

Performance des Modules Photovoltaïques dans les Conditions du Climat Saharien

Mémoire

Présentée Et Soutenu Publiquement Le December 2012

Pour L'Obtention Du :

Diplôme Master en Physiqye Energique

Par :

Mr. OTHMANI Mourad

Dirigè Par : Dr. M. SADOK

<i>Président :</i>	HAMOUDA Messaoud	M.C.A	Univ.Adrar
<i>Rapporteur :</i>	SADOK Mohammed	M.R.B	URERMS
<i>Examineurs :</i>	BENATIALLA Ali	M.C.A	Univ.Adrar
	OMARI Boumediene	M.C.A	Univ.Adrar
	KALLOUM Slimane	M.C.B	URERMS

*Je dédie ce modeste travail à mes chers parents,
À mes frères et mes sœurs à tous ma famille,
À mon encadreur Mr. Sadok Mohammed,
À tous mes collègues et mes amis partout,
À tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux qui utilisent la science
pour le bien et la prospérité de l'humanité.*

Remerciements

Je remercie monsieur SADOK Mohammed, Maître de Recherche, d'avoir accepté la direction scientifique de ce mémoire. Je lui exprime toute ma gratitude pour son expérience, sa disponibilité constante et les conseils fructueux qu'il m'a prodigués.

Je remercie tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes travaux : Mr HAMOUDA Messaoud, Maître de Conférence à l'Université d'Adrar et Directeur de l'URERMS, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.

Messieurs BENATILLA Ali, Maître de Conférence à l'université d'Adrar, OUMARI Boumediene, Maître Assistant à l'Université d'Adrar, KALOUM Slimane, Maître de Recherche pour leur participation au jury et pour l'intérêt qu'il ont montré pour mes travaux.

Les plus anciens remerciements grâce et de gratitude à mon ami et collègue, Nğaibia Amar et Yaichi Mohammed précieuse aide précieuse et je leur souhaite tout le progrès et la prospérité.

Et mes sincères remerciements tous ceux qui, de près ou de loin, ont donné l'aide.

Table des matières

Liste des tableaux	v
Table des figures	vi
Introduction générale	1
Chapitre 1 GÉNÉRALITÉS SUR L'ENERGIE SOLAIRE	3
1.1 Introduction	3
1.2 Le rayonnement solaire	4
1.2.1 Rôle de l'atmosphère	4
1.2.2 Effets atmosphériques	5
1.2.3 Spectre hors atmosphère	5
1.2.4 Spectre du rayonnement	5
1.2.5 Masse d'air	6
1.2.6 Les différents types de rayonnement	7
1.3 Instrumentation pour les mesures radiométriques	8
1.3.1 Pyranomètre	8
1.3.2 Héliographe	9
1.3.3 Pyrhéliomètre	10
1.4 Conclusion	11
Chapitre 2 TECHNOLOGIE DES PHOTOPILES	12
2.1 Introduction	12
2.2 Principe de la conversion photovoltaïque	13
2.3 Filière silicium cristallin	16
2.3.1 Les méthodes de purification du silicium	16
2.3.2 Techniques d'élaboration du silicium pour la conversion photovoltaïque	17

2.4	Conclusion	29
Chapitre 3 LE SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE		30
3.1	Introduction	30
3.2	La Cellule Photovoltaïque	31
3.2.1	Schéma Équivalent d'une Cellule Photovoltaïque idéale	31
3.2.2	Modèle réel d'une cellule photovoltaïque :	32
3.3	Le module photovoltaïque (n_{cs} cellules en série)	34
3.4	Cas d'un Générateur Photovoltaïque	36
3.5	Ajustement du Modèle	37
3.6	Validation du modèle en condition standard	40
3.7	Conclusion	41
Chapitre 4 SIMULATION DE LA PERFORMANCE DU MODULE PHOTOVOLTAÏQUE		43
4.1	Introduction	43
4.2	Influence de l'éclairement	44
4.3	Influence de la température	44
4.4	Les Tests Expérimentaux	45
4.5	Tests des modules UDTS avec quelque défaut	47
4.6	Conclusion	48
Conclusion Générale		49
Bibliographie		50

Liste des tableaux

1.1	Spectre solaire extraterrestre	6
1.2	Quelques valeurs de l'albédo	8

Table des figures

1.1	Différents spectres solaires	6
1.2	Nombre de masse d'air	7
1.3	Les différents composants du rayonnement solaire	8
1.4	Pyranomètre	9
1.5	Pyranomètre	9
1.6	Héliographe	10
1.7	Héliographe	10
2.1	Schéma de principe de la conversion photovoltaïque.	14
2.2	Effet de l'éclairement sur les caractéristiques $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque	15
2.3	Méthode de tirage CZ.	18
2.4	Élaboration du silicium par la méthode H.E.M.	19
2.5	Croissance d'un ruban de silicium par le procédé EFG.	21
2.6	Principe de la croissance dendritique.	22
2.7	Procédé de tirage des rubanes de silicium sur substrat de carbone RAD. . .	23
2.8	Procédé de tirage de ruban de silicium sur céramique.	24
2.9	Les trois différentes structures utilisées dans l'élaboration des cellules . . .	26
2.10	Structure d'une cellule solaire au CdS/Cu_2S	27
3.1	Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque idéale.	31
3.2	La caractéristique $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque.	32
3.3	Schéma électrique réel d'une cellule photovoltaïque.	32
3.4	Coupe transversale d'un module photovoltaïque.	34
3.5	Schéma équivalent d'un module photovoltaïque.	35
3.6	Champ (générateur) photovoltaïque.	36
3.7	Schéma équivalent d'un générateur photovoltaïque.	36
3.8	Les courbes $P - V$ pour différentes valeurs de R_s et R_{sh}	39
3.9	Algorithme de la méthode employée pour ajuster le modèle $I - V$	40
3.10	Caractérisation $I - V$ de modèle.	41
3.11	Caractérisation $P - V$ de modèle.	41
4.1	Effet de l'éclairement sur les caractéristiques $I(V)$ d'un module photovoltaïque	44
4.2	Influence de la température sur les caractéristiques $I - V$ d'un module photovoltaïque.	44

4.3	Photos de banc d'essai (a) Traceur de courbe $I - V$ de type EKO Instruments MP-160. (b) Résultats expérimentaux affichées sur le PC. (c) Module photovoltaïque à caractériser.	45
4.4	Courbe expérimentale	46
4.5	Courbe simulation	46
4.6	Courbe de module UDTS verre cassé.	47
4.7	Courbe de module UDTS cellule ombré.	47
4.8	Courbe de module UDTS sans diode.	47

Introduction générale

L'électricité, forme propre de l'énergie par excellence, est aujourd'hui produite, à près de 80 %, à partir de combustibles fossiles (pétrole, gaz, ...) ou fissiles (nucléaire), ressources épuisables et polluantes à la fois. Pour un développement durable, les ressources énergétiques renouvelables sont " propres " et inépuisables, donc capables à long terme de satisfaire la majeure partie de nos besoins. Après de nombreux soubresauts, les contraintes environnementales, le rapprochement de l'échéance d'épuisement des ressources fossiles et fissiles ainsi que les soucis d'indépendance énergétique conduisent depuis les années 1990 à un décollage significatif des filières de production d'électricité d'origine renouvelable. Les énergies renouvelables sont des énergies issues du soleil, du vent, de la géothermie, des chutes d'eau, des marées ou de la biomasse ; leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes : ce sont les énergies de l'avenir. Dans ce cadre, l'énergie photovoltaïque bien que connue depuis de nombreuses années comme une alternative aux sources de production d'énergie électrique, les niveaux de puissance s'étalent des milliwatts aux mégawatts. Les problèmes qui restent à résoudre concernent autant le matériau de conversion qui reste cher que la chaîne de conversion électrique qui présente beaucoup de pertes par une non optimisation et souvent une utilisation inappropriée de convertisseurs statiques. Sur la partie système de conversion lui-même, les recherches s'orientent selon deux axes principaux :

- le développement d'un modèle mathématique précis qui décrit le fonctionnement réel d'une cellule photovoltaïque, et qui reflète l'influence des conditions atmosphériques (éclairage et température) sur la cellule solaire ;
- des essais expérimentaux afin de démontrer l'efficacité de ce modèle mathématique et l'optimisation efficace qui est apte de déterminer le point de puissance maximale de la caractéristique $I(V)$ du module photovoltaïque.

Sur la partie matériau, beaucoup d'équipes de recherche travaillent depuis de nombreuses années pour obtenir des rendements élevés associés à des prix de réalisation bas et améliorer les performances des modules photovoltaïques. Le présent mémoire est organisé en quatre chapitres principaux qui se résument comme suit :

Dans le premier chapitre, on aborde notions essentielles relatives au gisement solaire comme les coordonnées terrestres et horaires, le mouvement de la terre autour de soleil ainsi que les différents types de rayonnement et quelques grandeurs photométriques. Le deuxième chapitre, sera consacré aux matériaux de base utilisés dans la fabrication des cellules solaires et aux procédés de leur élaboration et enfin à la technologie de fabrication de la photopile. Au troisième chapitre, on abordera une étude sur les systèmes photovoltaïques et les modèles utilisés pour la détermination de leurs performances. Le dernier chapitre du mémoire sera consacré à quelques tests de caractérisation des modules photo-

voltaïques dans les conditions réelles de fonctionnement. Ces tests seront suivies par une validation du modèle utilisé, et une détermination des modules photovoltaïques testés.

1

GÉNÉRALITÉS SUR L'ENERGIE SOLAIRE

Sommaire

1.1	Introduction	3
1.2	Le rayonnement solaire	4
1.2.1	Rôle de l'atmosphère	4
1.2.2	Effets atmosphériques	5
1.2.3	Spectre hors atmosphère	5
1.2.4	Spectre du rayonnement	5
1.2.5	Masse d'air	6
1.2.6	Les différents types de rayonnement	7
1.3	Instrumentation pour les mesures radiométriques	8
1.3.1	Pyranomètre	8
1.3.2	Héliographe	9
1.3.3	Pyrhéliomètre	10
1.4	Conclusion	11

1.1 Introduction

Le soleil est une sphère gazeuse d'un diamètre de 1.391000km située à une distance moyenne de la terre égale à 149.598000km. L'orbite terrestre étant presque circulaire, la distance terre-soleil varie donc peu au cours de l'année [1].

Le soleil est l'origine de la quasi-totalité des sources d'énergies utilisées par l'humanité pour ses besoins alimentaires, domestiques et industriels.

Le rayonnement solaire n'est pas toujours perpendiculaire à la surface du sol. Les panneaux solaires devraient être installés avec inclinaison et direction choisies de telle sorte que les rayons solaires soient perpendiculaires aux plans de captation des générateurs [1].

Pour cette raison, il est utile de présenter, dans ce chapitre, une notion générale sur le gisement solaire ainsi que les différents facteurs conduisant à la diminution de l'intensité de l'éclairement solaire.

1.2 Le rayonnement solaire

L'énergie du soleil est produite par des réactions de fusion thermonucléaire ; les noyaux d'hydrogène (protons) s'associent aux noyaux d'hélium avec un dégagement d'énergie. Cette énergie est émise dans l'espace par la surface du soleil, notamment sous forme d'ondes électromagnétiques. Le spectre de ce rayonnement correspond à l'émission d'un corps noir porté à une température de 5800 degré Kelvin. Le maximum d'énergie du spectre solaire est situé dans le domaine visible [1].

L'énergie qui nous arrive du soleil représente la quasi-totalité de l'énergie disponible sur terre. Outre l'apport direct sous forme de lumière et de chaleur, cette énergie est émise dans l'espace par la surface du soleil, notamment sous forme d'ondes électromagnétiques (lumière).

1.2.1 Rôle de l'atmosphère

– 1. Structure de l'atmosphère

On peut grossièrement diviser l'atmosphère en 5 couches aux propriétés tout à fait différentes et distinctement séparées [12] :

- La troposphère qui s'étend jusqu'à 15Km d'altitude ou la température décroît de 6.5°C par Km pour atteindre -70°C à la base de la couche suivante ;
- La stratosphère de 15 à 55 Km, ou la température croit de -70°C à 10°C ;
- La mésosphère de 55 à 80 Km, ou la température décroît à niveau de +10° C à -80°C ;
- L'ionosphère ou la température croit régulièrement pour atteindre 1500°C à l'altitude 300Km ;
- L'exosphère au moins delà de 700 km qui s'ouvre sans frontière sur l'espace intersidérale.

– 2. Composition de l'atmosphère

Les trois premières couches de l'atmosphère possèdent des compositions presque identiques : 78% d'azote, 21% d'oxygène, 0.9% d'argon, 0.03% de CO_2 et des traces d'autre gaz avec de la vapeur d'eau dans la troposphère et une mince couche d'ozone dans la stratosphère dont le rôle est si important dans l'absorption des rayons ultraviolets les plus durs [12].

