

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



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

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER PROFESSIONNEL

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE

Présenté par
Karim BELABDI
Hayet AIT OUARAB

Thème

Etude du processus de dégradation d'une cellule photovoltaïque

Mémoire soutenu publiquement le 13 juillet 2015 devant le jury composé de :

M Slimane REZGUI

Maitre Assistant A, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Président

M Arezki DICHE

Maitre Assistant A, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Rapporteur

M Kaci GHEDAMSI

Maitre de Conférences A, Université Abderrahmane Mira de Béjaïa, Rapporteur

M Ferroudja BOUALI – DJADEL

Maitre Assistant A, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Examineur

M Farid NAMANI

Maitre Assistant A, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Examineur

REMERCIEMENTS

*J'exprime mes chaleureux remerciements A **Mr Arezki DICHE** qui a suivi avec excellence nos travaux. Pour ses fructueuses remarques, ses encouragements et sa passion pour la recherche .Qu'il trouve ici le témoignage de notre profonde gratitude.*

Nous exprimons notre profonde gratitude à l'ensemble des membres de jury qui ont bien accepté d'en faire partie ; nous leurs adressons nos vifs remerciements.

Nous remercions également, noss amis et avec qui nous avons passé une excellente ambiance de travail.

Nous remercions toute personne ayant contribue de près ou de loin à la mise au point de ce travail.

Dédicaces

À MES CHERS PARENTS

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

Je vous remercie pour tout le soutien et l'encouragement que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.

Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez.

Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.

A MES CHERS FRERES ET SŒURS

En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde reconnaissance, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde.

À TOUT MES AMIS ET TOUTES MES AMIES

En souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble.

Veillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.

Karim



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Ma très chère mère qui m'a toujours soutenu ;

Mon père ;

Mes frère : Nabil et sa femme Taous , Samir et sa femme Hayet ,

Mounir ;

Mes sœurs : Naziha , Turkia ;

Mes anges : Lamara ; Aylan et Rayen ;

Ma nouvelle famille Zair ;

Mon marie Samir ;

Ma très chère amie Louiza ;

Tous mes ami(s),(es) ;

Tous mes cousins et cousines ;

Mon binôme Karim .

HAYET

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	06
<u>CHAPITRE I : GENERALITES SUR L'ENERGIE PHOTOVOLTAIQUE</u>	
I.1. Introduction.....	08
I.2. Définition	08
I.3. Le spectre solaire	09
I.4. Le rayonnement solaire	10
I.4.a. Rayonnement direct	10
I.4.b. Rayonnement diffus	11
I.4.c. Rayonnement solaire réfléchi ou l'albédo du sol	11
I.4.d- Rayonnement global.....	11
I.5. Dualité de la lumière	11
I.6. Conversion photovoltaïque	12
I.7. L'effet photovoltaïque	12
I.8. Le principe de conversion photovoltaïque	12
I.9. La cellule solaire	13
I.10. Processus de fabrication des systèmes photovoltaïques	14
I.10.A. Voie chimique (procédé Siemens)	14
I.10.B. Voie métallurgique (procédé Elkem)	15
I.10. C. Autres voies	15
I.11. Fabrication des cellules et modules photovoltaïques	15
I.11.1. Cristallisation du silicium et mise en forme des plaques	15
I.11.2. Silicium monocristallin (sc-Si)	16
I.11.3. Silicium multicristallin (mc-Si)	17
I.11.4. Silicium multicristallin en ruban	18
I.12. Secteurs d'applications	18
I.12.1. Domaine spatial	18
I.12.2.Habitation isolée	18
I.12.3.Industrie isolée	18
I.12.4. Centrale de puissance	19
I.12.5. Résidence urbaine	19
I.12.6 Traction électrique.....	20
I.13. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	20

I.13.a. Les avantages	20
I.13.b. les inconvénients	21
I.14. Conclusion	22

CHAPITRE II : CONCEPTION D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

II.1. Introduction	23
II.2. Définition	23
II.3. La cellule solaire	23
II.4. Fonctionnement de la cellule photovoltaïque	24
II.5. Les constituants de base d'une cellule photovoltaïque	26
II.5.1. Passivation des faces avant et arrière	27
II.5.2. Couche antireflet	27
II.5.3. Texturation de la surface	28
II.5.4. Contacts face avant et arrière	28
II.5.5. Back Surface Field (BSF)	28
II.6. Les différents types de cellules solaires	29
II.6.1. Les cellules solaires au silicium	29
II.6.2. Les cellules solaires à couche mince	30
II.6.3. Les cellules solaires organiques	31
II.6.4. Tableau récapitulatif	31
II.7. Caractéristique électrique	33
II.7.1. Modèle électrique	33
II.7.1.A. Cellule solaire idéale	33
II.7.1.B. Modèle électrique a une diode	34
II.7.1.C. Modèle électrique a deux diodes	37
II.7.2. Les grandeurs caractéristiques d'une cellule P-V	37
II.8. Module photovoltaïque	40
II.9. Groupement des cellules photovoltaïques	40
II.9.a. Groupement en série	40
II.9.b. Groupement en parallèle	41
II.9.c. Groupement mixte (série-parallèle)	42
II.12. Conclusion	44

CHAPITRE III : DEGRADATION D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAIQUE

III.1.Introduction	45
III.2.Indice de performance	45
III.2.1. Fonction de l'indice de performance	45
III.2.2. Méthode de calcul de l'indice de performance	46
III.2.3.A. Méthode du Calcul manuel	47
III.2.4.B. Méthode du Calcul automatique	47
III.3. Les facteurs influençant sur la dégradation de la cellule P-V	48
III.4. Modélisation de générateur PV	48
III.4.1. Paramètres de la simulation	49
III.4.2. cas d'une cellule P-V.....	49
III.4.2.1. Influence de la température.....	49
III.4.2.2. Influence de l'ensoleillement ou irradiation.....	51
III.4.2.3. Effet de la résistance série.....	52
III.4.2.4. Effet de la résistance shunt	53
III.4.2.5. Discussion des résultats de simulation	55
III.4.3. cas d'un module P-V.....	55
III.4.3.1. Constitution d'un générateur photovoltaïque.....	55
III.4.3.2. Modélisation des différents défauts.....	56
III.4.3.2.1 Défaut d'ombrage	57
III.4.3.2.2. Défaut de mismatch	57
III.4.3.3. Discussion des résultats de simulation	60
III.5. Effet de l'humidité	61
III.6. Impact de la poussière sur le rendement des modules photovoltaïques	61
III.7. Potential Induced Degradation (Le PID)	62
III.7.A. Les conséquences du PID	63
III.7.B. Le dépistage du phénomène du PID	65
III.7.C. Les précautions à prendre	66
III.8. Corrosion TCO	66
III.8.A. Les Causes de la Corrosion TCO	67
III.8.B. Les contre-mesures	68
III.9. Problème de diode de by-pass	68
III.10. Ombrage ou encrassement des panneaux photovoltaïques	70

III.11. Pertes dans les lignes	71
III.12. Coefficient de rendement des panneaux photovoltaïques	71
III.13. Le vieillissement des cellules solaires	71
III.14. Conclusion	71
CONCLUSION GENERALE	72

INTRODUCTION GENERALE

Historique

En 1839, Antoine-César Becquerel constate les effets électriques que produisent les rayons solaires dans une pile.

En 1905, Einstein découvrit que l'énergie de ces quanta de lumière est proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique.

L'utilisation des cellules solaires débute dans les années quarante. Le domaine spatial a besoin d'une énergie sans combustible embarqué. La recherche s'intensifie sur le photovoltaïque.

En 1954 est créée par les laboratoires BELL la première cellule photovoltaïque avec un rendement de 4%.

Le domaine spatial devient le banc d'essai de la technologie photovoltaïque. Les coûts de fabrication élevés des cellules et leurs rendements médiocres ne leur permettaient pas encore une exploitation à grande échelle. Il faudra attendre les années 70 pour que les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie photovoltaïque.

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie du Soleil est à l'origine de la plupart des sources d'énergie disponibles sur terre. En effet, le Soleil est l'élément-clé de la machine climatique de la Terre et par conséquent il participe aux mouvements des vents (énergie éolienne) et de l'eau (énergie hydroélectrique).

De plus, l'énergie solaire peut être directement captée et transformée en électricité grâce à des panneaux solaires installés sur les façades ou les toits des bâtiments.

Le soleil est une source quasiment inépuisable qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 15000 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (kWc/m²) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que ne consomme l'humanité en une année depuis longtemps, l'homme a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil, l'étoile la plus proche de notre planète. La plupart des utilisations sont directes comme la photosynthèse dans l'agriculture, ou dans des diverses applications de séchage et chauffage, autant artisanale qu'industrielle. Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, malgré une atténuation importante lors de la traversée de l'atmosphère, une quantité importante arrive à la surface du sol. On peut ainsi compter sur 1000 W/m² dans les zones tempérées et jusqu'à 1400 W/m² lorsque l'atmosphère est faiblement polluée en poussière ou en eau. Le flux solaire reçu au niveau du sol terrestre dépend ainsi de plusieurs paramètres [1] comme :

- L'orientation, la nature et l'inclinaison de la surface de la terre.
- La latitude du lieu de collecte, de son degré de pollution ainsi que de son altitude.
- La période de l'année.
- L'instant considéré dans la journée.
- La nature des couches nuageuses.

Dans le présent travail, on s'intéresse à l'effet de différents paramètres, à savoir : la température, l'ensoleillement, l'effet d'ombrage, ainsi que la dégradation interne à la cellule représentée par la variation des deux résistances série et parallèle, l'effet du PID ainsi que la corrosion et d autre facteurs environnementaux sur le rendement de la cellule photovoltaïque et par extension, le panneau photovoltaïque. Nous avons subdivisé le manuscrit en trois chapitres :

Nous débuterons par une introduction générale

Le premier chapitre présente des généralités sur l'énergie photovoltaïque. Le deuxième chapitre étudie la cellule photovoltaïque. Le dernier chapitre est consacré aux causes et facteurs contribuant a la détérioration des cellules solaires. Enfin nous terminerons par une conclusion générale.

CHAPITRE I : GENERALITEES SUR L'ENERGIE PHOTOVOLTAIQUE

I.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons voir des généralités sur l'énergie photovoltaïque ainsi que l'industrie du silicium.

I.2. Définition

Le terme (photovoltaïque) est composé du grec ancien (photos) = lumière, et du nom du physicien italien, Alessandro Volta, inventeur de la pile électrique, qui donna aussi son nom à l'unité de mesure de la tension électrique, le volt.

L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par la conversion directe de l'énergie lumineuse du soleil en électricité grâce à une cellule photovoltaïque. Les modules photovoltaïques n'utilisent que le rayonnement solaire (énergie lumineuse) pour produire l'électricité, sa chaleur n'étant pas un intermédiaire dans la production d'électricité photovoltaïque. [1]

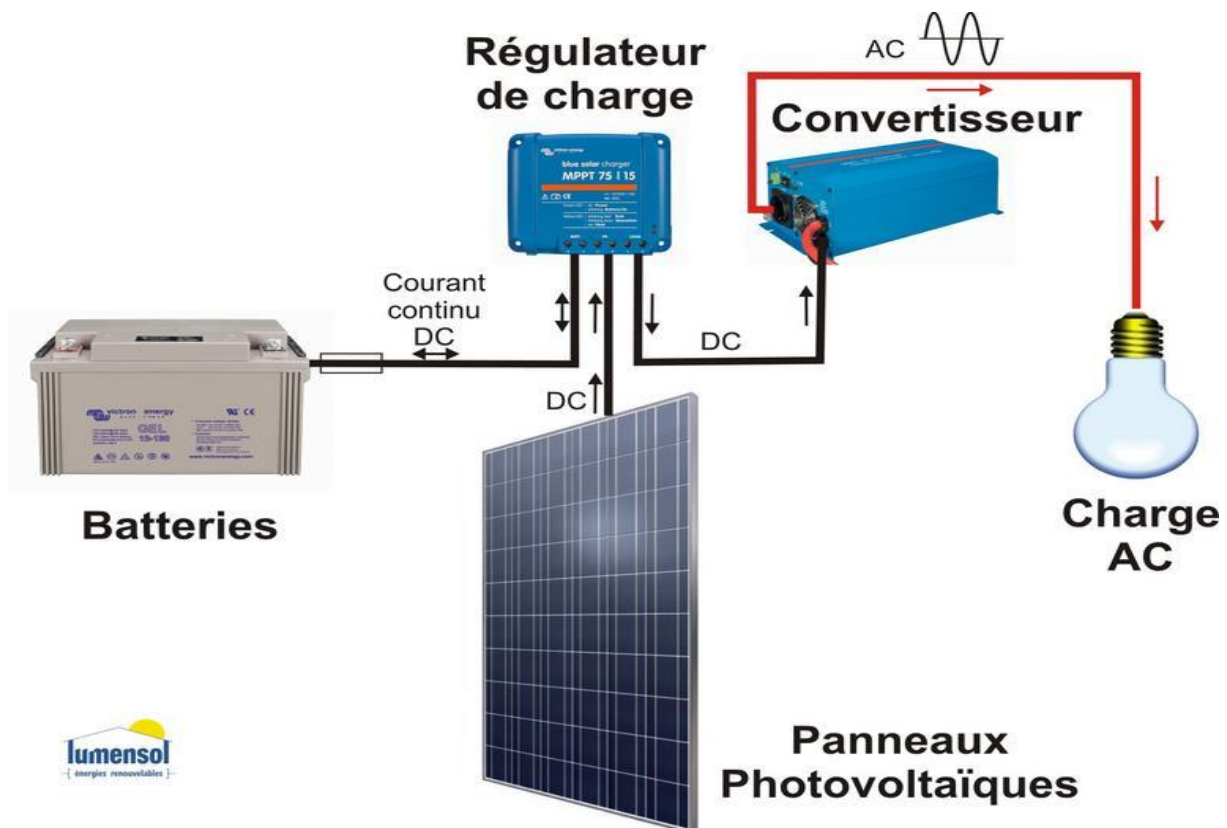


Figure I.1 : Principe de fonctionnement d'un système P-V [10]

I.3. Le spectre solaire

Le spectre du rayonnement électromagnétique solaire comporte une très grande étendue, depuis les rayonnements radio jusqu'aux rayons X. On distingue en général le spectre continu, qui est sensiblement celui d'un corps noir à environ 6000°K et le spectre réel d'émission du soleil.

La figure suivante présente la courbe d'énergie du corps noir à 6000°K, le rayonnement solaire hors de l'atmosphère et le rayonnement solaire au niveau de la mer en fonction de la longueur d'onde.

Ces courbes montrent que 9,2% de l'énergie de ce spectre se trouve dans l'ultraviolet, 42,4% dans le visible et 48,4% dans l'infrarouge. [1]

I.4. Le rayonnement solaire

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 μm à 10 μm .

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement a :

- 9% dans la bande des ultraviolets (<0,4 μm),
- 47% dans la bande visible (0,4 à 0,8 μm),
- 44% dans la bande des infrarouges (>0,8 μm),

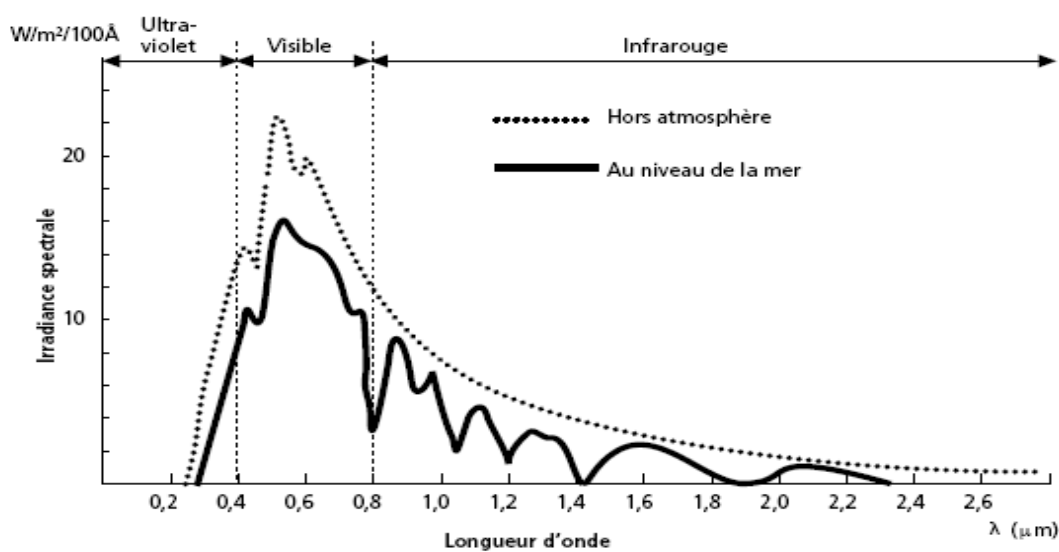


Figure I.2 : Analyse spectrale du rayonnement solaire [2]

Il y a quatre types de rayonnement: [2]

I.4.a. Rayonnement direct

C'est le rayonnement reçu directement du soleil. Il peut être mesuré par un pyrhéliomètre.

I.4.b. Rayonnement diffus

C'est le rayonnement provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages. Il peut être mesuré par un pyranomètre avec écran masquant le soleil.

I.4.c. Rayonnement solaire réfléchi ou l'albédo du sol

Le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

I.4.d- Rayonnement global

La somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran.

I.5. Dualité de la lumière :

La lumière peut être considérée sous forme d'ondes électromagnétique de longueur d'onde λ ou sous forme de photons, corpuscules possédant une énergie E liée à la longueur d'onde λ par la relation suivante :

$$E = \lambda \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (\text{I.1})$$

Avec : h : constante de Planck [$\text{j} \cdot \text{s}^{-1}$]

c : vitesse de la lumière dans le vide [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

λ : Longueur d'onde [m]

La notion de dualité onde/corpuscule est importante pour comprendre les phénomènes d'interaction entre un rayonnement et un matériau. [1]

I.6. Le principe de conversion photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p.

La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction (dite p-n) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi un pair électron - trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel le courant électrique circule, voir la figure (I.3) : [3]

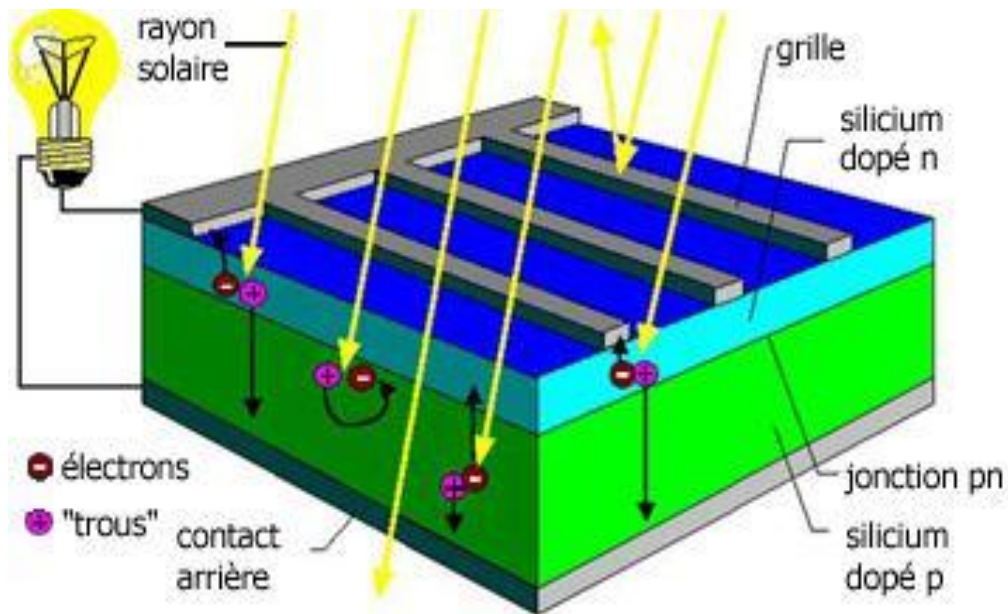


Figure I.3 : Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque. [3]

I.7. La cellule solaire

On appelle cellule solaire un convertisseur qui permet la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. La photopile ou cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque.[1]

I.8. Processus de fabrication des systèmes photovoltaïques [4]

On peut distinguer quatre étapes dans ce système de fabrication qui sont essentiellement :

- Le raffinage du silicium
- Le traitement de la silice jusqu'au silicium métallurgique
- Elaboration du silicium métallurgique
- Traitement du silicium métallurgique jusqu'au silicium solaire
- L'élaboration de ce processus se fait principalement par deux voies.

