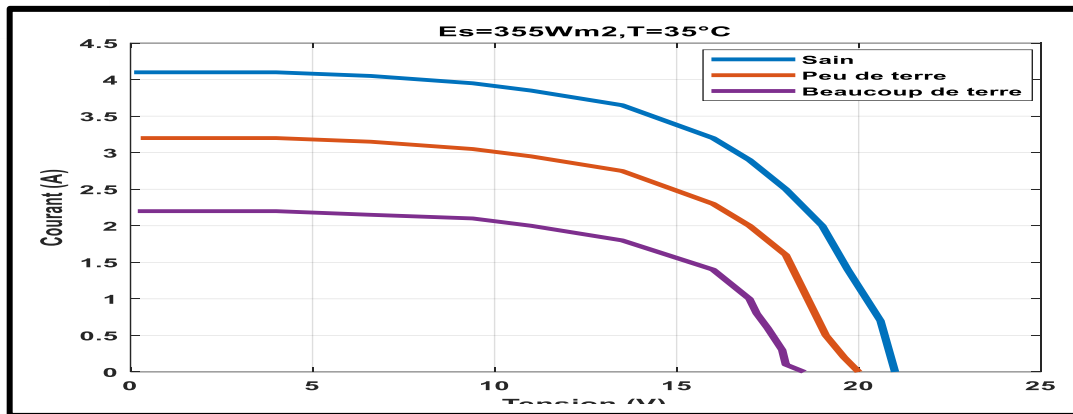


Figure III.22 : Caractéristiques (I-V) dans le cas de salissure avec de la terre.

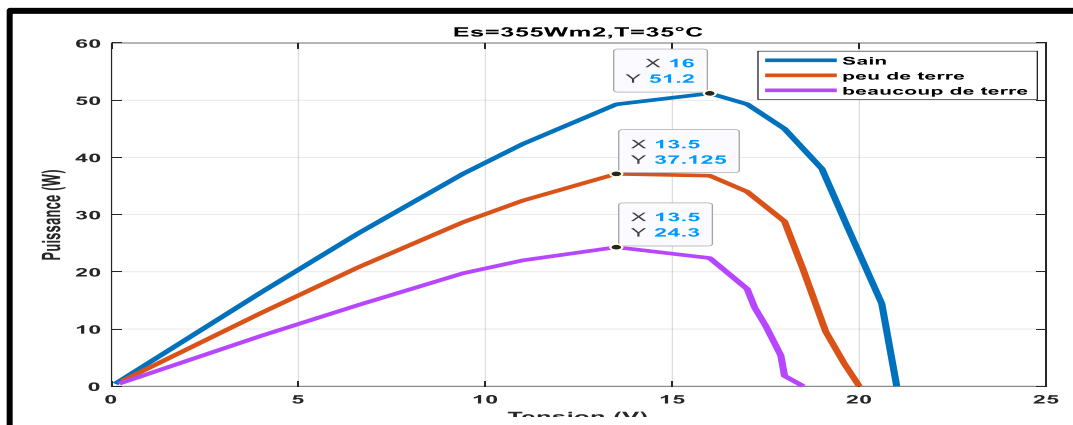


Figure III.23 : Caractéristiques (P-V) dans le cas de salissure avec de la terre.

La figure III.22 présente les courbes I-V pour différents niveaux de salissure : propre, peu de terre et beaucoup de terre. Les courbes montrent que plus il y a de salissure, plus la performance en courant diminue.

La figure III.23 affiche les courbes P-V correspondant aux mêmes niveaux de salissure que la figure III.22. De manière similaire, plus la salissure est importante, plus la puissance générée diminue.

Ces résultats démontrent clairement l'impact négatif de la salissure sur l'efficacité des panneaux solaires, soulignant ainsi l'importance de maintenir les surfaces des panneaux propres pour une performance optimale.



## Chapitre III : Évaluation des Défauts et de Leur influence sur les Panneaux PV

### ❖ Défaut de couverture avec du carton

Nous avons réalisé des tests d'ombrage pour différents pourcentages (25%, 34%, 50% et 68%), comme le montre la figure III.24, et nous avons mesuré les caractéristiques (I-V) et (P-V) à l'aide de la méthode voltampèremétrique, dont les résultats sont présentés dans les figures III.25 et III.26.

