

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE SUPERIEURE EN SCIENCES APPLIQUEES
--T L E M C E N--

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
-تلمسان-



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
École Supérieure en
Sciences Appliquées

Centre de Développement des
Energies Renouvelables - CDER



Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electrotechnique
Spécialité : énergie et environnement

Présenté par : **KHECHAFI Sofiane**
BENLAACHI Salah

Thème

**Étude et analyse des performances d'un
générateur photovoltaïque pour un
système autonome**

Soutenu publiquement, le 09 / 07 / 2019, devant le jury composé de :

Dr. BENNEKROUF Mohammed	MCB	ESSA. Tlemcen	Président
Dr. MALIKI Fouad	MAA	ESSA. Tlemcen	Directeur de mémoire
Dr. BELHAOUAS Nasereddine	MRB	CDER Alger	Co- Directeur de mémoire
Dr. KHERBOUCHE Ep FARADJI Djamila	MCB	ESSA. Tlemcen	Examineur 1
Dr. GHOMRI Amina	MCA	ESSA. Tlemcen	Examineur 2

Année universitaire : 2018 /2019



Remerciement

Tout d'abord, nous tenons à remercier ALLAH de nous avoir guidés sur la bonne voie, de nous avoir aidés tout au long de nos années d'études.

Nous ne saurions réellement, trouver les expressions éloquentes que mérite nos encadreurs monsieur MALIKI Fouad, maître de conférence au sein de l'école supérieure des sciences appliquées de Tlemcen, et monsieur BELHAOUAS Nasreddine, chercheur au sein du centre de développement des énergies renouvelables de Bouzareaah, pour leur grande patience, leurs conseils et leur disponibilité, malgré leurs différentes occupations, nous avons beaucoup appris à leurs côtés, tant sur le plan scientifique que humain. Nous tenons donc à les remercier pour la confiance qu'ils nous ont accordée en nous proposant ce travail, pour avoir contribué activement à sa réalisation. Nous leur exprimons en particulier notre reconnaissance pour nous avoir fait bénéficier de leurs compétences scientifiques, leurs qualités humaines et leur constante disponibilité et nous avoir donné l'occasion d'étudier un sujet si intéressant.

Nous adressons aussi nos remerciements aux différents membres de jury qui nous font l'honneur d'évaluer, d'examiner et d'enrichir ce modeste travail.

Nous tenons également à remercier tout le staff académique de l'école supérieur des sciences appliquées de Tlemcen pour leurs contributions à notre formation.

Merci enfin à tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont aidé et donc ont contribué au succès de ce travail.

Dédicace 1

Je dédie ce travail à...

A mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi, et qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance.

J'espère qu'ils trouveront dans ce travail toute ma reconnaissance et tout mon amour.

A mes frères et sœurs: Djamel, Imad, Nadia et Fouzia, Je vous remercie pour votre aide sans égal et votre affection si sincère.

A mon binôme Sofiane Merci pour ton soutien sans limite, pour ta présence et ton amitié sincère.

A tous mes amis et à tous ceux qui me sont chers.

Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.

BENLAACHI Salah



Dédicace

*Avant tout, je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donnée tous ce que je
veux,*

Je dédie ce modeste travail :

*A mes chers parents que dieu les garde et les Protège, pour tous leurs
sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au
long de mes études,*

*A mes frères, mes sœurs, mon oncle, et toute ma famille pour leur soutien
tout au long de mon parcours,*

A tous mes enseignants depuis le primaire jusqu'à maintenant,

*A mon binôme Salah pour tous les moments que nous avons passé ensemble
tout au long de ce projet,*

A tous mes camarades et mes amis,

A tous ce que j'aime et qui m'aiment,

A tous ceux qui me connaissent de près ou de loin.

Merci d'être toujours là pour moi

KHECHAFI Sofiane



Listes des figures

Figure 1.1 SCHEMA DES RAYONNEMENTS SOLAIRES.....	5
Figure 1.2 Un schéma des lignes de grille (fingers) et des barres omnibus (busbarre)	7
Figure 1.3 Une boîte de jonction avec deux diodes by-pass	9
Figure 1.4: Cellule en silicium mono-cristallin.	11
Figure 1.5 :Cellule en silicium poly-cristallin..	11
Figure 1.6 : Cellule en silicium amorphe.....	12
Figure 2.1 : Le modèle standard d'une cellule solaire.....	17
Figure 2.2 : Protection d'un générateur photovoltaïque.	19
Figure 2.3 : Influence de la température sur la caractéristique P(V) pour une irradiation solaire de 1000W/m2.	20
Figure 2.4 : Influence de la température sur la caractéristique I(V) pour une irradiation solaire de 1000W/m2.	20
Figure 2.5 : Caractéristiques P(V) d'un module pour différentes irradiations solaires à 25°C.....	21
Figure 2.6 : Caractéristiques I(V) d'un module pour différentes irradiations solaires à 25°C..	21
Figure 2.7 : L'influence de la résistance série R_s sur la caractéristique P(V).....	22
Figure 2.8 : L'influence de la résistance shunt R_{sh} Sur la caractéristique P (V).....	23
Figure 2.9 : La tension V en fonction de l'humidité. L'humidité apparaît sur l'axe X et la tension sur l'axeY	23
Figure 3.1: Deux exemples du bris de verre.....	27
Figure 3.2 : Un cas réel de la défaillance du connecteur.	28
Figure 3.3 : Encapsulation décollement d'un module PV (delamination).....	30
Figure 3.4 : Une boîte de jonction d'un module PV avec deux diodes by-pass..	30
Figure 3.5 : Défaillances de la boîte de jonction.	31
Figure 3.6 : Un coude de cadre entraîné par la neige.....	31
Figure 3.7 : Une fissure de cellule solaire à base de silicium.....	32
Figure 3.8 : photographie d'un module PV à piste d'escargot.....	33
Figure 3.9 : Une Marques de brûlures dans un module PV	34
Figure 3.10 : Les arcs Micro qui se produisent si la colle conductrice sur l'interconnexion des fils a un contact insuffisant.	35
Figure 3.11 : Image électroluminescente d'un module à couche mince.....	35
Figure 3.12 : Formation de shunts à points chauds au niveau de l'interconnexion des cellules associés à des dommages sur de grandes surfaces de cellules.	36
Figure 3.13 : Bris de verre à la façade pour un module CdTe.....	37

Liste Des Tableaux

<u>TABLEAU 1.1 REPARTITION DU RAYONNEMENT SOLAIRE A LIMITE SUPERIEURE DE L'ATMOSPHERE.....</u>	4
<u>TABLEAU 1.2 REPARTITION DU RAYONNEMENT SOLAIRE A LA SURFACE DE LA TERRE.....</u>	4
<u>TABLEAU 1.3 LES DIFFERENTS TYPES DE TECHNOLOGIE DES CELLULES SOLAIRES.....</u>	12
<u>TABLEAU 3.1 DEFAUTS INTRINSEQUES DES MODULES PV.....</u>	38
<u>TABLEAU 3.2 DEFAUTS EXTRINSEQUES DES MODULES PV.....</u>	43

Résumé

Un module photovoltaïque peut-être dégradé au fil du temps, cette dégradation se traduit par un changement dans les valeurs de ses paramètres et de ses performances. Un facteur clé pour réduire le coût d'un système photovoltaïque consiste à augmenter la fiabilité et la durée de vie des modules PV. Pour augmenter la fiabilité et la durée de vie des modules PV, il est nécessaire et important de comprendre et de connaître les défis et les défauts en détail afin d'éviter toute défaillance dans le mode de fonctionnement de l'installation photovoltaïque. Pour cette raison, le but de notre travail de projet fin d'étude consiste à résumer les défaillances réelles des modules PV.

Mots clés : Générateur photovoltaïque, cellule solaire, énergie renouvelable, systèmes solaires photovoltaïques.

Abstract

A photovoltaic module can degrade over time, this degradation results in a change in the values of its parameters and performance. A key factor in reducing the cost of a photovoltaic system is to increase the reliability and lifetime of PV modules. To increase the reliability and lifetime of PV modules, it is necessary and important to understand and know the challenges and defects in detail in order to avoid any failure in the operating mode of the photovoltaic installation. For this reason, the purpose of our end-of-study project work is to summarize the actual failures of PV modules.

Keywords: Photovoltaic generator, solar cell, renewable energy, solar energy.

ملخص

يمكن أن تتدهور الوحدة الكهروضوئية مع مرور الوقت، وهذا التدهور ينتج عنه تغيير في قيم الإعدادات والأداء. يتمثل أحد العوامل الرئيسية في تقليل تكلفة النظام الكهروضوئي في زيادة صلابة الوحدات الكهروضوئية وعمرها. لزيادة صلابة وعمر الوحدات الكهروضوئية، من الضروري والمهم فهم ومعرفة التحديات والعيوب بالتفصيل من أجل تجنب أي فشل في وضع التشغيل للتركيب الكهروضوئي. لهذا السبب، فإن الغرض من عمل مشروع نهاية الدراسة هو تلخيص الإخفاقات الفعلية للوحدات الكهروضوئية PV.

كلمات البحث: مولد كهروضوئي، الخلايا الشمسية، الطاقة المتجددة، الطاقة الشمسية

Table des matières

Remerciement	
Dedicace	
Résumé	
Introduction générale	1
Chapitre 1 : Généralités sur l'énergie solaire	
1.1. Introduction.....	3
1.2. Le soleil.....	3
1.3. Le rayonnement solaire	3
1.4. Spectre solaire	4
1.4.1. Rayonnement solaire direct.....	4
1.4.2. Rayonnement solaire diffus	4
1.4.3. Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol.....	4
1.4.4. Le rayonnement global	5
1.5. Caractéristiques des ondes électromagnétiques	5
1.6. L'énergie solaire photovoltaïque.....	5
1.7. Les différents éléments d'un module PV	6
1.7.1. Cellule solaire	6
1.7.2. Couverte.....	7
1.7.3. Couches encapsulées	7
1.7.4. Cadre de soutien.....	7
1.7.5. Protection ultérieure	8
1.7.6. Diodes by-pass	8
1.7.7. Boite de jonction électrique	9
1.8. Principe de fonctionnement de générateur PV.....	9
1.9. Technologies des cellules solaires	10
1.9.1. Les cellules au silicium cristallin.....	10
1.9.2. Les cellules à base de couches minces	11
1.10. Avantages et inconvénients d'une installation PV.....	13

1.10.1. Les avantages.....	13
1.10.2. Les inconvénients.....	13
1.11. Conclusion.....	14

Chapitre 2 : Facteurs influents le fonctionnement d'un module Photovoltaïque

2.1. Introduction.....	16
2.2. Modèle d'une cellule solaire.....	16
2.3. Paramètres électriques des cellules photovoltaïques.....	17
2.3.1. Courant de court-circuit.....	17
2.3.2. Tension à circuit ouvert.....	17
2.3.3. Point de puissance maximale.....	17
2.3.4. Puissance-crête (P_c (Wc)).....	18
2.3.5. Facteur de forme FF.....	18
2.3.6. Le rendement.....	18
2.4. Protections classiques d'un générateur photovoltaïque.....	19
2.5. Influence de la température.....	19
2.6. L'influence de l'ensoleillement ou irradiation.....	20
2.7. L'effet de la résistance série.....	22
2.8. L'effet de la résistance parallèle (shunt).....	22
2.9. L'effet de l'humidité.....	23
2.10. Conclusion.....	24