I.8.A. Voie chimique (procédé Siemens)

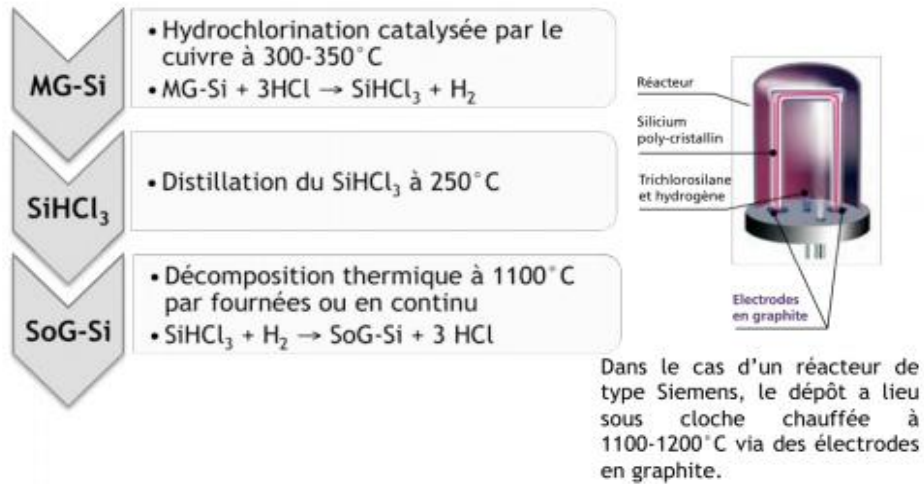


Figure I.4 : Procédé Siemens [4]

I.8.B. Voie métallurgique (procédé Elkem) :



Figure I.5 : Procédé Elkem [4]

I.8. C. Autres voies

Il existe encore d'autres voies de production du silicium solaire en cours de développement. On peut citer la fusion dans un faisceau électronique, le lessivage après réduction aluminothermique, l'électro-transport dans un champ magnétique, la voie

électrochimique, et quelques initiatives comme la dissociation de nitrure de silicium dans un four solaire ou l'utilisation de paille de riz comme source de silice. [4]

I.9. Fabrication des cellules et modules photovoltaïques

Le silicium solaire ou polycristallin va être encore une fois fondu et resolidifié en lingots ou ruban dans lesquels seront découpées les plaques de silicium. Ces plaques subiront quant à elles des transformations qui leur permettront de convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique. Puis elles seront reliées entre elles et protégées des intempéries dans un module photovoltaïque. La fabrication des autres composants d'un système, à savoir le matériel électrique comme les câbles et les onduleurs, ne sera pas détaillée.[4]

I.9.1. Cristallisation du silicium et mise en forme des plaques

Le silicium va être purifié encore une fois, dopé uniformément et découpé en plaques une fois refroidi. La technique de cristallisation consiste à solidifier progressivement le silicium polycristallin fondu de manière contrôlée. C'est dans la charge de silicium en fusion que sera ajouté l'élément dopant, généralement du bore qui donne un dopage de type p. Le matériau présente au final un réseau cristallin, qui est un arrangement ordonné des atomes de silicium. Note : le silicium multicristallin, résultant de la cristallisation contrôlée du silicium polycristallin, est souvent nommé polycristallin lorsqu'il s'agit de modules. L'élimination des impuretés se fait par ségrégation. Plus solubles en phase liquide que solide, les impuretés vont migrer vers les zones se solidifiant en dernier. Dans le cas d'un refroidissement pas le bas, elles vont se concentrer sur le haut du lingot.[4]

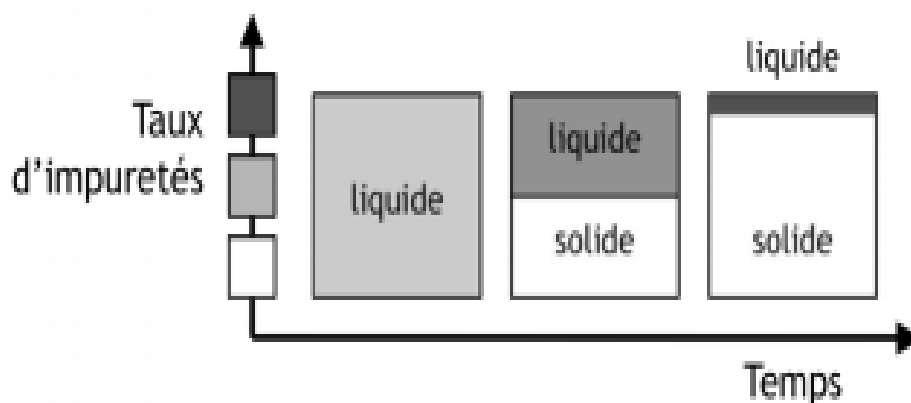


Figure I.6 : Mécanisme de ségrégation des impuretés lors de la cristallisation [4]

En termes d'impuretés, on peut en distinguer: les métaux : Fe, Cr et Mn pour les plus gênants les dopants : B, Ga, Al, As et P l'oxygène O, le carbone C et l'azote N. Toutes dégradent à leur manière les performances de la cellule, généralement en formant des complexes qui réduisent la conductivité du matériau. Pour la cristallisation, trois grandes voies sont possibles selon le choix technologique fait par le fabricant. Le tirage Czochralski donne des lingots cylindriques de silicium monocristallin ou sc-Si, la solidification directionnelle donne des briques de silicium multicristallin ou mc-Si et les techniques de tirage de ruban donnent du silicium multicristallin en ruban.[4]

I.9.2. Silicium monocristallin (sc-Si)

Ce matériau est constitué d'un seul cristal, sa couleur est unie, grise. Il est obtenu par croissance ou étirage d'un lingot cylindrique à partir d'un monocristal « souche » selon le procédé Czochralski ou CZ. Les cellules finales ont un des meilleurs rendements, autour de 15%, la contrepartie est une plus grande dépense énergétique pour sa mise en forme.

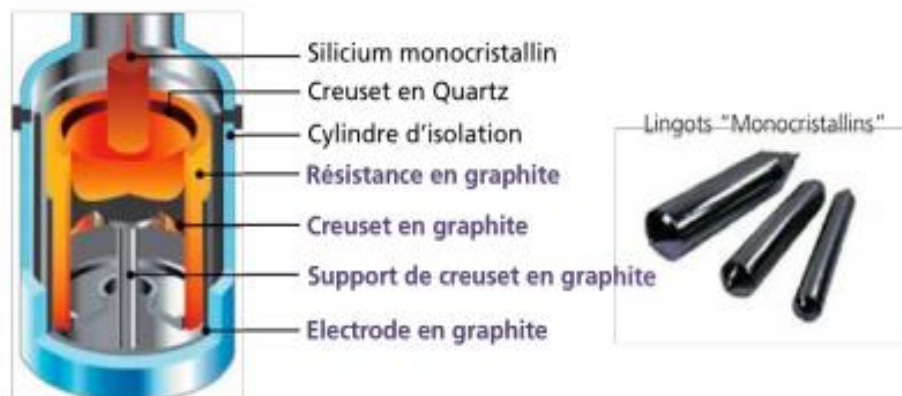


Figure I.7 : Silicium monocristallin (sc-Si) [4]

I.9.3. Silicium multicristallin (mc-Si)

Ce matériau de couleur grise est constitué d'une mosaïque de cristaux monocristallins de silicium, d'orientation et de tailles différentes. Il est obtenu par coulage en lingotière dans laquelle s'opère un refroidissement lent, de l'ordre de quelques dizaines d'heures. Sa mise au point est moins énergivore, et le rendement final des cellules est d'environ 12%.[4]

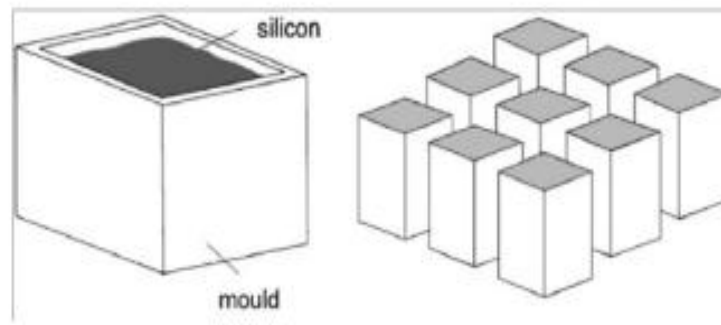


Figure I.8 : Mise en forme des lingots de silicium multicristallin [4]

Les lingots monocristallins et les briques multicristallines sont ensuite découpés en tranches par une scie à fil, à une épaisseur d'environ 250 μm . L'opération est réalisée en présence de slurry, une solution organique contenant des abrasifs en suspension. Il faut souligner une perte importante de matériau lors du sciage (30 à 40% non recyclé).

I.11.4. Silicium multicristallin en ruban

Cette dernière option technologique combine les étapes de cristallisation et de mise en forme du silicium, et présente l'avantage de minimiser la perte matière. Il est obtenu par entraînement d'un ruban de silicium sur un support plan ou tubulaire à partir d'un bain de silicium fondu.[4]

I.10. Secteurs d'applications

I.10.1. Domaine spatial

C'est de loin le secteur le plus ancien puisque les premières utilisations de cellules solaires pour des engins spatiaux (satellites, navettes,...) remontent aux années soixante.

Depuis lors, des recherches et développements nombreux ont été réalisés dans le domaine militaire (NASA aux Etats-Unis) et public (ESA en Europe) pour accroître les performances électriques tout en réduisant le poids des modules. [3]

I.10.2.Habitation isolée

L'approvisionnement en électricité dans les régions rurales isolées est un problème d'actualité, en particulier dans les pays en voie de développement. L'extension du réseau pour des demandes relativement faibles et isolées n'est pas rentable pour les sociétés d'électricité.

De nombreuses organisations internationales d'aide aux pays en voie de développement ont choisi la technologie photovoltaïque comme outil de développement social et économique pour fournir des services de base à la population, tels que:

- Le pompage de l'eau pour la consommation du village ou pour l'irrigation, la réfrigération pour la production de glace et la conservation de vaccins, sang, produits agricoles,....
- l'éclairage (lampe portative, éclairage public, électrification villageoise, ...) [3]

I.10.3.Industrie isolée

Beaucoup d'applications professionnelles exigent une source d'électricité hautement fiable, autonome, sans entretien et sans combustible. Le générateur photovoltaïque est de loin l'option la plus séduisante; on l'utilise avec succès dans les télécommunications (stations relais pour TV, radio, téléphonie, émetteur-récepteur,...), mais aussi pour d'autres applications telles que: [3]

- protection cathodique,
- systèmes silencieux ou sans vibration,
- éclairage, balises et signaux pour la navigation,
- équipement de monitoring,
- télémétrie, etc.

I.10.4. Centrale de puissance

Avec les applications photovoltaïques connectées au réseau d'électricité national, une nouvelle tendance se dégage; elle est caractérisée par un fort potentiel de diffusion dans les pays industrialisés. La plupart des projets utilisent des champs de capteurs plans, mais on expérimente aussi les systèmes à concentration dans les régions riches en rayonnement direct.

Lorsque la pointe de la demande est en phase avec l'ensoleillement, la centrale photovoltaïque connectée au réseau permet de fournir les pointes. C'est le cas dans le sud des

E.U. où la demande est maximum aux heures les plus ensoleillées à cause du conditionnement d'air omniprésent.[7]

I.10.5. Résidence urbaine

Le générateur photovoltaïque connecté au réseau est aussi envisagé en zone urbaine avec l'installation de modules sur les toits et façades de bâtiments.

La façade photovoltaïque suscite beaucoup d'enthousiasme en Europe et aux E.U.

Le recouvrement des façades de bâtiments commerciaux où la consommation est essentiellement diurne correspond mieux aux heures d'ensoleillement.

L'orientation verticale peut être avantageuse dans nos régions de haute latitude pour rehausser la production au creux de l'hiver. Cependant, l'apport énergétique d'une façade recouverte de modules photovoltaïques risque d'être assez négligeable par rapport aux consommations de bâtiments commerciaux. En réalité, l'enthousiasme découle du fait que le revêtement à l'aide de panneaux solaires photovoltaïques reviendrait pratiquement au même prix qu'un recouvrement à l'aide de matériaux classiques. [7]

I.10.6. Traction électrique

L'évolution des cellules photosensibles permettant de capturer l'énergie solaire pourrait contribuer grandement au succès de la voiture électrique ou hybride à travers :

Les stations de chargements individuels ou collectifs spéciales pour les véhicules rechargeables. En plus, ces stations de recharge sont conçues pour être rapidement et aisément déplacées dans différents endroits, rapide et facile à installer, sans besoin d'œuvres de maçonnerie, sans besoin de maintenance, connectée aussi au réseau électrique pour fournir électricité 24/24 h.

- Par l'insertion directe des panneaux photovoltaïque sur le toit ou capot de véhicule (deux panneaux de grande puissance peuvent assurer une autonomie de 30 km). [7]

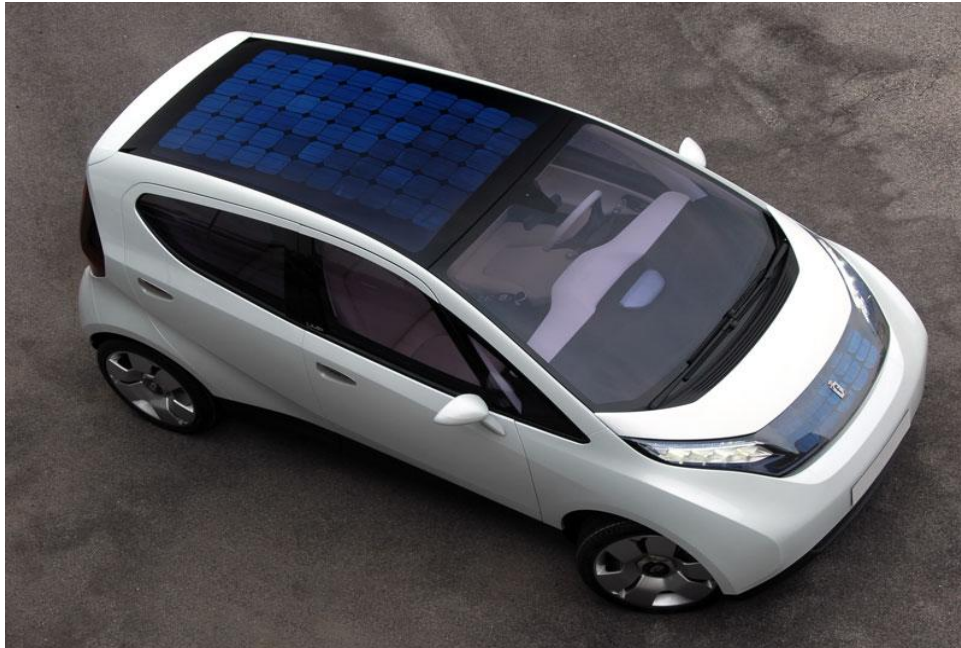


Figure 1.10 voiture solaire [7]

I.11. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

I.11.a. Les avantages [6]

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages à savoir :

Une haute fiabilité.

Elle ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. D'où son utilisation sur les engins spatiaux.

Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïque permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers.

Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissance allant du milliwatt au Mégawatt.

le coût de fonctionnement est faible vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni personnel hautement spécialisé.

Enfin, 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, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

I.11.b. les inconvénients [6]

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 (la limite théorique pour une cellule au silicium est de 28%).

Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.

Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.

I.12. Conclusion

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie renouvelable qui provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein des matériaux bien particuliers tels que les semi-conducteurs (le silicium, le Germanium, l'Arséniure des Galium,...). Afin de la rendre réalisable physiquement, elle nécessite un équipement complémentaire dit Système photovoltaïque, contenant les composants d'amélioration nécessaires qui rendent l'électricité produite consommable (régulation, conversion CC/AC...).

Dans ce chapitre on a présenté des notions générales sur les systèmes photovoltaïques, synthèse d'assemblage ainsi que l'industrie du silicium.

CHAPITRE II : CONCEPTION D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAQUE

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons des notions fondamentales sur l'élément clé dans la conversion photovoltaïque (la cellule solaire).

II.2. Définition

La conversion photovoltaïque est la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement) en énergie électrique de type continu directement utilisable. L'élément de base dans cette conversion est la cellule solaire.

II.3. La cellule solaire

La cellule solaire est un dispositif optoélectronique capable de capter et convertir directement l'énergie des rayons lumineux en électricité. Cette conversion est appelée la conversion photovoltaïque. Sa structure est illustrée dans la figure (II.1) ci-dessous. Elle montre un schéma simplifié d'une cellule solaire typique car l'architecture des dispositifs photovoltaïques modernes se révèle particulièrement complexe.

La cellule photovoltaïque sera donc une plaquette du matériau semi-conducteur; où la jonction P- Représente le cœur de la cellule photovoltaïque; elle représente le vrai generateur dans le dispositif.

Les contacts métalliques en face avant et en face arrière, constituent la structure de cheminement permettant de récupérer les porteurs photogénérés, pour ça; deux électrodes sont élaborées sur la plaquette du semi-conducteur, l'une qui recouvre la totalité de la face arrière pour assurer le contact avec la zone p , et l'autre en forme de grille sur la face avant, la géométrie de cette grille étant un compromis entre une faible occultation du rayonnement et Un bon contact électrique avec la zone n . [2]

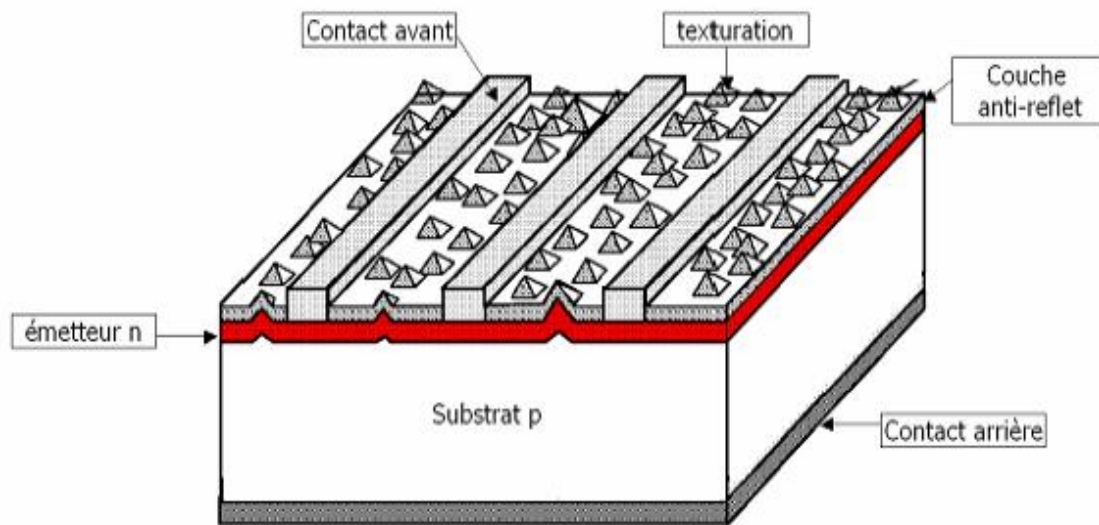


Figure II.1 : Schéma simplifié illustratif d'une cellule solaire [2]

II.4. Fonctionnement de la cellule photovoltaïque

La transformation de l'énergie solaire en énergie électrique est basée sur les trois mécanismes suivants (figure. II.2). [9]

- absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif ;
- conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur ;
- collecte des particules générées dans le dispositif.

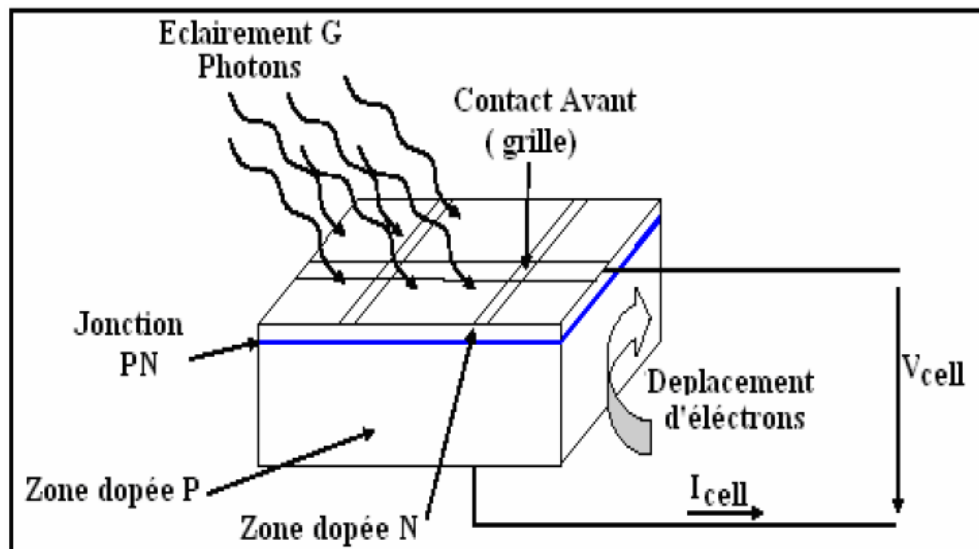


Figure II.2 : fonctionnement d'une cellule P-V [9]

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier le pair électron / trou créés est nécessaire.