– **3. Rôle de l'eau**

La quasi-totalité de la vapeur d'eau est contenue dans la 1ère couche.

1.2.2 Effets atmosphériques

Lors de leur passage par l'atmosphère, l'intensité des rayons solaires est considérablement altérée. Les deux principaux mécanismes qui sont responsables d'une telle altération sont l'absorption et la diffusion [12, 13].

– **1. L'absorption**

Plusieurs constituants atmosphériques absorbent une partie de la radiation solaire incidente. La couche d'ozone élimine presque la totalité des rayons ultra-violet du spectre solaire de telle sorte qu'une petite radiation de longueurs d'ondes inférieures à $0,3\mu m$ puisse atteindre la surface terrestre. La vapeur d'eau est aussi responsable de l'absorption de la radiation (dans la région infrarouge). un troisième type absorbe de petites quantités (dioxyde de carbone, l'oxygène, autres gaz et certaines particules).

– **2. La diffusion**

La diffusion est un phénomène complexe qui intègre, à la fois, la diffraction, la réfraction et la réflexion par les particules. L'indice de réfraction des particules diffusantes modifie sensiblement la répartition spectrale et l'intensité lumineuse. Parmi les constituants responsables de la diffusion de la radiation solaire, on trouve les molécules d'air, les aérosols (poussières, cendres, micro-cristaux, micro-gouttelettes, fumées de pollution industrielle,...) et les nuages (gouttelettes d'eau).

1.2.3 Spectre hors atmosphère

Hors atmosphère, la distribution spectrale du rayonnement est parfaitement définie, au voisinage de la planète venue l'éclairement atteint $2600W/m^2$ au fur et à mesure qu'on s'éloigne du soleil, sur Jupiter par exemple il n'est plus que de $50W/m^2$.

1.2.4 Spectre du rayonnement

La courbe représentant l'intensité des rayons solaire associée à une longueur d'onde donnée est appelée spectre solaire ou distribution spectrale. L'énergie du photon lumineux est reliée à la longueur d'onde par l'expression suivante :

$$E = h.v = h.\frac{c}{\lambda} \quad (1.1)$$

h : est la constante de Planck Js .

C : étant la vitesse de propagation ms^{-1} .

Hors atmosphère, le spectre solaire correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à $5800K$. En dehors de l'atmosphère terrestre, l'intensité de l'éclairement ou constante solaire est égale à $1353kW/m^2$. La distribution spectrale est alors référencée par Air Mass Zéro ($AM0$) [13]. La répartition du spectre $AM0$ est donnée au tableau [1] :

TABLE 1.1 – Spectre solaire extraterrestre

Ultraviolet UV	$0.20 < \lambda < 0.38 \mu m$	6.4%
Visible	$0.38 < \lambda < 0.78 \mu m$	48%
Infrarouge IR	$0.78 < \lambda < 10 \mu m$	45.6%

La figure suivante représente le flux incident en fonction de longueur d'onde.

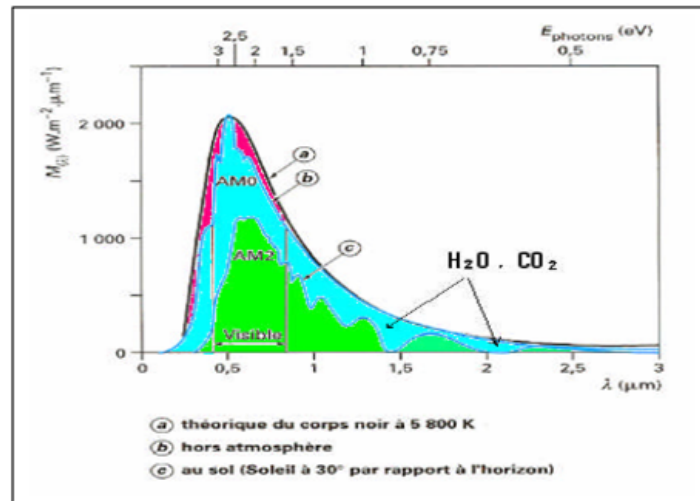


FIGURE 1.1 – Différents spectres solaires

1.2.5 Masse d'air

La masse d'air optique est définie (par ciel clair) comme la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol, rapportée à la traversée verticale au niveau de la mer. On suppose que cette couche est plane et stratifiée horizontalement et on admet un trajet rectiligne des rayons lumineux, la longueur du trajet est donné

$$OM = OA / \sin(h) \quad (1.2)$$

On appelle m le rapport OM/OA , soit $1/\sin(h)$

À une pression p différente de 1013 mbar et une altitude z (km), on désigne par masse atmosphérique ou nombre d'air masse le nombre m défini par l'expression suivante (voir figure 1.2) :

$$m = (p/1013 \cdot \sin(h)) \cdot \exp(-z/7,8) \quad (1.3)$$

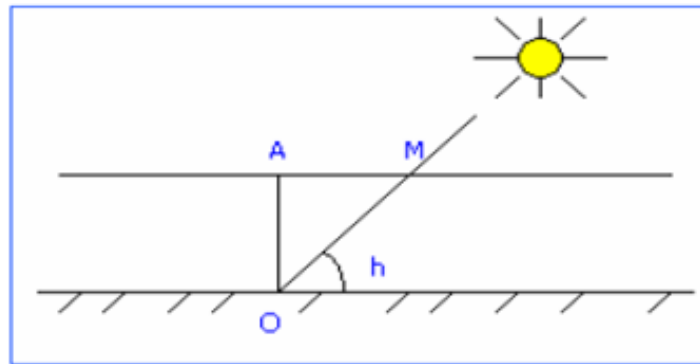


FIGURE 1.2 – Nombre de masse d’air

1.2.6 Les différents types de rayonnement

Le soleil fournit une énorme quantité d’énergie équivalente à $15.10^{17} kWh/m^2$ [1]. Le besoin énergétique global de la terre (électricité, chauffage, transport,...) est de l’ordre de $30.10^{13} kWh/m^2$.

Le soleil fournit donc annuellement 5000 fois les besoins énergétiques globaux de la terre. La fraction de rayonnement absorbée varie avec la longueur d’onde. Le rouge étant plus absorbé que le bleu ou le jaune.

– *a. Le rayonnement global :*

Le rayonnement global au sol est donc fonction de la composition et de l’épaisseur de l’atmosphère traversée par les rayons lumineux au cours de la journée. C’est une combinaison de deux types de rayonnements : direct et diffus. Ces distinctions entre ces deux composantes sont importantes pour les applications solaires [13].

$$G = I \cdot \cos(\theta) + D \quad (1.4)$$

C’est tout simplement la somme de diverses contributions montrées dans la figure ci-dessous.

– *b. Le rayonnement direct :*

Le rayonnement direct est le rayonnement solaire incident sur un plan donné et provenant d’un angle solide centré sur le disque solaire. Soit θ l’angle d’incidence du flux lumineux sur un élément ds du plan d’incidence.

– *c. Le rayonnement diffus :*

Le rayonnement diffus est le rayonnement émis par des obstacles (nuages, sol, bâtiments) et provient de toutes les directions (figure 1.3).

La conversion photovoltaïque utilisant les modules utilise aussi bien le rayonnement

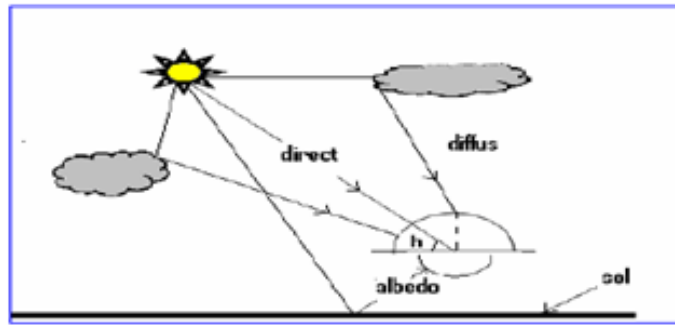


FIGURE 1.3 – Les différents composants du rayonnement solaire

direct que le rayonnement diffus.

– *d. L'albédo :*

C'est la fraction d'un rayonnement incident diffusée ou réfléchi par un obstacle. Ce terme étant généralement réservé au sol ou aux nuages. Pour un rayonnement considéré, l'albédo est la valeur moyenne des réflectances des obstacles définies pour tous les angles d'incidence [12]. Dans le tableau (1.2), on donne quelques valeurs de l'albédo pour différents types de sols :

TABLE 1.2 – Quelques valeurs de l'albédo

Nature du sol	Albédo
Surface d'eau	0.03 à 0.1
Forêt	0.05 à 0.2
Sol cultivé	0.07 à 0.14
Pierres et rochers	0.15 à 0.25
Champs et prairies	0.1 à 0.3
Sol nu	0.15 à 0.4
Neige ancienne	0.5 à 0.7

1.3 Instrumentation pour les mesures radiométriques

1.3.1 Pyranomètre

Le pyranomètre mesure le rayonnement global (direct+diffus) de toute l'hémisphère céleste dans la bande de longueur d'onde $0.33\mu m$. Le pyranomètre d'Eppley est une thermopile adaptée à cet usage (figure 1.4). La surface réceptrice comporte deux anneaux concentriques en argent ; l'anneau intérieur est recouvert de noir, l'anneau extérieur recouvert de blanc. La différence de température mesurée entre les deux anneaux par des

thermocouples en contact thermique avec les surfaces intérieures des anneaux, mais isolés électriquement, peut être enregistrée à raison d'une lecture par heure sous forme d'une tension de sortie de l'ordre du mV . Pour éliminer le rayonnement direct, certains pyranomètres sont munis d'un cache à orienter suivant la saison pour suivre la déclinaison (figure 1.5).



FIGURE 1.4 – Pyranomètre



FIGURE 1.5 – Pyranomètre

1.3.2 Héliographe

L'héliographe mesure les périodes de la journée pendant lesquelles l'intensité du rayonnement direct a dépassé un certain seuil. Tant que l'on peut observer des ombres sur le sol, les météorologistes parlent de radiation directe à laquelle est sensible l'héliographe. La somme de ces périodes représente la durée d'insolation journalière permettant de définir la fraction d'insolation. Dans l'héliographe de Campbell-Stokes (figure 1.6), une sphère de verre concentre le rayonnement direct en un point qui brûle un papier spécial. En se

déplaçant, le point brûlé décrit le mouvement apparent du Soleil en traçant une courbe dont la longueur est proportionnelle à la durée d'insolation. L'héliographe de Jordan est une variante qui utilise du papier photographique.



FIGURE 1.6 – Héliographe

1.3.3 Pyrhéliomètre

Le Pyrhéliomètre mesure le rayonnement direct (figure 1.7). Il comporte une ouverture réduite et une surface réceptrice qui doit être maintenue normale au rayonnement par un système de poursuite automatique. La surface sensible est un disque d'argent noirci placé à la base d'un tube muni d'un obturateur et d'un diaphragme limitant l'angle d'ouverture à 5.7° (le diamètre apparent du Soleil est de 0.5°). On mesure la température du disque d'argent à intervalles réguliers en ouvrant et en occultant alternativement l'entrée de l'appareil.



FIGURE 1.7 – Héliographe

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté quelques notions importantes pour l'évaluation du gisement solaire comme les coordonnées terrestres et horaires, le mouvement de la terre autour de soleil. On a, par la suite, abordé les différentes composantes du rayonnement solaire (global, direct, diffus et l'albédo). les appareils de mesure du rayonnement solaire.

2

TECHNOLOGIE DES PHOTOPILES

Sommaire

2.1	Introduction	12
2.2	Principe de la conversion photovoltaïque	13
2.3	Filière silicium cristallin	16
2.3.1	Les méthodes de purification du silicium	16
2.3.2	Techniques d'élaboration du silicium pour la conversion photovoltaïque	17
2.4	Conclusion	29

2.1 Introduction

Parmi les matériaux semi-conducteurs utilisés dans la conversion photovoltaïque, le silicium cristallin est le plus répandu du fait de son assez bonne absorption adaptée au spectre solaire et sa technologie qui est bien développée en raison de sa dominance dans l'industrie électronique des semi-conducteurs. Malgré la présence d'autres matériaux ayant des propriétés mieux adaptés à la CPV, le silicium est favorisé pour son efficacité et sa stabilité [2, 4]. À l'état actuel, les modules PV au Si cristallin dominent une part du marché pv de plus de 90%. Malgré que de nouveaux modules en couches minces (silicium amorphe, CuInSe₂,...) émergent dans le marché PV, il semblerait que le silicium cristallin gardera, pour longtemps, son rôle majeur [4].