Chapitre 3 : Les différents défauts d'un module photovoltaïque

3.1. Introduction.....	26
3.2. Définition d'une défaillance d'un module PV.....	26
3.3. Définition du défaut.....	26

3.4.	Contrôle visuel.....	27
3.5.	Défaillances des modules PV.....	27
3.6.	Les défaillances observées dans tous les modules PV.....	27
3.6.1.	Serrage.....	27
3.6.2.	Défaillance du connecteur rapide.....	27
3.6.3.	Perte de collage de la feuille arrière (feuille de fond).....	28
3.6.4.	Matériau de fond à base métallique.....	29
3.6.5.	Défaillance de la boîte de jonction.....	29
3.6.6.	Rupture du cadre.....	31
3.7.	Les défaillances observées dans les modules PV à base de silicium.....	31
3.7.1.	Fissures dans les cellules.....	31
3.7.2.	Pistes d'escargots (Snail tracks).....	32
3.7.3.	Marques de brûlures.....	33
3.8.	Défaillances observées dans les modules à couche mince.....	33
3.8.1.	Micro-arcs au niveau des connecteurs collés.....	34
3.8.2.	Shunt points chauds.....	34
3.9.	Les défaillances spécifiques observées dans les modules PV à couche mince CdTe.....	36
3.9.1.	Bris de verre à la façade.....	36
3.14.	Conclusion.....	44
	Conclusion générale.....	46
	Bibliographie.....	48

Introduction Générale

Introduction Générale

Les systèmes photovoltaïques (PV), qui convertissent directement l'énergie solaire incidente en électricité, sont un moyen élégant et polyvalent d'exploiter l'énergie renouvelable et ont un rôle majeur à jouer dans la transition de nos systèmes énergétiques requise par les questions du changement climatique, la réduction des ressources en combustibles fossiles et la sécurité énergétique. Au cours de la dernière décennie, la capacité installée a augmenté rapidement, elle s'élève à plus de 300 GW dans le monde. Cela représente encore un faible pourcentage de la capacité totale installée pour la production d'électricité, mais le photovoltaïque est en train de devenir l'une des technologies à mesure les plus courantes dont les coûts continuent à diminuer. Cependant, afin d'assurer une contribution maximale de l'énergie photovoltaïque, nous devons non seulement installer les systèmes, mais aussi les exploiter d'une manière efficace tout au long de leur durée de vie.. Cela exige une approche cohérente pour déterminer la performance et la qualité des composants et des systèmes, une compréhension claire des mécanismes de perte et des moyens de les minimiser, ainsi que la mesure et l'analyse à long terme de la performance sur le terrain pour assurer un rendement maximal.

La plupart des travaux précédents sur la technologie photovoltaïque se sont concentrés sur la théorie et la conception des cellules ou systèmes photovoltaïques. En revanche, ce travail s'agit d'identifier et de recenser les informations nécessaires à la procédure de diagnostique et de vérification des systèmes photovoltaïques autonomes.

En raison du large éventail d'applications du photovoltaïque et des progrès rapides réalisés, il est impossible de couvrir tous les aspects de la performance photovoltaïque en un seul document d'une taille raisonnable. Cependant, la raison pour laquelle on a réalisé ce travail est de viser et se concentrer clairement sur la performance des composants et des systèmes afin de fournir une introduction détaillée aux problèmes et d'encourager l'évaluation de la performance à toutes les étapes du développement, de la conception et du fonctionnement des systèmes PV.

CHAPITRE 1

Généralités sur l'énergie solaire

Chapitre 1 : Généralités sur l'énergie solaire

1.1. Introduction

L'énergie renouvelable est un ensemble des sources d'énergie qui sont inépuisables à l'échelle humaine, largement disponible, essentiellement gratuites et sont compatibles avec un certain respect environnemental.

Dans ce chapitre nous commencerons par la définition de l'énergie solaire puis la construction des cellules photovoltaïques et leur effet ainsi que leur principe de fonctionnement. Puis nous présentons les différentes technologies des cellules photovoltaïques.

1.2. Le soleil

Le soleil est une étoile située à une distance moyenne de 149 598 000 km de la Terre, avec une température de surface de 5.600°C et une température centrale de 15.000.000°C, l'énergie qui nous vient du Soleil représente presque toute l'énergie disponible sur terre.

Le flux de photons qui arrive tous les jours sur Terre permet de répondre à tous les besoins énergétiques de l'humanité à très long terme et sans limite. Cette énergie est produite par les réactions de fusion thermonucléaire : les noyaux d'hydrogène (protons) s'assemblent en noyaux d'hélium (deux protons + deux neutrons), elle est émise dans l'espace par la surface du Soleil.

D'une saison à l'autre, d'une région à l'autre, d'un pays à l'autre. La quantité d'énergie solaire disponible en extérieur est aussi très variable, Sur une journée complète, le Soleil fournit sur Terre de 0 à 7 kWh/m² de rayonnement incident. Connaître et quantifier précisément cette énergie lumineuse est indispensable à la maîtrise de l'énergie photovoltaïque.

Disponible, inépuisable, propre..., et dans le sens de la qualité technologique, et de l'efficacité, l'énergie représente une source « nouvelle » en expansion et est un sujet très convoité ces dernières années. [1] [2]

1.3. Le rayonnement solaire

On peut définir le rayonnement solaire comme étant l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le Soleil. Il est composé de toute la gamme des rayonnements, de l'ultraviolet lointain comme les rayons gamma aux ondes radio en passant par la lumière visible¹. Le rayonnement solaire contient aussi des rayons cosmiques de basse énergie. [3]

La répartition de ce rayonnement à la limite supérieure de l'atmosphère est :

Tableau 1.1 : Répartition du rayonnement solaire à limite supérieure de l'atmosphère. [5][13]

Répartition (%)	Longueur d'onde λ (nm)	Lumière
9	$\lambda < 400$	Ultraviolet
47	$400 < \lambda < 800$	Visible
44	$800 < \lambda < 3000$	Infrarouge proche

A la surface de la terre, la nouvelle répartition est :

Tableau 1.2 : Répartition du rayonnement solaire à la surface de la terre.[5][13]

Répartition (%)	Longueur d'onde λ (nm)	Lumière
0,25	$280 < \lambda < 315$	Ultraviolet moyen
4,75	$315 < \lambda < 400$	Ultraviolet proche
44	$400 < \lambda < 800$	Visible
51	$800 < \lambda < 2350$	Infrarouge

1.4. Spectre solaire

En traversant l'atmosphère, il est nécessaire de connaître le spectre du rayonnement solaire reçu sur sol, afin de quantifier l'énergie développée par le générateur photovoltaïque dans une application donnée. En effet, quatre types de rayonnement ont été répertoriés dans la littérature :

1.4.1. Rayonnement solaire direct

Le rayonnement direct est le rayonnement solaire atteignant directement la surface terrestre depuis le soleil. Il dépend de l'épaisseur de l'atmosphère que la radiation solaire doit traverser et de l'inclinaison des rayons par rapport au sol. Le pyréliomètre est l'instrument qui permet de mesurer l'intensité du rayonnement direct. Le pyréliomètre doit être muni d'un dispositif chargé de l'orienter en permanence vers le soleil. [4]

1.4.2. Rayonnement solaire diffus

Le rayonnement diffus est aussi appelé rayonnement indirect. C'est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire global par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages et les aérosols. Autre définition, le rayonnement diffus représente la partie du rayonnement solaire qui a touché au moins une particule de gaz atmosphérique en modifiant l'angle d'incidence et qui, cependant, atteint le sol car il est dirigé vers elle. Une partie du rayonnement diffus est de retour vers l'espace. [5] [6]

1.4.3. Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol

C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. L'albédo est le coefficient de réflexion « c », ses valeurs comprises généralement entre 0 et 1 ou sont exprimées en pourcentage. Il est donné par la relation entre l'énergie rayonnante réfléchie par une surface par rapport à l'énergie incidente. La Terre a une valeur moyenne de 40% (c = 0,4). Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc...). [5] [6]

1.4.4. Le rayonnement global

Le rayonnement global est subdivisé en rayonnements directs, diffus et reflété par le sol. Dans la figure ci-dessous représente l'ensemble des rayonnements solaires reçu sur une surface terrestre.

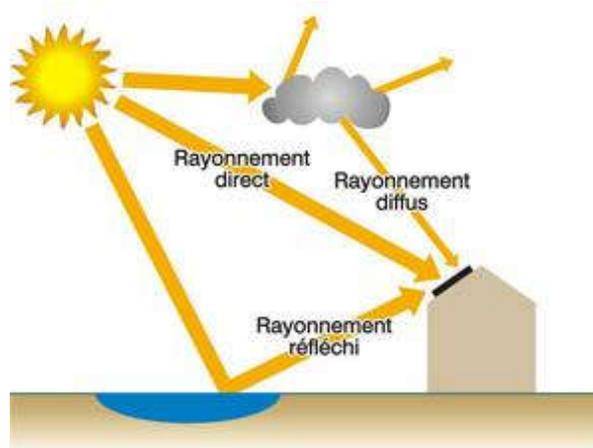


Fig. 1 : schéma des rayonnements solaires.

1.5. Caractéristiques des ondes électromagnétiques

Une onde électromagnétique, soit une oscillation périodique, caractérisée par sa longueur d'onde λ ou sa fréquence ν avec une relation inversement proportionnelle entre eux, plus la fréquence est élevée, plus la longueur d'onde est faible et inversement, la relation entre eux est donnée par :

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (1.1)$$

Tel que « C » est la célérité de la lumière.[20]

Cette onde est aussi caractérisée par sa quantité d'énergie, qui dépend de leur longueur d'onde, selon la formule de Louis de Broglie (1924) :

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (1.1)$$

La longueur d'onde et la fréquence sont importantes pour déterminer leur énergie, leur visibilité et leur pouvoir de pénétration. Toutes les ondes électromagnétiques se déplacent dans le vide à une vitesse de 299,792 km / s. [8]

1.6. L'énergie solaire photovoltaïque

Le mot photovoltaïque est composé du terme photo, qui signifie le photon de la lumière et de voltaïque dont l'origine est le nom de l'inventeur de la pile électrique Volta. Autre explication est le synonyme de photopile. La technologie photovoltaïque (PV) offre une méthode pratique pour la conversion de la lumière du soleil disponible en abondance pendant une grande partie de l'année directement en 'électricité. Cette technique de conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule solaire et basée sur le principe de photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la cellule est exposée à la lumière.

La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale.

Le courant produit à la sortie d'une cellule photovoltaïque est de type continu. Dans le cas d'une installation domestique, un onduleur doit donc transformer celui-ci en courant alternatif. [9] [10][11]

1.7. Les différents éléments d'un module PV

Un module photovoltaïque ou un panneau solaire photovoltaïque est le convertisseur d'énergie lumineuse des photons compris dans le rayonnement solaire en énergie électrique, le module formé de plusieurs cellules photovoltaïques mises en série et en parallèle pour obtenir la tension désirée.

La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule. Dans le processus de fabrication des panneaux PV, un contrôle de qualité très strict est mis en place, car ils sont exposés pendant de nombreuses années aux intempéries dans des conditions de chaleur extrêmes à glaciers froids, vent, humidité, etc. [12] [7]

1.7.1. Cellule solaire

La cellule est l'élément le plus important du module photovoltaïque. Une cellule solaire est définie comme la plus petite pièce de semi-conducteur, ayant une tension associée à une seule jonction. Une chaîne de cellules représente un ensemble de cellules, généralement 10 ou 12 cellules dans un module à base de wafer ou environ 60-100 cellules dans un module à couche mince, qui sont reliées électriquement en série. Deux ou plusieurs chaînes de cellules sont parfois connectées en parallèle avec une diode de by-pass, créant ainsi un " sous-module " électriquement indépendant, dont la fonction est isolée de toute cellule ou chaîne qui n'est pas dans le sous-module. [13]

Les lignes de grillage (fingers) constituent le niveau le plus fin de métallisation directement sur les cellules et se composent d'un réseau de lignes. Le courant provenant des lignes de grille est collecté dans les barres omnibus (busbarre), qui se trouvent également directement sur la cellule.

La figure suivante représente un schéma des lignes de grille (fingers) et des barres omnibus (busbarre) sur une cellule monocristalline ou poly-cristalline en silicium.