Pour cela on utilise le plus souvent une jonction p-n. D'autres structures, comme les hétérojonctions peuvent également être utilisées.

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure (II.3).

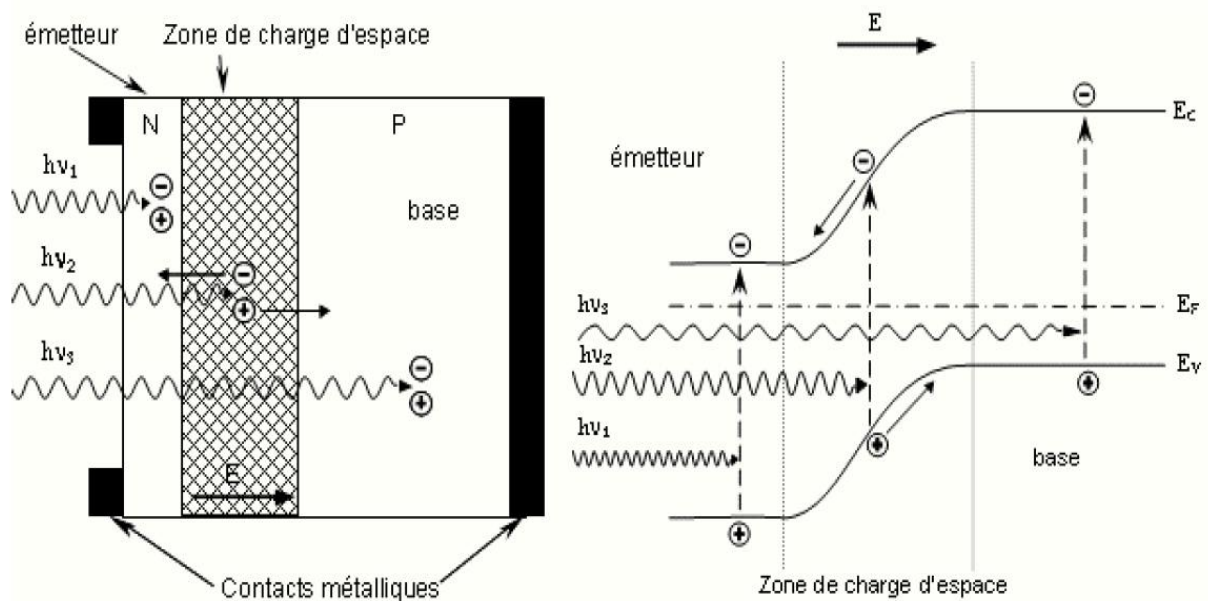


Figure II.3 : Structure (image gauche) et diagramme de bande (image droite) d'une cellule photovoltaïque. [9]

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones n et p et dans la zone de charge d'espace.

Les photons porteurs auront un comportement différent suivant la région :

- dans la zone n ou p, les porteurs minoritaires sont "envoyés" par le champ électrique dans la zone p (pour les trous) ou dans la zone n (pour les électrons) où ils seront majoritaires.

On aura une photo courant de diffusion :

- dans la zone de charge d'espace, le pair électron / trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région n, les trous vers la région p. On aura une photo courant de génération. [9]

Ces deux contributions s'ajoutent pour donner une photo courant résultant **I_{ph}** qui est proportionnel à l'intensité lumineuse.

II.5. Les constituants de base d'une cellule photovoltaïque

Alors que différentes structures soient envisageables pour l'élaboration des cellules PV ; Des parties similaires sont présentes dans chaque composant.

La structure d'une cellule photovoltaïque avec contacts sur les deux faces est présentée sur la figure (II.4).

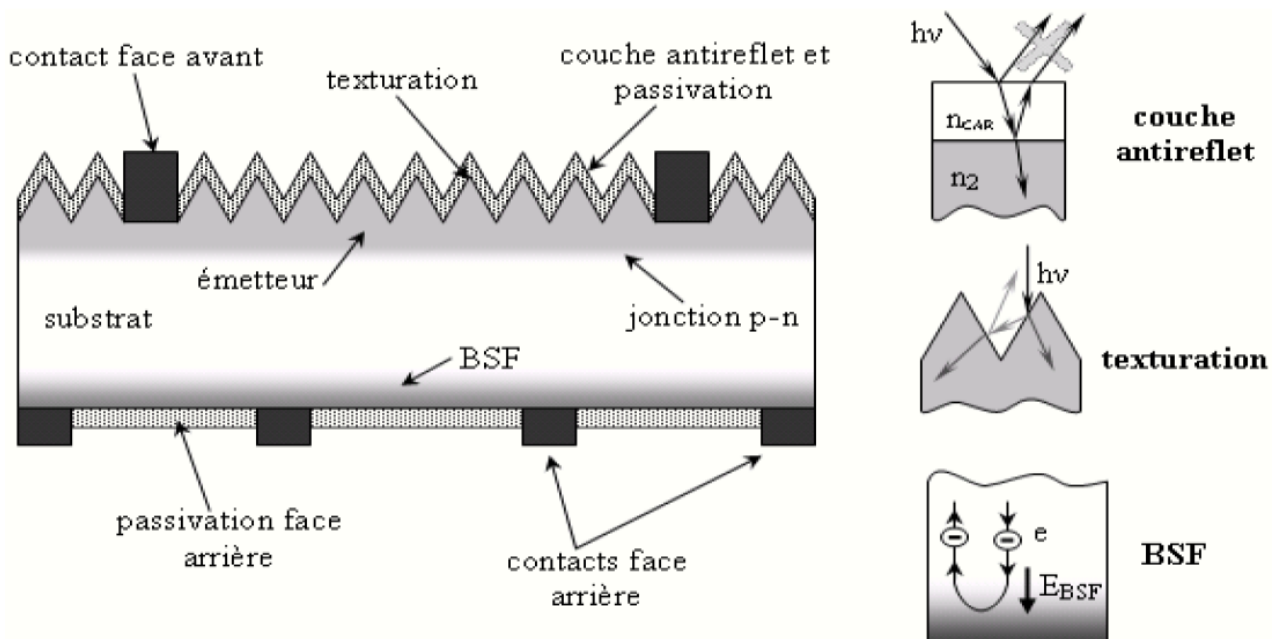


Figure II.4 : Composition d'une cellule photovoltaïque [9]

II.5.1. Passivation des faces avant et arrière

La surface des semi-conducteurs contient une densité importante de défauts (liaison pendantes, impuretés, etc.) entraînant des pertes non négligeables liées à la recombinaison en surface.

La passivation consiste à améliorer les qualités électroniques de la surface et du volume du matériau en neutralisant les effets de ses défauts électriquement actifs.

Diverses couches de passivation sont utilisées en photovoltaïque mais les principales sont l'oxyde de silicium (SiO₂) et le nitrure de silicium hydrogéné (Si N x : H). [9]

II.5.2. Couche antireflet

Pour minimiser la réflexion de la lumière, une couche antireflet (CAR) est utilisée. Le principe d'action des couches antireflet est basé sur l'interférence des faisceaux lumineux dans les couches diélectriques minces (la figure (II.4)).

Si l'épaisseur de la couche diélectrique est égale à :

$$d_{CAR} = \frac{(2N+1)\lambda}{4N_{car}} \quad (II.1)$$

Avec : N = 0, 1, 2, 3.....

On obtiendra l'annulation des faisceaux réfléchis à l'interface air/CAR et CAR/semi-conducteur. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, une double couche antireflet est utilisée (avec deux diélectriques différents).

Différentes CAR sont utilisées en photovoltaïque, nous avons:

TiO₂, SiO₂, Zn S, MgF₂, Si N x etc..... [9]

II.5.3. Texturation de la surface

La texturation du silicium est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule.

Cette opération vise à développer en surface un relief micrométrique, généralement de forme pyramidale. La longueur d'onde de la lumière incidente étant inférieure aux dimensions des structures ainsi réalisées, les rayons incidents suivent les lois de l'optique géométrique. L'insertion sur la figure (II.4) présente le principe de réflexions multiples propre à la texturation. Différents procédés sont utilisés pour texturer la surface du silicium : attaques chimiques de la surface (KOH, NaOH, acides), texturation mécanique (laminage à froid sous un peigne dentelé), texturation laser etc. [9]

II.5.4. Contacts face avant et arrière

Les contacts métalliques à l'émetteur et au substrat servent à collecter le courant de Porteurs photo générés.

Les contacts doivent être ohmiques, c'est-à-dire que la caractéristique $I=f(V)$ du contact doit être linéaire ; La résistance des contacts est un paramètre très important ; La forte résistance des contacts augmente la résistance série de la cellule et baisse le facteur de forme et le rendement. Différents procédés sont utilisés pour réaliser les contacts ; Dans le cadre des cellules photovoltaïques industrielles en silicium multi cristallin, les contacts sont généralement réalisés par sérigraphie.

Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, la pulvérisation cathodique ou L'évaporation sous vide est utilisée. [9]

II.5.5. Back Surface Field (BSF)

Le champ électrique de surface arrière (BSF : Back Surface Field) consiste à créer une barrière de potentiel (par exemple, jonction p+-p) sur la face arrière de la cellule.

La barrière de potentiel induite par la différence de niveau de dopage entre la base et le BSF tend à confiner les porteurs minoritaires dans la base (voir l'insertion sur la figure (II.4)).

Ceux-ci sont donc tenus à l'écart de la face arrière qui est caractérisée par une vitesse de recombinaison très élevée.

Le BSF fait encore l'objet de nombreuses recherches car l'épaisseur des plaques est constamment réduite afin de réaliser une économie de matière première, et le silicium multi cristallin présente désormais des longueurs de diffusion des porteurs minoritaires élevées (environ 200 μm pour le Poli-cristallin). [9]

II.6. Les différents types de cellules solaires [2]

Sur le plan technologique; plusieurs types de cellules solaires sont distingués :

II.6.1. Les cellules solaires au silicium

Le silicium est le matériau de base des photopiles. C'est le deuxième élément en terme d'abondance sur notre planète (après l'oxygène), mais il n'existe pas à l'état pur dans la nature (le sable et le quartz en contiennent). Il existe trois catégories principales de photopiles au silicium :

❖ Les cellules monocristallines

Elles sont considérées comme la première génération de photopile, elles ont un taux de rendement excellent (12 – 16% et jusqu'à 24 % en laboratoire) mais leur méthode de production est laborieuse et délicate, et donc, très chère; il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur.

❖ Les cellules poly-cristallines

Elles ont un coût de production moins élevé et un rendement qui varie entre 11 – 13% (autour de 18 % en laboratoire).

❖ Les cellules nanocristallines

Une des dernières générations de photopiles ; Fonctionnent selon un principe qui différencie les fonctions d'absorption de la lumière et de séparation des charges électriques ; rendement global de 10,4 %, confirmé par des mesures au laboratoire ; procédé et coût de production encore plus bas.

❖ Les cellules amorphes

Leur coût de production bien plus bas, mais malheureusement aussi, ont un rendement plus bas qui varie entre 8 –10%(autour de 13 % en laboratoire pour une cellule non dégradée).

Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium de 0.3 à 1.0 nanomètre seulement (500 nanomètres pour les deux autres types). On peut donc appliquer de très fines couches de silicium amorphe sur des vitres, du métal, voir du plastique souple par un procédé de vaporisation sous vide. C'est le silicium amorphe que l'on trouve le plus souvent dans les petits produits de consommation comme les calculatrices, les montres,

Les panneaux amorphes ont besoin d'environ deux fois plus de surface (comparé aux panneaux cristallin) pour produire la même quantité d'électricité, et semblent se dégrader plus rapidement, mais ils ont l'avantage de mieux réagir a la lumière diffuse et a la lumière fluorescente et d'être plus performants a des températures élevées.

II.6.2.Les cellules solaires à couche mince

On distingue plusieurs technologies parmi lesquelles :

- ❖ **Cuivre-indium-di sélénium (CIS) ou cuivre-indium-gallium-sélénium (CIGS):** leur rendement est égal à 11 % (17 .1 % au laboratoire). 99 % d'absorption, dégradation minime, mais fabrication très délicate.
- ❖ **Cadmium-tellure (CdTe) :** rendement 10.5 % (15.8 % en laboratoire). Haute absorption, mais n'oublions pas que le cadmium est très toxique.
- ❖ **Gallium Arsenic (GaAs):** leur rendement dépasse les 25 % en laboratoire [2]. Ces cellules, dont le prix est très élève, sont très appréciées dans l'aérospatiale. Leurs principaux avantages sont :
 - une absorption très élevée. Ces cellules ne son pas épaisses, ce qui traduit un gain en volume et en masse pour les sondes sur lesquelles le moindre gramme superflu est traqué.
 - leur puissance est, par rapport aux cellules simples au silicium, peu affectée par les augmentations de température que les sondes peuvent rencontrer.

II.6.3. Les cellules solaires organiques

Le solaire organique est considéré comme une nouvelle technologie basée sur les colorants et leurs propriétés physiques et en particulier optiques [5].

II.6.4. Tableau récapitulatif [3]

	Technologie	m2 / kWc	Rendement en %	Coût de production	Avantages	Inconvénients
1 ^{ère} génération	Silicium Monocristallin	8	1722	+++	Rendement, durée de vie (jusqu'à 30 ans), technologie maîtrisée	Prix, coût de production (matériaux et énergie grise) nécessaire, sensible à la température et au manque de luminosité
	Silicium polycristallin	10	1215	+++	Rendement, durée de vie (jusqu'à 30 ans), rapport qualité/prix	Coût de production (matériaux et énergie grise), sensible à la température et au manque de luminosité
	Silicium ruban	10	1215	+++	Consommation de silicium divisée par 2	
2 ^{ème} génération	Silicium amorphe	16	58	+	Fonctionne avec un éclairage faible, supporte la température, prix, facilité d'installation	Faible rendement en plein soleil, performances qui diminuent avec le temps, faible durée de vie. Stabilisation sous lumière (perte η au début de l'exploitation)
	CdTe	1216	710	++	Faible coût de production (<1€/Wc), rendement correct, Fonctionne avec un éclairage faible, supporte la température, durée de vie (>25ans)	Composants dangereux pour l'homme et l'environnement (nécessite de suivre un protocole de sécurité pour la manipulation et le recyclage)
	CIS – CGIS		812	++	Meilleur rendement des couches minces, faible coût de production (<2€/Wc), durée de vie (>25ans), Fonctionne avec un éclairage faible, supporte la température	Le rendement reste inférieur au cristallin
	Micromorphe (double jonction) GaAs		811 >23	++ +++++ Rendement	Faible épaisseur, pose facile, Fonctionne avec un éclairage faible, supporte mieux la température, Faible coût de production (12€/Wc)	Rendement assez faible, courte durée de vie, Usage réservé à l'aérospatial
3 ^{ème} génération	Multijonction		613	++	Faible épaisseur, pose facile, Fonctionne avec un éclairage faible, supporte mieux la température, Faible coût de production (12€/Wc)	peu de recul sur la technologie, process industriels non maîtrisés
	Concentration		>40		Haut rendement pour un minimum de cellules	Tracker obligatoire, centrales au sol, nécessite un fort ensoleillement direct
	Cellules organiques	Encore en développement	Record à 8.5% en laboratoire		Très faible épaisseur (possibilités nanométriques => film PV), pas de silicium	Les cellules sont encore instables (risque de destruction et instabilité dans la durée)

Commentaire pour créer, envoyer et annoter des Fichiers PDF.

II.7. Caractéristique électrique

La variation du courant I (ou densité du courant (A/cm^2)) en fonction de la tension (V) à l'obscurité et en particulier sous éclairement, permet d'évaluer la performance de la cellule solaire; la figure (II.5) montre deux exemples de caractéristiques $I - V$ de cellule solaire sans et avec éclairement. [2]

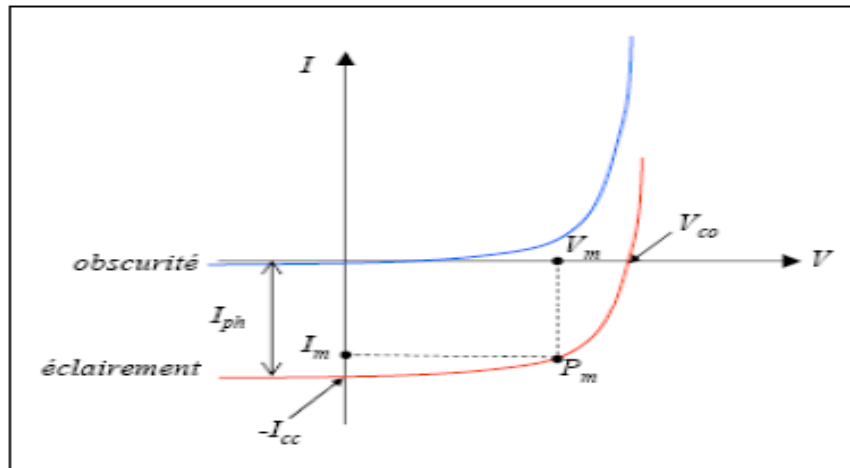


Figure II.5 : Caractéristique I-V d'une cellule solaire; à l'obscurité et sous éclairement

II.7.1. Modèle électrique

II.7.1.A. Cellule solaire idéale [2]

Le circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque est fréquemment utilisé afin de décrire son comportement électrique à l'aide de composants électriques élémentaires (source, résistance, diode, bobine, condensateur, etc.).

L'expérience montre qu'à l'obscurité; 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 . Dans le cas d'une cellule idéale à l'obscurité, la caractéristique $I-V$ peut être représenté par la relation suivante [2]

$$I_{\text{obs}} = I_s \left[\exp\left(\frac{V}{nV_{th}}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.2})$$

Où :

I_s : le courant de saturation en Ampère (A).

n : le facteur de qualité de la diode; sans dimension.

V_{th} : le potentiel thermique en Volt (V) ; il est donné par :

$$V_{th} = \frac{KT}{q} \quad (II.3)$$

Où :

K : la constante de Boltzmann (1.38066×10^{-23} J/K= 8.61400×10^{-5} eV/K).

T : la température absolue en Kelvin (K).

q : la charge absolue d'un électron en coulomb (1.60281×10^{-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 [2] :

$$I = I_{ph} - I_{obs} = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V}{nV_{th}}\right) - 1 \right] \quad (II.4)$$

II.7.1.B. Modèle électrique a une diode

Le fonctionnement d'un module photovoltaïque est décrit par le modèle (standard) à une diode, établi par Shokley pour une seule cellule PV, est généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série ou en parallèle. [15]

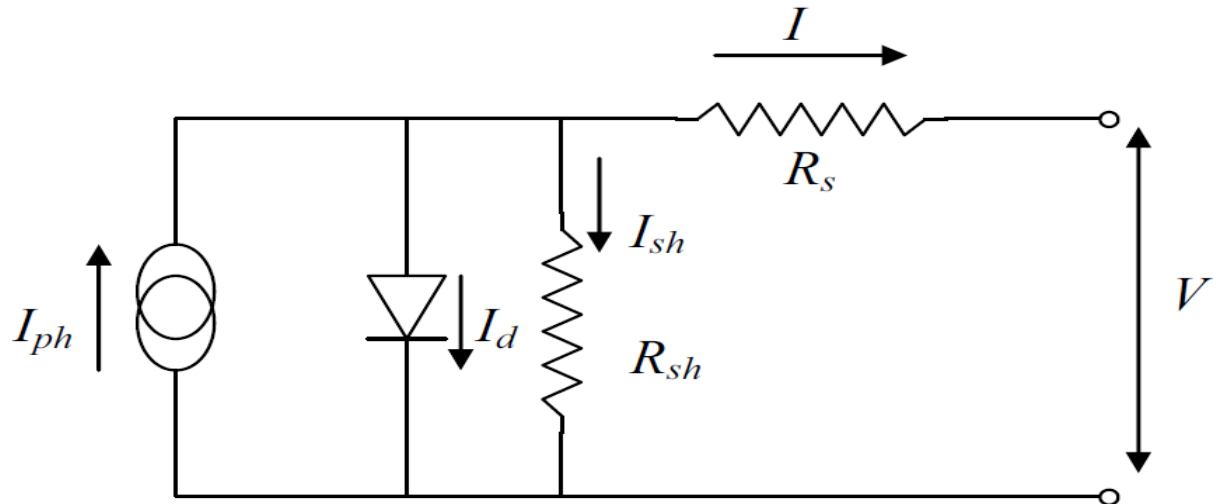


Figure II.6 : Schéma équivalent du modèle a une seule diode [15]

Le courant fourni par la cellule est donné par la relation (II.5) :

$$I = -I_{ph} + \frac{V - R_s I}{R_{sh}} + I_s \left[\exp\left(\frac{q(V - R_s I)}{AKT}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.5})$$

Avec :

I : Courant fourni par la cellule [A]

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

I_{ph} : Photocourant [A], proportionnel à l'irradiance Φ , avec correction selon T

I_s : Courant de saturation de la diode [A], dépendant de la température [A]

R_s : Résistance série [W].