Les cellules solaires au silicium ont été inventées en 1953. Les Rendements de conversion obtenus à l'époque, étaient de l'ordre de 4%. Un an plus tard, le rendement passa de 4 à 6%. Un Module 9 watts de puissance a été produit. Ces modules, installés sur site, ont donnés des résultats satisfaisants pour plusieurs mois. Toutefois, leur utilisation posaient

des problèmes économiques [2].

La recherche orientée vers les applications spatiales des cellules solaires a conduit à une réduction significative du coût de la cellule solaire [2]. En 1977, le rendement d'une cellule solaire, au silicium monocristallin, a atteint, en laboratoire, le seuil de 15% [2]. A la même époque, sont rentrés en compétition de nouveaux matériaux tels que l'arséniure de gallium et le sulfure de cadmium. Ce dernier, connu pour sa résistance aux radiations et élaboré en couches minces, n'a pas permis d'atteindre la fiabilité et le rendement escomptés pour un usage spatial.

Pour les applications terrestres de la conversion photovoltaïque, divers matériaux et structures ont été étudiés pour trouver un compromis technico-économique. Les recherches ont été orientées vers les filières avec et sans concentration. Le développement de l'une d'elles est lié aux critères de choix des matériaux photovoltaïques. Les principaux sont la largeur de la bande interdite, la stabilité, l'aptitude au dopage, la disponibilité, le coût du matériau et du procédé de fabrication.

Pour que l'énergie solaire photovoltaïque soit compétitive avec les sources d'énergie conventionnelles, il faut réduire le coût de traitement du matériau. Les recherches actuelles s'orientent vers une amélioration des techniques d'élaboration du matériau et de la technique d'obtention des lingots. D'autres techniques sont en cours d'investigation pour la réalisation des produits plats supportés ou auto supportés. Ces derniers utilisent du silicium dit de qualité solaire. L'adoption de nouveaux matériaux, mieux adaptés au spectre solaire, est également envisagée.

2.2 Principe de la conversion photovoltaïque

En 1839, le scientifique français Edmond Becquerel fut le premier à découvrir l'effet photovoltaïque [3]. Il a constaté que certains matériaux pourraient produire une petite quantité d'énergie sous l'influence de la lumière.

La conversion photovoltaïque aujourd'hui largement utilisée peut être simplement définie comme la transformation de l'énergie des photons en énergie électrique grâce au processus d'absorption de la lumière par la matière. Lorsqu'un photon est absorbé par le matériau, il passe une partie de son énergie par collision à un électron l'arrachant littéralement de la matière. Ce dernier étant précédemment à un niveau d'énergie inférieur où il était dans un état stable passe alors vers un niveau d'énergie supérieur, créant un déséquilibre électrique au sein de la matière se traduisant par une paire électron-trou, de même énergie électrique. Généralement, la paire électron-trou revient rapidement à l'équilibre en transformant son énergie électrique en énergie thermique. De même, toute l'énergie des photons n'arrivant pas à se transformer en électricité est absorbée par le matériau sous forme thermique. Le matériau constituant les capteurs *PV* a alors sa température interne qui augmente proportionnellement à l'énergie solaire reçue. Le taux de conversion photon-électron est faible car un certain nombre de conditions doivent être réunies pour

que ce phénomène se produise. L'effet thermique est donc majoritaire sur la plupart des capteurs détériorant d'autant plus les performances de ces derniers.

Même si le phénomène électrique est secondaire devant le phénomène thermique, récupérer tout ou partie de l'énergie électrique est le premier objectif des capteurs photovoltaïques sous forme de cellules ou de générateurs. Cela est possible grâce par exemple à des cellules solaires réalisées en associant un matériau semi-conducteur dopé N à un autre semi-conducteur dopé P , Figure 2-1. L'énergie produite par l'absorption d'un photon dans un matériau se traduit du point de vue électrique par la création d'une paire électron-trou. Cette réaction entraîne une différence de répartition des charges créant ainsi une différence de potentiel électrique, c'est l'effet photovoltaïque. Le fait d'avoir associé deux types de matériaux pour créer une jonction permet de pouvoir récupérer les charges avant que ces dernières ne se soient recombinées dans le matériau qui redevient alors neutre. La présence de la jonction PN permet ainsi de maintenir une circulation de courant jusqu'à ses bornes. Le nombre de photons par unité de longueur d'onde est une donnée à connaître pour les applications photovoltaïques pour estimer l'énergie totale disponible. La longueur d'onde correspondant au maximum de photons est de l'ordre de $650 - 670nm$ [3].

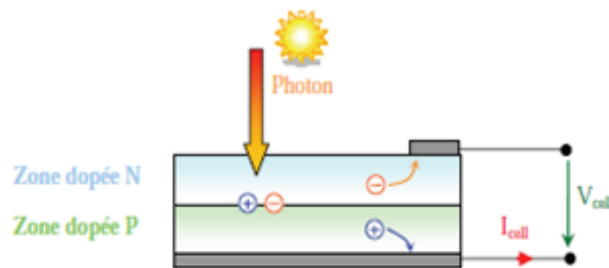


FIGURE 2.1 – Schéma de principe de la conversion photovoltaïque.

La plupart des cellules photovoltaïques utilisent des semi-conducteurs pour récolter les paires électron-trou créées par la collision des photons dans le matériau. Cependant, selon le matériau utilisé, le nombre de photons utiles (qui peuvent être absorbés) diffère. En effet, chaque matériau possède son propre gap énergétique (bande d'énergie interdite). Tout photon possédant une énergie inférieure à ce gap et arrivant à la surface du matériau n'aura pas assez d'énergie pour arracher un électron au matériau même s'il entre en collision avec un. Le courant produit par un capteur PV est donc beaucoup plus faible que la quantité de photons arrivant sur le matériau car plusieurs conditions doivent être réunies pour que réellement l'énergie d'un photon se traduise en courant (compatibilité du matériau avec les longueurs d'ondes du spectre solaire, énergie des photons à leur arrivée sur le matériau, probabilité de rencontre d'un photon avec un électron, incidence du rayonnement, épaisseur du matériau, ...). De plus, un autre compromis doit être fait par les concepteurs PV .

Si le gap du matériau est grand, peu de photons auront assez d'énergie pour créer du courant mais aux bornes de la cellule, la tension en circuit ouvert sera grande et facilitera d'autant plus l'exploitation de l'énergie électrique.

A l'inverse, un matériau avec un faible gap absorbe plus de photons mais présente une tension plus faible à ses bornes. Ce compromis a été quantifié par *Shockley* et *Quessier*. Ainsi par exemple, avec un seul matériau, le rendement de conversion maximal théorique est de 31% pour un gap énergétique d'environ $1.4eV$. Par comparaison, le gap du silicium qui est aujourd'hui le matériau le plus utilisé pour constituer des cellules dans les capteurs *PV* terrestres, n'est pas très loin de cet optimum avec $1.12eV$. Ainsi, le maximum théorique pour une simple jonction Si est d'environ 29%.

La différence de potentiel présente aux bornes d'une jonction PN soumise à un éclairage est également mesurable entre les bornes de la cellule *PV*. Typiquement, la tension maximale d'une cellule (*PN*) est d'environ 0.5 à 0.8V. Elle peut être directement mesurée à ses bornes sans charge (circuit ouvert). Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (V_{oc}). Lorsque les bornes d'une cellule sont court-circuitées, on peut mesurer le courant maximal produit par la cellule *PV* et on le nomme communément courant de court-circuit (I_{cc}). Ces valeurs peuvent changer fortement en fonction du matériau utilisé, de la température et de l'ensoleillement. La figure 2-2 représente les caractéristiques typiques mesurables $I_{cell} = f(V_{cell})$ d'une jonction PN soumise à un flux lumineux constant et dans l'obscurité.

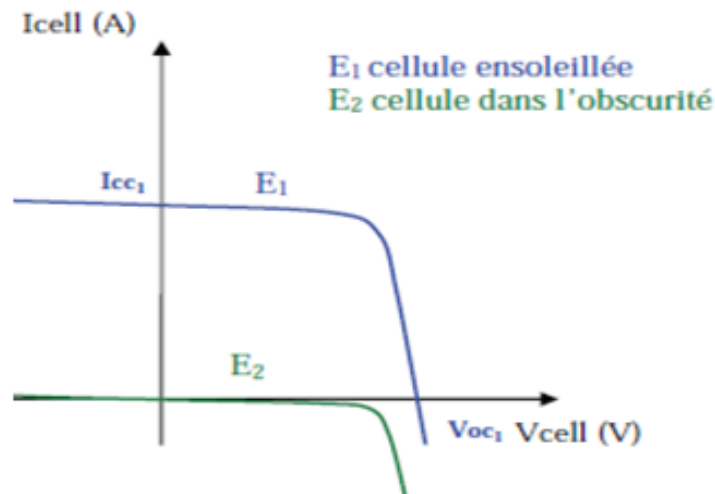


FIGURE 2.2 – Effet de l'éclairement sur les caractéristiques $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque

On parle souvent de rendement de conversion pour des cellules photovoltaïques, ce terme correspond à la capacité de la cellule à transformer l'énergie des photons qui la percutent. Ces mesures sont aujourd'hui normalisées. Les cellules solaires sont donc testées par les constructeurs sous un spectre lumineux artificiel correspondant à un spectre solaire typique *AM1.5* (soit à l'irradiance totale reçue sur le sol terrestre à une altitude de 0° avec un angle de 48°) sous une température fixe de $25^\circ C$. Pour simplifier, cette convention a permis de normaliser les rendements donnés dans les notices des capteurs afin de pouvoir

les comparer. La puissance moyenne totale reçue lors des tests par les cellules assemblées en module *PV* est de $1000W/m^2$ sous $25^\circ C$.

De nombreux scientifiques travaillent sur l'augmentation des rendements de conversion des cellules photovoltaïques. Actuellement, les panneaux commerciaux ont pour la plupart d'entre eux, un rendement d'environ 14%. Ceci peut se traduire par la production de 140 Watts crêtes pour un module *PV* qui reçoit $1000W/m^2$. Les recherches sur les matériaux qui constituent les cellules sont en plein essor de même que celles sur l'optimisation de fabrication de cellules et de panneaux *PV*. Pour mieux situer nos travaux sur les systèmes de conversion juste à la sortie des cellules et des panneaux, il nous a semblé important de faire une synthèse des avancées actuelles accomplies sur la production de l'énergie *PV*. Les sections suivantes de ce chapitre exposent ainsi les avancés et les innovations majeures apportées aux matériaux photovoltaïques dans la course au rendement énergétique. Auparavant, nous rappelons brièvement les modélisations électriques que nous utilisons et les principales définitions en vigueur.

2.3 Filière silicium cristallin

Bien que ces dernières années ont apparu des matériaux semi-conducteurs avec des propriétés plus attractives, le silicium est le seul matériau qui présente un compromis acceptable entre coût, rendement et stabilité. Il reste le plus performant et cela pour des raisons liées principalement à une parfaite maîtrise de la technologie de la cellule solaire.

2.3.1 Les méthodes de purification du silicium

Le silicium est l'un des éléments les plus répandus de l'écorce terrestre, il représente presque 20%. A l'état brut, il se trouve sous forme de silicates ou de silice. Pour être utilisé, en conversion photovoltaïque, il doit être purifié. Le procédé, le plus utilisé est celui développé par *SIEMENS*. La silice est d'abord réduite dans un four à arc, à électrodes en carbone, suivant la réaction :



On obtient du silicium métallurgique pur à 98.8%. La pureté de ce dernier ne convient pas à l'industrie des semi-conducteurs. Il est donc indispensable de réduire la quantité des impuretés présentes. Sa conversion en chlorosilanes permet sa purification par distillation fractionnée. Pour une purification poussée, le trichlorosilane ($SiHCl_3$) et le tétrachlorure de silicium ($SiCl_4$) sont actuellement les seuls adoptés. Ce choix est dicté par les raisons suivantes :

- ✓ Ils peuvent être facilement manipulés à basses température par réaction du silicium métallurgique avec l'acide chlorhydrique (HCl) pour le trichlorosilane ou avec le chlore pour le tétrachlorure de silicium.

- ✓ Ce sont des liquides à faibles températures d'ébullition et se purifient en appliquant les techniques standards de distillation. Les impuretés métalliques sont volatiles et disparaissent sous forme de résidus.
- ✓ Ils sont réduits autour de la pression atmosphérique en présence de l'hydrogène. Le silicium obtenu se dépose sur une tige, en silicium, chauffée vers 1000°C . Les impuretés présentes dans le silicium métallurgique sont aussi converties en chlorures correspondants. Les chlorures métalliques ne sont pas volatils à basses températures et les chlorosilanes seront facilement séparés par distillation fractionnée. Le taux de dépôt du silicium est plus élevé avec le trichlorosilane qu'avec le tétrachlorure de silicium. Ce dernier se distingue par sa grande capacité à séparer les composés à base de bore à la température d'ébullition. La purification physique qui suit sera plus efficace.