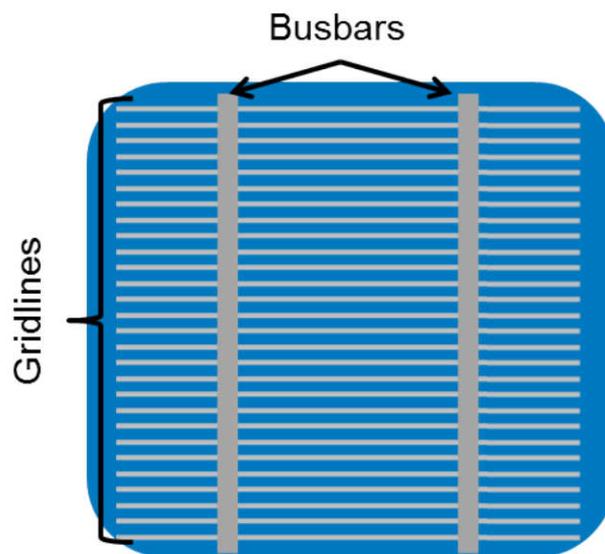


Fig 1.1 : un schéma des lignes de grille (fingers) et des barres omnibus (busbarre).

1.7.2. Couverte

Constituée de verre trempé à faible teneur en fer, la face avant du panneau PV a une fonction principalement protectrice car elle est soumise à des actions des agents et des impacts atmosphériques. Bien que la présence de la couverture soit nécessaire pour protéger les cellules PV, en fonction de la qualité du verre protecteur, elle peut réduire l'énergie du panneau solaire.[9]

1.7.3. Couches encapsulées

Avec des matériaux qui fournissent une excellente transmission au rayonnement solaire, ces couches sont responsables de la protection des cellules solaires et de leurs contacts, généralement les constructeurs utilisent EVA qui est un copolymère thermoplastique d'acétate de vinyle et d'éthylène, car il agit comme un isolant thermique transparent pour laisser la lumière du soleil pour les cellules PV. Assure aussi la cohésion du panneau dans son ensemble en remplissant le volume existant entre les couvercles avant et arrière, atténuant ainsi les vibrations et les impacts qui peuvent se produire. [9]

1.7.4. Cadre de soutien

Fait habituellement d'aluminium, le cadre de support d'un panneau solaire permet son insertion dans des structures qui vont regrouper les modules, il est donc la partie qui donne toute la robustesse mécanique au panneau. Il est important qu'il soit construit avec un matériau résistant aux différentes conditions météorologiques. [9]

1.7.5. Protection ultérieure

Les matériaux utilisés dans cette partie sont souvent transparent, cela favorise la performance du panneau en raison de la réflexion qu'il produit dans les cellules. Cette protection consiste fondamentalement à protéger contre les agents atmosphériques, en exerçant une barrière insurmontable contre l'humidité. [9]

1.7.6. Diodes by-pass

Les modules PV sont équipés de diodes de dérivation intégrées. Ces diodes sont nécessaires, car dans des conditions réelles, les modules PV peuvent être partiellement ombragés. L'ombre peut provenir d'un objet à distance, comme un arbre, une cheminée ou un bâtiment voisin. Elle peut également être causée par une feuille qui est tombé sur le module. L'ombrage partiel peut avoir des conséquences importantes sur le rendement du module solaire.

Le courant généré dans la cellule ombrée est considérablement réduit. Dans une connexion en série, le courant est limité par la cellule qui génère le courant le plus faible ; cette cellule impose le courant maximum qui circule dans le module.

Si une cellule est ombragée, la diode de by-pass commence à passer le courant. Par conséquent, le courant peut circuler autour de la cellule ombragée et le module peut toujours produire un courant égal à celui d'une cellule solaire simple non ombragée.

Dans les modules PV réels, toutes les cellules solaires ne sont pas équipées d'une diode de dérivation, mais des groupes de cellules partagent une diode. Par exemple, un module de 36 cellules, connectées en série en formant une chaîne, peut contenir trois diodes by-pass, chaque diode étant partagée par un groupe de 18 cellules. [9]

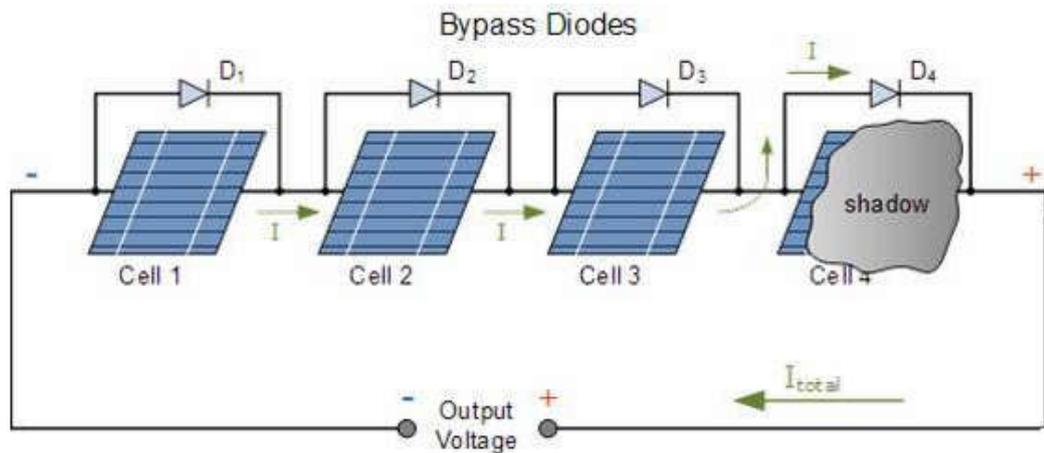


Fig 1.2 : un schème d'un ensemble de cellules protégées par des diodes by-pass.

1.7.7. Boîte de jonction électrique

Une boîte de jonction est généralement placée à l'arrière du module. Les connexions électriques à la cellule solaire y sont connectées avec les fils qui servent à connecter le module aux autres composants du système PV. [7]

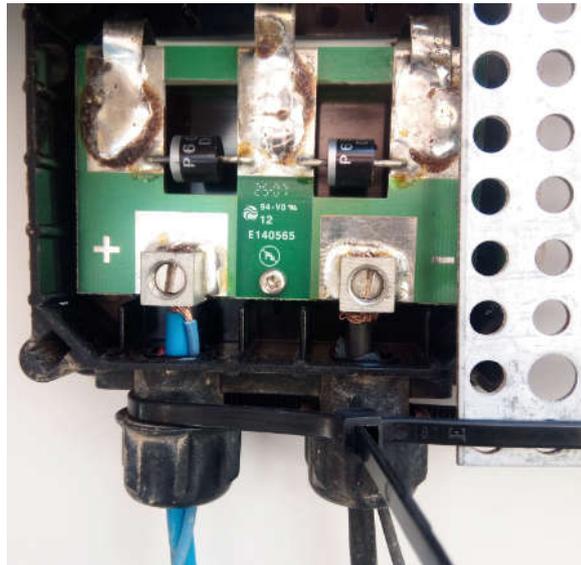


Fig 1.3 : Une boîte de jonction avec deux diodes by-pass.

1.8. Principe de fonctionnement de générateur PV

Basé sur l'effet photovoltaïque (la conversion de l'énergie lumineuse des photons en électricité) qui est l'origine du phénomène, la cellule solaire ou la photopile est un composante électronique, permet à l'exposition de la lumière de générer un courant électrique.

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, l'une dopée « N » par l'adjonction d'atomes de phosphore (P), Contient donc plus d'électrons qu'une

couche de silicium pur et l'autre dopée « P » par l'adjonction d'atomes de bore (B), Contient donc moins d'électrons qu'une couche de silicium pur, créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. La différence de potentielle entre les deux couches se crée lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, car ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P).

Le champ électrique obtenu ne permet le passage du courant que dans un seul sens : les électrons peuvent passer de la région P vers la région N, inversement les trous ne passent que de N vers P.

En somme, une cellule photovoltaïque est l'équivalent d'un générateur de courant auquel on a adjoint une diode. [11] [7] [14] [15]

1.9. Technologies des cellules solaires

Les cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteurs à base de silicium (Si), de germanium (Ge), de sélénium (Se), de sulfure de cadmium (CdS), de tellure de cadmium (CdTe) ou d'arséniure de gallium (GaAs). actuellement le silicium est le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules, ce matériau est très abondant dans la nature et on le trouve sous la forme de pierre de silice (sable, grés), le choix se pose également sur la durabilité et le prix des cellules. Le choix peut par ailleurs varier en fonction de l'ensoleillement du projet, de sa situation géographique ou tout simplement de son orientation.

On peut distinguer trois grandes familles de cellules photovoltaïques :

1.9.1. Les cellules au silicium cristallin

Le silicium monocristallin :

Les cellules qui en sont composées sont les plus performantes sur le marché : elles présentent un bon rendement à fort et moyen éclairément. Toutefois, leur prix reste élevé. Le silicium monocristallin est un matériau pur à 99,999 % et se présente sous la forme d'un cristal unique de grandes dimensions. Il affiche les meilleurs rendements sur le marché des produits actuellement disponibles. [16]



Fig 1.4: Cellule en silicium mono-cristallin.

Le silicium poly-cristallin :

Leur conception étant plus facile, leur coût de fabrication est moins important, cependant leur rendement est plus faible. [16] [17]

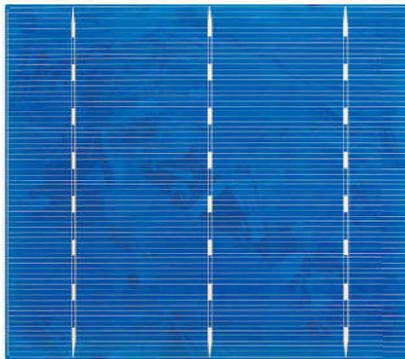


Fig 1.5 :Cellule en silicium mono-cristallin.

1.9.2. Les cellules à base de couches minces

Silicium amorphe

Nettement moins puissant au soleil que les deux précédents, mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres.

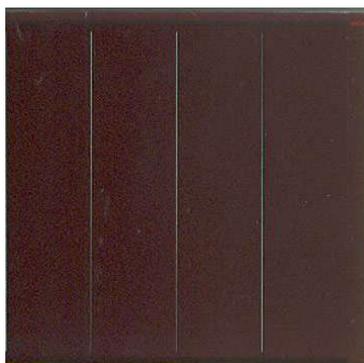


Fig 1.6 : Cellule en silicium amorphe.

CuInSe₂ (CIS) et CuInGaSe (CIGS)

À cause de difficultés d'industrialisation et surtout en raison du cadmium qu'elle contient (matériau dangereux), cette technologie est assez peu commercialisée, cependant, elle possède une bonne propriété électronique. De plus, elle bénéficie des mêmes commodités de fabrication que le silicium amorphe. [13]

CdTe

Le CdTe est une technologie qui permet d'augmenter le rendement des panneaux solaires, tout en diminuant leur coût. Mais, Il est important de noter que Ce type de cellules photovoltaïques n'est pas fabriqué à partir de silicium. Son composant de base est le tellure de cadmium. Ainsi que Le principal inconvénient de cette technologie réside dans la toxicité des produits utilisés à la fabrication de ce type de cellules. [18][19]

Nous allons regrouper les différents types de technologie dans le tableau suivant :

Tableau 1.3 : Les différents types de technologie des cellules solaires.

Type de cellules	Rendement des cellules(%)			Domaines d'application
	théorique	En labo	disponible	
Silicium monocristallin	27	24.7	14-16	modules de grandes dimensions pour toits et façades, appareils de faibles puissances, espace (satellites)
Silicium poly cristallin	27	19.8	12-14	modules de grandes dimensions pour toits et façades, générateurs de toutes tailles (reliés réseau ou sites isolés)

Silicium amorphe	25	13	6-8	appareils de faible puissance, production d'énergie embarquée (calculatrice, montre.) modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
Arséniure de Gallium GaAs	29	27.5	18-20	systèmes de concentrateur, espace (satellites).
CIS	27.5	18.2	10-12	appareils de faibles puissances, modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
Tellurure de Gadmuim CdTe	28.5	16	9-11	modules de grandes dimensions (intégrations dans le bâtiment)

1.10. Avantages et inconvénients d'une installation PV

En tant que source d'énergie, un système photovoltaïque offre des avantages mais aussi des inconvénients.