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

q : Charge de l'électron = $1,602 \cdot 10^{-19}$ Coulomb

K : Constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K

A : Facteur de qualité de la diode, normalement compris entre 1 et 2.

T : Température effective de la cellule [Kelvin].

Il faut noter que ces deux résistances sont liées à la technologie d'élaboration des électrodes. Il faut minimiser R_s de telle sorte que R_{sh} soit très important. Le photocourant I_{ph} varie avec l'irradiance, il est déterminé par rapport à des valeurs données aux conditions de référence:

$$I_{ph} = \frac{\Phi}{\Phi_{ref}} [I_{ph_{ref}} + \mu_{Ics} (T - T_{ref})] \quad (II.6)$$

Avec :

Φ et Φ_{ref} : Irradiance effective et de référence [W/m^2].

T et T_{ref} : Température effective et de référence [K].

μ_{Ics} : Coefficient de température du photocourant (ou courant de court-circuit), il est souvent donné par le fabricant, il est en général positif mais très faible.

Le courant de saturation de la diode est supposé variable avec la température selon

L'expression :

$$I_s = I_{sref} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[\left(\frac{qE_g}{AK} \right) \left(\frac{1}{T_{ref}} \right) - \left(\frac{1}{T} \right) \right] \quad (II.7)$$

Avec :

E_g : Energie de Gap de la cellule. (Silicium cristallin $E_g = 1.12$ eV, Silicium amorphe $E_g = 1,7$ eV, CIS = 1,03 eV, CdTe = 1,5 eV).

Les conditions de référence Φ et Φ_{ref} sont les conditions extérieures pour lesquelles sont spécifiées les données de base utilisées pour l'établissement du modèle (V_{co} , I_{co} , V_{max} , I_{max}), se sont soit les spécifications du fabricant, toujours données aux STC (Standard Test Conditions, 1000 W/m^2 , 25°C, spectre AM1.5), soit des valeurs issues d'une mesure du module. [15]

II.7.1.C. Modèle électrique a deux diodes

Nous avons deux diodes pour représenter les phénomènes de polarisation de la jonction PN. Ces diodes symbolisent la recombinaison des porteurs minoritaires, d'une part en surface du matériau et d'autre part dans le volume du matériau. Le schéma est donné par la figure (II.7). [15]

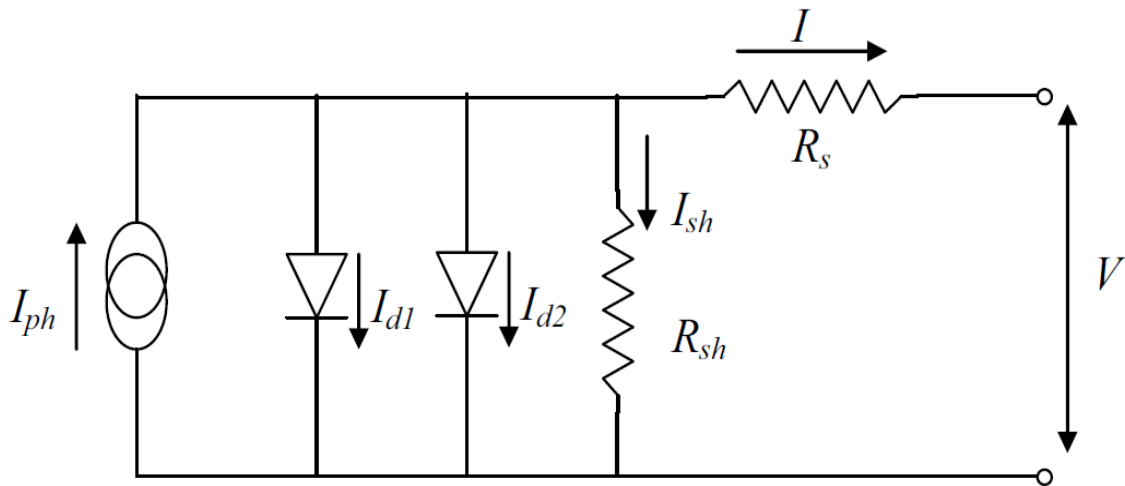


Figure II.7 : schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes [15]

Le courant fourni par la cellule est donné par la relation (II.8) :

$$I = -I_{ph} + \frac{V - R_s I}{R_{sh}} + I_{s1} \left[\exp \left(\frac{q(V - R_s I)}{AKT} \right) - 1 \right] + I_{s2} \left[\exp \left(\frac{q(V - R_s I)}{2AKT} \right) - 1 \right] \quad (II.8)$$

II.7.2. Les grandeurs caractéristiques d'une cellule P-V

À partir de la caractéristique I-V sous éclaircissement illustrée au dessus dans la figure (II.5), on constate que le comportement d'une cellule solaire peut être étudié à travers quatre principales grandeurs [2]; I_{cc} , V_{co} , I_m et V_m :

- Le courant de court circuit I_{cc} :

Le courant de court circuit I_{cc} est la valeur du courant lorsque la tension aux bornes de cellule est nulle ($V=0$) :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{I_{cc} R_s}{nV_{th}}\right) - 1 \right] - \frac{I_{cc} R_s}{R_{sh}} \quad (II.9)$$

Pour la plus part des cellules solaires (dont la résistance série est très faible), on peut négliger le terme $I_s \left[\exp\left(\frac{I_{cc} R_s}{nV_{th}}\right) - 1 \right]$ devant I_{ph} .

L'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right)} \quad (II.10)$$

Dans le cas idéal ($R_s \rightarrow 0$ et $R_{sh} \rightarrow \infty$) ou dans le cas approximatif suivant [2] :

$$R_{sh} = \frac{1}{G_{sh}} \gg R_s \Rightarrow \frac{R_s}{R_{sh}} \ll 1 \Rightarrow 1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \cong 1 \quad (II.11)$$

- Le courant de court circuit I_{cc} se confond avec le photo courant I_{ph} :

$$I_{cc} \cong I_{ph} \quad (II.12)$$

- La tension en circuit ouvert V_{co} :

C'est la tension mesurée aux bornes de la cellule et pour laquelle le courant débité par la cellule solaire est nul, elle est donnée par la relation :

$$V_{co} = nV_{sh} \log\left(1 + \frac{I_{ph}}{I_s}\right) \quad (II.13)$$

- Le point du fonctionnement P_m (V_m , I_m) :

La puissance maximale d'une cellule photovoltaïque éclairée est la grandeur Essentielle pour évaluer sa performance; elle est donnée par la relation :

$$P_m = I_m \times V_m \quad (\text{II.14})$$

Elle traduit sur la caractéristique I-V le point du fonctionnement P_m (V_m , I_m) qui est situé au coude de la caractéristique I-V et dit point de puissance maximale où les valeurs de tension V_m et du courant I_m appelées également tension et courant maximums respectivement.

- **Le facteur de forme FF**

Le facteur de forme FF (en anglais : Fill Factor) est défini comme le rapport entre la puissance maximale et le produit ($I_{cc} \times V_{co}$); d'où il est donné par la relation [2] :

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} \times V_{co}} = \frac{I_m \times V_m}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (\text{II.15})$$

Ce paramètre compris entre 0 et 1, on l'exprime en % qualifie la forme plus ou moins rectangulaire de la caractéristique I-V de la cellule solaire.

Si celle-ci était carrée le facteur de forme serait égale à 1, la puissance P_m sera égale à ($I_{cc} \times V_{co}$). Mais, généralement le facteur de forme prend des valeurs entre 0.6 et 0.85.

On note que ces quatre grandeurs caractéristiques sont sommables dans un seul paramètre qu'on appelle le rendement η :

Il est défini comme le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule.

Si (S) est la surface de la cellule en [m^2] et (E) est l'éclairement -irradiante-en [W/m^2] le rendement énergétique s'écrit :

$$\eta = \frac{P_m}{S \times E} \quad (\text{II.16})$$

D'après

$$\eta = \frac{FF \times I_{cc} \times V_{co}}{S \times E} \quad (\text{II.17})$$

II.8. Module photovoltaïque

Afin d'augmenter la tension d'utilisation, les cellules PV sont connectées en série. La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge, les modules ont généralement 36 cellules. De plus, la fragilité des cellules à la destruction et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique. Le tout est appelé un module photovoltaïque.

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation. Toutefois, il importe de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dus à de l'ombrage, de la poussière, etc.) peuvent endommager les cellules de façon permanente.

II.9. Groupement des cellules photovoltaïques

II.9.a. Groupement en série

Dans un groupement en série (figure II.7.a), les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par l'addition des tensions à courant donné. (La figure II.7.b) montre la caractéristique résultante (I_s , V_s) obtenue par l'association en série (indice s) de n_s cellules identiques (I_{cc} , V_{co}).

Avec :

$I_{sc} = I_{cc}$: le courant de court-circuit.

$V_{sco} = n_s V_{co}$: la tension de circuit ouvert.

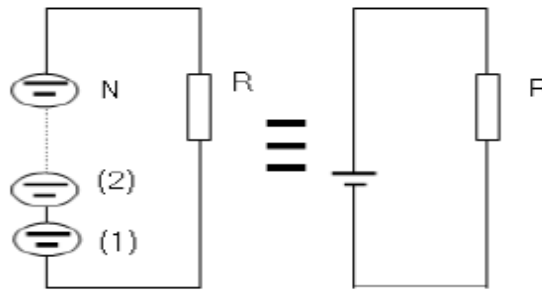


Figure II.7.a : Association des modules en série. [1]

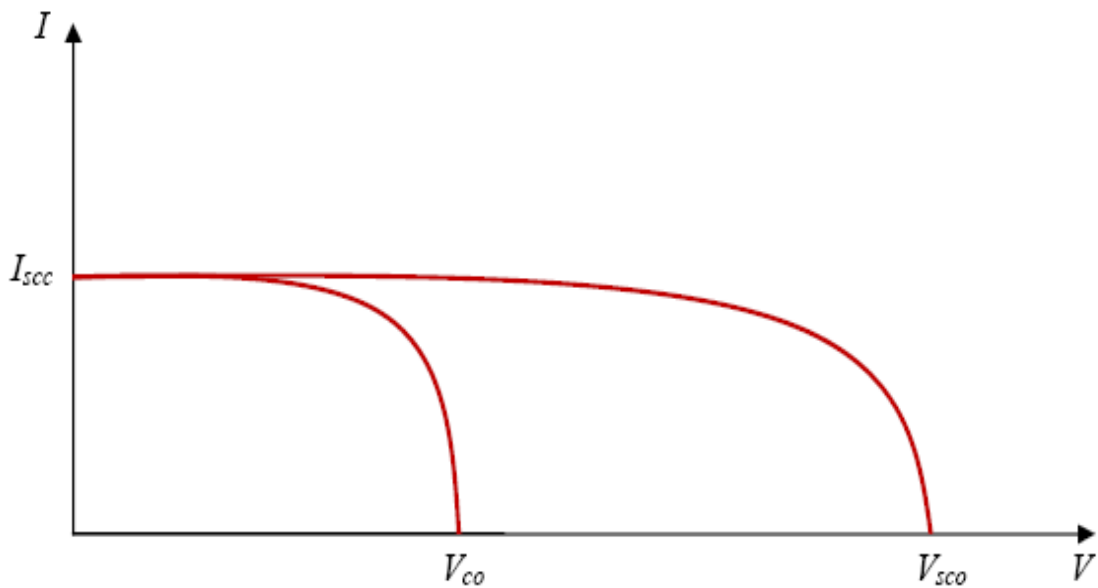


Figure II.7.b : Caractéristique résultante d'un groupement en série de ns cellules identiques. [1]

II.9.b. Groupement en parallèle

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle (figure II.8.a), les cellules étant soumises à la même tension, les intensités s'additionnent : la caractéristique résultante est obtenue par addition de courants à tension donnée. (La figure II.8.b) montre la caractéristique résultante (I_{pcc} , V_{pco}) obtenue en associant en parallèle (indice p) np cellules identiques (I_{cc} , V_{co}).

$I_{pcc} = npI_{cc}$: le courant de court-circuit.

$V_{pco} = V_{co}$: la tension de circuit ouvert.

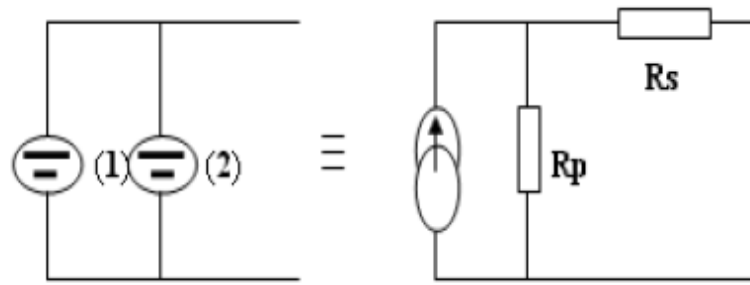
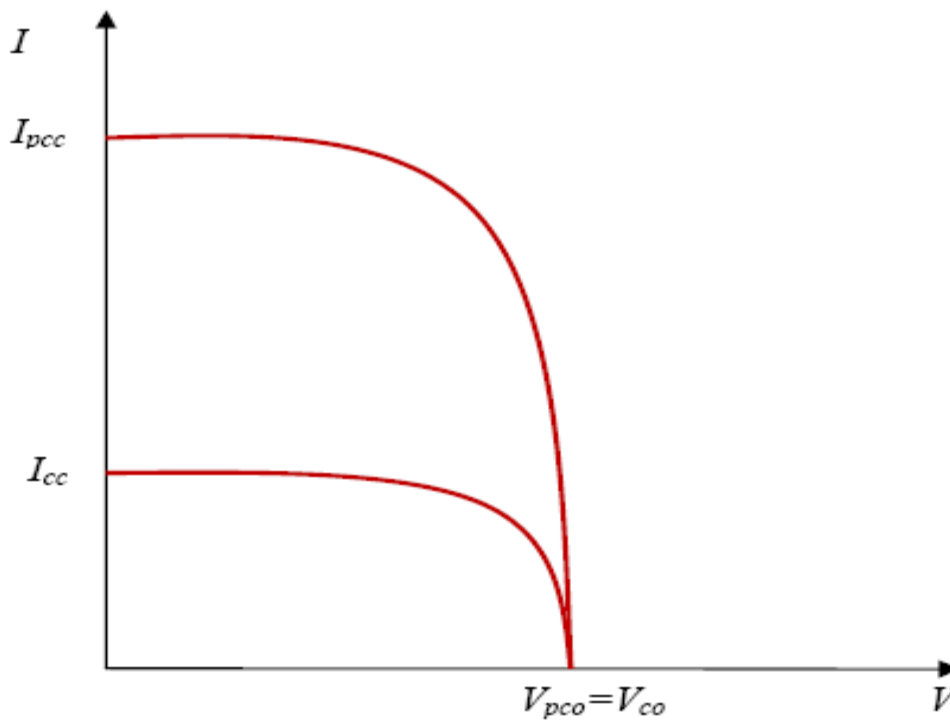


Figure II.8.a : Association des modules en parallèle. [1]



Figure

II.8.b : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de ns cellules identiques.

[1]

II.9.c. Groupement mixte (série-parallèle)

Le générateur photovoltaïque est constitué d'un réseau série-parallèle de nombreux modules photovoltaïques regroupés par panneaux photovoltaïques (figure II.9.a) La caractéristique électrique globale courant/tension du GPV se déduit donc théoriquement de la combinaison des caractéristiques des cellules élémentaires supposées identiques qui le composent par deux affinités de rapport ns parallèlement à l'axe des tensions et de rapport np parallèlement à l'axe des courants.(la figure II.9.b), ns et np étant respectivement les nombres totaux de cellules en série et en parallèle.

$I_{gcc} = np \cdot I_{cc}$: courant de court-circuit du module résultant.

$V_{gco} = n \cdot V_{co}$: tension du circuit ouvert du module résultant.

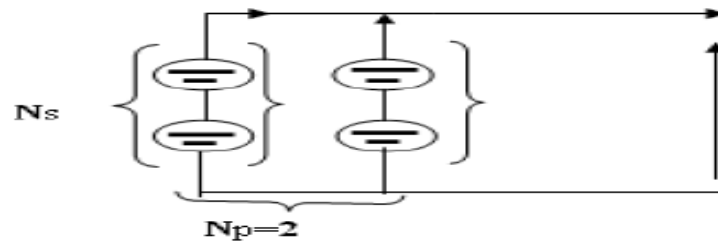


Figure II.9.a : Association mixte des modules. [1]

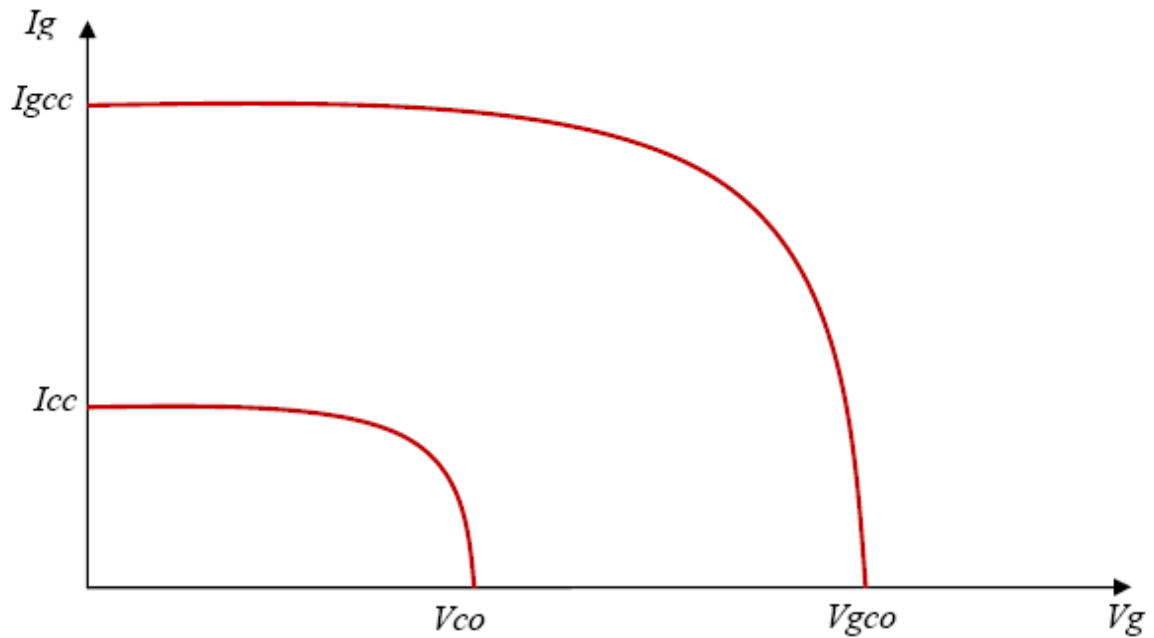


Figure II.9.b : Caractéristique résultante d'un groupement mixte. [1]

Les générateurs photovoltaïques sont alors réalisés en vue d'augmenter la tension (Groupement en série) ou augmenter le courant (Groupement en parallèle) par l'association d'un grand nombre de cellules élémentaires de même technologie et de caractéristiques identiques. Le câblage série-parallèle est donc utilisé pour obtenir un module PV (ou panneau PV) aux caractéristiques souhaitées (courant et tension suffisants).