Avec, le procédé *SIEMENS* on obtient des barreaux de silicium polycristallin très pur (de l'ordre du ppb). Il a l'avantage d'être un procédé industriel bien maîtrisé et parfaitement adapté à la production du silicium ultra pur. Fort consommateur d'énergie et de matériau, ce procédé reste relativement coûteux.

Afin d'abaisser le coût de la purification du matériau, la compagnie Union Carbide a développé une technique qui consiste à faire réagir le tétrachlorure de silicium avec le silicium métallurgique pour produire le silane qui sera transformé par pyrolyse en silicium de grade électronique ou solaire. Il peut aussi servir à la préparation du silicium amorphe hydrogéné. Ce procédé, moins coûteux, est l'un des seuls qui peut rivaliser avec le procédé *SIEMENS*.

2.3.2 Techniques d'élaboration du silicium pour la conversion photovoltaïque

– 1. *Silicium monocristallin*

Pour élaborer des cellules solaires à rendement élevé, le silicium doit être pur et à structure monocristalline (purification physique). La forme et les dimensions de la cellule, deux critères importants pour des considérations économiques, sont liées à la technique d'obtention du lingot. L'industrie du silicium a permis la mise au point de plusieurs techniques de croissance du matériau. Elles utilisent essentiellement du silicium de grade électronique.

a. Tirage Czochralski (CZ) : Ce procédé, dont le principe de cristallisation est donné par la figure 2-3, est très utilisé. A partir d'un bain de silicium fondu, on fait croître des lingots de silicium monocristallin. Les barreaux de silicium polycristallin obtenus par le procédé *SIEMENS* sont réduits en morceaux et introduits dans un creuset, en quartz, porté à la température de fusion du silicium. Un germe de silicium monocristallin, placé à l'extrémité d'une tige, est mis en contact avec la surface du bain. Le germe et le creuset sont mis en rotation en sens opposés. La tige est alors tirée lentement vers le haut. La solidification s'amorce au niveau du ménisque qui se forme au contact du germe avec la surface du bain. On obtient un lingot de silicium

de forme cylindrique et d'orientation cristallographique identique à celle du germe. Le diamètre du lingot atteint 15cm. Sa longueur et son poids sont respectivement de 1.50cm et 40kg. Cette technique est aujourd'hui très automatisée. Mais elle est consommatrice d'énergie et entraîne des opérations de mise en forme et de sciage lentes et coûteuses. Néanmoins, elle présente l'avantage d'utiliser le matériau obtenu en micro-électronique.

L'opération de dopage est effectuée par ajout, dans le bain liquide, d'une quantité contrôlée de l'impureté appropriée.

Des laboratoires de recherches ont développé des procédés permettant l'élaboration de plusieurs lingots de silicium avec le même creuset. Cette opération est rendue possible par une charge continue du creuset (tirage CZ continu). La charge continue est faite avec de la poudre (procédé varian) ou par introduction de silicium fondu (procédé Texas). Economiquement seul ce dernier a conduit à de bons résultats. Une masse de l'ordre de 1 50kg de silicium est traitée avec un seul creuset. Après la mise en forme, le lingot est découpé en lamelles d'épaisseur comprise entre 0.4 et 0.5 mm. La voie de sciage est du même ordre que l'épaisseur des plaquettes découpées. Elle engendre une perte de matière qui représente plus de la moitié du lingot.

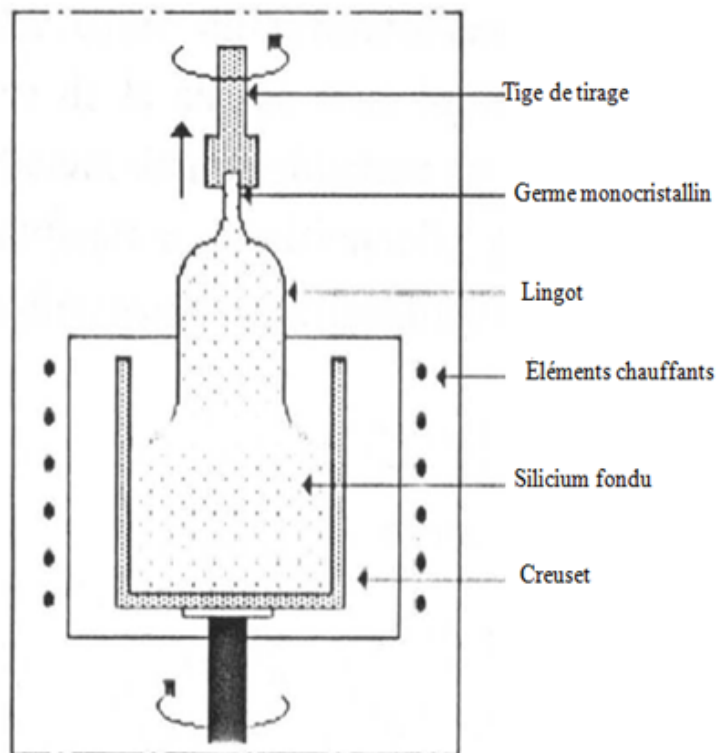


FIGURE 2.3 – Méthode de tirage CZ.

Pour la fabrication des photopiles au silicium monocristallin à usage terrestre et dont le rendement est voisin de 15%. La Plaquettes CZ restent la principale source.

Une autre méthode, connue sous le nom de la zone flottante (FZ), est aussi utilisée. Une zone étroite d'un lingot de silicium polycristallin est fondue par passage progressif à l'intérieur d'une spirale haute fréquence. Le déplacement du germe monocristallin, initialement mise en contact avec la zone fondue, permet la croissance d'un lingot de silicium monocristallin. Le lingot, disposé verticalement ou horizontalement, n'est soutenu qu'à ses deux extrémités. On obtient ainsi un lingot de très haute pureté (il n'y a pas de contamination par le creuset). Un tel matériau, généralement à usage en micro-électronique (circuits intégrés, transistors ...), n'est pas utilisé pour la fabrication des cellules solaires.

b. Procédé H.E.M (Heat Exchanger Method) : Cette technique, initialement mise au point par Schmid et Viechniki en s'inspirant de la technique de croissance du saphir, a été reprise par Crystal System (U.S.A). Dans ce procédé figure 2-4 aucune pièce mécanique n'est en mouvement. La charge de silicium est fondue dans un creuset de grande dimension et de forme carrée ou rectangulaire. L'opération se déroule sous une pression de 0.1 Torr. Un germe de silicium monocristallin, centré au fond du creuset, est refroidi par une circulation d'hélium. Au cours du refroidissement de l'ensemble, il entraîne la solidification progressive de la charge sous forme de monocristal ou de polycristal. Des lingots carrés de silicium dont la structure est proche du monocristal, ont été ainsi obtenus. La solidification directionnelle permet l'obtention d'un matériau structure colonnaire. La dimension des cristallites atteint un centimètre.

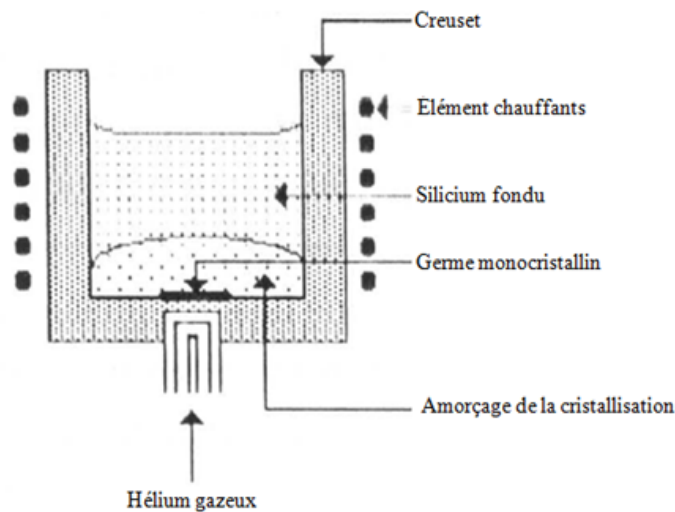


FIGURE 2.4 – Élaboration du silicium par la méthode H.E.M.

Ce procédé caractérisé par sa simplicité présente, en plus, l'avantage de maintenir le cristal de silicium à l'abri de la contamination par l'oxygène et des fluctuations de la température. Afin de réduire la densité des dislocations, un refroidissement lent est requis. Il a été montré que plus de 90% du lingot est utilisable pour la conversion photovoltaïque. Des rendements de conversion de l'ordre de 12% ont été atteints. Le coût du procédé a été estimé à une valeur de 3 à 5 fois moindre que celui du tirage CZ.

– *2.Silicium multicristallin*

A l'aide du silicium ultra pur, obtenu par le procédé *SIEMENS*, le tirage CZ ou le procédé *H.E.M* sont remplacés, pour des raisons d'économie, par une technique de croissance d'un matériau polycristallin à structure colonnaire. Ce matériau semicristallin peut être obtenu par des techniques diverses.

- a. Moulage du lingot polycristallin :** La société Solarex a développé une méthode de moulage de lingot de silicium à larges grains. Cette méthode, appelée U.C.P (Ubiquitous Cristalline Process), consiste à faire fondre des petits monocristaux et procéder à leur moulage. Elle permet l'obtention d'un matériau dont le rendement dépasse 15%.

La firme Wacker produit des lingots de silicium polycristallin à structure colonnaire de 1 à 5mm de diamètre. Les lingots découpés en plaquettes sont commercialisés sous le nom de Silso. Le procédé consiste en une solidification directionnelle d'un bain de silicium dans un moule en graphite où existe un gradient thermique entre les faces opposées. L'une des faces planes est portée à basse température (400-600°C), alors que l'autre est maintenue à 1000-1200°C. Les domaines cristallins s'orientent dans le sens du gradient thermique. Cette méthode a été appliquée jusqu'ici au matériau de grade électronique. Son inconvénient réside dans une cristallisation multidirectionnelle. En effet, le refroidissement s'opère par le fond et par les cotés en même temps.

Le procédé Wacker permet l'obtention des grains de plusieurs millimètres, alors que celui de Solarex ne permet d'atteindre que le centimètre. Avec de tels matériaux, l'influence des joints de grains est atténuée et le rendement dépasse largement 10%. Un autre procédé, développé par les laboratoires de la *C.G.E*, utilise la cristallisation unidirectionnelle du silicium fondu dans un creuset où est appliqué un gradient de température. Ce dernier se déplace de haut en bas. Le creuset est en graphite ou en carbone vitreux. Le silicium polycristallin. Actuellement utilisé, est celui obtenu par la solidification directionnelle. Les différences marquées entre un tel matériau et le silicium monocristallin sont la présence des joints de grains et des défauts tels que les dislocations et les défauts de structure. Ces derniers réduisent la durée de vie des porteurs minoritaires. Les défauts de structure et les impuretés présentes dans le matériau sont la cause du faible rendement. Pour pallier à ces défauts. Le procédé de passivation des joints de grains a permis l'amélioration de la longueur de diffusion des porteurs minoritaires. Cette passivation se fait par l'hydrogène. Elle a conduit à une augmentation du rendement de l'ordre de 2%.

- b. Silicium sous forme de ruban :** Pour remédier aux pertes engendrées par la découpe et la forte consommation d'énergie lors de la croissance du lingot. Des recherches ont été orientées vers l'obtention de rubans de silicium de dimensions variables.

b.1 Ruban de silicium auto-supporté :

b.1.1 Procédé E.F.G (Edge Defined Growth) : Ce procédé, développé par Mobil Tyco, consiste à tremper deux plaques en graphite. Séparées de quelques centaines de microns dans un bain de silicium fondu dans un creuset en quartz ou en graphite (figure 2-5). Le silicium grimpe par capillarité jusqu'à la limite supérieure des plaques et entre en contact avec un germe Monocristallin qui, en se déplaçant vers le haut, l'entraîne sous forme d'un ruban plat dont la forme est fixée par le contour. Le procédé est continu, simple et économique. Des essais ont été effectués pour tirer simultanément cinq rubans à partir du même creuset.