1.10.1. Les avantages

- ✓ Les systèmes photovoltaïques sont fiables : aucune pièce employée n'est en mouvement. Les matériaux utilisés (silicium, verre, aluminium), résistent aux conditions météorologiques extrêmes.
- ✓ un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant jusqu'au *MégaWatt*.
- ✓ Combinable avec d'autres sources d'énergie pour augmenter le rendement de système.
- ✓ La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologiques car le produit est non polluant, silencieux, et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- ✓ Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- ✓ Sur les sites isolés, l'énergie photovoltaïque offre une solution pratique pour obtenir de l'énergie électrique à moindre coût.

1.10.2. Les inconvénients

- ✓ 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%.
- ✓ l'énergie issue du générateur photovoltaïque est continue et de faible donc il doit être transformé par l'intermédiaire d'un onduleur.
- ✓ Lorsque le stockage de l'énergie électrique par des batteries est nécessaire, le coût du système photovoltaïque augmente.
- ✓ Les panneaux contiennent des produits toxiques et la filière de recyclage n'est pas encore existante.
- ✓ Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

[10]

1.11. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes notions qui caractérisent le solaire et la formation d'un générateur photovoltaïque et nous avons exploré le principe de la conversion photovoltaïque et certaines technologies utilisées ainsi que les différents types des cellules photovoltaïques. Puis nous avons terminé avec les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire.

Dans le chapitre suivant, nous présentons le modèle standard d'une cellule solaire et discutons ensuite les principaux facteurs qui influencent le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

CHAPITRE 2

*Facteurs influents le
fonctionnement d'un module
Photovoltaïque*

Chapitre 2 : Facteurs qui influents sur le fonctionnement d'un module Photovoltaïque

2.1. Introduction

La durée de vie typique d'un système photovoltaïque est d'environ 25 ans, au cours desquels peu d'entretien doit être effectué sur les composants du système, en particulier les modules PV. Les fabricants garantissent généralement une puissance entre 80% et 90% de la puissance initiale après 25 ans. Au cours d'une durée de vie de 25 ans ou plus, les modules PV sont exposés à divers contraintes externes provenant de sources diverses

- ✓ Les changements de température entre la nuit et le jour ainsi qu'entre l'hiver et l'été,
- ✓ Contraintes mécaniques dues par exemple au vent et à la neige,
- ✓ La contrainte par les substances transportées dans l'atmosphère telle que la poussière et le sable,
- ✓ L'humidité provenant de la pluie, et de l'atmosphère,
- ✓ Le rayonnement UV hautement énergétique est un défi pour de nombreux matériaux. [9]

Dans ce chapitre nous présentons le modèle standard d'une cellule solaire et discutons l'influence de certains paramètres météorologiques température atmosphérique, taux d'humidité, rayonnement solaire, sur la performance d'un module PV.

2.2. Modèle d'une cellule solaire

Le modèle à une seule diode est considéré comme **un modèle standard**, il décrit le fonctionnement d'un module photovoltaïque.

Il se généralise au modèle des panneaux photovoltaïques considérés comme un ensemble de cellules identiques branchées en série ou en parallèle.

Ce modèle à une diode est actuellement **le plus utilisé** en raison de sa simplicité. Il permet d'exprimer l'intensité d'un module PV en fonction de la tension à ses bornes et des conditions climatiques (ensoleillement et température ambiante). [7]

La cellule photovoltaïque se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, les pertes sont modélisées par les deux résistances, une résistance shunt et une résistance série. [3]

Le circuit électrique de la cellule est représenté par le schéma électrique suivant

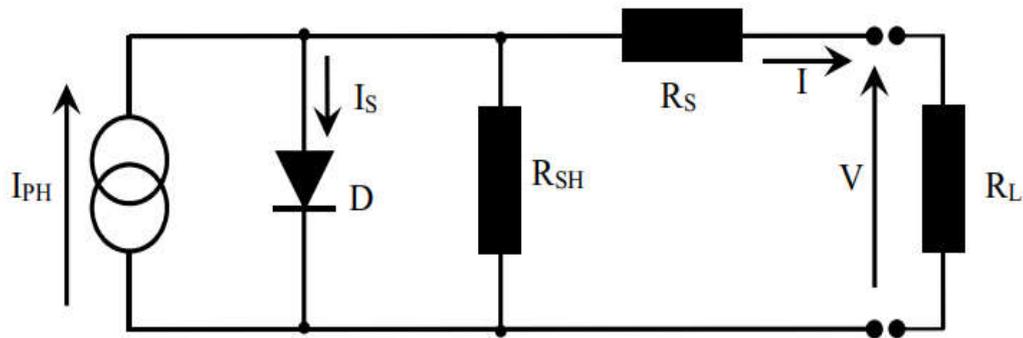


Fig 2.1 : Le modèle standard d'une cellule solaire.

Tel que les cinq paramètres sont

I_{PH} : le courant photonique,

I_S : courant de saturation,

α : facteur de qualité de la diode,

R_S : la résistance série,

R_{SH} : la résistance parallèle.

L'équation du courant-tension est déterminée à partir de la loi de Kirchhoff, elle est donnée par

$$I = I_{PH} - I_S \cdot \left(\exp\left(\frac{q \cdot (V + R_S I)}{\alpha \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right) - \frac{V + R_S I}{R_{SH}} \quad (2.1)$$

2.3. Paramètres électriques des cellules photovoltaïques

2.3.1. Courant de court-circuit

C'est le courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule. Ce courant augmente linéairement avec l'intensité d'éclairage de la cellule, il dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température. [8]

2.3.2. Tension à circuit ouvert

La tension en circuit ouvert est obtenue lorsque le courant traversant la cellule est nul. Elle dépend de la barrière énergétique, de la température et varie peu en fonction de l'intensité du rayonnement lumineux. [3]

2.3.3. Point de puissance maximale

L'utilisation optimale d'une photopile consiste à alimenter une charge sous la tension maximale et à un courant maximal.

En effet, suivant la formule $P = UI$, pour que la puissance soit maximale : il faut être dans les conditions où le produit UI est maximal : c'est le point de charge idéal de la photopile, ou point de puissance maximale P_m . On a coutume d'appeler U_m et I_m la tension et le courant correspondant à ce point $P_m = U_{pm} I_{pm}$ [7]

2.3.4. Puissance-crête (P_c (Wc))

La puissance maximale est fonction de l'éclairement. Lorsqu'il s'agit de la puissance maximale dans les conditions normalisées d'ensoleillement STC (1 000 W/m², 25 °C, spectre solaire AM 1,5), on parle alors de watts-crête (Wc) ou de puissance-crête. [8]

2.3.5. Facteur de forme FF

Un paramètre important souvent utilisé à partir de la caractéristique $I(V)$ pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le facteur de remplissage ou « fill factor (FF) ». C'est le rapport entre la puissance maximale que peut fournir une cellule et la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (puissance optimale). [3]

$$FF = \frac{P_{\max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (2.2)$$

2.3.6. Le rendement

Le rendement η des cellules PV est la propriété la plus importante d'une cellule solaire. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente. [9]

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{P_{\max}}{G \cdot S} = \frac{FF \cdot I_{cc} V_{co}}{P_{in}} \quad (2.3)$$

Vu que la surface du module n'est pas totalement pas recouverte de cellules solaires (par exemple : les cadres et l'espace entre les cellules solaires individuelles ne sont pas des surfaces actives), la valeur de rendement du module est inférieure à celle de la cellule individuelle

On peut calculer ce rendement pour différents éclairagements, mais le plus souvent, c'est dans les conditions STC qu'il est donné. On le calcule donc avec la puissance crête.

$$\eta = \frac{P_c}{1000 \cdot S} \quad (2.4)$$

2.4. Protections classiques d'un générateur photovoltaïque

Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage.

- Pour cela, deux types de protections sont classiquement utilisés dans les installations actuelles
La protection en cas de connexion en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour).
- la protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass) et éviter les points chauds. [3]

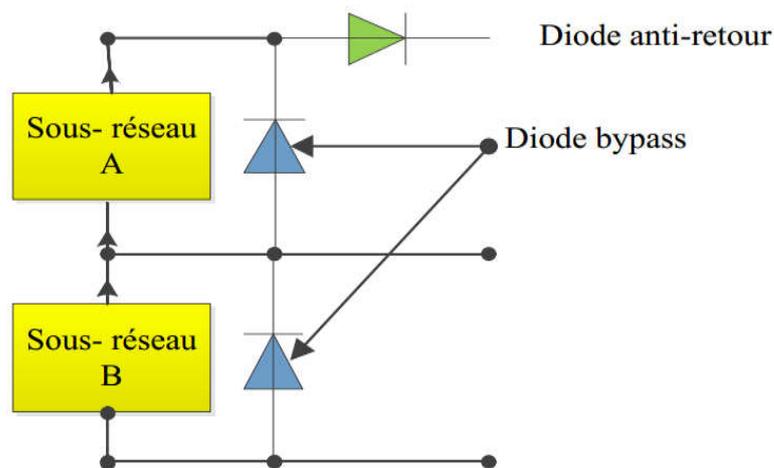


Fig 2.2 : Protection d'un générateur photovoltaïque

2.5. Influence de la température

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules photovoltaïques car les propriétés électriques d'un semi-conducteur sont très sensibles à la température. [20][21]

Les figures suivantes montrent les caractéristiques I-V et P-V d'un module solaire (PV) en fonction de la température, sous un éclairage constant.

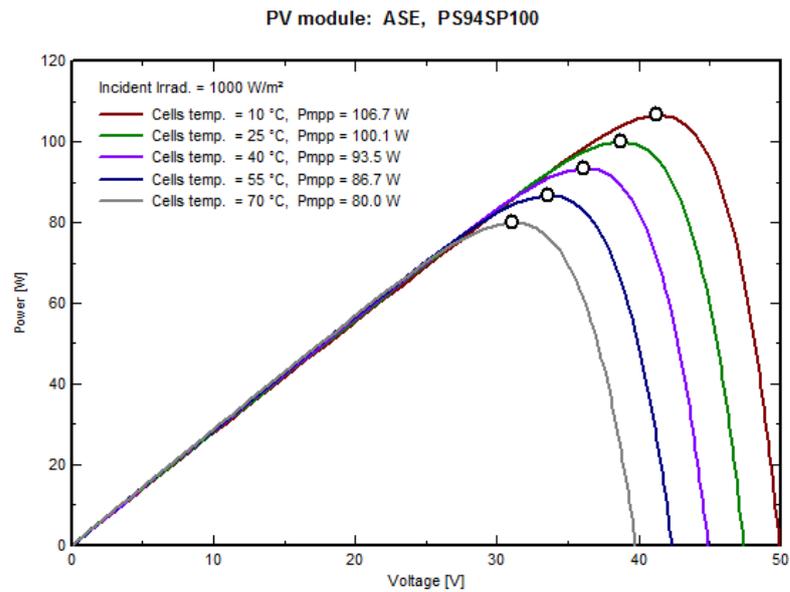


Fig 2.3 : Influence de la température sur la caractéristique P(V) pour une irradiation solaire de 1000W/m².

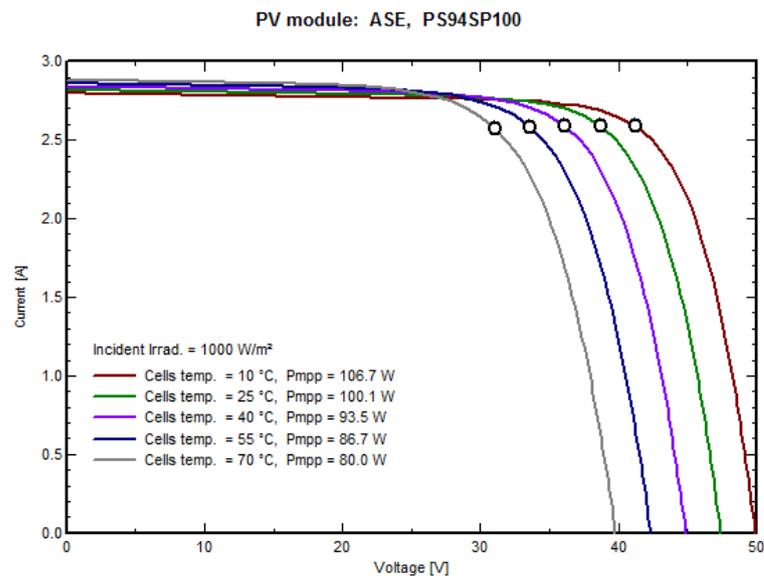


Fig 2.4 : Influence de la température sur la caractéristique I(V) pour une irradiation solaire de 1000W/m².