II.12. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié la cellule P-V ainsi que les convertisseurs photovoltaïques, leur caractéristique I-V, leur circuit électrique équivalent et leurs principales grandeurs caractéristiques, l'association des cellules en série, en parallèle et en série-parallèle et les groupements de modules.

CHAPITRE III : DEGRADATION D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAIQUE

III.1.Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter l'indice de performance ainsi que les facteurs influençant sur le rendement et la dégradation des différentes technologies de cellules photovoltaïques dans les milieux naturels.

III.2.Indice de performance

L'indice de performance (Performance Ratio) est une valeur indépendante du lieu et mesure la qualité d'une installation photovoltaïque; ce faisant, cet indice de performance est aussi souvent appelé facteur de qualité.

L'indice de performance (PR) est indiqué en pourcentage et désigne le rapport entre le rendement réel et le rendement théorique de l'installation photovoltaïque. Ainsi, il indique la part d'énergie réellement disponible après déduction des pertes d'énergie (par exemple pertes thermiques et pertes de conductivité) et de la consommation propre au fonctionnement pour l'alimentation.

Plus la valeur d'une installation photovoltaïque se rapproche des 100 %, plus cette installation photovoltaïque présente un fonctionnement efficace. Cependant, il n'est pas possible d'atteindre la valeur de 100 % en pratique, car le fonctionnement de l'installation photovoltaïque engendre toujours des pertes, qui sont inévitables (par exemple pertes thermiques suite au réchauffement des panneaux photovoltaïques).

Les installations photovoltaïques performantes atteignent toutefois un indice de performance pouvant aller jusqu'à 80 % [6].

III.2.1. Fonction de l'indice de performance

L'indice de performance nous informe sur le rendement énergétique et la fiabilité de l'installation photovoltaïque.

L'indice de performance nous permet de comparer le rendement de l'installation photovoltaïque à celui d'autres installations photovoltaïques, ou de contrôler l'état de l'installation sur une longue période.

Dans le cas de la détermination de l'indice de performance, effectuée à des intervalles de temps définis et réguliers, il n'est toutefois pas question d'effectuer une comparaison dans l'absolu, mais plutôt d'avoir la possibilité de contrôler le déroulement et le rendement: lors de la mise en service d'une installation photovoltaïque, si l'on part du principe que l'installation

photovoltaïque fonctionne de façon optimale à un moment déterminé, avec une valeur initiale de 100 % pour l'indice de performance, alors, en déterminant les autres valeurs PR au fil du temps, on peut détecter les écarts et prendre les mesures nécessaires à temps [6].

Des écarts de la valeur PR sous forme de valeurs inférieures au domaine normatif vous indiquent un possible dysfonctionnement de votre installation photovoltaïque.

III.2.2. Méthode de calcul de l'indice de performance [6]

Pour pouvoir calculer l'indice de performance de l'installation photovoltaïque, on doit avoir différentes valeurs.

D'une part, on a besoin des valeurs d'ensoleillement correspondant au lieu de l'installation photovoltaïque. Ces valeurs peuvent être obtenues à l'aide d'un appareil de mesure, qui mesure la quantité d'énergie rayonnée pour l'installation photovoltaïque. D'autre part, on a besoin des dimensions de la surface modulaire de l'installation photovoltaïque, et du coefficient de rendement des panneaux photovoltaïques.

Le coefficient de rendement des panneaux est indiqué dans la fiche technique du panneau photovoltaïque.

- **Les conditions préalables pour le calcul**

Dans le cas de l'utilisation d'un appareil de mesure mesurant le rayonnement solaire direct pour l'installation photovoltaïque, les panneaux photovoltaïques et l'appareil de mesure doivent être orientés à l'identique afin que la valeur PR puisse être correctement calculée.

Il faut aussi que les panneaux photovoltaïques et l'appareil de mesure soient soumis à la même quantité de rayonnement solaire et les mêmes températures.

- **La période d'observation**

La période d'observation optimale pour le calcul de l'indice de performance est d'un an. Cependant, on peut également choisir des intervalles de temps plus courts, par exemple si on souhaite directement comparer deux installations photovoltaïques, on doit sélectionner une période d'observation d'au moins 1 mois afin de s'assurer que les conditions d'environnement,

comme les positions basses du soleil, de faibles températures et des ombrages des panneaux photovoltaïques et de l'appareil de mesure n'influencent pas trop la mesure.

III.2.2.A. Méthode du Calcul manuel

Si on souhaite calculer nous-mêmes l'indice de performance, on peut appliquer la formule simplifiée suivante:

$$PR = \frac{\text{Rendement de l'installation réel affiché en kW/h par an}}{\text{Rendement de l'installation nominal calculé en kW/h par an}}$$

Le rendement de l'installation réel, indiqué en kWh, doit être lu à la fin de l'année sur le compteur de production. [6]

Le rendement de l'installation nominal calculé pour l'année se compose comme suit:

η = Rayonnement annuel sur la surface génératrice de l'installation photovoltaïque × le rendement des panneaux de l'installation photovoltaïque.

La valeur du rayonnement mesuré par l'appareil de mesure est enregistrée au niveau du panneau, et sur une année entière dans l'idéal. Afin de déterminer cette valeur de rayonnement, il faut calculer la valeur moyenne de rayonnement solaire pour la période d'observation, à partir des valeurs de rayonnement enregistrées par l'appareil de mesure.

Il faut ensuite faire une estimation de la valeur de rayonnement par M^2 ainsi déterminée, pour la surface totale des panneaux de l'installation photovoltaïque (surface génératrice). [6]

III.2.2.B. Méthode du Calcul automatique

Afin de pouvoir calculer automatiquement l'indice de performance il faut transmettre des données précises sur les valeurs collectées sur notre installation photovoltaïque à une base de donnée référentielle (le constructeur).

III.3. Les facteurs influençant sur la dégradation de la cellule P-V

L'indice de performance est une grandeur de définition pure, qui, sous l'action de certains facteurs, peut même atteindre des valeurs supérieures à 100 %.

Ceci s'explique par le fait que, lors du calcul de l'indice de performance, on utilise, pour les panneaux photovoltaïques, des caractéristiques qui ont été déterminées dans des conditions de test standard (1 000 W/m² pour le rayonnement et 25 °C pour la température des panneaux).

Dans la réalité, des conditions différentes influent ainsi sur l'indice de performance.

Voici les facteurs régissant sur la détérioration d'une P-V :

- Influence de la température.
- Influence de l'ensoleillement ou irradiation.
- Effet de la résistance série.
- Effet de la résistance shunt.
- Effet de l'humidité.
- impact de la poussière sur le rendement des modules photovoltaïques.
- Le PID (Potential Induced Degradation).
- Corrosion TCO.
- Problème de diode de by-pass
- Ombrage ou encrassement des panneaux photovoltaïques.
- Pertes dans les lignes.
- Coefficient de rendement des panneaux photovoltaïques.

III.4. Modélisation de générateur PV

Le circuit équivalent du modèle à deux diodes est donné sur la figure II.7, Ce modèle est dit le plus proche du comportement réel de la cellule solaire, du fait qu'il tient compte du mécanisme de transport des charges électriques à l'intérieur de la cellule (deux diodes).

Pour l'obtention des caractéristiques I-V et P-V nous avons résolu l'équation (II.8) dans l'environnement Matlab en utilisant la méthode de Newton-Raphson.

III.4.1. Paramètres de la simulation

paramètres	valeurs
Rs : la résistance série (ohm)	0.58
Rsh : la resistance shunt (ohm)	160
K : la constante de Boltzmann (J/K)	1.38×10^{-23}
q : la charge de l'électron (coulomb)	1.6×10^{-19}
A : facteur d'idéalité de la diode (1 et 2)	1
T : la température de la cellule (°C)	25
E : l'irradiation solaire (W/m ²)	1000
Eg : l'énergie du GAP de la cellule	$1.12 \times q$
V : tension de la cellule (V)	[0-0.7]

III.4.2. Cas d'une cellule P-V

III.4.2.1. Influence de la température

La température est un paramètre très important dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques parce que les propriétés électriques d'un semi conducteur sont très sensibles à la température. La figure (III.1) représente la caractéristique I-V et P-V d'une cellule (PV) solaire en fonction de la température, sous un éclairage constant.

La caractéristique I-V en fonction de la température montre qu'elle ne se varie que légèrement quand la température varie, ce qui veut dire que la température a un effet en longue durée de fonctionnement [9].

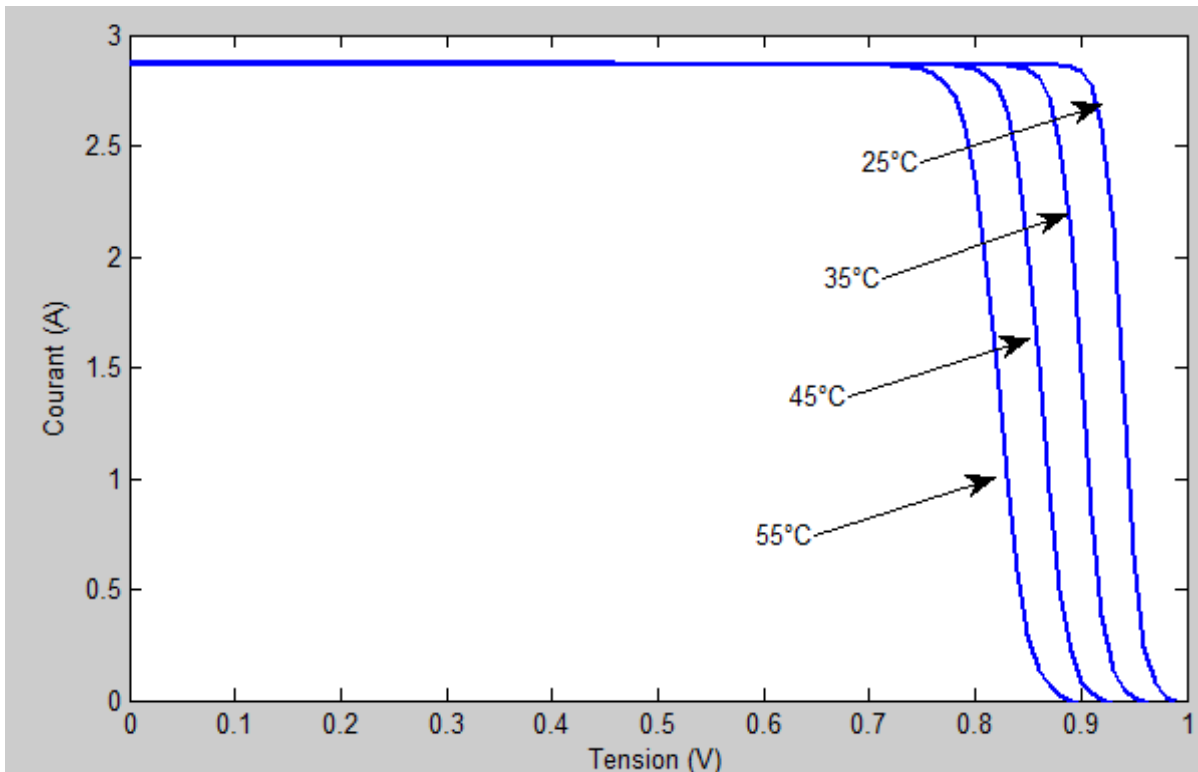


Figure (III.1.a) : Influence de la température sur la caractéristique I (V) pour une irradiation solaire de 1000W/m²

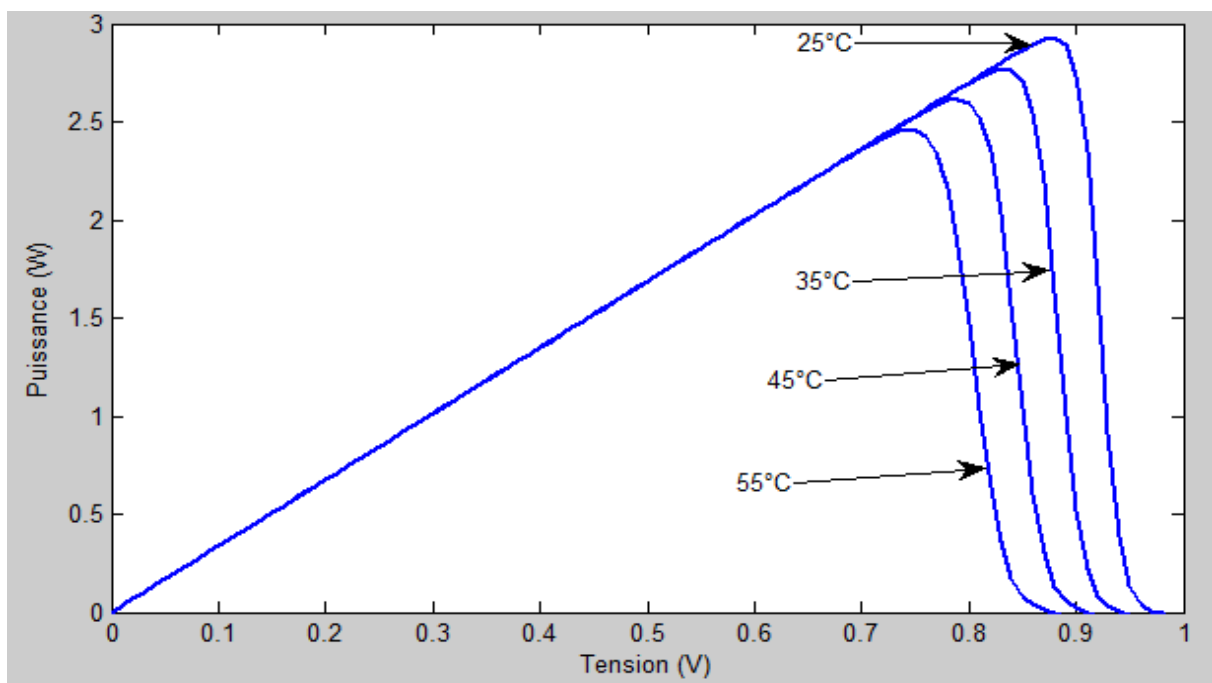


Figure (III.1.b) : Influence de la température sur la caractéristique P(V) pour une irradiation solaire de 1000W/m²

III.4.2.2. Influence de l'ensoleillement ou irradiation

Les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque changent avec l'éclairement pour une température donnée.

Quand l'ensoleillement augmente, l'intensité du courant photovoltaïque se croît.

Les courbes I-V se décalent vers les valeurs croissantes permettant au module de produire une puissance électrique plus importante ce qui implique que les irradiations solaires n'ont pas des effets négatifs.

Pratiquement, les irradiations énergétiques (électron, neutron, rayon cosmique...) sont les seuls responsables de la dégradation. (Figure.III.2).

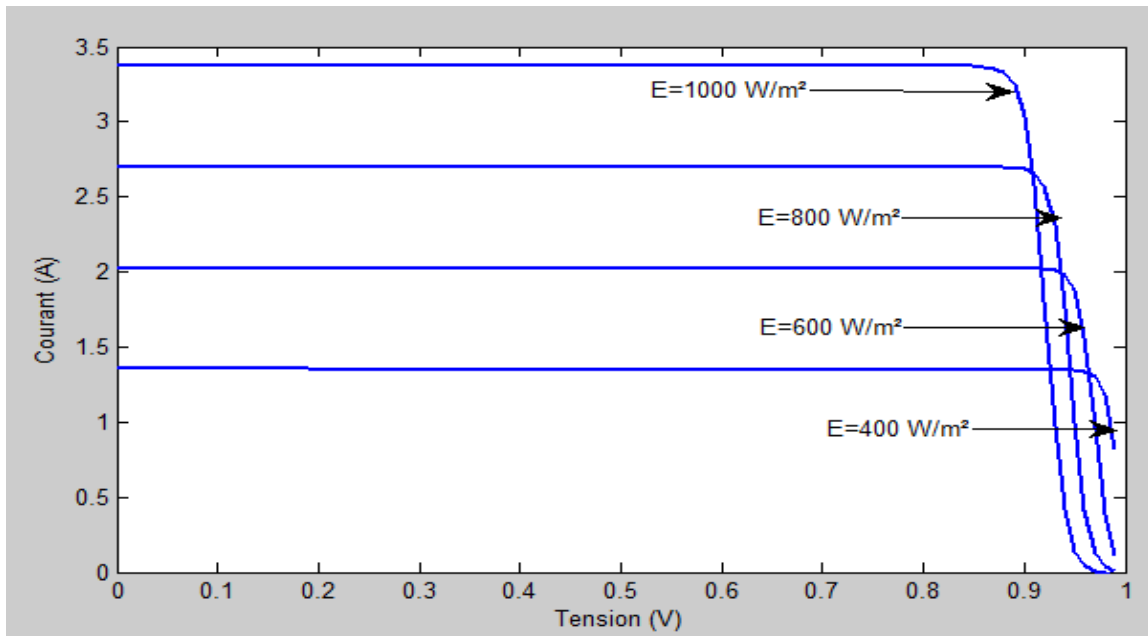


Figure (III.2.a) : Caractéristiques I (V) d'une cellule P-V pour différentes irradiations solaires à 25°C

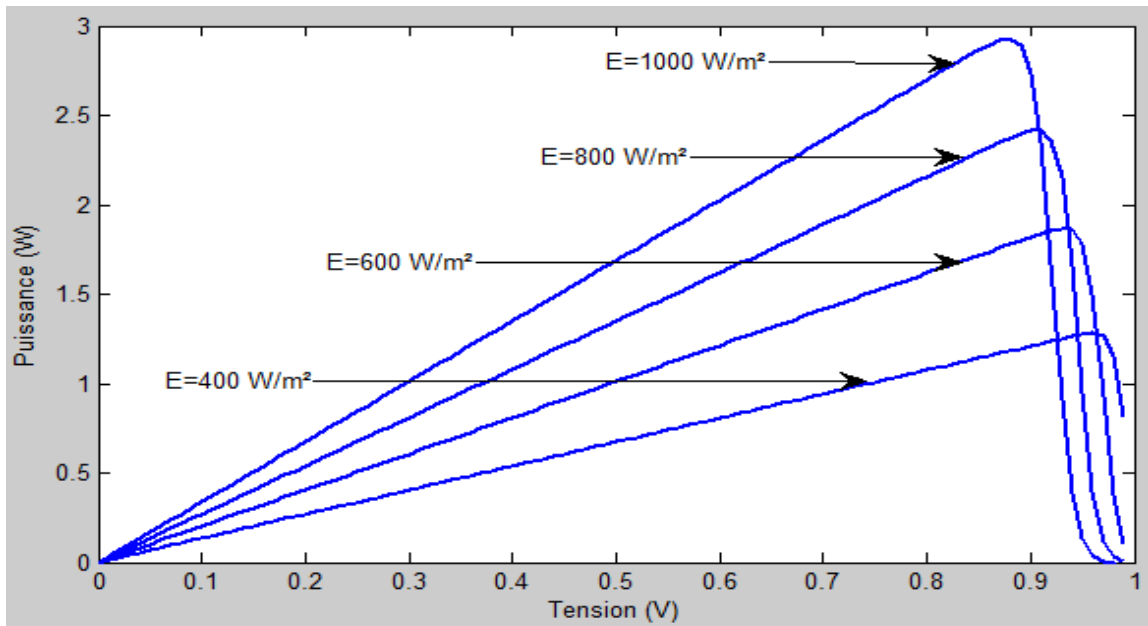


Figure (III.2.b) : Caractéristiques P (V) d'une cellule P-V pour différentes irradiances solaires à 25°C

III.4.2.3. Effet de la résistance série

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

La figure (III.3) montre l'influence de la résistance série sur la caractéristique I-V. Cette influence se traduit par une diminution de la pente de la courbe $I = f(V)$ dans la zone où le module fonctionne comme source de tension, à droite du point de puissance maximum [9].