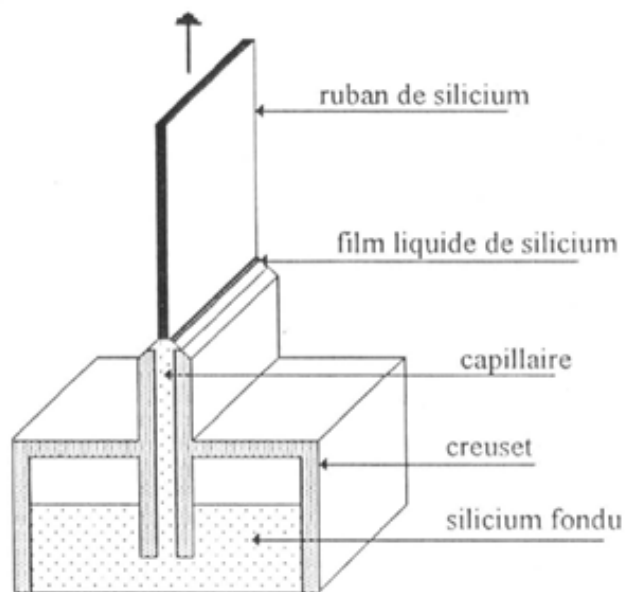


FIGURE 2.5 – Croissance d'un ruban de silicium par le procédé EFG.

Ce procédé de croissance permet l'obtention des rubans avec une bonne structure cristalline. Malgré la contamination par le carbone, provenant du creuset, les rubans sont obtenus avec une bonne reproductibilité. Les cellules solaires élaborés sur ces rubans ont des rendements voisins de 12%.

b.1.2. Croissance dendritique (WEB) : Le schéma de principe de ce procédé est donné par la figure 2-6. Il a été développé par la firme Westinghouse en 1959. Il consiste à tirer directement les rubans à partir d'un bain de silicium sans utiliser de contour. Deux dendrites parallèles en silicium, disposées verticalement et distantes entre elles de 2 à 3cm, prennent naissance quand un germe monocristallin est descendu dans un bain légèrement refroidi. Les dendrites, une fois refroidies, sont retirées lentement vers le haut. On obtient un film continu de silicium monocristallin de haute pureté. Il est exempt de carbone et des dislocations. Le remplissage

continu du creuset a été réalisé avec succès. Pour tirer des rubans à faibles coûts, une vitesse de croissance de $25\text{cm}^2/\text{mn}$ est indispensable. Les rendements obtenus sont de l'ordre de 15% sous AM1.

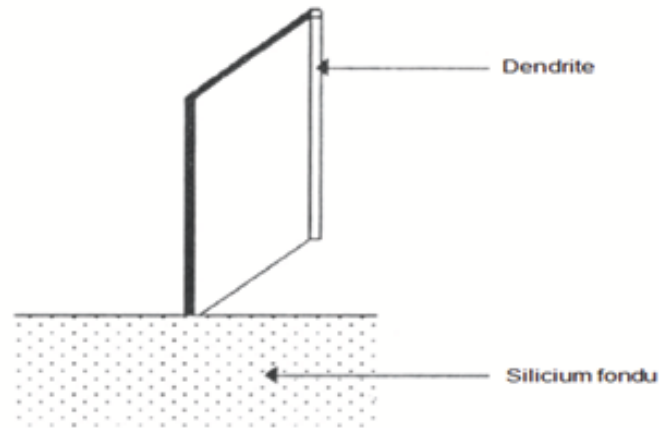


FIGURE 2.6 – Principe de la croissance dendritique.

b.2. Ruban de silicium sur supporté :

b.2.1. Ruban de silicium sur support en carbone (RAD) : Ce procédé, étudié par Photowatt, est une méthode de dépôt continue ayant pour but la réalisation des couches polycristallines sur substrats de carbone (papyex). Ce dernier se déplace de haut en bas à travers une fente dans le creuset et entraîne avec lui une fine couche de silicium semicristallin dont les démontions des joints atteignent le millimètre (figure 2-7). La qualité cristalline de la couche et de l'interface silicium-substrat doit être améliorée. La couche de silicium est séparée du substrat en brulant le carbone dans un four. Ce procédé a parmi l'élaboration de photopile dont le rendement dépasse 10%.

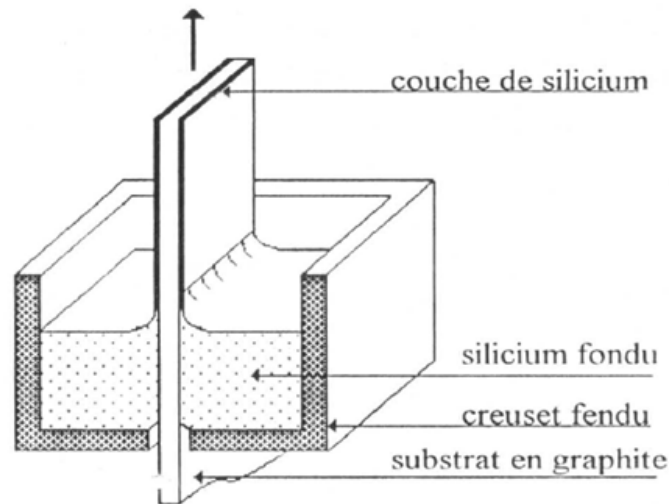


FIGURE 2.7 – Procédé de tirage des rubanes de silicium sur substrat de carbone RAD.

- b.2.2. Ruban de silicium sur support en molybdène (RTR) :** Ce procédé a été développé par Motorola. Un substrat est introduit à l'intérieur d'un réacteur en quartz contenant du trichlorosilane. Le silicium est déposé par la technique CVD. Le dépôt se fait sur le substrat sous forme d'un ruban multicristallin. Le film et le substrat, dont les coefficients de dilatation diffèrent, sont ensuite séparés par la technique TESS (Thermal Expansion Shear Separation). Le substrat, le plus utilisé, est le molybdène. Ce dernier peut être utilisé pour un nouveau dépôt. Afin d'augmenter les dimensions des grains, le ruban de silicium est recristallisé par fusion de zone à l'aide d'un faisceau laser focalisé ou d'un faisceau d'électrons. La zone flottante favorise l'arrangement de la structure cristalline en grains de dimensions suffisantes pour la conversion photovoltaïque. Les cellules solaires élaborées sur ce matériau ont atteint un rendement de conversion compris entre 12 et 13% sous AM 1.
- b.2.3. Silicium sur céramique :** Un substrat en céramique, avec une face recouverte d'un film de carbone, passe à travers un bain de silicium fondu (figure 2-8). La couche de carbone lèche le ménisque et se couvre d'un film de silicium d'épaisseur voisine de 250 microns. Les cellules solaires élaborées sur ce matériau ont atteint un rendement de l'ordre de 10.5%.

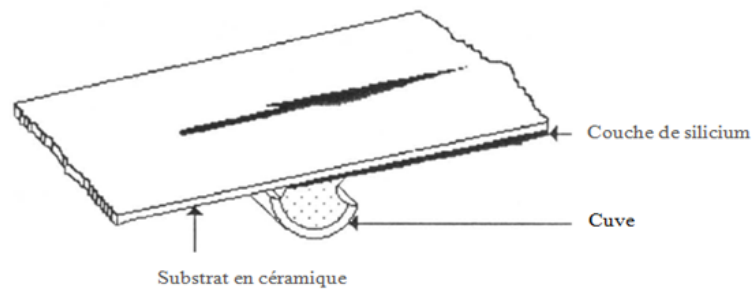


FIGURE 2.8 – Procédé de tirage de ruban de silicium sur céramique.

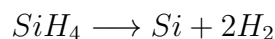
– 3.Filière Silicium Amorphe

Ce matériau se présente sous forme d'une structure inorganisée. Il est caractérisé par une forte densité d'états localisés dans la bande interdite. La forte densité d'états est causée par des liaisons non saturées appelées liaisons pendantes. Ce phénomène le rend inapte à la conversion photovoltaïque et le changement du niveau de Fermi par introduction des dopants de type n ou p n'a aucun effet sur les propriétés électriques du matériau. Pour pallier à cet inconvénient on introduit de l'hydrogène dans le plasma. Ce dernier passive les Liaisons pendantes des atomes de silicium et réduit ainsi la densité d'états localisés dans la bande interdite. Ce nouveau matériau, appelé silicium amorphe hydrogéné ($a-Si:H$), convient à la conversion photovoltaïque.

Méthodes de préparation du silicium amorphe hydrogéné : Les principales méthodes utilisées dans la préparation du silicium amorphe hydrogéné sont la décomposition du silane, le dépôt chimique en phase vapeur (CVD) et la pulvérisation cathodique réactive (sputtering).

a. Décomposition du silane (SiH_4) : C'est la technique la plus étudiée. Elle a donné les meilleurs résultats. La température du substrat est maintenue entre 200 et 300°C. Le silane dilué, avec l'hydrogène ou l'argon, est introduit dans l'enceinte. La pression du gaz est comprise entre 0.1 et 10 Torr. Le système plasma peut être réalisé par décharge DC ou RF. La cathode sert de porte substrat. Pour le dopage, on introduit en même temps que le silane une quantité appropriée de phosphine (type n) ou de diborane (type p). Les concentrations de certaines impuretés doivent être maintenues à très faibles niveaux, car ils peuvent affecter les propriétés du matériau (effet Staebler-Wronski).

b. Dépôt chimique en phase vapeur : Le silane se décompose entre 600 et 700°C selon la réaction suivante :



Le dépôt s'effectue à faible pression sur substrat en molybdène ou en silicium cristallin de type p. On obtient des films de silicium amorphe de bonne qualité électrique qui subissent une post-hydrogénation dans un plasma d'hydrogène. L'exploitation de cette méthode est encouragée sous deux aspects, l'un technique et l'autre

économique. Le premier permet d'ajuster la quantité d'hydrogène pour optimiser l'absorption optique ainsi que la qualité des couches n+ et p+. Le second repose sur sa simplicité et la faible pression de dépôt des films sur plusieurs substrats simultanément. En outre, il présente l'avantage d'éliminer le bombardement par les ions du plasma et l'incorporation d'impuretés. Ce procédé est couramment utilisé dans l'industrie.

- c. Pulvérisation cathodique réactive :** La pulvérisation cathodique réactive d'une cible de silicium dans une atmosphère d'argon et d'hydrogène permet le dépôt de couches minces de silicium amorphe hydrogéné. En plus de sa capacité d'une production à grande échelle, il est possible de contrôler le pourcentage d'hydrogène par ajustement de la pression partielle de ce dernier. Ce procédé est adapté à la réalisation des panneaux de grande surface avec une bonne reproductibilité.

Propriétés et stabilité du silicium amorphe hydrogéné : Les cellules solaires au silicium amorphe sont devenues très attractives pour la conversion photovoltaïque. Leur élaboration consomme moins d'énergie que celles au silicium cristallin. En effet, la température de croissance est comprise entre 200 et 400°C. De plus, le silicium amorphe possède un coefficient d'absorption beaucoup plus élevé que celui du silicium monocristallin et il est mieux adapté au spectre solaire. Ainsi, une cellule solaire de rendement de conversion de l'ordre de 10% peut être réalisée avec une couche d'épaisseur voisine du micron. Des calculs ont montré que l'épaisseur optimale de la couche active de la cellule est comprise entre 0.5 et 0.7 µm. Cette épaisseur est la plus petite de tous les matériaux. Comparée à celle du silicium monocristallin le rapport est de 1/500. Le silicium amorphe permet, donc, une économie d'énergie et de matériau. Aussi, n'ayant pas d'orientation cristallographique privilégiée, il peut être déposé sur substrats bon marché comme le verre ou l'acier inoxydable. Les structures, couramment utilisées, sont la barrière de Schottky, la jonction p-i-n et l'hétérojonction.

- a. Structure à barrière de Schottky :** C'est la plus simple des structures et la plus facile à réaliser (figure 2-9(a)). Cependant elle présente des problèmes de stabilité surtout en présence d'humidité.
- b. Jonction p-i-n :** Ce type de structures dont le schéma est donné par la (figure 2-9(b)) donnent les meilleurs rendements.
- c. Structure à hétérojonction :** Les cellules au silicium amorphe réalisées avec une structure à hétérojonction (figure 2-9(c)) donnent un fort courant de court-circuit. Elles possèdent une couche Si-C transparente qui limite les pertes. La tension en circuit ouvert est plus élevée que celles des cellules conventionnelles à structures p-i-n. Ces deux demi-celles structures sont beaucoup plus stables et sont pratiquement les plus utilisés. Toutefois, à cause de l'effet Staebler-Wronski, le rendement des modules au silicium amorphe exposés à un éclairement de 100mW/cm² se dégrade rapidement. Cet effet est réversible par exposition prolongée à fortes températures. Des essais, sur sites, ont montré que les modules au silicium amorphe retrouvent une partie de leurs rendements pendant les mois de fort ensoleillement.