La caractéristique I-V en fonction de la température montre qu'elle ne change que légèrement lorsque la température change, ce qui signifie que la température a un effet à long terme.

2.6. L'influence de l'ensoleillement ou irradiation

Influence de la lumière du soleil ou de l'irradiation Selon les figures suivantes, les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque changent avec l'éclairage pour une température donnée. L'énergie électrique produite par une cellule photovoltaïque

dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. Lorsque l'ensoleillement augmente, l'intensité du courant photovoltaïque augmente. [21]

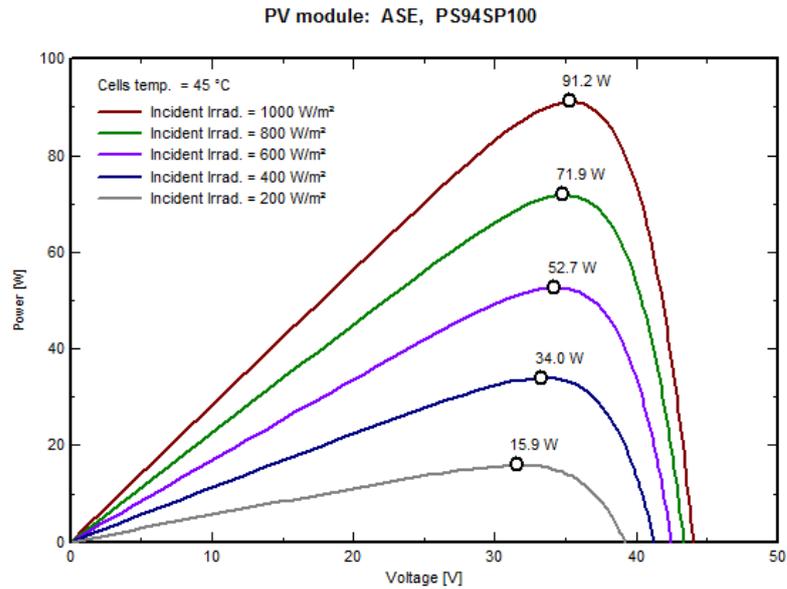


Fig 2.5 : Caractéristiques P(V) d'un module pour différentes irradiances solaires à 25°C.

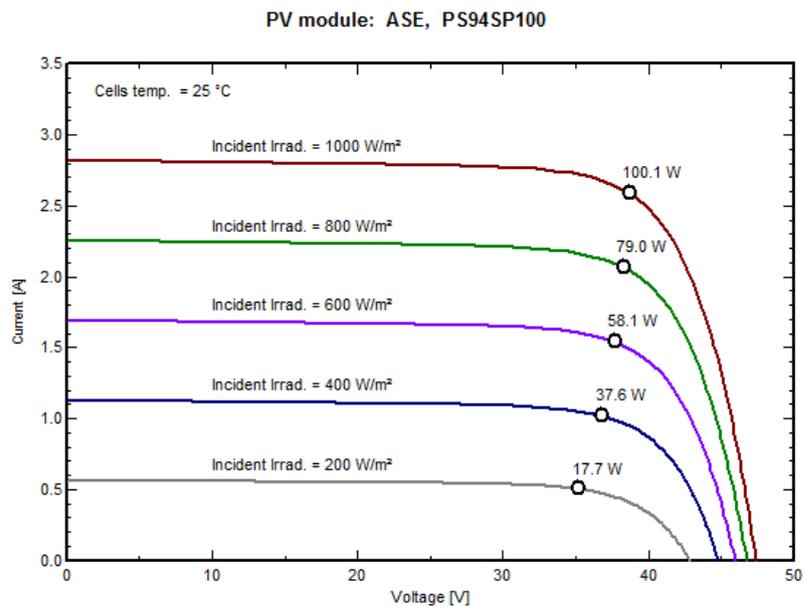


Fig 2.6 : Caractéristiques I(V) d'un module pour différentes irradiances solaires à 25°C.

Les courbes I-V se déplacent vers les valeurs croissantes permettant au module de produire une puissance électrique plus élevée, ce qui implique que les rayonnements solaires n'ont pas d'effets négatifs. [22]

En pratique, les irradiances énergétiques (électrons, neutrons, rayons cosmiques...) sont les seules responsables de la dégradation

2.7. L'effet de la résistance série

La résistance en série est la résistance interne de la cellule. Elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles de collecteurs et de la résistivité de ces grilles. [22]

La figure suivante montre l'influence de la résistance en série sur la caractéristique P(V).

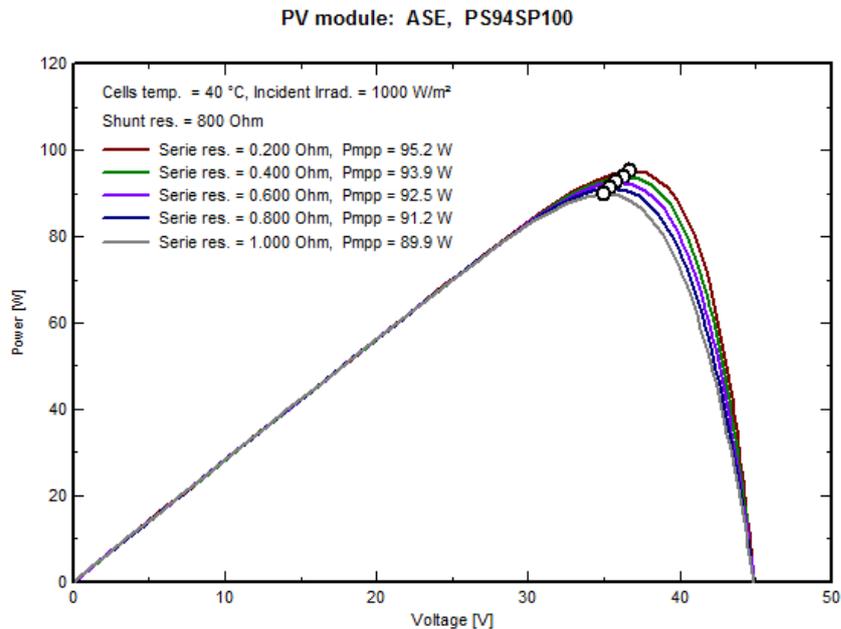


Fig 2.7 : L'influence de la résistance série R_s sur la caractéristique P(V).

2.8. L'effet de la résistance parallèle (shunt)

La résistance shunt est une résistance qui prend en compte la fuite qui se produit forcément entre les bornes opposées d'une photopile. [23]

La résistance shunt est directement liée au procédé de fabrication et son influence ne se fait directement sentir qu'à des valeurs de courant très faibles (proches du courant de court-circuit).

La figure suivante représente l'effet de la résistance shunt R_{sh} sur la caractéristique P(V) :

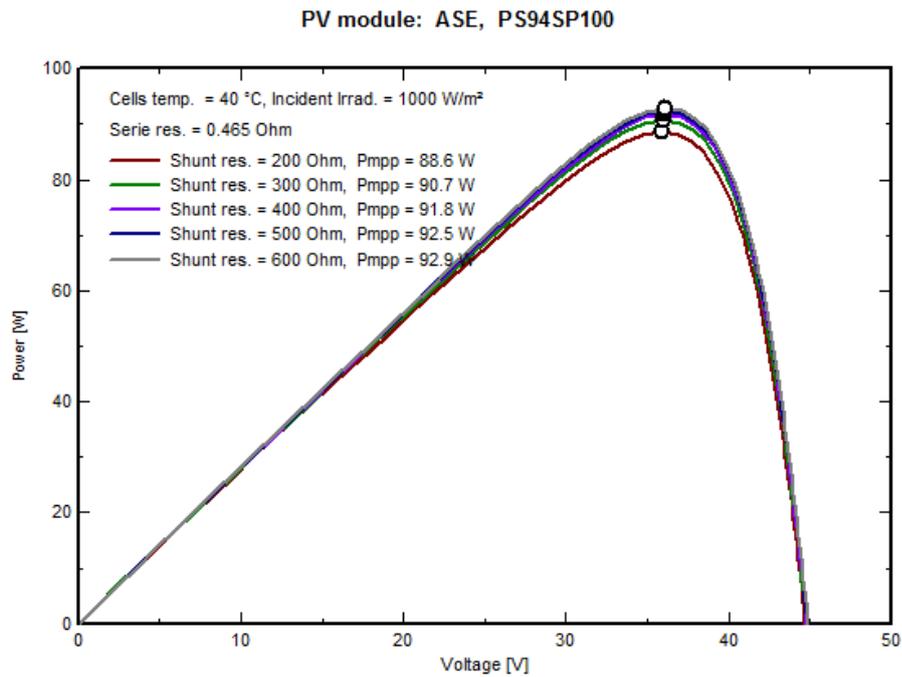


Fig 2.8 : L'influence de la résistance shunt R_{sh} Sur la caractéristique P (V).

2.9. L'effet de l'humidité

La figure suivante représente la variation de la tension V en fonction de l'humidité.

International Journal of Engineering Research and General Science Volume 2, Issue 4, June-July, 2014
ISSN 2091-2730

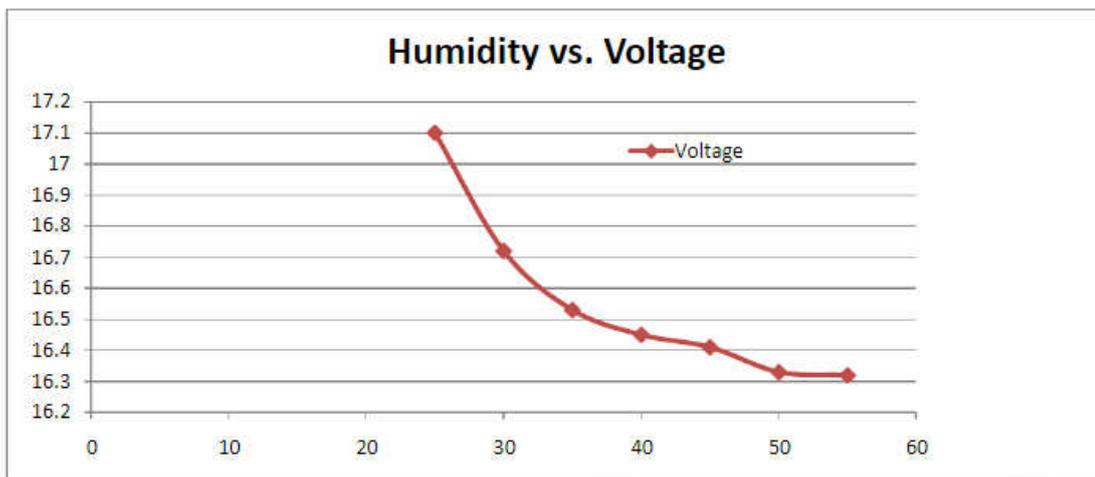


Fig 2.9 : La tension V en fonction de l'humidité. L'humidité apparaît sur l'axe X et la tension sur l'axe Y. [24]

La figure précédente montre que la tension de la cellule photovoltaïque est inversement proportionnelle à l'humidité. Ce qui implique une décroissance de la puissance dans les caractéristiques des modules PV.

2.10. Conclusion

La performance d'un générateur PV est fortement dépendante des conditions climatiques, en premier lieu du rayonnement solaire, de la température des modules, de l'humidité relative et de la résistance des modules PV. Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle standard de la cellule solaire et les effets les plus importants sur les caractéristiques des modules PV pour différentes conditions d'ensoleillement et de température.

Nous décrirons dans le chapitre suivant les différentes défaillances des modules photovoltaïques.