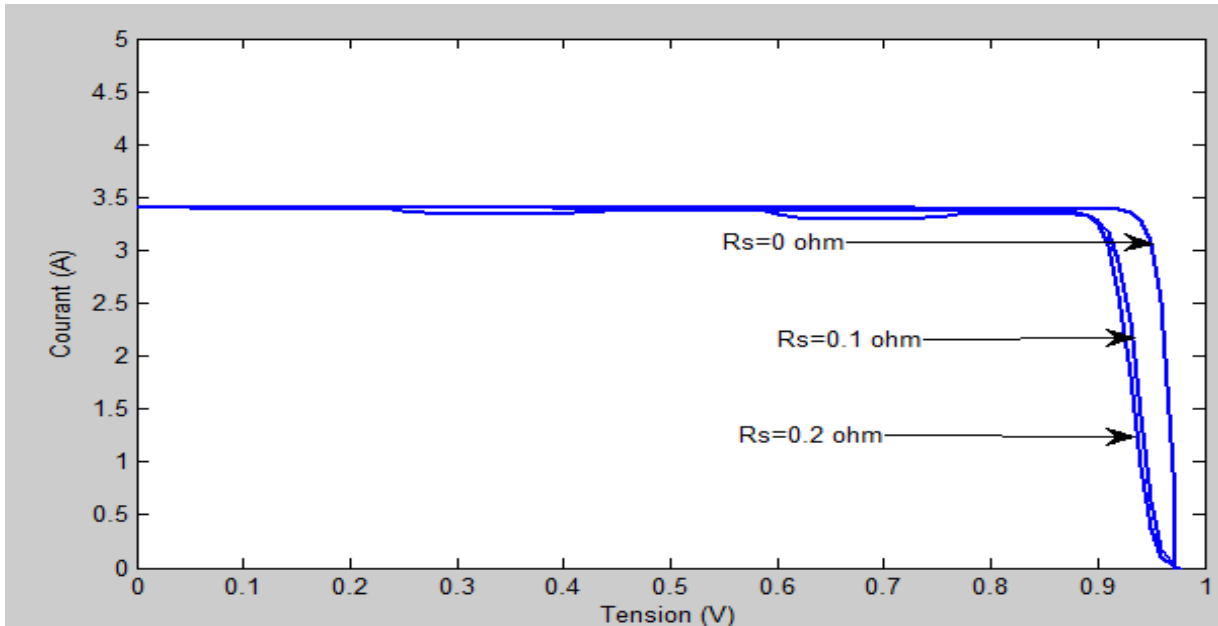


Figure (III.3.a) : L'influence de la résistance série R_s sur la caractéristique I (V),
 $E=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$

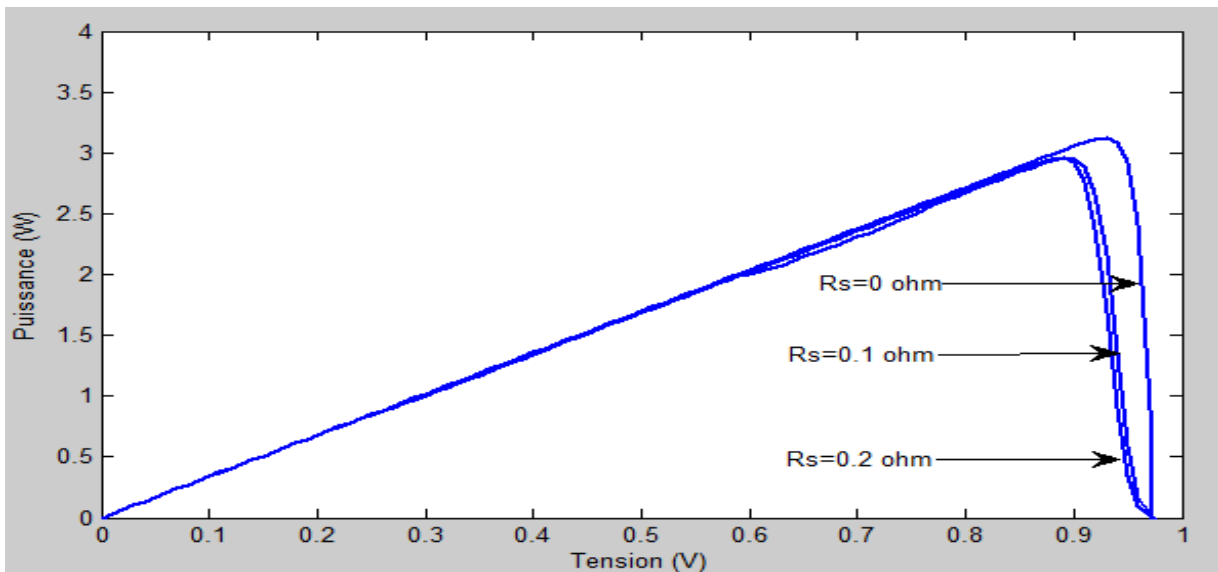


Figure (III.3.b) : L'influence de la résistance série R_s sur la caractéristique P (V),
 $E=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$

III.4.2.4. Effet de la résistance shunt

La résistance shunt est une résistance qui prend en compte les fuites inévitables du Courant qui intervient entre les bornes opposées d'une photopile.

La résistance shunt est liée directement au processus de fabrication, et son influence ne se fait sentir que pour de très faibles valeurs du courant (proche du courant de court-circuit). La figure (III.4) montre que cette influence se traduit par une augmentation de la pente de la courbe I-V du module dans la zone correspondante à un fonctionnement comme une source de courant. [9]

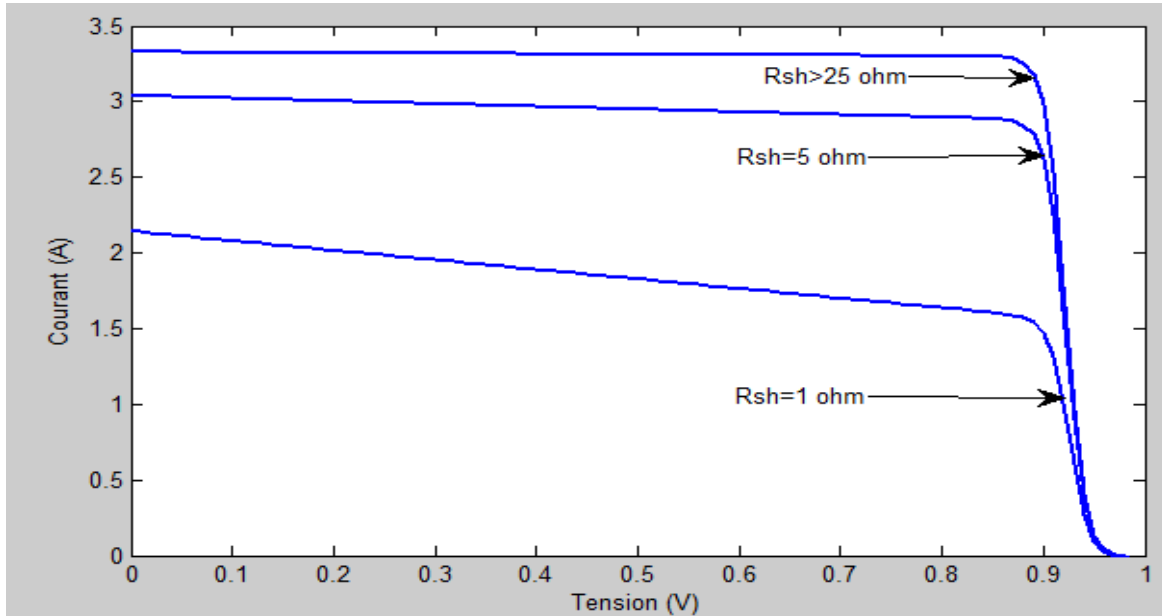


Figure (III.4.a) : L'influence de la résistance shunt R_{sh} Sur la caractéristique I (V),
 $E=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$

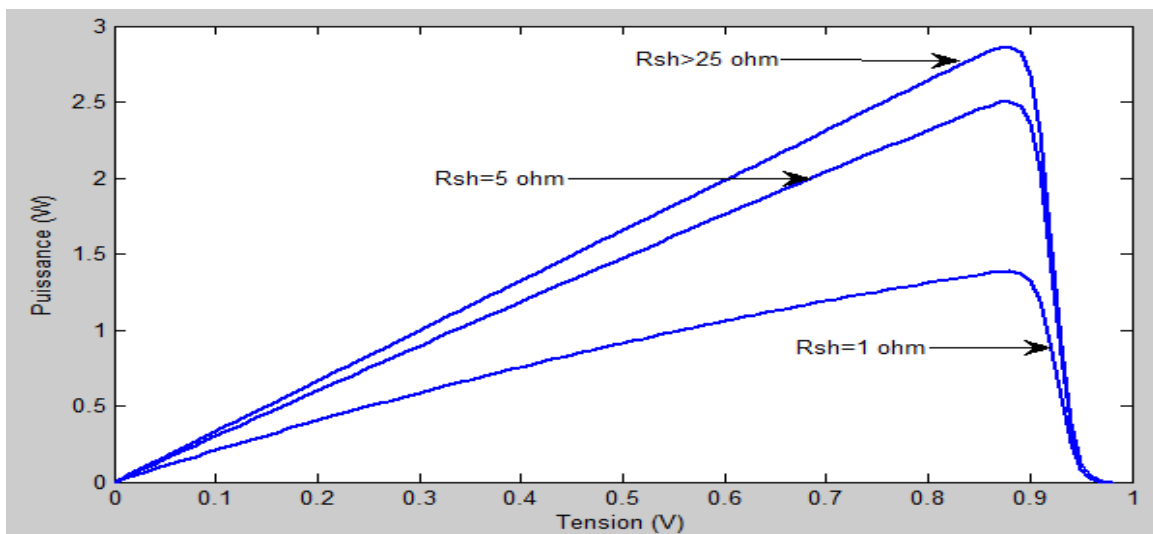


Figure (III.4.b) : L'influence de la résistance shunt R_{sh} Sur la caractéristique P (V),
 $E=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$

III.4.2.5. Discussion des résultats de simulation

- L'augmentation de la température cause une diminution remarquable dans la caractéristique I (V) et I(P) de la cellule.
- La diminution de l irradiation cause une baisse dans la caractéristique I (V) et I(P) de la cellule.
- L'augmentation de la valeur de la résistance série R_s cause une baisse dans la caractéristique I (V) et I(P) de la cellule.
- La diminution de la valeur de la résistance shunt R_{sh} cause une importante baisse dans la caractéristique I (V) et I(P) de la cellule.

III.4.3. cas d'un module P-V

III.4.3.1. Constitution d'un générateur photovoltaïque

En associant les cellules PV en série (ajout des tensions de chaque cellule) ou en parallèle (somme des intensités de chaque cellule), on peut constituer un générateur PV selon les besoins des applications visées. Le câblage série-parallèle est utilisé pour obtenir un générateur aux caractéristiques souhaitées. Ainsi, en généralisant à N_s cellules en série et N_p cellules en parallèle, la puissance disponible en sortie du générateur PV ainsi constitué est donnée par :

$$P_{pv} = N_s \cdot V_{ce} \cdot N_p \cdot I_{ce} \quad (\text{III.1})$$

Avec :

N_s et N_p respectivement, le nombre de cellules en série et le nombre de cellules en parallèle.

V_{ce} et I_{ce} respectivement, la tension et le courant du générateur PV.

Les caractéristiques résultantes des différents mises en parallèle de N_p ($z=1, 2, 4$ et 8) cellules PV identiques ou N_s ($z=1, 3, 9, 18$ et 36) en série sont présentées sur les figures III.5 et III.6 respectivement.

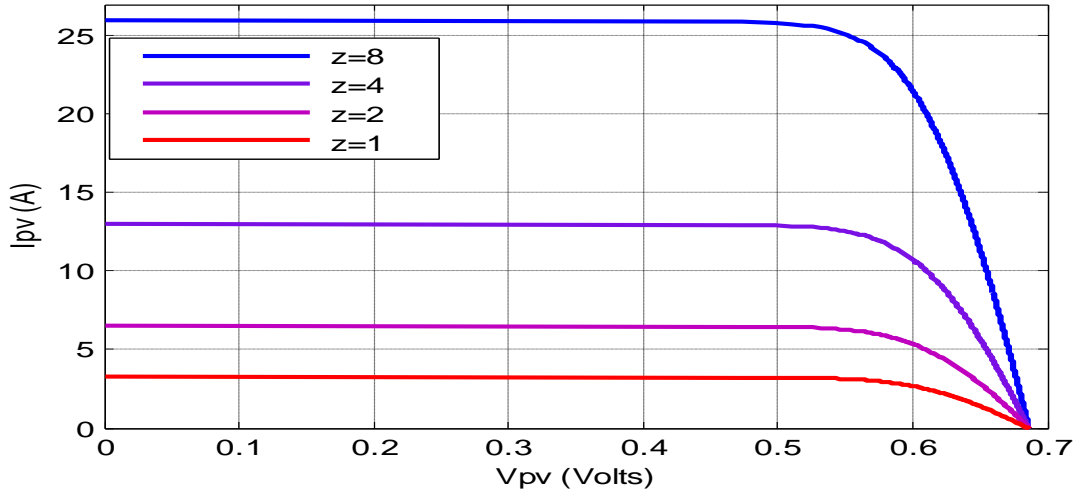


Figure III.5 : Caractéristique d'un groupement constitué de différent N_p cellules identiques en parallèle

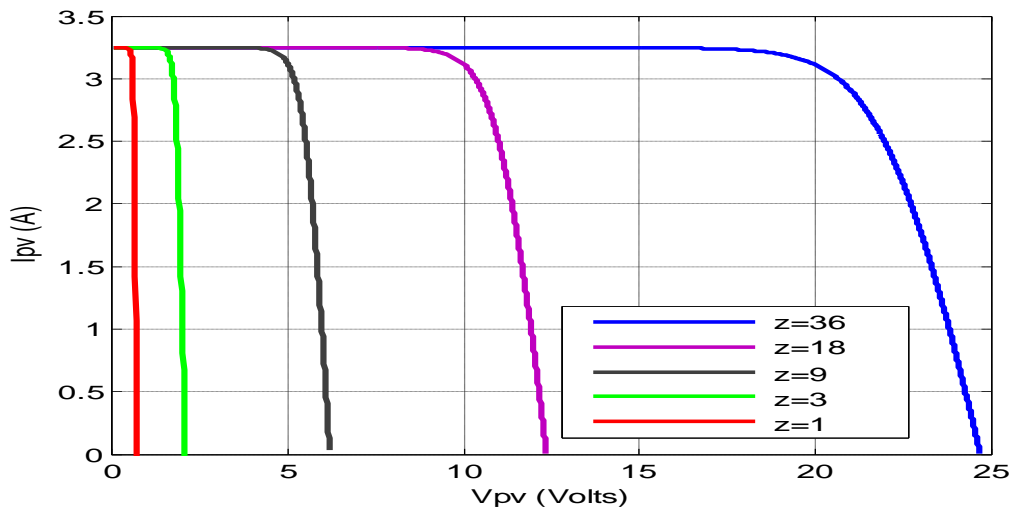


Figure III.6 : Caractéristique d'un groupement constitué de différent N_p cellules identiques en série

III.4.3.2. Modélisation des différents défauts

Au cours de son fonctionnement, une installation PV peut être éventuellement soumise à différents défauts et conditions de fonctionnement anormales. Les défauts et les anomalies apparus varient d'une installation à une autre en fonction de sa conception, installation, opération et maintenance. Les défauts connus pour l'instant et qui peuvent apparaître sur un générateur PV sont : Défaut de l'ombrage et de mismatch (échauffement, mismatch de type R_s et de type R_p), Défaut de diodes de by-pass, Défauts de module, Défauts de connectique, Défauts de la diode anti-retour.

III.4.3.2.1 Défaut d'ombrage

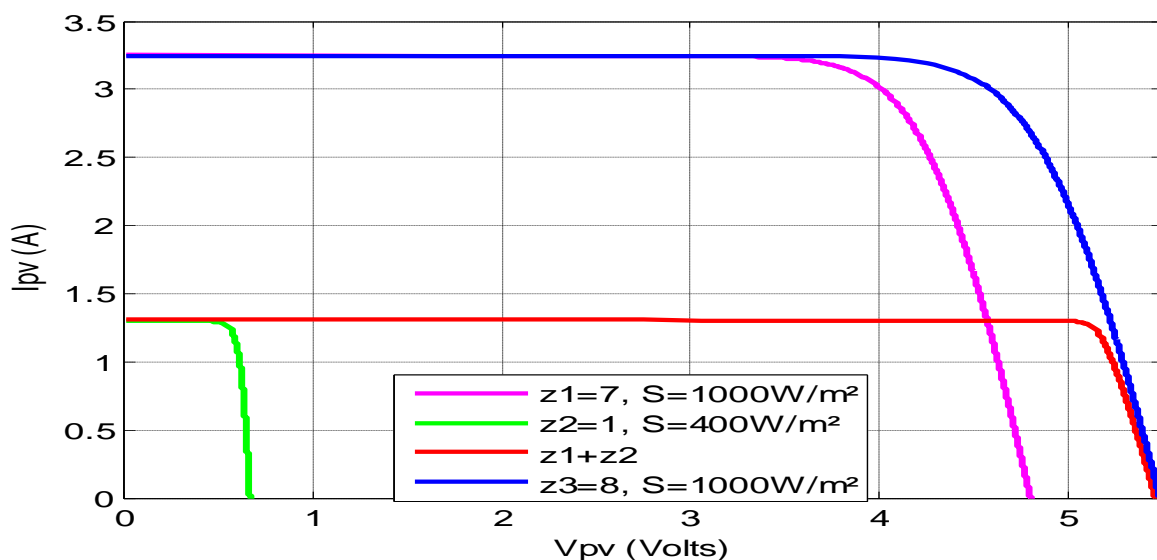


Figure III.7 : Allure d'un groupe de cellules dans lequel une cellule est ombrée et l'allure du même groupe en fonctionnement normal

III.4.3.2.2. Défaut de mismatch

Le mismatch est sous deux formes : structurel et fonctionnel. L'origine du mismatch structurel découle du fait que deux cellules identiques (même technologie, même procédé de fabrication, même constructeur, même série) soumises aux mêmes conditions de fonctionnement auront des caractéristiques différentes par contre le mismatch fonctionnel est, quant à lui, dû à des conditions de fonctionnement des cellules PV différentes, ombrages partiels, point chaud.