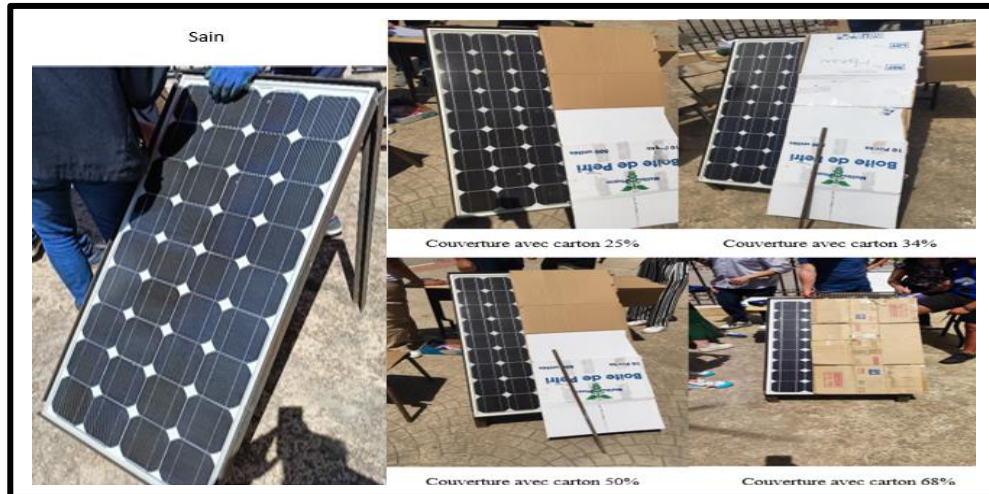


Figure III.24 : Différents pourcentages de couverture avec carton.

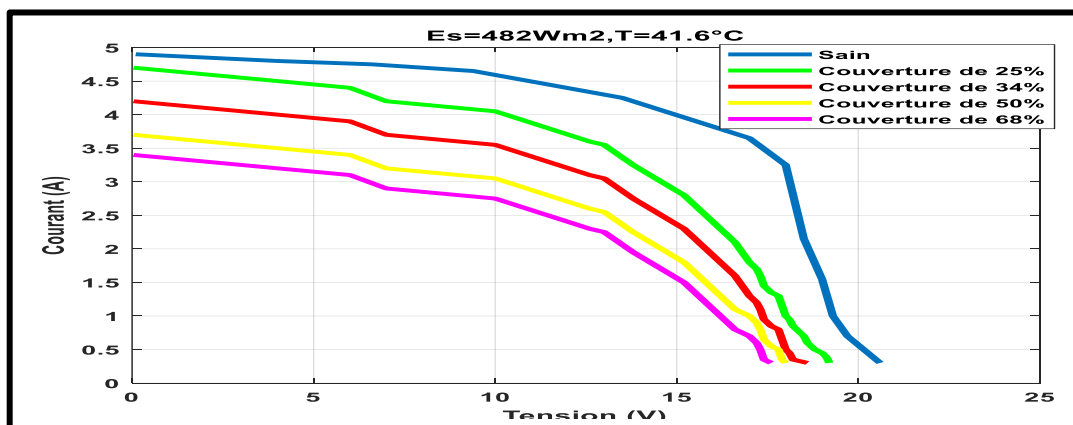
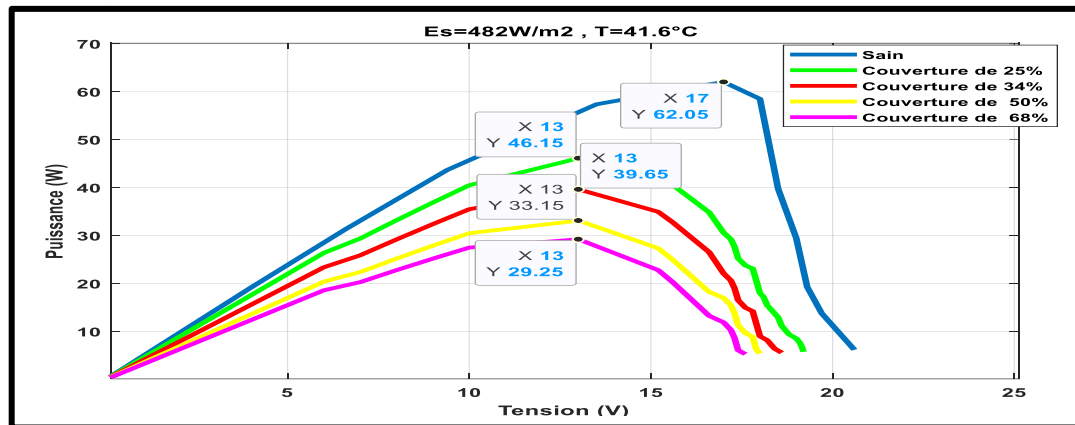


Figure III.25 : Caractéristiques électrique (I-V) d'un module PV lors de défaut de couverture avec carton.