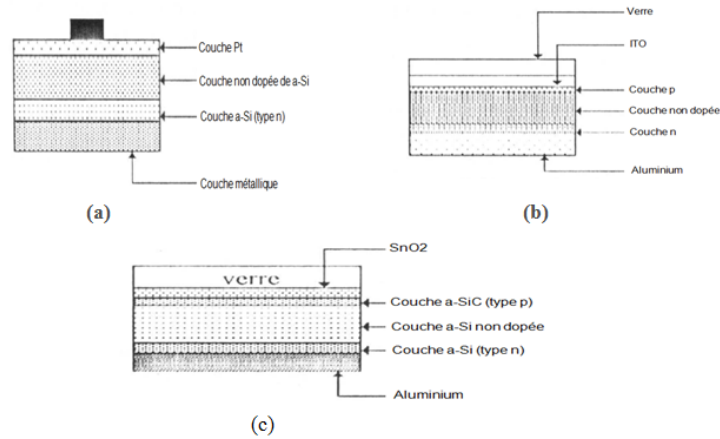
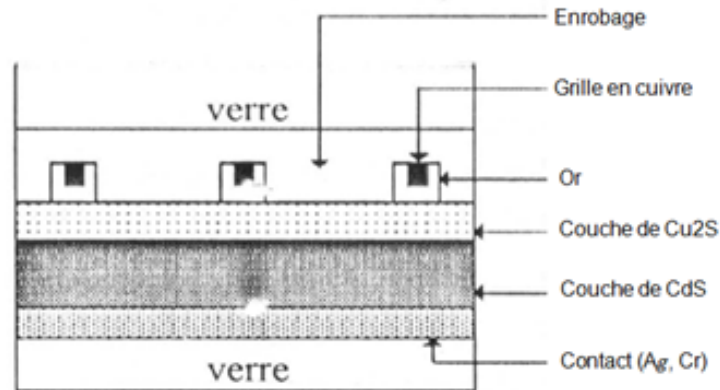


FIGURE 2.9 – Les trois différentes structures utilisées dans l’élaboration des cellules .

– 4. Filière Sulfure De Cadmium

Depuis la découverte de l’effet photovoltaïque dans le sulfure de cadmium monocristallin, la cellule CdS/Cu_2S a été l’objet, durant ces trente dernières années, de plusieurs programmes de recherche. A présent, un intérêt particulier est porté sur ce matériau en couches minces pour la fabrication des cellules solaires à faible coût. Les avantages de ces photopiles sont leur élaboration relativement simple, la possibilité d’utilisation d’une grande surface, le faible prix de revient, la bonne résistance aux radiations et leur faible poids. Ces derniers en ont fait un candidat sérieux pour les applications photovoltaïques aussi bien spatiales que terrestres. Le meilleur rendement, obtenu aux laboratoires de l’université de Delaware, est de 9.1%.

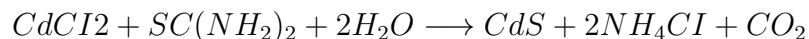
La cellule solaire CdS/Cu_2S est obtenue par la formation d’une couche polycristalline de Cu_2S au détriment de la couche de CdS (figure 2.10). Ces deux couches ont pour épaisseurs respectives $0.1 - 0.3\mu m$ et $20 - 30\mu m$. Le désaccord entre les paramètres cristallins cause des états d’interface importants. La lumière est essentiellement absorbée par la couche de Cu_2S .

FIGURE 2.10 – Structure d'une cellule solaire au CdS/Cu_2S .

A. Méthodes de préparation du composé CdS/Cu_2S Les couches minces de CdS peuvent être obtenues par plusieurs techniques dont les plus prometteuses sont l'évaporation thermique et la pulvérisation chimique (spray).

a. Techniques de Dépôt par évaporation thermique sous vide : Cette technique de dépôt sous vide par effet Joule ou par canon à électrons de la poudre de sulfure de cadmium a été la plus utilisée. Le molybdène, le verre et le krypton argenté ont été utilisés comme substrats. La température de dépôt se situe autour de 200°C . Les couches obtenues sont caractérisées par une bonne qualité cristalline et des propriétés semi-conductrices bien adaptées à la conversion photovoltaïque. Ce procédé, en dépit de sa simplicité, se caractérise par une forte perte du matériau lors de son dépôt. En effet, moins de 20% de la charge du creuset atteint le substrat. Une bonne reproductibilité est obtenue par un contrôle rigoureux de la température de la source d'évaporation et du substrat.

b. Pulvérisation chimique (spray) : Une solution contenant généralement de la thiourée ($SC(NH_2)_2$) est pulvérisée sur un substrat porté à une température supérieure à 300°C . Le CdS se dépose sur le substrat suivant la réaction :

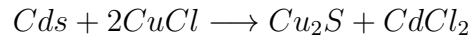


Les couches obtenues sont souvent plus compactes et plus stoechiométriques que les couches obtenues par évaporation. Néanmoins, la taille très faible des grains ($\cong 0.1\mu\text{m}$) rend ces couches très sensibles à la contamination. Ce procédé simple se prête bien à une fabrication en série et évite les pertes prohibitives de matériau. Il permet de conserver les avantages du trempage dans la solution de chlorure de cuivre. Les couches spray contiennent moins d'excès de cadmium et de lacunes de soufre.

B. Formation de la couche de sulfure de cuivre (Cu_2S) Pour la préparation de cette couche, deux méthodes sont en compétition la méthode humide et la méthode sèche.

a. Méthode humide : Les couches Cu_2S sont préparées par trempage des films CdS dans une solution de $CuCl$ portée à une température de 90°C . La formation

de la couche de Cu_2S sur la couche de CdS est basée sur la réaction d'échange d'ions entre la solution de chlorure cuivreux et le CdS suivant la réaction :



L'excès de $CdCl_2$ se dissout dans la solution. On obtient souvent du Cu_xS dont on améliore la stoechiométrie par le dépôt d'une fine couche de cuivre. Cette dernière compense la perte ultérieure par diffusion de cet élément dans le CdS.

b. Méthode sèche : On dépose par évaporation sous vide une fine couche de CuCl sur celle de CdS. La réaction d'échange d'ions est provoquée par des recuits thermiques. La couche formée de chlorure de cadmium $CdCl_2$ est éliminée par dissolution dans l'eau.

C. Formation de l'hétérojonction Cu_2S/CdS et problèmes de stabilité Les travaux de développement entrepris, en vue de l'industrialisation des photopiles Cu_2S/CdS , s'effectuent à partir du sulfure de cadmium évaporé ou pulvérisé chimiquement. La couche de sulfure cuivreux est formée par voie humide. La méthode sèche, quant à elle, permet de définir la jonction mais reste toutefois moins utilisée car le $CuCl$ doit être très pur et les couches obtenues ont des épaisseurs limitées. Sur le plan industriel, seul le procédé développé par la Clevite Corporation a donné de bons résultats. Il utilise le dépôt sous vide de la couche de CdS. La couche de Cu_xS est formée au détriment de cette dernière par voie humide. La supériorité de ce procédé est due à sa capacité de donner des couches de CdS de bonne qualité cristalline et bien adaptées à la conversion photovoltaïque. La croissance de la couche Cu_xS par trempage permet l'obtention d'une profondeur de jonction bien optimisée.

La filière CdS/Cu_2S en couches minces a longtemps attiré l'attention comme filière alternative au silicium monocristallin car les techniques de fabrication sont relativement plus simples et moins coûteuses. Mais, le problème de stabilité n'est pas encore maîtrisé. Une dégradation des propriétés de l'hétérojonction a été observée après une exposition prolongée au rayonnement solaire. L'encapsulation sous verre scellée hermétiquement a été préconisée pour limiter la dégradation par décomposition chimique. Cette décomposition est accompagnée par une formation de nodules qui détruisent la stoechiométrie de la couche de Cu_xS . Les rendements des cellules CdS/Cu_2S sont limités par les valeurs relativement faibles de la tension. Ceci est principalement dû au désaccord entre les paramètres cristallins et l'affinité électronique des deux matériaux.

L'utilisation du film de $Cd_{1-x}Zn_xS$ à la place de la couche de CdS permet d'obtenir une valeur plus élevée de la tension en circuit ouvert (0.7V environ). Les divers tests effectués ont montré que le verre est le seul matériau pouvant convenir à l'encapsulation et notamment tous les matériaux plastiques sont à rejeter. Une technologie prometteuse a été développée par Bloss et Hewig. Dans ce procédé, le verre est utilisé comme substrat où l'on dépose par évaporation une couche d'argent d'épaisseur de l'ordre du micron. La grille en cuivre couverte avec une fine couche d'or est collée sur la face avant (figure 2-10). La structure est ensuite pressée et traitée thermiquement. Le Cu_2S combiné au $(CdZn)S$ est l'un des quelques matériaux en couches minces dont le rendement excède les 10%, mais reste moins utilisé dans la

fabrication des photopiles à cause de son instabilité. En effet. Les défauts responsables de la dégradation apparaissent quand des particules étrangères contaminent le substrat et introduisent des défauts physiques dans le film de *CdS* évaporé. La plupart des cellules testées n'ont montrée qu'une faible dégradation attribuée à l'influence de la partie ultra-violette du spectre solaire. Une encapsulation étanche en verre augmentera la durée de vie de ces photopiles.

2.4 Conclusion

Le monde de la conversion photovoltaïque, aussi bien au niveau de la recherche qu'au niveau industriel, connaît depuis quelques années une mutation profonde associé à l'intérêt croissant pour l'énergie photovoltaïque. Nous avons montré dans ce chapitre, le principe de la conversion photovoltaïque ainsi que les différentes techniques utilisées pour atteindre cet objectif. Ont été abordés certains des aspects technologiques de l'électricité à une meilleure compréhension de l'ensemble du mécanisme de la conversion photovoltaïque. Pour rechercher un impact significatif dans l'amélioration des possibilités d'innovation et la mise en uvre et de recherche pour le développement industriel lumière nouvelle et social.

3

LE SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE

Sommaire

3.1	Introduction	30
3.2	La Cellule Photovoltaïque	31
3.2.1	Schéma Équivalent d'une Cellule Photovoltaïque idéale	31
3.2.2	Modèle réel d'une cellule photovoltaïque :	32
3.3	Le module photovoltaïque (n_{cs} cellules en série)	34
3.4	Cas d'un Générateur Photovoltaïque	36
3.5	Ajustement du Modèle	37
3.6	Validation du modèle en condition standard	40
3.7	Conclusion	41

3.1 Introduction

Les modules photovoltaïques présentent des caractéristiques $I - V$ non linéaires avec plusieurs paramètres qui doivent être ajustés par des données expérimentales. Souvent, Les fabricants des modules photovoltaïques fournissent seulement quelques données expérimentales concernant leurs caractéristiques électriques. Malheureusement certains paramètres requis pour ajuster les modèles du module photovoltaïque ne sont pas contenues dans la fiche technique du module, comme le photocourant I_{ph} , les résistances parasites (R_s, R_{sh}), le facteur d'idéalité A et le courant de saturation inverse de diode I_0 [11].

Dans ce chapitre, on présente une méthode numérique facile et précise sans avoir besoin d'effectuer des testes expérimentaux sur le module photovoltaïque. Cette méthode permet d'obtenir les paramètres du module photovoltaïque, en utilisant les informations contenues dans la fiche technique. Le modèle est validé par des données expérimentales.

3.2 La Cellule Photovoltaïque

3.2.1 Schéma Équivalent d'une Cellule Photovoltaïque idéale

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électrique équivalent ci-dessous. Nous pouvons considérer le cas d'une cellule idéale comprenant une source du courant et une diode en parallèle.

La source du courant I_{ph} représente le courant photogénéré et la branche de diode, un courant de diode I_D [1].

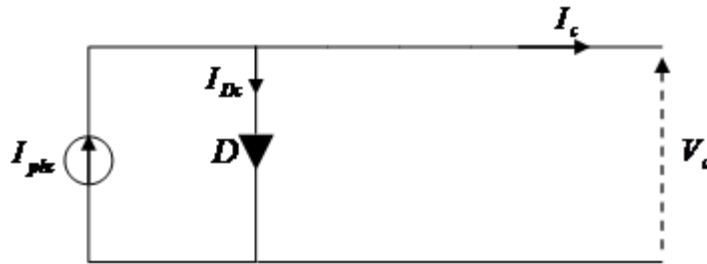


FIGURE 3.1 – Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque idéale.