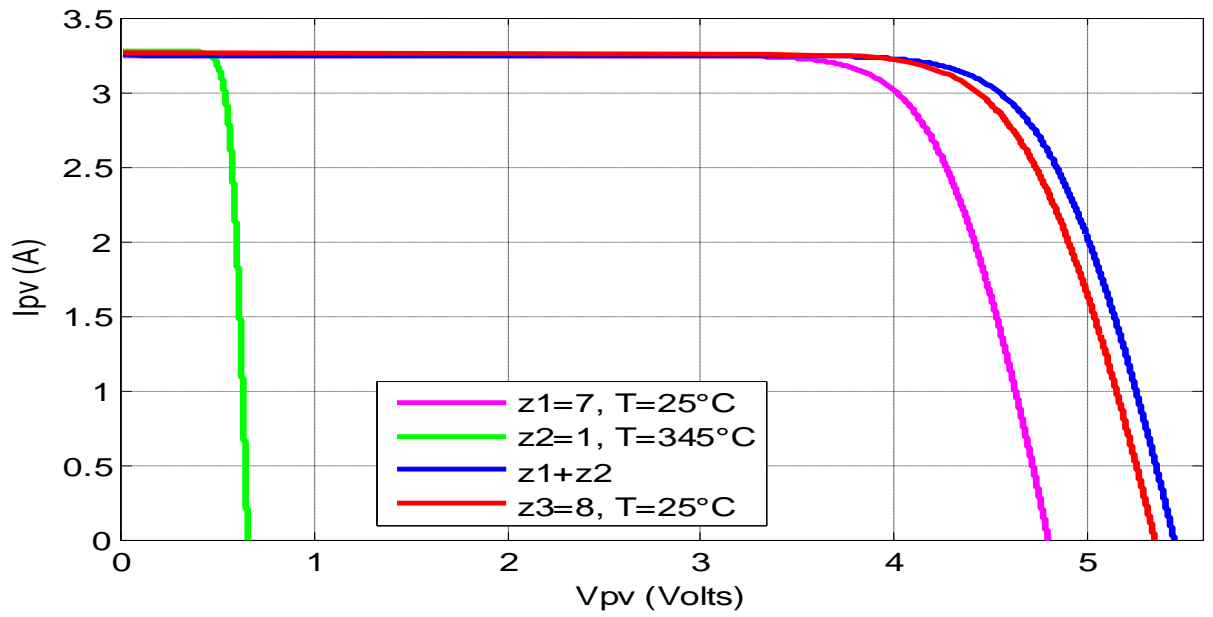


Figure III.8 : Allure d'un groupe de cellules dans lequel une cellule est chauffée et l'allure du même groupe en fonctionnement normal

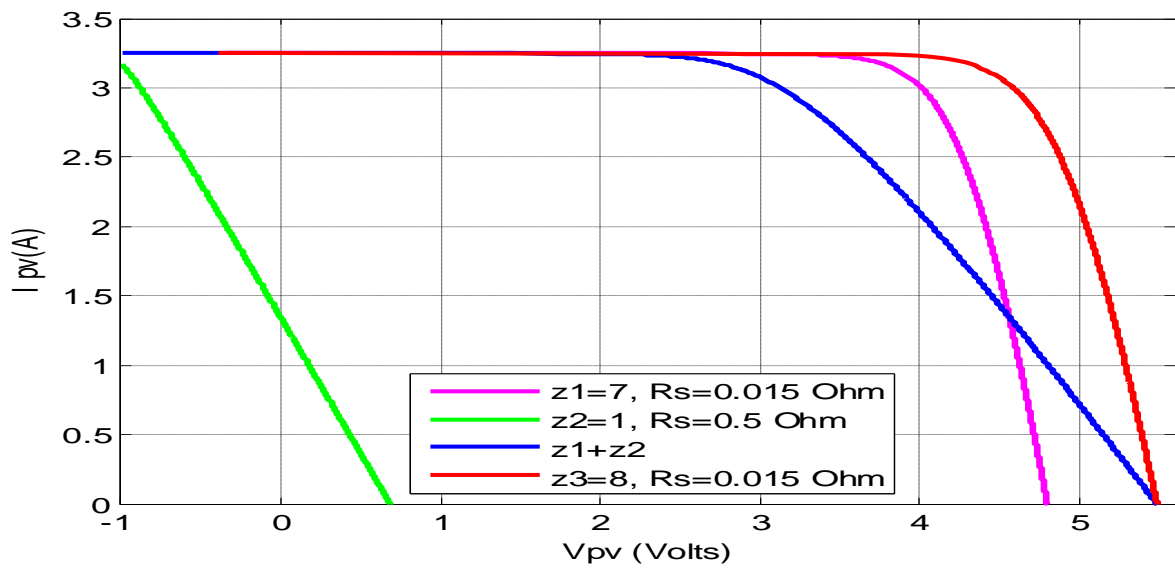


Figure III.9 : Allure d'un groupe de cellules lors d'un défaut de mismatch type « R_s » d'une cellule et l'allure du même groupe en fonctionnement normal

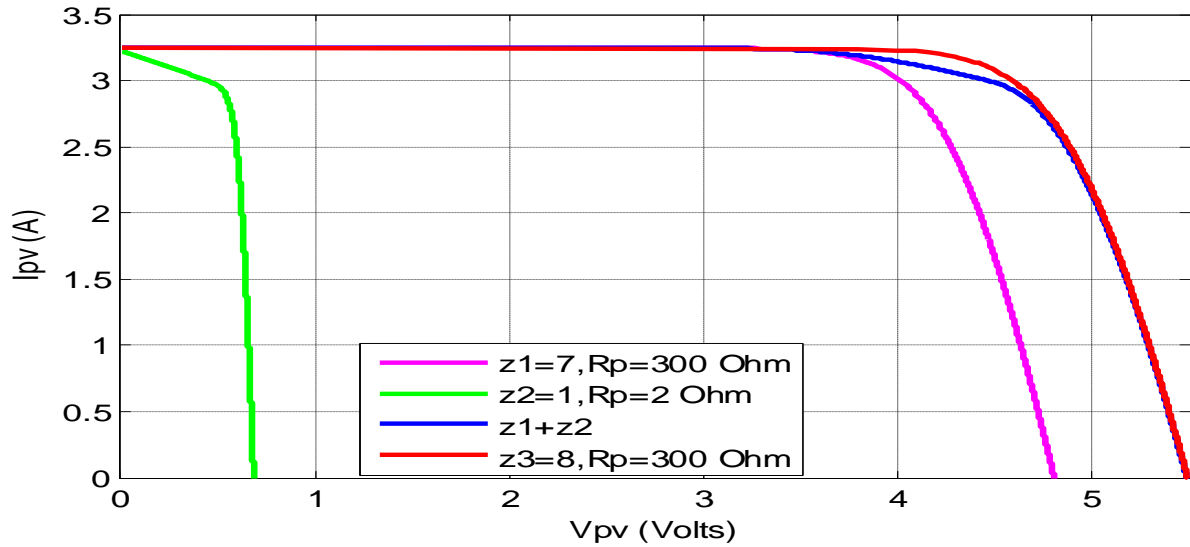


Figure III.10 : Allure d'un groupe de cellules lords d'un défaut de mismatch type « R_p » d'une cellule et l'allure du même groupe en fonctionnement normal

On prend un exemple de deux champs, chaque champ contient 4 strings de 3 modules chaque module contient 36 cellules de tel sorte :

Champs N°1 : chaque string contient un module commise les différents défauts de mismatch et d'ombrage dans 8 cellules ($S=800; T=308; R_{s2}=0.45; R_{p2}=2$).

Champ N°2: fonctionne en conditions normales.

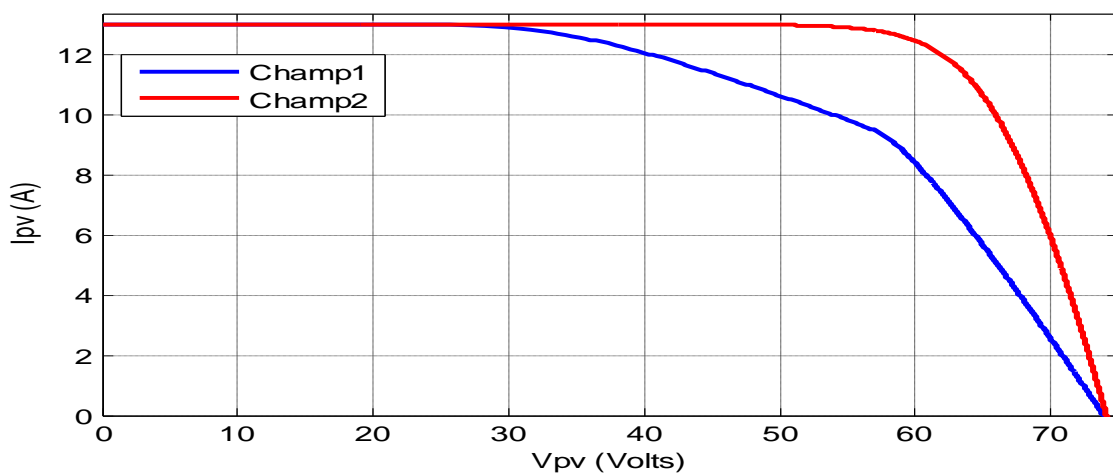


Figure III.11 : Caractéristiques I-V d'un champ PV lors des différents défauts de mismatch et d'ombrage et d'un champ PV en fonctionnement normal.

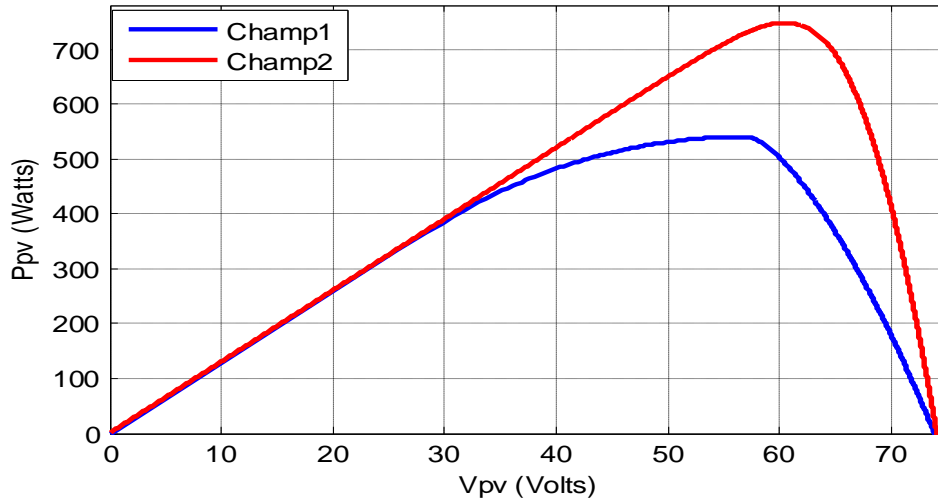


Figure III.12 : Caractéristiques P-V d'un champ PV lors des différents défauts de mismatch et d'ombrage et d'un champ PV en fonctionnement normal

III.4.3.3. Discussion des résultats de simulation

A partir des figures précédentes on peut constater que :

1- Un défaut qui survient sur un système PV provoque des déformations des caractéristiques (V-I ou V-P) de celui-ci qui sont dues à une chute de tension ou une perte de courant ou bien les deux en même temps. Ce qui influence la puissance globale délivrée par le système P-V.

2- La deuxième constatation qu'on peut faire est que pour qu'un générateur PV puisse fonctionner de façon optimale, il faut que les N_s et N_p cellules, les modules et les strings mis en série et en parallèle se comportent tous de façon identique. Pour cela, il faut qu'ils soient issus de la même technologie et plus encore, du même lot de fabrication. Il faut ensuite qu'ils soient soumis aux mêmes conditions de fonctionnement (éclairage, température, vieillissement et inclinaison).

III.5. Effet de l'humidité

Des couches de Si d'un substrat dopé (n+), sont exposées à des variations d'humidité (de 0 à 80%). Sur la figure (III.5) sont représentées la variation de masse et de la résistance de la couche absorbant de l'humidité.

Nous observons la croissance rapide de la résistance quand l'humidité augmente, ce qui implique la décroissance de la puissance maximal dans les caractéristiques des modules PV. [9].

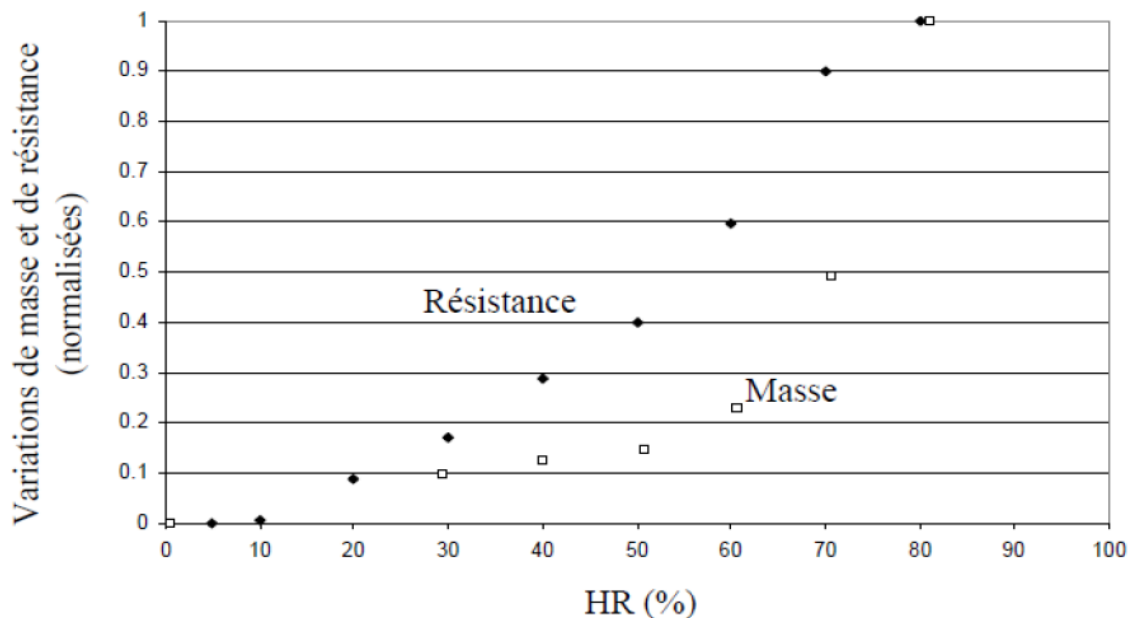


Figure III.13 : Variation de résistance des couches de si exposé à des variations d'humidité [9].

III.6. Impact de la poussière sur le rendement des modules photovoltaïques

Beaucoup de modules photovoltaïques présentent un rendement très faible en contact avec de la poussière réduisant ainsi considérablement l'efficacité aussi bien en performance électrique, et la capacité, sachant que la plupart des panneaux sont conçus dans le but d'un fonctionnement correct pendant plus de deux décennies, mais cette durée est réduite à cause des conditions environnementales, en raison de l'impact de la poussière sur les panneaux.

L'étude de la dégradation de ces derniers s'avère essentiel ; elle pourrait aider à apporter des améliorations sur l'optimisation et la planification, selon Une étude sur la quantité d'énergie solaire absorbée par des modules impurs comparée à ceux nettoyés.

L observations a indiqué une accumulation de poussière d'environ 2,5 g/m²/jour entre avril et juin au Koweït avec une réduction de la transmission allant de 64% à 17% pour les angles d'inclinaison allant de 0 ° à 60 °, respectivement après 38 jours d'exposition, un taux de dégradation de l'efficacité de 7% a été constaté , cependant l'estimation des perte journalière engendrées par la poussière peut être représenté par l'équation (III.1) . [8]

$$HL(\%) = \frac{H_{cc} - H_{DC}}{H_{cc}} \times 100 \quad (III.2)$$

HL : Energie non reçue par le module

H_{cc} : Irradiation journalière mesurée pour un module nettoyé (W hm⁻²)

H_{DC} : Irradiation journalière mesurée pour un module sale (W hm⁻²).

III.7. Potential Induced Degradation (Le PID)

Ce phénomène se caractérise par la dégradation progressive des performances des modules photovoltaïques, à base de silicium cristallin, due à la présence d'un courant électrique induit au cœur même du module. (figure III.14)

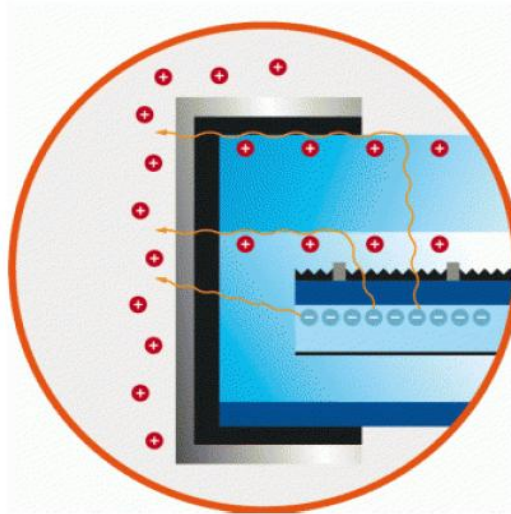


Figure III.14 : Représentation de la différence de potentiel induit dans un module PV [7]

III.7.A. Les conséquences du PID

- Diminution de la puissance du module.
- Dégradation irréversible des cellules siliciums.
- Vieillissement de l'encapsulant.
- Délaminage et destruction du module.

1) Dans un premier temps, seules les performances électriques seront touchées.(Figure III.15)

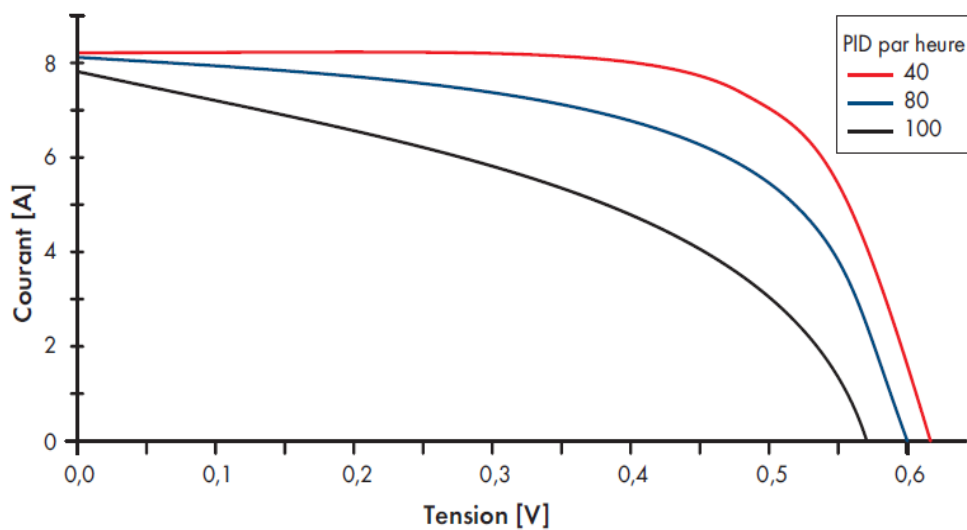


Figure III.15 : Diminution du rendement du module [7]

2) Si le phénomène n'est pas traité, après une durée de fonctionnement relativement courte, une dégradation de la couche conductrice peut être décelée. (Figure III.16)

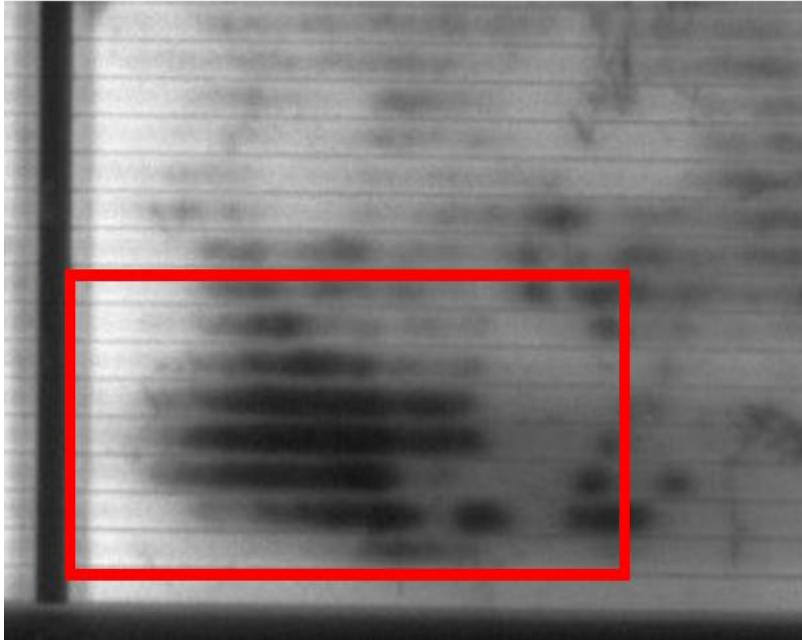


Figure III.16 : Court-circuit de la jonction p-n dans la cellule [7]

3) Avec le temps, si le problème n'est pas traité, l'encapsulant(EVA) jaunit parfois mais surtout perd son pouvoir adhésif. (Figure III.17)

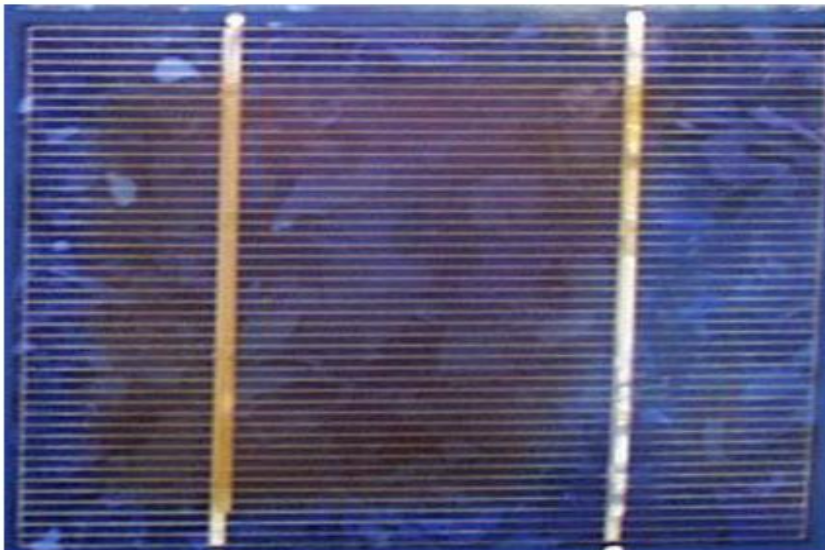


Figure III.17 : Jaunissement de l'encapsulant [7]

4) Délaminage et donc infiltration d'eau dans le module PV. (Figure III.18)



Figure III.18: Délaminage du module [7]

- **Remarque :**

Ces dégradations seront d'autant plus rapides que les modules sont placés dans des endroits à fortes précipitations.

En effet, la pluie augmente considérablement le courant de fuite dans le module.

III.7.B. Le dépistage du phénomène du PID :

La manifestation de l'effet du PID étant fonction de différentes interactions entre les matériaux constituant le module, la seule façon de vérifier que celui-ci est susceptible ou non d'être dégradé par ce phénomène est de le simuler de manière accélérée, en laboratoire.