## Chapitre III : Évaluation des Défaits et de Leur influence sur les Panneaux PV



**Figure III.26 :** Caractéristiques électriques (P-V) d'un module PV dans le cas du défaut de couverture avec carton.

Les essais montrent que la couverture partielle d'un module PV avec du carton affecte de manière significative ses caractéristiques électriques. Plus le pourcentage de couverture est élevé, plus la performance du module PV diminue, tant en termes de courant (I) que de puissance (P). Ces résultats mettent en évidence l'importance de maintenir les modules PV exempts d'ombrage pour assurer une performance optimale.

### III.3.3. Calcul des rendements ( $\eta$ ) et du Facteur de Forme (FF) :

Pour l'ensoleillement et la température des cas précédents, on a relevé les puissances maximales, on a calculé les différents rendements, les facteurs de forme, avec la surface de panneau solaire  $S=0.646495\text{m}^2$ , les rendements sont comme suit :

❖ **1<sup>er</sup> essai**  $E_s= 355 \text{ W/m}^2$  ,  $T=35^\circ\text{C}$

➤ **Cas N°1 panneau sain**

On a relevé  $P_{mpp}= 51.2\text{W}$

On a :

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{E_s * S} = \frac{51.2}{355 * 0.646495} = 22.3\%$$

➤ **Cas N°2 panneau ombré**

▪ Panneau ombré à 25% :  $P_{mpp}=25.2 \text{ W}$

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{E_s * S} = \frac{25.2}{355 * 0.646495} = 10.98\%$$

▪ Panneau ombré à 50% :  $P_{mpp}= 24.5 \text{ W}$

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{E_s * S} = \frac{24.5}{355 * 0.646495} = 10.67\%$$

## Chapitre III : Évaluation des Défauts et de Leur influence sur les Panneaux PV

- Panneau ombré à 75% :  $P_{mpp}= 3.78 \text{ W}$

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{E_s * S} = \frac{3.78}{355 * 0.646495} = 1.64\%$$

- Panneau ombré à 100% :  $P_{mpp}= 2.43 \text{ W}$

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{E_s * S} = \frac{2.43}{355 * 0.646495} = 1.05\%$$

### ➤ Cas N°3 panneau couvert par les feuilles d'arbre :

- Pour le cas : Beaucoup de feuilles d'arbre

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{E_s * S} = \frac{40}{355 * 0.646495} = 17.42\%$$

- Pour le cas : Peu de feuilles d'arbre

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{E_s * S} = \frac{22.275}{355 * 0.646495} = 9.7\%$$

### ➤ Cas N°4 panneau avec salissure :

- Pour le cas : Poussière

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{E_s * S} = \frac{41.6}{355 * 0.646495} = 18.12\%$$

- Pour le cas : Vent de sable

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{E_s * S} = \frac{36.8}{355 * 0.646495} = 16.03\%$$

- Pour le cas : Tempête de sable

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{E_s * S} = \frac{13.6}{355 * 0.646495} = 5.92\%$$

- Pour le cas : Peu de terre

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{E_s * S} = \frac{37.125}{355 * 0.646495} = 16.17\%$$

- Pour le cas : Beaucoup de terre

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{E_s * S} = \frac{24.3}{355 * 0.646495} = 10.58\%$$

### ❖ 2<sup>ème</sup> essai $E_s = 482 \text{ W/m}^2$ , $T = 41.6^\circ\text{C}$

#### ➤ Cas N°5

- ✓ Pour un panneau sain

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{E_s * S} = \frac{62.05}{482 * 0.646495} = 19.91\%$$

- ✓ Panneau couvert avec carton :

- Panneau couvert à 25% :  $P_{mpp} = 25.2 \text{ W}$

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{E_s * S} = \frac{46.15}{482 * 0.646495} = 14.81\%$$