Le courant délivré par la cellule photovoltaïque éclairée sur une charge R s'écrit :

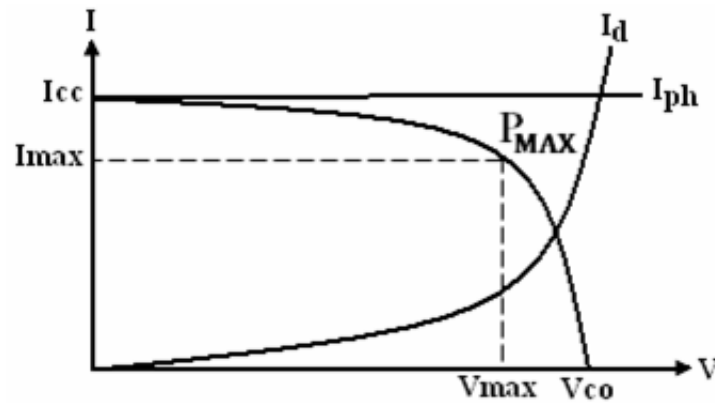
$$I_c = I_{phc} - I_{dc} \quad (3.1)$$

I_{ph} : photo- courant. I_d : Courant traversant la diode.

$$I_{dc} = I_s \left[e^{\left(\frac{V}{V_T}\right)} - 1 \right] \quad (3.2)$$

$$I_T = \frac{TK}{q} \quad (3.3)$$

Si on trace le courant (I) en fonction de la tension (V) on a une soustraction de deux courbes [1] :

FIGURE 3.2 – La caractéristique $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque.

I_{phc} : Le photo-courant.

I_{dc} : La caractéristique de la diode $I(V)$. La figure (3-2), représente les différentes courbes :

3.2.2 Modèle réel d'une cellule photovoltaïque :

Dans le cas d'une cellule photovoltaïque réelle, d'autres paramètres tenant compte des effets résistifs, des recombinaisons, des fuites vers les bords, doivent être pris en considération.

Le modèle mathématique du générateur photovoltaïque est basé sur le circuit équivalent. Cette circuit est représenté sur la figure (3-3) par un générateur de courant I_{cc} , une diode et deux résistances R_s et R_{sh} [11].

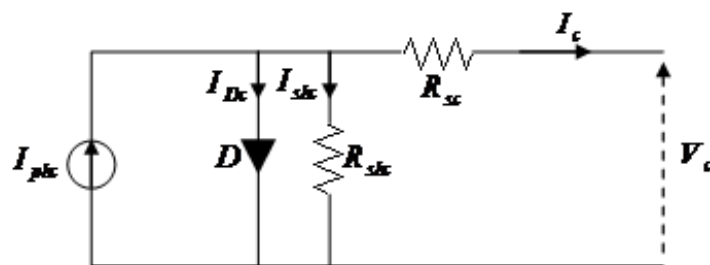


FIGURE 3.3 – Schéma électrique réel d'une cellule photovoltaïque.

Le courant I_{phc} dépend de l'éclairement, une partie de ce courant traverse la diode à cause de la recombinaison des porteurs de charge.

La résistance R_{shc} existe principalement en raison du courant de fuite de la jonction pn et dépend de la méthode de fabrication de cellule photovoltaïque. La résistance R_{sc} La résistance série, due principalement à la difficulté rencontrée par les porteurs collectés avant

d'atteindre les contacts externes. Les différentes sources de la résistance série incluent principalement la résistance du matériau, celle des contacts métalliques, particulièrement, la grille métallique, celle de l'émetteur et la circulation transversale dans la cellule, existe principalement en raison de la chute de tension de la jonction pn . R_{shc} (résistance shunt ou parallèle. C'est une conséquence de l'état de surface le long de périphérique de la cellule solaire). En général, les auteurs négligent l'effet de la résistance parallèle à cause de sa valeur élevée. La valeur de R_{scest} très basse et parfois ce paramètre est trop négligé.

$$I_c = I_{phc} - I_{Dc} - I_{shc} \quad (3.4)$$

$$I_{phc} \approx I_{cc} = f(E, T_c) \quad (3.5)$$

$$I_{Dc} = I_s \left[\exp\left(\frac{e_0 V_d}{AKT_c}\right) - 1 \right] = I_s \left[\exp\left(\frac{e_0 (V_c + R_{sc} I_c)}{AKT_c}\right) - 1 \right] \quad (3.6)$$

$$I_{shc} = \frac{V_D}{R_{shc}} = \frac{V_c + R_{sc} I_c}{R_{shc}} \quad (3.7)$$

Où :

I_c : Courant de sortie de la cellule solaire [A] ;

I_{phc} : Courant produit par la photopile [A] ;

I_{Dc} : Courant de diode [A] ;

I_{shc} : Courant de fuite du a la résistance parallèle [A] ;

E : Éclairement globale sur le plan de la cellule [W/m^2] ;

I_s : Courant de saturation dans la diode [A] ;

V_c : Tension de sortie de la cellule solaire [Volt] ;

T_c : Température de la cellule [Kelvin] ;

R_{sc} : Résistance série d'une cellule [Ω] ;

R_{shc} : Résistance shunt d'une cellule [Ω] ;

A : Facteur d'idéalité de la jonction ;

K : Constante de Boltzmann $1,38.10^{-23} J/K$;

e_o : Charge de l'électron $1,6.10^{-19} C$.

A partir des résultats expérimentaux de la température ambiante, la température de la cellule peut être estimée comme suit :

$$T_c = T_a + E \left(\frac{NOCT - 20}{800} \right) \quad (3.8)$$

Avec :

T_a : Température ambiante [Kelvin] ;

$NOCT$ [Kelvin] : Température d'utilisation de cellule ; est la température qu'atteint une cellule encapsulée dans un module soumis à un éclaircment de $800W/m^2$.

3.3 Le module photovoltaïque (n_{cs} cellules en série)

Une cellule solaire typique au silicium produit une tension de puissance maximale d'environ 475 millivolts aux conditions standards. Cette faible tension ne permet pas, en pratique, d'utiliser les cellules de façon individuelle. En général, les cellules solaires sont connectées en série et/ou parallèle pour produire une tension utile pour les applications pratiques. Cette combinaison de cellules solaires forme ce qu'on appelle le module photovoltaïque[4].

La production mondiale des modules PV connaît un grand essor ces dernières années. À titre d'illustration, la puissance globale installée dans le monde a augmenté de moins d'un GW en 2003 à plus de 7,2 GW en 2009.

La plupart des modules photovoltaïques commercialisés contiennent 36 cellules connectées en série pour s'adapter à une tension de batterie de 12 V. On peut trouver aussi des modules contenant plus de 36 (72 et plus).

Une coupe transversale d'un module photovoltaïque est représentée par la figure 3-4 [4].

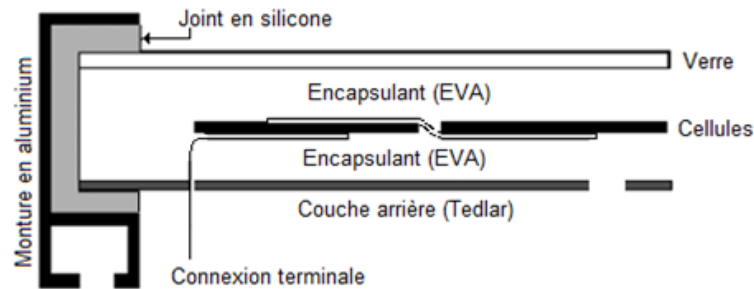


FIGURE 3.4 – Coupe transversale d'un module photovoltaïque.

La caractéristique courant-tension d'un groupement quelconque de cellules sera homothétique à la courbe $I - V$ d'une cellule de base. La même constatation est valable pour tout le réseau de caractéristiques. Par conséquent, tout ce qui a été dit pour une seule cellule demeure valable pour un groupement de cellules.

En laboratoire, les modules subissent des tests en utilisant des simulateurs à flash dont la durée de quelques m_s permet d'obtenir un éclairement de $1000W/m^2$ sans pour autant réchauffer le module. Les tests sont donc effectués suivant les conditions de test standard (STC : Standard Tests Conditions).

$$E = 1000W/m^2, T_{ref} = 25^\circ C \quad (3.9)$$

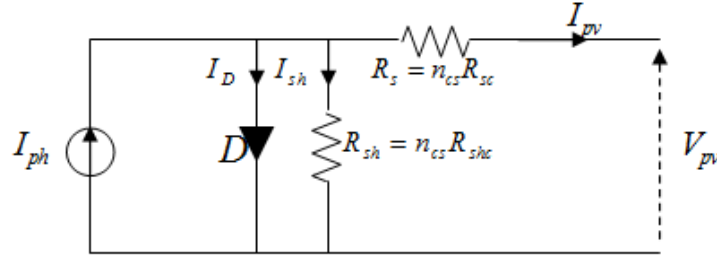


FIGURE 3.5 – Schéma équivalent d'un module photovoltaïque.

La figure 3-5 représente le modèle d'un module photovoltaïque. Les résistances R_s et R_{sh} sont la somme de plusieurs résistances structurales de la cellule. Nous avons :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (3.10)$$

$$I_{ph} = \frac{E}{E_{ref}} (I_{phref} + \alpha \Delta T) = p_1 E (1 + p_2 \Delta T) \quad (3.11)$$

ou :

$$p_1 = \frac{I_{phref}}{E_{ref}} = \frac{(R_s + R_{sh}) I_{ccref}}{R_{sh} E_{ref}}, p_2 = \frac{\alpha}{I_{phref}} = \frac{\alpha R_{sh}}{(R_s + R_{sh}) I_{ccref}}, et \Delta T = T_c - T_{cref}$$

$$I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{e_0 (V_{pv} + R_s I_{pv})}{A n_{cs} K T_c}\right) - 1 \right] \quad (3.12)$$

$$I_{sh} = \frac{\frac{V_{pv}}{n_{cs}} + R_{sc} I_{pv}}{R_{shc}} = \frac{V_{pv} + n_{cs} R_{sc} I_{pv}}{n_{cs} R_{shc}} = \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \quad (3.13)$$

E_{ref} : Éclairement de référence [$1000 W/m^2$];

T_{cref} : Température de référence [$298 Kelvin$];

I_{ccref} : Courant de court-circuit de référence [A];

R_s : Résistance série du module [Ω];

R_m : Résistance shunt du module [Ω];

n_{cs} : Nombre de cellule en série dans le module;

I_{ph} : Photo courant déterminé par l'expérimentale [A];

α : Coefficient de courant en température [$A/^\circ C$].

I_0 Le courant de saturation inverse de diode, proportionnel fortement, à la température donné par :

$$I_0 = \frac{I_{ccref} + \alpha \Delta T}{\exp\left(\frac{e_0 (V_{coref} + \beta \Delta T)}{A n_{cs} K T_c}\right) - 1}, \text{ ou } I_0 = I_{0ref} \left(\frac{T_c}{T_{cref}}\right)^3 \exp\left[\left(\frac{E_g}{AK} \left(\frac{1}{T_{cref}} - \frac{1}{T_c}\right)\right)\right] = p_3 T_c^3 \exp\left(-\frac{E_g}{AK T_c}\right) \quad (3.14)$$

$$I_{0ref} = \frac{I_{ccref}}{\exp\left(\frac{e_0 V_{coref}}{A n_{cs} K T_{cref}}\right) - 1}, \text{ donc } p_3 = \frac{I_{ccref} \exp\left(\frac{E_g}{AK T_{cref}}\right)}{\left(\exp\left(\frac{e_0 V_{coref}}{A n_{cs} K T_{cref}}\right) - 1\right) T_{cref}^3} \quad (3.15)$$

β : Coefficient de tension en température [$V/^{\circ}C$];

V_{coref} : Tension de référence à vide [V];

I_{0ref} : Courant de référence de saturation inverse de diode [A];

E_g : Énergie du gap du matériau (pour le silicium cristalline $E_g = 1,12eV$).

3.4 Cas d'un Générateur Photovoltaïque

Typiquement, une cellule photovoltaïque produit moins de *2watts* sous approximativement *0,5Volt*. Une association série de plusieurs cellules donne un module et une association série et/ou parallèle de plusieurs modules permet de réaliser un champ photovoltaïque. Le passage d'un module à un champ se fait par l'ajout de diodes de protection, une en série pour éviter les courants inverses et une en parallèle, dite diode by-pass, qui n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de production associée.

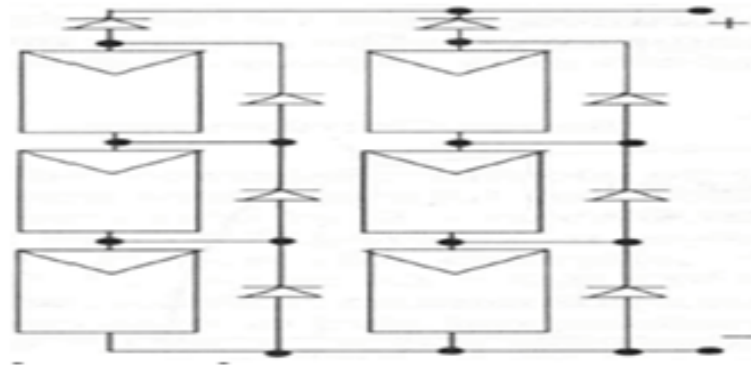


FIGURE 3.6 – Champ (générateur) photovoltaïque.