CHAPITRE 3

*Les différents défauts d'un
module photovoltaïque*

Chapitre 03 : Les différents défauts d'un module photovoltaïque

3.1. Introduction

Les défauts du module PV ont une influence directe sur ses performances et par conséquent sur sa production d'énergie, il est donc important de bien les connaître et les détailler pour pouvoir prévenir toutes défaillances dans le mode de fonctionnement de l'installation photovoltaïque. Pendant sa durée de vie, une installation photovoltaïque fait l'objet d'un diagnostic périodique. Ces tests et vérifications sont généralement annuels. La première étape de cette procédure de diagnostic consiste à détecter le problème par une inspection visuelle. Le technicien chargé de cette tâche doit être au courant de toutes les défaillances visuellement détectables afin d'être capable de les signaler.

Pour cela nous présentons d'abord quelques notions de défauts et de défaillances dans le domaine photovoltaïque. Nous décrirons ensuite la défaillance de tous les types de modules PV, puis détaillerons la défaillance spécifique à chaque technologie de module PV et terminerons ce chapitre par deux tableaux récapitulatifs des défauts, leurs causes, leurs conséquences sur le panneau PV.

3.2. Définition d'une défaillance d'un module PV

Une défaillance d'un module PV est un effet qui dégrade la puissance du module ou crée un problème de sécurité. Un problème purement esthétique n'est pas considéré comme une défaillance du module PV.

Un problème causé par une mauvaise manipulation ou par l'environnement local n'est pas considéré comme un "échec". D'une part, l'encrassement du module ou une défaillance due à la foudre ne sont pas considérés comme des défaillances du module PV. Le problème d'encrassement doit être traité par l'opérateur et la foudre est un cas de force majeure pour lequel le module n'a pas été conçu. En revanche, les défauts dus à une forte charge de neige sont considérés comme une défaillance du module si ce dernier est spécifié pour une charge de neige importante. [9][25]

3.3. Définition du défaut

Un défaut est tout ce qui, dans un module PV, n'est pas ce qu'on attend de lui. Un défaut peut impliquer une défaillance du module PV. Un défaut est un terme beaucoup plus large qu'un échec. Un défaut n'entraîne pas nécessairement une perte de sécurité

ou de puissance pour un module PV, mais spécifie une partie d'un module PV qui est différente d'un module PV parfait. [26]

3.4. Contrôle visuel

Principe de base pour identifier les défaillances et la méthode la plus efficace et rapide pour détecter les défaillances et les défauts d'un module PV c'est le contrôle visuel.

3.5. Défaillances des modules PV

Les défaillances des modules PV sont dues à de nombreux facteurs. Les défaillances liées à la façon dont le module est connecté au système PV et les défaillances d'emballage habituelles sont les mêmes pour tous les modules.

Certains défauts ne sont observés que sur certains types de modules et certains défauts ne sont même pas causés par le module mais par des sources externes ou des défauts intrinsèques. [25]

3.6. Les défaillances observées dans tous les modules PV

3.6.1. Serrage

Une défaillance relativement fréquente sur le terrain est le bris de verre des modules PV sans cadre causé par les pinces.

La Figure suivante présente deux exemples tirés du terrain.



Fig 3.1: Deux exemples du bris de verre.

Le transport et l'installation sont les premières étapes critiques dans la vie d'un module PV. Le couvercle en verre de certains modules PV peut se briser et provoquer la rupture des cellules en raison des vibrations et des chocs. [25]

3.6.2. Défaillance du connecteur rapide

Le connecteur rapide relie électriquement les modules solaires entre eux, aux boîtes à fusibles, aux câbles de liaison, aux boîtiers de couplage et à l'onduleur. Cet élément est très important pour la sécurité et la fiabilité de la production d'énergie du

système. Cependant, il existe très peu de littérature sur la fiabilité des connecteurs rapides disponibles dans la communauté PV. Dans la plupart des cas, les problèmes causés par le connecteur rapide ne sont pas considérés comme une défaillance du module PV. [9][26]

Des connecteurs rapides mal montés ou mal sertis peuvent entraîner une perte totale de puissance sur toute une chaîne. Dans des cas encore plus graves, ils peuvent provoquer des arcs électriques et donc des incendies.



Fig 3.2 : Un cas réel de la défaillance du connecteur.

3.6.3. Perte de collage de la feuille arrière (feuille de fond)

La face arrière d'un module sert à la fois à protéger les composants électroniques d'une exposition directe à l'environnement et à assurer un fonctionnement sûr en présence de tensions continues élevées. Les feuilles de fond peuvent être composées de verre ou de polymères et peuvent comporter une feuille de métal, ou une feuille de fond constituée d'une structure feuilletée avec un polymère très stable et résistant aux UV.

Lorsqu'une vitre arrière est utilisée au lieu d'une feuille de fond, elle peut se casser en se fracturant. Cela peut se produire en raison d'un montage incorrect, d'un impact de grêle, d'un impact d'objets soufflés par le vent, ou de tout autre type de contrainte mécanique.

Le long des fissures, il peut y avoir un petit espace et une certaine tension qui est capable de produire et de maintenir un arc électrique. Si cela se produit en conjonction avec la défaillance d'une diode de by-pass, toute la tension du système pourrait être présente à travers l'espace créant un arc important et soutenu qui est susceptible de faire fondre le verre pouvant déclencher un incendie.

Lorsqu'un module est construit avec des plaques de verre à l'avant et à l'arrière, il peut y avoir des contraintes supplémentaires qui augmentent le délaminage et le cassage du verre.

Sans un contrôle approprié du feuilletage, l'excès peut être poussé à l'extérieur des côtés du module, ce qui provoque une légère déformation du verre. Il en résulte une contrainte de traction importante dans l'encapsulant sur le bord du module qui aura alors une plus grande propension au décollement.

De même, le verre trempé n'est pas parfaitement plat et la présence d'une structure avec les matériaux de la cellule entraînera d'autres contraintes mécaniques résiduelles.

Toutes ces contraintes ont pour effet d'augmenter la probabilité de décollement et de bris de verre, ce qui peut entraîner de graves problèmes de performance et de sécurité. [9][17][25][27]

3.6.4. Matériau de fond à base métallique

Les matériaux de la plaque de fond peuvent également être construits avec une feuille métallique dans une structure stratifiée polymère pour fournir une structure imperméable à l'humidité qui est légère et potentiellement flexible. Dans ce cas, il est nécessaire de prévoir une couche d'isolation électrique plus robuste entre les cellules et la feuille métallique. Toute petite rupture de l'isolation électrique sur toute la surface de la feuille entraînera la charge de toute la feuille à la tension du système. Il y a donc une plus grande surface sur laquelle il faut se concentrer pour l'isolation électrique. De plus, une feuille de métal agira comme un condensateur haut tension, les cellules servant d'électrodes.

Enfin, la plupart du temps les modules sont réalisés avec une feuille de fond en matériau polymère feuilleté, comme dans les modules en Si cristallin typiques. Dans le cas des couches multiples, il existe un certain nombre d'interfaces qui peuvent se décoller en réponse à la chaleur, aux cycles thermiques, aux contraintes mécaniques, à l'humidité, à la lumière UV ou autres contraintes physiques ou chimiques. Si le décollement se produit en formant des bulles, il ne posera pas de problème de sécurité immédiat. Cette zone fonctionnerait probablement un peu plus chaude car la chaleur ne conduit pas aussi bien l'arrière, mais tant que la bulle n'est pas davantage perturbée, brisée ou dilatée, les problèmes de performance et de sécurité sont minimes. [26][28]



Fig 3.3 : Encapsulation décollement d'un module PV (delamination).

3.6.5. Défaillance de la boîte de jonction

La boîte de jonction est le conteneur fixé à l'arrière du module qui protège la connexion des chaînes de cellules des modules aux bornes externes. En général, la boîte de jonction contient les diodes de by-pass pour protéger les cellules d'une chaîne en cas de point chaud ou d'ombre. [9]

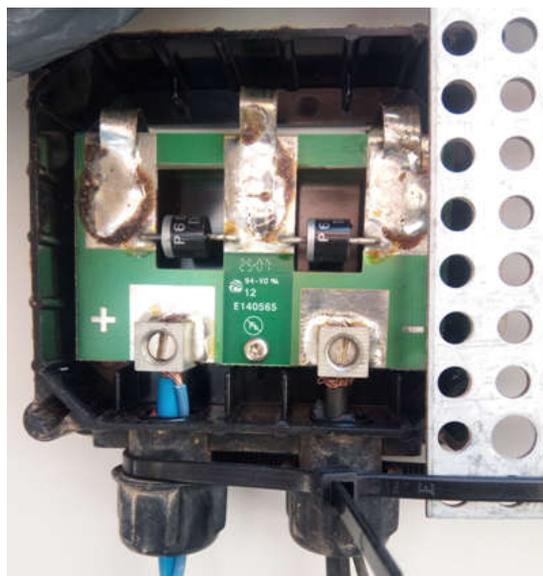


Fig 3.4 : Une boîte de jonction d'un module PV avec deux diodes by-pass.

Les défaillances observées sur le terrain sont :

- ✓ Mauvaise fixation de la boîte de jonction sur la feuille de fond.
- ✓ Boîte de jonction ouverts ou mal fermés en raison d'un mauvais processus de fabrication.
- ✓ Les infiltrations d'humidité qui provoquent la corrosion des connexions et des branchements dans la boîte de jonction.
- ✓ Mauvais câblage provoquant des arcs électriques internes dans le j-box. Cette défaillance est particulièrement dangereuse car l'amorçage d'arc peut déclencher un incendie.

Le manque de fiabilité des contacts à souder des interconnexions des branches peut causer une résistance élevée et un échauffement conséquent dans la boîte de jonction. Dans les cas extrêmes, le risque d'incendie augmente. [26][28]



Fig 3.5 : Défaillances de la boîte de jonction.

La figure précédente présente quelques types de défaillances de la boîte de jonction, la photo de gauche montre une boîte de jonction ouverte sur le terrain, celle du milieu une boîte de jonction mal collé sur la feuille de fond, et celle de droite une boîte de jonction avec un mauvais câblage.

3.6.6. Rupture du cadre

De nombreux modules photovoltaïques ont été conçus et appliqués pour les régions à forte charge de neige. Les charges de neige se glissent vers le bas de la pente et gênent l'espace potentiel entre le bord du cadre et la surface supérieure. La glace formée par la compression des zones de neige inférieures pousse contre l'extrémité exposée du cadre.



Fig 3.6 : Un coude de cadre entraîné par la neige.

La surface inclinée du module permet simplement à la neige de déplacer la charge vers les parties inférieures du module, ce qui induit également un couple aux points de serrage. [9][25][27]

3.7. Les défaillances observées dans les modules PV à base de silicium

3.7.1. Fissures dans les cellules

La plupart des cellules photovoltaïques sont à base de silicium. Cela rend les cellules photovoltaïques très fragiles. Dans une cellule solaire, des fissures peuvent se former dans différentes longueurs et orientations.

Le processus de mise en chaîne des cellules solaires présente un risque élevé de formation de fissures dans ces cellules. Une fois la production terminée, l'emballage, le transport et le rechargement des modules PV constituent une source importante de fissures dans les cellules.

Enfin, l'installation de modules PV est une des grandes sources de fissuration des cellules, par exemple si le module tombe ou si quelqu'un marche sur le module.

Une fois que des fissures de cellules sont présentes dans un module solaire, il y a plus de risques de formation de fissures plus longues et plus larges pendant le fonctionnement du module solaire. Ceci est dû aux contraintes mécaniques dues au vent ou à la charge de neige et aux contraintes thermomécaniques sur les modules solaires dues aux variations de température causées par le passage des nuages et les variations climatiques. [13][29]

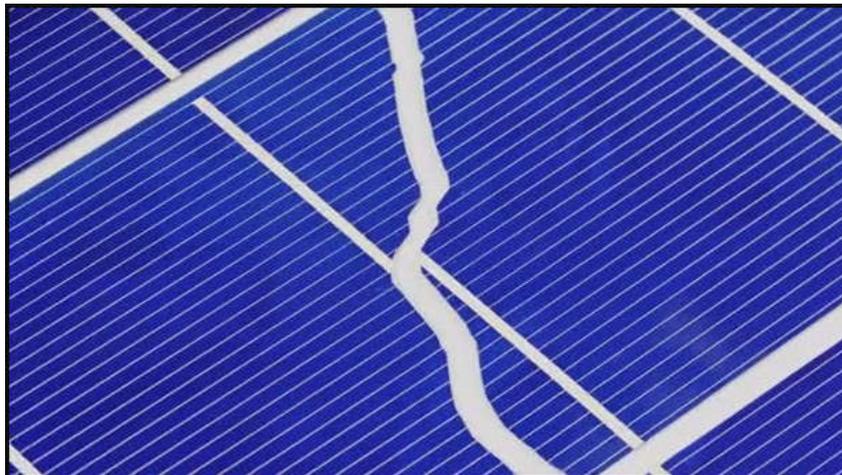


Fig 3.7 : Une fissure de cellule solaire à base de silicium.