- Panneau couvert à 34% :  $P_{mpp} = 24.5 \text{ W}$

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{E_s * S} = \frac{39.65}{482 * 0.646495} = 12.72\%$$

## Chapitre III : Évaluation des Défauts et de Leur influence sur les Panneaux PV

- Panneau couvert à 50% :  $P_{mpp} = 3.78 \text{ W}$

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{E_s * S} = \frac{33.15}{482 * 0.646495} = 10.63\%$$

- Panneau couvert à 68% :  $P_{mpp} = 2.43 \text{ W}$

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{E_s * S} = \frac{29.25}{482 * 0.646495} = 9.38\%$$

Le tableau suivant présente le récapitulatif des résultats obtenus dans les calculs. Pour remplir le tableau suivant il faut utiliser les relations suivantes :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} * V_{co}}$$
 , la relation utilisée pour calculer le facteur de forme

Les cas		Résultats expérimentaux		
		Pmax (W)	FF (%)	$\eta$ (%)
Cas 1	Panneau sain	51.2	59.46	22.3
Cas 2	Ombre 25%	25.2	32.64	10.98
	Ombre 50%	24.5	33.59	10.67
	Ombre 75%	3.78	52.5	1.64
	Ombre 100%	2.43	45.76	1.05
Cas 3	Peu de feuilles d'arbre	40	56.83	17.42
	Beaucoup de feuilles d'arbre	22.275	53.03	9.7
	Poussière	41.6	57.14	18.12
	Vent de sable	36.8	57.9	16.03

## Chapitre III : Évaluation des Défauts et de Leur influence sur les Panneaux PV

<b>Cas 4</b>	<b>Tempête de sable</b>	13.6	45.33	5.92
	<b>Peu de terre</b>	37.125	58	16.17
	<b>Beaucoup de terre</b>	24.3	59.7	10.58

**Tableau III.3.** Résultat du 1<sup>er</sup> essai

Les cas		Résultats expérimentaux		
		Pmax (W)	FF (%)	$\eta$ (%)
<b>Cas 5</b>	<b>Panneau sain</b>	62.05	61.45	19.91
	<b>Ombre 25%</b>	46.15	51.14	14.81
	<b>Ombre 34%</b>	39.65	50.75	12.72
	<b>Ombre 50%</b>	33.15	49.77	10.63
	<b>Ombre 68%</b>	29.25	48.88	9.38

**Tableau III.4.** Résultat du 2<sup>ème</sup> essai

### III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'impact de plusieurs défauts sur les performances d'un panneau photovoltaïque de 80 Wc à l'aide de la simulation numérique et de l'expérimentation pratique.

- ✓ Partie simulation :
- Défaut d'ombrage : L'ombrage a un effet significatif sur les caractéristiques électriques du panneau. Avec l'augmentation du pourcentage d'ombrage, nous avons observé :
  - Une réduction du point de puissance maximale (PPM).
  - Une diminution du courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ).
  - Une baisse de la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ).
- Défaut de mismatch type  $R_s$  : L'augmentation de la résistance série entraîne une perte de tension pour un courant donné, activant parfois la diode de bypass. Cette



## Chapitre III : Évaluation des Défauts et de Leur influence sur les Panneaux PV

augmentation de la résistance réduit également la puissance maximale délivrée par le panneau.

- ✓ Partie pratique : Les essais pratiques ont confirmé les résultats des simulations. Nous avons testé le panneau sous différentes conditions de défauts :
- Ombrage (différents pourcentages) : réduction significative de la puissance et de l'efficacité du panneau.
- Couverture avec feuilles d'arbre : des pertes de puissance variables en fonction de la densité de la couverture.
- Salissure (poussière, sable, terre) : impact variable sur la performance du panneau, la terre étant le plus délétère.
- ✓ Calcul des rendements : Les rendements et facteurs de forme calculés pour chaque cas de défaut ont montré une réduction notable des performances du panneau dans des conditions de défauts par rapport à un panneau sain.

Nous pouvons conclure d'après nos simulations et expérimentations que des défauts tels que l'ombrage, le mismatch et la salissure ont un impact significatif sur les performances des panneaux photovoltaïques. Il est donc crucial d'effectuer une maintenance régulière et de prévenir ces défauts pour assurer une efficacité optimale des systèmes photovoltaïques.