Nous allons placer le module dans les conditions les plus sévères de fonctionnement:

- Augmentation de la température.
- Augmentation de l'humidité.
- Polarisation du module.

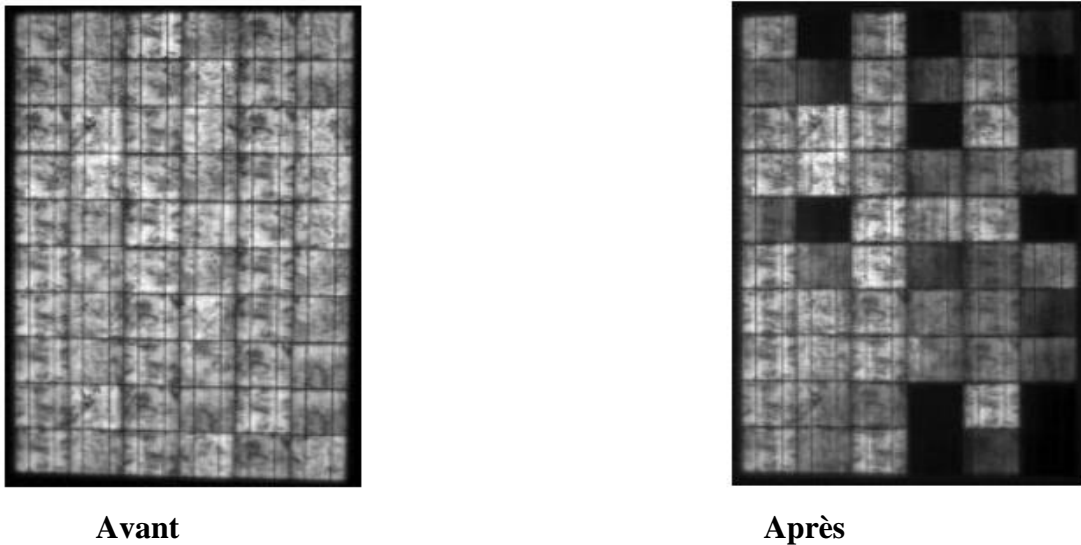


Figure III.19 : Photo en Electroluminescence avant et après dépitage du PID

T= 50°C

H_r =50%

Durée: 100h [7]

III.7.C. Les précautions à prendre

Une fois le phénomène repéré, le PID peut être arrêté ou inversé en évitant la présence de ce potentiel négatif au niveau de l'onduleur.

III.8. Corrosion TCO

Après une durée de fonctionnement relativement courte, une dégradation de la couche dite TCO (Transparent Conductiv Oxide) a été décelée sur certains panneaux à couche mince. L'endommagement de cette couche conductrice sur l'intérieur du vitrage est irréparable et entraîne des pertes de puissance considérables. [7]

III.8.A. Les Causes de la Corrosion TCO

Le Florida Solar Energy Center (FSEC) étudie les causes de la corrosion TCO depuis l'an 2000.

D'après les recherches de ce centre, ce sont principalement les panneaux dotés de cellules en a-Si et CdTe, fabriqués selon la technologie superstrat, qui sont concernés. Lors de ce processus de fabrication, l'installation de chaque couche du panneau débute par le vitrage.

La corrosion TCO apparaît en priorité en bordure des panneaux photovoltaïques, suite à la réaction de l'humidité avec le sodium contenu dans le vitrage. [7]

La corrosion rend le TCO laiteux et lui fait perdre ses propriétés conductrices. Le rendement du panneau photovoltaïque diminue alors progressivement. (Figure III.20)

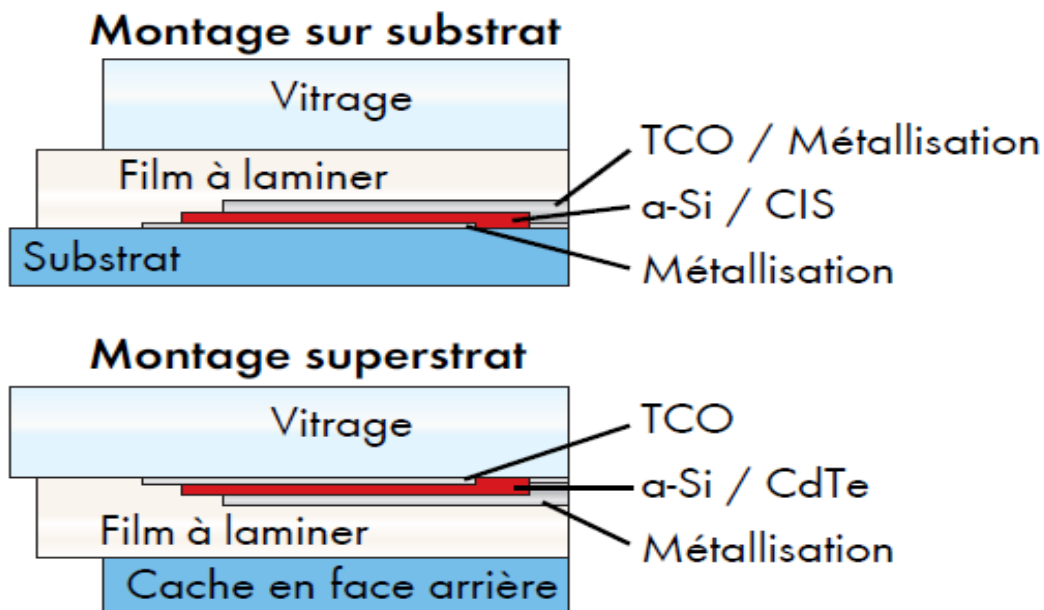


Figure III.20 : Processus d'apparition de la corrosion TCO [7]

- a-Si Silicium amorphe
- CIS Di séléniure de cuivre-indium
- CdTe Tellure de cadmium

III.8.B. Les contre-mesures

Les phénomènes de corrosion dépendent directement des courants de fuite, liés au potentiel du générateur photovoltaïque à la terre ; contrairement à la tension photovoltaïque entre les raccordements positif et négatif, la tension à la terre n'est guère prise en compte lors de la configuration de l'installation.

Selon la topologie de l'onduleur, cette tension peut être très variable.

Une augmentation de la distance entre les panneaux et la mise à la terre des structures (par exemple le cadre du panneau) limitent certes les courants de fuite, mais le choix d'une certaine topologie d'onduleurs ne peut à lui seul résoudre le problème.

L'utilisation d'onduleurs à séparation galvanique et la mise à la terre négative du générateur photovoltaïque avec un kit de mise à la terre permettent de créer un champ électrique dans lequel les ions de sodium chargés positivement sont repoussés de la couche TCO ; la corrosion est ainsi évitée en toute sécurité ; cette mesure devrait par conséquent être privilégiée.

Les fabricants de panneaux développent par ailleurs des solutions visant à empêcher l'apparition de cet effet ; un meilleur scellage des bords du panneau, par exemple, empêche la pénétration d'humidité, ce qui élimine un ingrédient essentiel du processus de corrosion.[7]

III.9. Problème de la diode de by-pass

La mise en série des cellules peut être dangereuse lorsque l'une d'entre elles se retrouve à l'ombre ; Elle va s'échauffer et risque de se détruire.

En effet, une cellule masquée voit l'intensité qui la traverse diminuer. De ce fait, elle bloque la circulation de l'intensité (normale) produite par les autres modules. La tension aux bornes de cette cellule "masquée" augmente, d'où apparition d'une surchauffe.

C'est l'effet d'auto-polarisation inverse. Une telle cellule est appelée (Hot spot).

Pour supprimer ce problème et protéger la cellule (masquée), on place des diodes by-pass. En antiparallèles sur 18 ou 24 cellules de façon à court-circuiter les cellules ombrées.

Un panneau solaire dispose d'une à trois diodes by-pass, en fonction de son nombre de cellules (en moyenne 36 cellules pour 3 diodes by-pass). En cas de masque :

- 1 diode : 100 % du module est en by-pass,
- 2 diodes : 50 % du module est en by-pass,
- 3 diodes : 33 % du module est en by-pass.

Exemple :

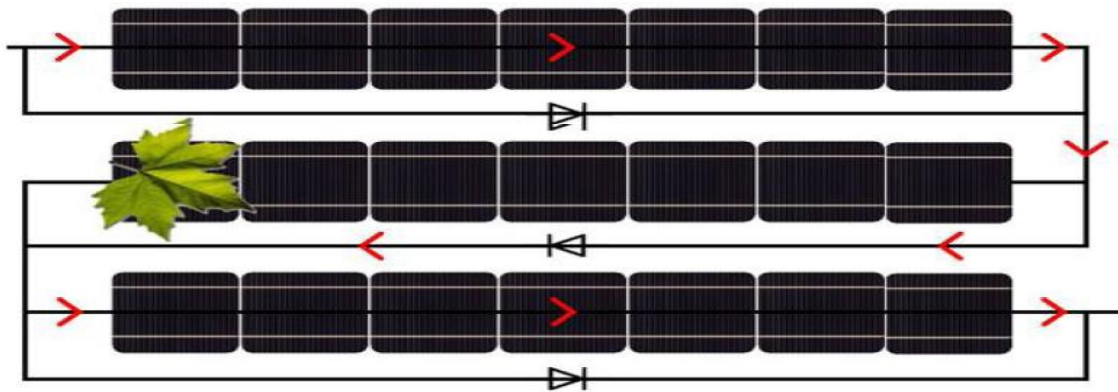


Figure III.21 : Rôle de la diode by-pass dans un module P-V

Au niveau de la deuxième rangée, le courant passe par la diode by-pass pour cause d'ombrage.

Les diodes de by-pass, utilisées pour éviter les problèmes de mis match, peuvent faillir par des problèmes de surchauffe ou de sous dimensionnement. Ce problème est restreint lorsque la température de jonction (au sein de la diode) est maintenue en dessous de 130°C. (Figure III.21)

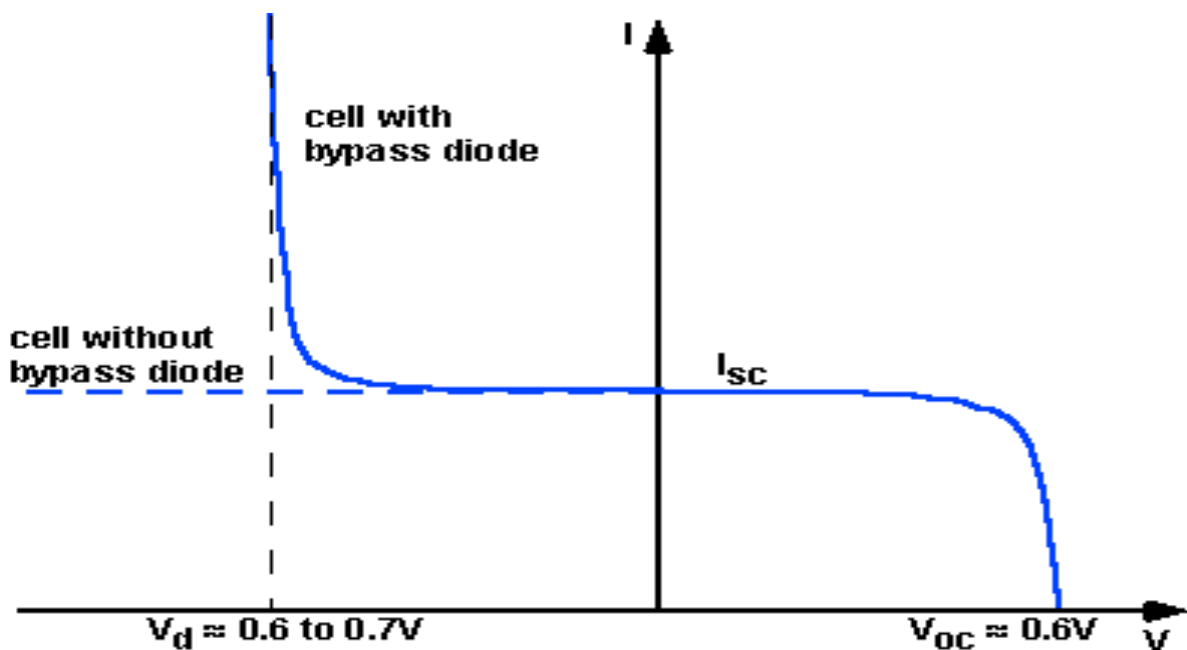


Figure III.22 : Influence de la diode by-pass sur la cellule P-V [11]

III.10. Ombrage ou encrassement des panneaux photovoltaïques

Selon leur emplacement, les végétaux et les édifices peuvent projeter de l'ombre sur vos panneaux photovoltaïques et engendrer ainsi un ombrage temporaire ou même permanent des panneaux photovoltaïques. De même, l'encrassement du par exemple à la poussière, le pollen, la neige ...etc. entraînent un ombrage des panneaux photovoltaïques. Ces ombrages ont pour conséquence que les panneaux photovoltaïques absorbent moins de rayonnements solaires. Ce faisant, l'efficacité des panneaux photovoltaïques s'en trouve amoindrie, et donc la valeur PR de l'installation photovoltaïque.

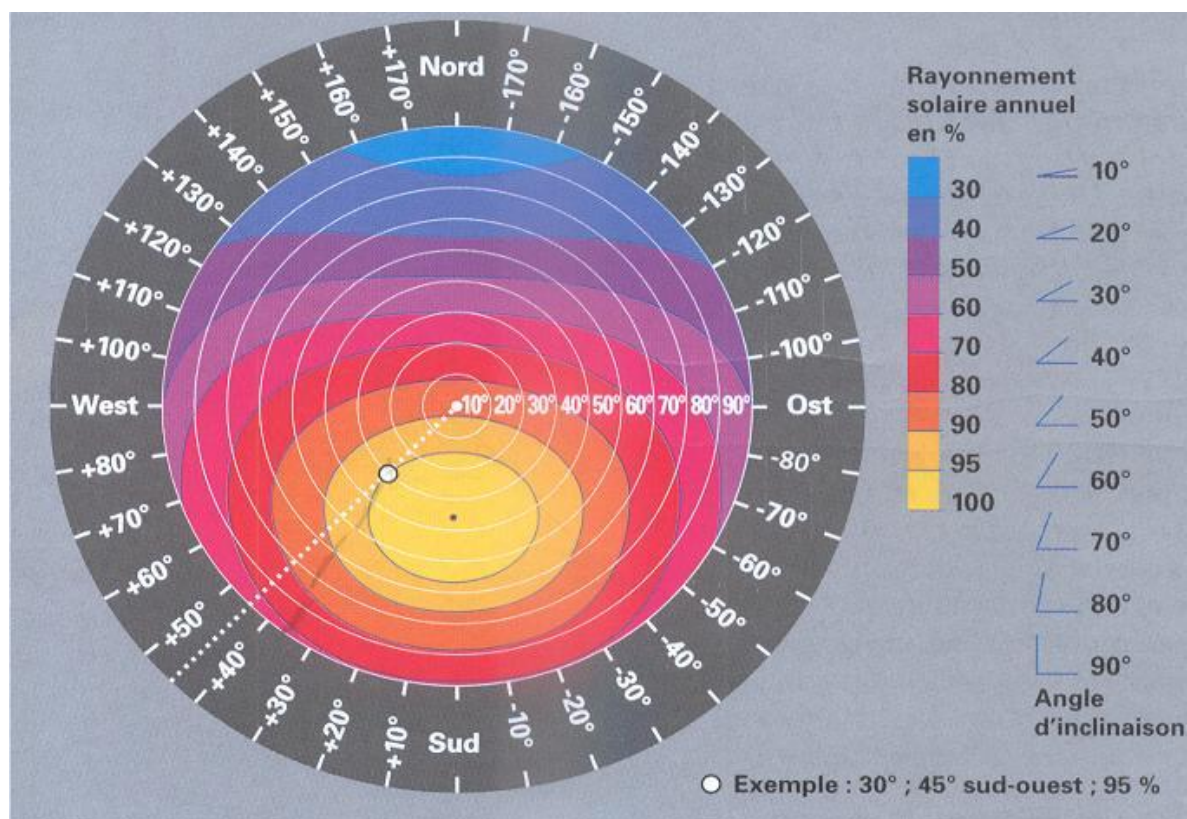


Figure III.23 : Influence de l'orientation, de l'inclinaison et de l'ombrage sur l'énergie rayonnée [12]

III.11. Pertes dans les lignes

Lors de la transmission d'énergie de l'onduleur au compteur de production de l'exploitant du réseau, il se produit des pertes de conductivité, qui varient selon le type et le matériau du câble utilisé. Ces pertes de conductivité peuvent réduire la valeur PR. [7]

III.12. Coefficient de rendement des panneaux photovoltaïques

Le coefficient de rendement des panneaux photovoltaïques joue un rôle décisif sur l'indice de performance l'installation photovoltaïque. Plus le coefficient de rendement des panneaux photovoltaïques est élevé, plus la valeur PR sera élevée (dans le cas de conditions générales appropriées, comme un rayonnement solaire élevé sur le site, etc.). [7]

III.13. Le vieillissement des cellules solaires

Le vieillissement des cellules solaires engendre une valeur PR moins élevée au fil des ans. Les cellules solaires monocristallines et les cellules solaires poly cristallines peuvent être altérées de jusqu'à 20 % en 20 ans. [7]

III.14. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons appris à calculer l'indice de performance des systèmes photovoltaïque ainsi que l'évolution et l'évaluation des facteurs influençant sur leur dégradation au fil du temps a savoir les paramètres interne des composant solaire mais aussi les facteurs externes.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

L'énergie photovoltaïque constitue une vraie alternative efficace aux énergies fossiles à plusieurs titres, elle est inépuisable, peut être produite localement et selon les besoins locaux, elle préserve l'environnement car elle n'émet pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets et n'entraîne aucun risque majeur et aucune nuisance significative. Cette énergie est produite par un dispositif (cellule solaire photovoltaïque ou photopile) qui transforme l'énergie électromagnétique du rayonnement solaire en énergie électrique.

Dans ce travail, nous avons étudié l'influence des différents facteurs sur le rendement de la cellule photovoltaïque. Parmi ceux-ci, on cite : les résistances série et parallèle, le défaut de mismatch, l'ombrage, la température et l'ensoleillement.

A partir des résultats obtenus, on remarque que :

L'augmentation de la résistance série (R_s) est conjuguée par une tension constante et un courant constant une diminution de puissance délivrée.

La diminution de la résistance shunt (R_{sh}) se traduit par une diminution de courant généré et de puissance délivrée avec pratiquement une tension constante.

L'augmentation de la température (T) est conjuguée par un courant constant et une diminution considérable de tension et de puissance délivrée.

La baisse de l'irradiation (E) se traduit par une diminution de courant généré et de puissance délivrée avec pratiquement une tension constante.

Le défaut d'ombrage cause une diminution du courant et de tension ainsi que la puissance délivrée.

L'échauffement d'une cellule solaire dû à un défaut de mismatch diminue la tension et la puissance délivrée avec un courant relativement constant.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Kamelia Helali, « Modélisation d'une cellule photovoltaïque », Thèse de Magister, Université de Tizi-Ouzou, 2012.
- [2] Salaheddine BENSALÉM , « Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires », Thèse de Magister, Université de Ferhat Abbas-setif, 2011.
- [3] www.peracod.sn
- [4] Cecil MIQUEL, « Energie renouvelable et efficacité énergétique », Revue Hespul, 2009.
- [5] A. Ricaud ; Livre : photopile solaire l'édition polytechnique et universitaire romandes ; Lausanne, 1997.
- [6] SMA Solar Technology AG SMA
- [7] www.eliosys.eu Revue 2011
- [8] M.Mesrouk , A.Hadj Arab , Eude « Effet de la poussière sur le rendement des modules photovoltaïques » ,Etude : Université de Tizi-Ouzou,2014.
- [9] Mohammed BOUSSAID , « Modélisation des phénomènes de vieillissement des modules Photovoltaïques », Thèse de Magister , Université Tlemcen, 2012.
- [10] www.lumensol.fr
- [11] www.pveducation.org
- [12] www.tpepaneauxsolaire.fr
- [13] www.bruxellesenvironnement.be

[14] LE PHOTOVOLTAÏQUE – MODULE 8 – ENTRETIEN ET SUIVI DES INSTALLATIONS , FICHE TECHNIQUE , 2010.

[15] Zakaria BENDJELLOULI , « contribution a la modelisation d'une cellule solaire»,Thèse de Magister, U niversité de Bechar , 2009.