3.7.2. Pistes d'escargots (Snail tracks)

Une trace d'escargot est visible à travers l'œil humain. Une piste d'escargot est une décoloration grise ou noire de la pâte argentée de la métallisation frontale des cellules

solaires imprimées à l'écran. Dans le module PV, l'effet ressemble à une piste d'escargot sur la vitre avant du module.

La décoloration se produit au bord de la cellule solaire, elle se produit généralement 3 mois à 1 an après l'installation des modules PV. La vitesse initiale de décoloration dépend de la saison et des conditions environnementales. Pendant l'été et dans les climats chauds. [30][25]



Fig 3.8 : photographie d'un module PV à piste d'escargot.

3.7.3. Marques de brûlures

L'une des défaillances les plus courantes (parfois observées dans les modules en silicium) est associée à des parties du module qui deviennent très chaudes en raison d'une rupture de soudure, d'une rupture de ruban, d'un échauffement localisé par application d'un courant inverse ou d'autres points chauds.

La fatigue thermique peut être à l'origine d'une rupture de la soudure. Les défaillances peuvent être causées par l'augmentation de la résistance et le réchauffement correspondant lorsque le joint commence à se rompre et que le courant circule toujours à travers lui. Au fur et à mesure que la température augmente, la résistance peut également augmenter jusqu'à ce que la température soit suffisamment élevée pour décolorer l'encapsulation.

Un deuxième type de marque de brûlure se produit parce qu'une cellule ou une partie d'une cellule est forcée de subir une inversion de la direction. Parfois, cela se produit parce qu'une partie du module est ombragée ; cela peut aussi se produire en raison de non uniformités à l'intérieur du module, y compris des cellules fissurées.

Les marques de brûlures peuvent généralement être identifiées de façon visuelle. La figure suivante montre un cas réel d'une Marques de brûlures. [25][31][32]

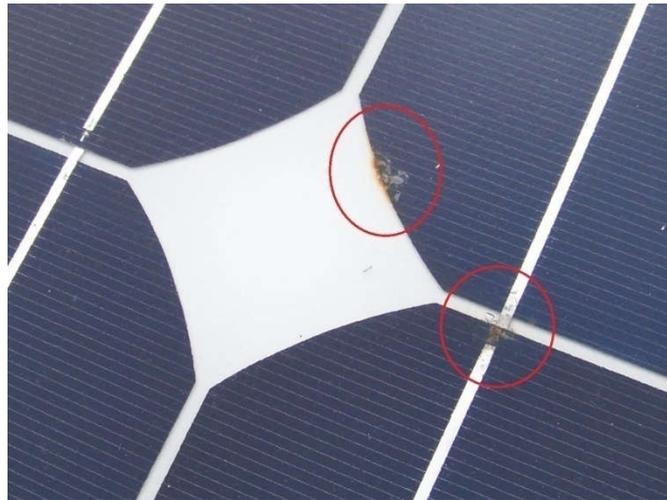


Fig 3.9 : Une Marques de brûlures dans un module PV.

3.8. Défaillances observées dans les modules à couche mince

Pour les modules PV à couche mince, il y a beaucoup moins d'expériences accumulées au cours des dernières années que pour les modules PV en silicium cristallin. De plus, la variété des différents types de modules minces est beaucoup plus large que pour les modules PV en silicium cristallin. C'est pourquoi de nombreuses défaillances de modules sont très spécifiques à un fabricant donné.

Dans ce qui suit, on se concentre sur les défaillances que l'on peut trouver dans ce type de modules PV.

3.8.1. Micro-arcs au niveau des connecteurs collés

Pour les modules PV à couche mince, ce défaut est généré lorsque le fabricant relie la chaîne de connexion aux cellules et entre elles. En raison de la perte de contact, des micro-arcs apparaissent au niveau des zones de raccordement.

Pour confirmer que cette défaillance se produit, il est possible d'appuyer ou de serrer le module PV aux points de connexion suspectés entre l'interconnexion de branche et l'interconnexion de cellule ou de chaîne à branche. [25][9]

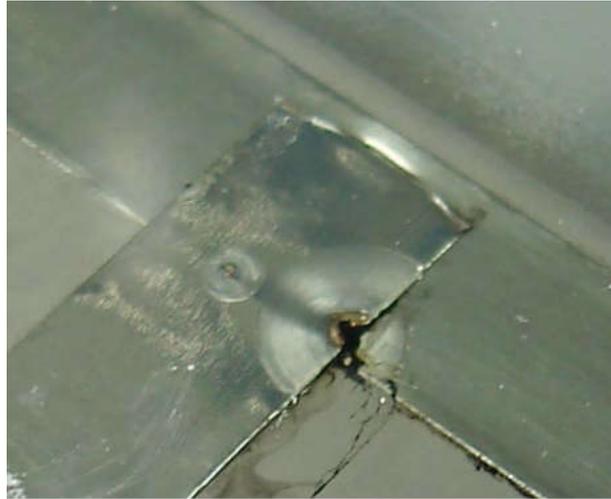


Fig 3.10 : Les arcs Micro qui se produisent si la colle conductrice sur l'interconnexion des fils a un contact insuffisant.

3.8.2. Shunt points chauds

La performance électrique des modules à couche mince dépend fortement de la qualité du processus de pose. La figure suivante montre par une image électroluminescente d'un module, dans lequel les shunts sont clairement visibles en zones brillantes et non brillantes.

Deux types de dérivations doivent être différenciés :

- ✓ Les shunts qui proviennent du procédé de fabrication.
- ✓ Les shunts qui proviennent du fonctionnement en polarisation inverse des cellules. Ces voies de dérivation sont causées par l'ombrage des modules ou des cellules d'un système PV. [32]

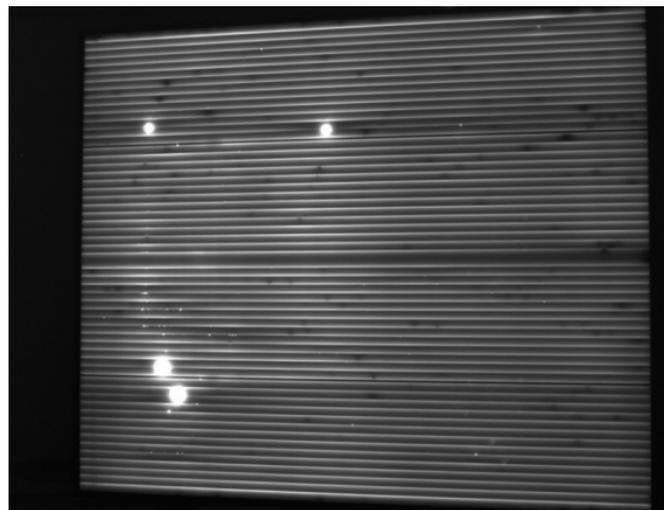


Fig 3.11 : Image électroluminescente d'un module à couche mince.

Les zones noires sont des shunts issus du processus de production. Les points brillants sont des shunts importants formés par le fonctionnement par points chauds.

Les shunts provenant du processus de fabrication des cellules solaires à couche mince sont situés à des endroits typiques du module :

1. Sur les lignes d'interconnexion des cellules à cause d'un procédé de traçage laser imparfait.
2. Zone de la cellule : toute particule ou impureté générée pendant le traitement, particules sur la surface du verre ou rugosité de la surface.
3. Bord de la zone de la cellule active en raison d'un processus d'insolation imparfait des bords.



Fig 3.12 : Formation de shunts à points chauds au niveau de l'interconnexion des cellules associés à des dommages sur de grandes surfaces de cellules

3.9. Les défaillances spécifiques observées dans les modules PV à couche mince CdTe

La plupart des systèmes CdTe actuels utilisent le verre comme feuille avant et arrière. La feuille de verre frontale est utilisée comme superstrat (super couche) pour la construction de la couche de minces couches fonctionnelles. [18]

3.9.1. Bris de verre à la façade

L'une des causes de bris de verre provient des contraintes dues à l'impact sur le bord du verre. Ce type de rupture est courant pour les modules CdTe. Les modules sans cadre sont plus sujets à la casse des bords que les modules encadrés. Il convient de mentionner que la différenciation des deux origines de bris de verre nécessite peu

d'expertise en la matière, puisque le lieu de l'impact peut être facilement trouvé sur du verre non trempé, car il n'y a pas de fragmentation. [18][19]

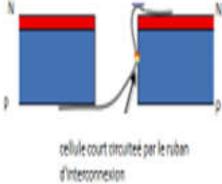
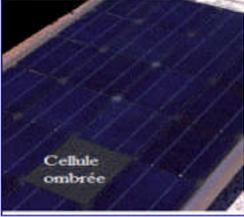


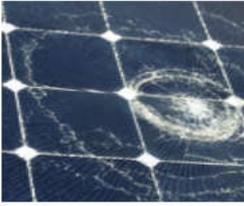
Fig 3.13 : Bris de verre à la façade pour un module CdTe.

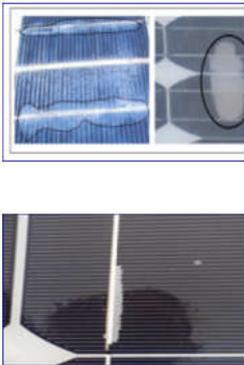
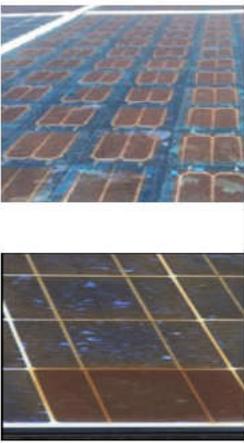
Nous récapitulons maintenant tous les types de défaillances d'un panneau photovoltaïque en deux grandes classes de défaillances : une classe de défaillances intrinsèques qui regroupe les défauts internes et une classe de défaillances extrinsèques qui regroupe les défauts externes. Ces défauts sont présentés dans les deux tableaux suivants :

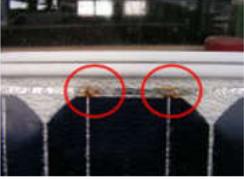
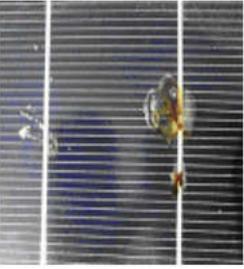
Tableau 3.1 : Défauts intrinsèques des modules PV.

Défauts	Partie	Image descriptive	La cause	La conséquence
Circuit ouvert	Module, la boîte de jonction ou le câblage interne.		Les fautes d'installation, et processus de fabrication.	-Des marques brunes /combustion à la face arrière du module, -Diminution de la puissance de sortie du module au fil au temps.
Défaut de « snail trail »	-La face arrière des modules, -Toute la surface des cellules .		Stresse du aux cycles thermique et l'humidité.	-Décoloration noirâtre, -Diminution des performances.
circuit ouvert	La cellule		-Contraintes thermiques, Grosse grêle. -Fissure invisible au moment de l'assemblage.	-Diminution graduelle de la performance de la cellule.