## **Conclusion Générale**

## **Conclusion Générale**



## Conclusion Générale

Ce mémoire explore les multiples facettes de la production d'énergie électrique à partir de panneaux solaires photovoltaïques, en se concentrant sur les défis et les opportunités liés à leur performance et à leur maintenance. En examinant différentes configurations de panneaux solaires, ainsi que les impacts des conditions environnementales et des pratiques d'entretien, nous avons pu quantifier et comparer les performances énergétiques de divers systèmes.

Nous avons commencé par une revue des principes fondamentaux de l'effet photovoltaïque et des différentes technologies utilisées pour la fabrication des cellules solaires. Cela nous a permis de comprendre les bases scientifiques qui sous-tendent le fonctionnement des panneaux solaires et les innovations technologiques qui améliorent leur efficacité.

Ensuite, nous avons étudié les problèmes courants et les défaillances des panneaux photovoltaïques, en mettant en évidence les effets de l'ombrage, de la saleté et des variations de température sur leurs performances. Nous avons démontré l'importance d'un système de détection et de localisation des défauts pour améliorer la fiabilité et la durabilité des systèmes photovoltaïques.

Enfin, les essais pratiques que nous avons menés ont révélé des différences significatives de performance entre les panneaux solaires maintenus en parfait état et ceux soumis à des conditions défavorables. Ces résultats soulignent l'importance cruciale de l'entretien régulier et de la surveillance proactive pour maximiser la production d'énergie solaire.

En conclusion, ce mémoire propose des recommandations pratiques pour optimiser la production d'énergie solaire, en tenant compte des variables environnementales et des meilleures pratiques de maintenance. Ces recommandations visent à aider à la mise en œuvre de systèmes photovoltaïques plus efficaces et durables, contribuant ainsi à une transition énergétique vers des sources d'énergie renouvelables plus propres et plus durables.



## Références bibliographiques

- [1] : <https://energieplus-lesite.be/theories/climat8/ensoleillement-d8/>.
- [2] : <https://www.un.org/fr/climatechange/what-is-renewable-energy>.
- [3] : <https://resourcegovernance.org>.
- [4] : L.Bun, “Détection et Localisation de Défauts pour un Système PV”, thèse de doctorat, université de Grenoble, France, 2011.
- [5] : <https://www.europe-energie.com/blog/petite-histoire-du-photovoltaïque/>.
- [6] : <https://www.inspiraenergie.fr/histoire/>.
- [7] : <https://www.ademe.fr/>.
- [8] : Angel Cid Pastor « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques ». Thèse de Docteur. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006.
- [9] : <https://www.planete-energies.com/fr/media/article/cellule-photovoltaïque-comment-ca-marche>.
- [10] : <https://www.ecosources.org/types-de-cellules-photovoltaïques>.
- [11] : ROUABAH LAHCENE, ZITOUNI DJALLEL {Etude et détection de défauts dans un système photovoltaïque} Mémoire Présenté pour obtenir LE DIPLOME DE MASTER Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj 2019/2020.
- [12] : Picault, D., Raison, B., Bacha, S., Aguilera, J., et De La Casa, J. (2010a). Changing photovoltaic array interconnections to reduce mismatch losses: a case study. 2010 9th International Conference on Environment and Electrical Engineering, 2010 :37-40.
- [13]: [Bishop, 1988] Bishop, J. (1988). Computer Simulation of the Effects of Electrical Mismatches in Photovoltaic Cell Interconnection Circuits. Solar Cells, 25 :73-89.
- [14] : Doumane, R. (2011). Modélisation du Vieillissement d’un Module Photovoltaïque. Thèse de Doctorat, Université M’hamed Bougara Boumerdes Algérie.
- [15] : [Benghanem et Alamri, 2009] Benghanem, M. S. et Alamri, S. N. (2009). Modeling of Photovoltaic Module and Experimental Determination of Serial Resistance. Journal of Taibah University for Science, 2 :94-105.
- [16] : Belaout Abdesslam « Etude et diagnostic des défauts fréquents aux systèmes photovoltaïques (PV) par emploi de la caractéristique courant-tension », Mémoire de Magister, Université – Setif-1, 2014.
- [17] : Madani Samiha et Habib Zohra {Diagnostic des défauts d’un panneau solaire} PROJET DE FIN DE CYCLE MASTER Université Ibn Khaldoun de Tiaret 2021 - 2022.
- [18] : MECHOU CH et CHETTAH H, « Analyse énergétique et exégétique d’un Panneau photovoltaïque », mémoire de Master, Université Akli Mohand Oulhadj –BOUIRA,2019/2018.
- [19] : Bouzaghrou Sedik, Berrian Djaber, « Développement des modèles mathématiques d’un générateur photovoltaïque défectueux », mémoire de master, Université Houari Boumediene,2015/2014.
- [20] : Aziz Toulait, Rachid Aili, « Modélisation et simulation sous Matlab/Simulink d’un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou,2014.

## Références bibliographiques

- [21] : HELALI KAMELIA « Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque », Ingénieur d'Etat en Electrotechnique, l'UMMTO « Tizi-Ouzou », 2012.
- [22] : A. MIRICKI « Etude comparative de chaîne de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » thèse de doctorat de l'institut national de polytechnique de Toulouse France, 2005.
- [23] : O. Gergoud « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », Thèse de doctorat de l'ENS de Cachan France, 2002.
- [24]: D. Turcotte, M. Ross, F. Sheriff « photovoltaic hybrid system sizing and simulation tools » horizon Canada, 2001.
- [25] : <http://www.espec.com>.
- [26] : Seif Eddine NAFFOUTI, « Dimensionnement et commande d'un hacheur parallèle alimenté par une source photovoltaïque », thèse pour obtenir le diplôme national d'ingénieur, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, 02/07/2012.
- [27] : Marir-Benabbas M, « Etude du problème de « HOT SPOT » dans un module solaire photovoltaïque », Thèse de magistère, université de Constantine, 1984.
- [28] : Ababacar Ndiaye, « Étude de la dégradation et de la fiabilité des modules photovoltaïques-Impact de la poussière sur les caractéristiques électriques de performance », thèse doctorat, université de Cheikh Anta Diop de Dakar, 2013.
- [29]: Oreski G., Wallner G.M, « Evaluation of the aging behavior of ethylene copolymer films for solar applications under accelerated weathering conditions », Solar Energy, 2009.
- [30] : Khenfer Raid, « Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro énergétique », thèse doctorat, université de Ferhat Abbas Setif, 2015.
- [31]: Quintana M.A., King D.L., McMahan T.J., Osterwald C.R, « Commonly observed degradation in field-aged photovoltaic modules », Proc. 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1436-1439, 2002.
- [32] : Dossier thermique –Courier ES n°03, « effet photovoltaïque et fonctionnement des installation solaires isolées », Janvier 2000.
- [33] : <https://www.hovall.com>.
- [34] : LAHLOU Samir, Mémoire de fin d'études «Détection et localisation des défauts convertisseurs statiques dans un système Photovoltaïque raccordé au réseau moyenne tension », Université M'Hamed BOUGARA – Boumerdes, Juin 2016.
- [35] : Hachour, . Approche décentralisée pour la détection et la localisation de défauts dans une ferme photovoltaïque. s.l. : Projet de Stage, 2011.
- [36]: Marco, C. Ventura and G. Development of models for on-line diagnostic and energy assessment analysis of PV power plants : the study case of 1 MW Sicilian PV plant. s.l. : Energy Procedia, Vol. 83, pp. 248 - 257, 2015.doi:10.1016/j.egypro.2015.12.179.
- [37]: E. Garoudja, A. Chouder, K. Kara and S. Silvestre. An enhanced machine learning based approach for failures detection and diagnosis of PV systems. s.l. : Energy Conversion and Management, Vol. 151, pp. 496 - 513, 2017 doi:10.1016/j.enconman.2017.09.019.



## Références bibliographiques

[38]: Singh, S.R. Madeti and S.N. A comprehensive study on different types of faults and detection techniques for solar photovoltaic system. s.l.: Solar Energy, Vol. 158, pp. 161 - 185, 2017. doi:10.1016/j.solener.2017.08.069.

[39]: [https://www.researchgate.net/figure/Techniques-de-detection-de-defauts-pour-les-systemes-PV-autonomes\\_fig5\\_328577571](https://www.researchgate.net/figure/Techniques-de-detection-de-defauts-pour-les-systemes-PV-autonomes_fig5_328577571).

[40]: A. Mellit, G.M. Tina and S.A. Kalogirou. Fault detection and diagnosis methods for photovoltaic systems: a review Renewable Sustainable Energy Review. s.l.: Vol. 91, pp. 1 -17, 2018. doi:10.1016/j.rser.2018.03.062.