<p>Vieillessement</p>	<p>-Toute la surface des modules, -La boîte à jonction.</p>		<p>-l'humidité -le vent, -la grêle -la neige -l'homme (Des vibrations dues au transport, au manque de rigueur lors de l'installation.</p>	<p>-Perte de puissance -Diminution graduelle de la performance des modules PV.</p>
<p>court-circuit (au niveau des interconnexions)</p>	<p>La cellule (couche mince)</p>		<p>- les électrodes supérieures et inférieures sont beaucoup plus rapprochées et ont plus de chances de se retrouver court-circuitées par du matériel corrodé ou endommagé.</p>	<p>-Diminution graduelle de la performance de la cellule.</p>
<p>Interconnexion ou jonctions défectueuses</p>	<p>-La boîte de jonction</p>		<p>-La pénétration de la poussière, l'humidité et l'eau, -Fort courant.</p>	<p>-Mauvais contacts entre le module et le câble électrique, -Diminution de performance</p>
<p>Défaut de mismatch</p>	<p>La cellule</p>		<p>-L'association des cellules PV sont mal assorties ou (des caractéristiques I-V non identiques).</p>	<p>-Dissemblance de leur caractéristique physique et électrique, -Dégradation de la performance de la cellule, hot spot, Brulure.</p>

<p>Défaut de diode by pass et de diode anti -retour</p>	<p>-Boite à jonction</p>		<ul style="list-style-type: none"> -Destruction des diodes, -Absence des diodes, -Inversion de la polarité des diodes, -Diode mal connecte ou court-circuitée. 	<p>-Réduction graduelle de la puissance.</p>
<p>Cellule fissuré</p>	<p>-Verre, -Toutes les couches du module.</p>		<ul style="list-style-type: none"> -La nature très fragile du silicium et du verre, -Choc mécanique, -Pression, - Les vibrations dues au transport et à l'utilisation. 	<ul style="list-style-type: none"> -Perte de puissance électrique, -Augmentation de la résistance série de la cellule, -Diminution du performance de la cellule.
<p>Back skeet fissurée ou déchiré » « tedler »</p>	<p>-La face arrière d'un module.</p>		<ul style="list-style-type: none"> -Corrosion de la métallisation, -Pénétration de l'humidité et d'eau, - La température élevée, -Choc mécanique. 	<p>-Dégradation de Bach skeet qui ne permet plus d'assurer son rôle.</p>
<p>Défaut de câblage (déformation ou coupure)</p>	<p>-Câblage et connecteur.</p>		<ul style="list-style-type: none"> -Mal fixée sous les panneaux, -déjections, pollution, sable, neige etc..., -Mauvais câblage, Mauvais dimensionnement des câbles -Pression mécanique. 	<ul style="list-style-type: none"> -Diminution des performances, - Coupure dans le circuit.

<p>Fluage et Déformation du cadre</p>	<p>-Joints, -le cadre.</p>		<p>-Une forte charge de neige glisse sur le bord du module</p>	<p>- Si le cadre est détaché, Le verre du module PV est détruit et doit être échangé, -Infiltration d'eau, -Perte de performance.</p>
<p>Le décollement (délamination)</p>	<p>La face avant du module.</p>		<p>-La pénétration du sel et de l'humidité, les climats chauds.</p>	<p>-Une perte d'adhérence entre le polymère encapsulant et les cellules ou entre les cellules et le verre avant, -Dégradation de la puissance.</p>
<p>La décoloration (dégradation).</p>	<p>Entre le verre et les cellules.</p>		<p>L'exposition aux rayonnements UV combinée avec l'eau à des températures supérieures à 50C°.</p>	<p>-Changement de couleur (coloration jaunâtre puis marron) du matériau encapsulant, - Changement dans la structure chimique du polymère, -Diminution de la puissance générée.</p>

<p>l'augmentation de la résistance série</p>	<p>-Le cadre.</p>		<ul style="list-style-type: none"> - La corrosion de la connectique entre deux modules PV, -une vis de connexion mal serrée, 	<ul style="list-style-type: none"> -Une perte en tension, -Diminution des performances des modules PV.
<p>Les points chauds ou Hot-spots</p>	<ul style="list-style-type: none"> -La face arrière des modules. -Petite surface d'une cellule. 		<ul style="list-style-type: none"> -Température élevée, -Mauvaise connexion entre cellules. -Résistivité électrique supérieur à la normale en ce point précis du circuit PV. 	<ul style="list-style-type: none"> -Une forte diminution du courant produit par le module PV.
<p>Les bulles d'air</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Le coté arrière des module PV, -le centre des cellules, -le coté avant entre le verre et les cellules. 	<p style="text-align: center;">+</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Conditions météorologiques, -Le manque d'adhérence de l'EVA affecte seulement une petite surface, il est combiné avec le gonflement de la zone où l'adhésion a été perdue. 	<ul style="list-style-type: none"> -Diminution des performances, -Minimiser la durée de vie des modules PV.
<p>L'arc électrique (série, parallèle ou terre).</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Connexion des câbles (connecteurs), ou à l'intérieur des modules. 		<ul style="list-style-type: none"> -Une forte température à l'intérieur des modules, -Connexions desserrées ou les défauts de connexions, -Un système isolant est défectueux, -La mauvaise qualité des composants 	<ul style="list-style-type: none"> -Risque d'incendie, -danger de mort, -un choc électrique

Le deuxième tableau ci-dessous récapitule les défauts externes des modules photovoltaïques :

Tableau 3.2 : Les défauts extrinsèques des modules PV.

Défauts extrinsèques	Image descriptive
Masque	
Feuille d'arbre	
Déjection d'oiseau	
Neige	
Ombrage	
Poussière	

Mauvaise installation	
Mismatch entre les modules.	

3.10. Conclusion

Un module photovoltaïque peut-être dégradé au fil du temps, cette dégradation se traduit par un changement dans les valeurs de ses paramètres et de ses performances.

Il est important de connaître les défauts en détail afin d'éviter toute défaillance dans le mode de fonctionnement de l'installation photovoltaïque. Certaines défaillances sont généralement difficiles à définir comme une défaillance d'un module PV ou comme une défaillance de l'entrepreneur, de l'installateur ou du concepteur du système ou même pour d'autres causes. Pour ce but, nous avons présenté deux tableaux récapitulatifs de la plupart des défauts qui existent dans un module photovoltaïque.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Les dysfonctionnements observés sur le terrain mettent en évidence la nécessité de vérifier régulièrement les installations PV autonomes, à la réception et cours du temps, et pas seulement lorsque des problèmes surviennent.

L'objectif de travail est de rédiger un document d'outil pour le diagnostic des installations photovoltaïques autonomes. L'objectif est d'identifier les informations nécessaires au diagnostic et à la procédure de vérification des systèmes photovoltaïques autonomes après installation, que ce soit pour la phase de mise en exploitation ou pour une intervention de maintenance ou de prévention.

Ce mémoire est divisé en deux parties la première partie décrit et énumère les informations nécessaires, met en évidence les parties de l'installation qui doivent être vérifiées, ce qu'il faut rechercher, quels types des défauts peuvent survenir pour effectuer la procédure de diagnostic. La deuxième partie résume l'information décrite et présentée dans la première partie sous forme de tableaux.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] JEAN-PAUL BRAUN, 'Cellules solaires Les bases de l'énergie photovoltaïque', éditions techniques et scientifique françaises, 2010.

- [2] Abdulrauf Ahmed AswayAbaid, « DESIGN AND OPERATION OF A STAND-ALONE SOLAR PATHWAY FOR PUBLIC PARK LIGHTING », Thèse Master, Université de technologie de Cape Peninsula, 2017.

- [3] M. MUSTAPHA BELARBI, « Contribution à l'étude d'un générateur solaire pour site autonome », Thèse de Doctorat, UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE D'ORAN, 2015.

- [4] « SolarElectricityHandbook A simple » practical guide to solar energy: how to design and install photovoltaic solar electric systems.

- [5] ParimitaMohanty, « SolarPhotovoltaic System Applications, A Guidebook for Off-Grid Electrification », 2015.

- [6] PhilippeBarrade, « électronique de puissance méthodologie et convertisseurs élémentaire », press polytechnique et universitaires, 1ère édition 2006.

- [7] Zrinski, Yvonne Booth « Planning and Installing Photovoltaic Systems », A guide for installers, architects and engineer, second edition, 2008.

- [8] Abdulrauf Ahmed AswayAbaid, « DESIGN AND OPERATION OF A STAND-ALONE SOLAR PATHWAY FOR PUBLIC PARK LIGHTING », Thèse Master, Université de technologie de Cape Peninsula, 2017.

- [9] Arno HM Smets, Klaus Jäger, Olindo Isabella, René ACMM van Swaaij and Miro Zeman, 'Solar energy, The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems', 2016.

- [10] Michel Viloz, « Installations photovoltaïques, Conception et dimensionnement d'installations raccordées au réseau », 5e édition, 2012.

- [11] AurianArrigoni, « Conception et dimensionnement des installations photovoltaïques raccordées au réseau », Editions Eyrolles, 2011.

- [12] Sandia National Laboratories operated for the United States « stand-alone photovoltaic systems », a hand book of recommended design practice, 1995.
- [13] Benmoussa, W. C., S. Amara, and A. Zerga. "Etude comparative des modèles de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire au silicium monocristallin." *Revue des Energies Renouvelables ICRES-07* (2007): 301-306.
- [14] IbrahimTahraoui,« Dimensionnement et Etude d'une installation photovoltaïque pour une habitation domestique », mémoire de Master, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID TLEMCEM, 2016/2017.
- [15] UNION TECHNIQUE DE L'ELECTRICITE, « Installations photovoltaïques raccordées au réseau public de distribution »,GUIDE PRATIQUE,2010.
- [16] BOUSSAID, MOHAMMED. "Modélisation des phénomènes de vieillissement des modules Photovoltaïques." (2011).
- [17] SADOK, Mohammed. "Détermination des Paramètres, Performances et Etude de la Dégradation des Modules Photovoltaïques en milieu saharien." (2011).
- [18] M. Held, "Life Cycle Assessment of CdTe Module Recycling," in *24th EU PVSEC Conference*, 2009, pp. 2370-2375.
- [19] Six and Smolders, "Future trends in soil cadmium concentration under current cadmium flux to European agricultural soils," *Science of The Total Environment*, vol.
- [20] URL : <http://www.cythelia.fr> Conseil et formation en énergie photovoltaïque.
- [21] L.Kemmouche ; Modele de fonctionnement d'une station solaire photovoltaïque, enprevision de panne", mémoire de magistère, université de Constantine, année 2002.
- [22] F. zerhouni, and al; Approche Dans La Modélisation D'un Générateur Photovoltaïque; ICEL, november 13-15, U.S.T. Oran, Algeria 2000.
- [23] A. Ricaud ; Photopiles solaire de la physique de conversion photovoltaïque auxfilères, matériaux et procédées; presses polytechniques et universitaires romandes 1997.
- [24] Manoj Kumar Panjwani , Dr. Ghous Bukshsh Narejo, Effect of Humidity on the Efficiency of Solar Cell (photovoltaic), *International Journal of Engineering Research and General Science* Volume 2, Issue 4, June-July, 2014.

- [25] Köntges, M., et al. "Performance and reliability of photovoltaic systems." *Subtask 3* (2014): 4-20.
- [26] Fateh, Hassani, and Noura Mohamed Islam. "Détection des pannes photovoltaïques par les réseaux de neurones probabiliste." (2018).
- [27] KHENFER, Amar. *Etude et conception d'une architecture en vue de la détection de défauts dans une installation photovoltaïque*. Diss. 2015.
- [28] Bun, Long. *Détection et localisation de défauts dans un système photovoltaïque*. Diss. Université de Grenoble, 2011.
- [29] Belaout, Abdesslam. *Etude et diagnostic des défauts fréquents aux systèmes photovoltaïques (PV) par emploi de la caractéristique courant-tension*. Diss. 2018.
- [30] DJEBBOURI, Hadjer, and Mohammed SADOK. "Le Module PV UDTS-50." (2017).
- [31] Jordan, Dirk C., et al. "Photovoltaic failure and degradation modes." *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 25.4 (2017): 318-326.
- [32] Simon, Michael, and Edson L. Meyer. "Detection and analysis of hot-spot formation in solar cells." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 94.2 (2010): 106-113.