L'association de N_s Modules en séries et de N_p Modules en parallèles, nous donne la caractéristique de la figure 3-7.

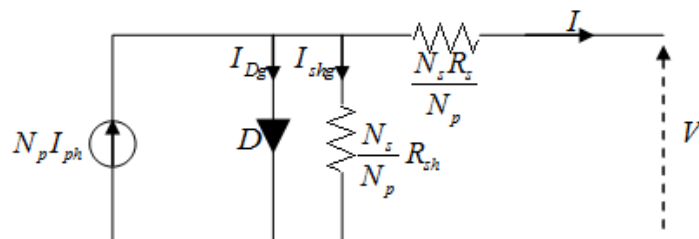


FIGURE 3.7 – Schéma équivalent d'un générateur photovoltaïque.

Les équations du module deviennent :

$$I = N_p I_{ph} - I_{Dg} - I_{shg} \quad (3.16)$$

$$I_{Dg} = N_p p_3 T_c^3 \exp\left(\frac{-E_g}{AKT_c}\right) \left[\exp\left(\frac{e_0(V + (\frac{N_s R_s}{N_p})I)}{An_{cs} N_s K T_c}\right) - 1 \right] \quad (3.17)$$

$$I_{shg} = \frac{\frac{V}{N_s} + N_s R_s (\frac{I}{N_p})}{R_{sh}} = N_p \frac{V + (\frac{N_s R_s}{N_p})I}{n_s R_{sh}} \quad (3.18)$$

N_s : Nombre de panneaux connectés en série ; N_p : Nombre de branche.

3.5 Ajustement du Modèle

La caractéristique $I - V$ du module photovoltaïque dépend fortement des caractéristiques internes comme les paramètres (R_s, R_{sh}) et sur l'influence des paramètres externes tels que le niveau d'éclairement (E) et la température ambiante. Le courant I_{ph} des cellules élémentaires, sans influence les résistances série et shunt, est difficile à déterminer. Par conséquent, Les fiches techniques fournissent uniquement le courant I_{cc} , qui est le courant maximum disponible sur les bornes du module. En général, parce que la résistance série est trop faible et la résistance parallèle est trop élevée, on peut supposée que $I_{ph} = I_{cc}$.

La valeur du facteur d'idéalité A peut être arbitrairement choisie. Beaucoup d'auteurs discutent des méthodes pour estimer la valeur exacte de cette constante basée sur l'analyse empirique[9]. Habituellement $1 \leq A \leq 1.5$ et le choix de sa valeur dépend d'autres paramètres du modèle $I - V$. Dans, [9] on cite différentes méthodes pour l'estimation de A . Puisque A exprime le degré d'idéalité de la diode et est totalement empirique, on peut choisir n'importe quelle valeur initiale, cette constante affecte la courbure de la caractéristique $I - V$. En effet, la variation de A peut améliorer l'exactitude du modèle. Sa valeur peut être déterminée par itération afin d'aboutir à un meilleur lissage graphique de la caractéristique $I - V$.

Les deux paramètres qui demeurent inconnus sont R_s et R_{sh} . Quelques auteurs proposent de faire des incréments de R_s (processus itératif) et cela dans le but d'atteindre une meilleur concordance entre les données expérimentales et calculées. Par la suite, on procède de la même manière pour l'estimation R_{sh} . Cette méthode est convenable mais manque de précision, parce que principalement R_s et R_{sh} ne sont pas ajustés séparément si un bon modèle $I - V$ est souhaité.

Cette partie propose une méthode pour ajuster R_s et R_{sh} basé sur le fait qu'il y a une seule paire (R_s, R_{sh}) qui garantie la condition $P_{max} = P_{crite-expri} = V_{op} I_{op}$. La relation entre R_s et R_{sh} est seul inconnue dans l'eq. (3-10), peut être trouvée pour un module photovoltaïque en faisant $P_{max} = P_{crite-expri}$ puis en résultant R_{sh} pour R_s en résolvant des équations (3-19) et (3-20).

$$P_{crte-expri} = V_{op}I_{op} = V_{op}(I_{phref} - p_3T_{cref}^3 \exp(-\frac{E_g}{AKT_{cref}})) [\exp(\frac{e_0(V_{op} + R_s I_{op})}{An_{cs}KT_{cref}}) - 1] - \frac{V_{op} + R_s I_{op}}{R_{sh}} \quad (3.19)$$

$$R_{sh} = V_{op} \frac{V_{op}R_s I_{op}}{V_{op}(I_{phref} - p_3T_{cref}^3 \exp(-\frac{E_g}{AKT_{cref}})) [\exp(\frac{e_0(V_{op} + R_s I_{op})}{An_{cs}KT_{cref}}) - 1] - P_{crte-expri}} \quad (3.20)$$

$P_{crte-expri}$: Puissance de référence crête ;

I_{op} : Courant optimal de référence ;

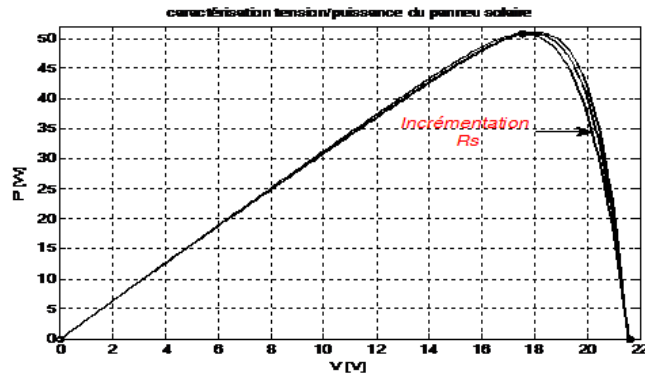
V_{op} : Tension optimale de référence.

L'éq. (3-20) signifie que pour n'importe quelle valeur de R_s il y aura une valeur du R_{sh} qui permet une meilleur concordance entre la crête des puissances calculés et celle fournie par le constructeur.

Le but est de trouver la valeur de R_s (et par conséquent R_{sh}) qui fait la crête de la courbe mathématique $V - P$ coïncider avec la puissance de crête expérimentale. Pour cela, on doit passer par plusieurs itérations.

Dans le processus itératif, R_s doit être faiblement incrémenté à partir de $R_s = 0$. L'ajustement de la courbe de $V - P$ sur les données expérimentales exige de trouver la courbe pour plusieurs valeurs de R_s et R_{sh} . En effet, il n'est pas nécessaire de représenter la courbe $V - P$, mais seulement la valeur de la puissance crête est utilisée. La Fig.3-8 illustre l'influence de l'augmentation de R_s sur le déplacement de la courbe $V - P$ vers la gauche et la crête de puissance vers le MPP(point de maximum puissance)expérimental.

Pour Tracer les courbes $I - V$ et $V - P$, on doit résoudre l'équation (3-10) pour $I \in [0, I_{cc}]$ et $V \in [0, V_{oc}]$. Cette équation n'a pas une solution directe parce que l'équation $I = f(V, I)$ est à la fois implicite et non linéaire. Donc, on doit résoudre par une méthode numérique (Newton) et ceci n'impose aucune difficulté. Les points (I, V) sont facilement obtenus en résolvant numériquement $g(V, I) = I - f(V, I) = 0$ pour un ensemble de valeurs de V et obtenir, ainsi, les valeurs correspondants du courant I .

FIGURE 3.8 – Les courbes $P - V$ pour différentes valeurs de R_s et R_{sh} .

Le modèle peut être encore amélioré en tirant profit de la solution itérative de R_s et R_{sh} . Chaque itération permet de s'approcher de la meilleure solution du modèle, l'équation (3-21) permet de calculer le courant I_{ph} .

$$I_{ph} = \frac{R_s + R_{sh}}{R_{sh}} I_{cc} \quad (3.21)$$

L'éq. (3-21) emploie les résistances R_s et R_{sh} pour déterminer que $I_{cc} \neq I_{ph}$. Au début, les valeurs de R_s et R_{sh} sont inconnues mais pendant que la solution de l'algorithme est raffinée le long des itérations successives les valeurs de R_s et R_{sh} convergent vers la meilleure solution et l'équation. (3-21) devient valide et détermine effectivement le courant I_{ph} compte rentrant l'influence des résistances série et parallèles du module. Les suppositions initiales pour R_s et R_{sh} ont nécessaires avant que le processus itératif commence. La valeur initiale de R_s peut être nulle. La valeur initiale du R_{sh} est donné par :

$$R_{sh-initial} = \frac{V_{op}}{I_{cc} - I_{op}} - \frac{V_{oc} - V_{op}}{I_{op}} \quad (3.22)$$

L'éq. (3-22) détermine la valeur minimale de R_{sh} , qui est la pente de la droite coupe les points remarquables court-circuit et puissance maximal. Bien que le $R_{sh-initial}$ est plus grand que le R_{sh} et c'est un bon choix.

L'organigramme simplifié de l'algorithme de modélisation itératif est donné par la Fig. (3-8)

La méthode itérative pour $A = 1.3$ donne la solution :
 $R_s = 0.25\Omega$ et $R_{sh} = 198.1\Omega$ pour le module.

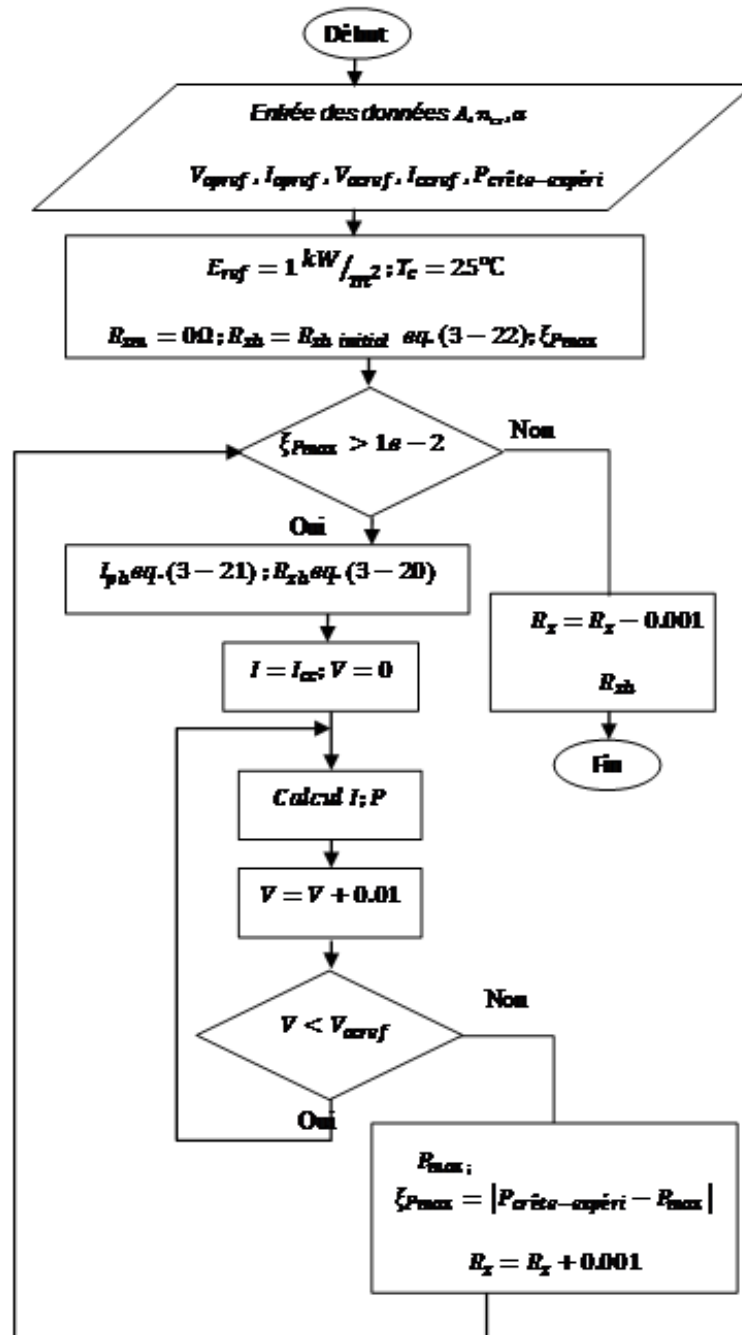
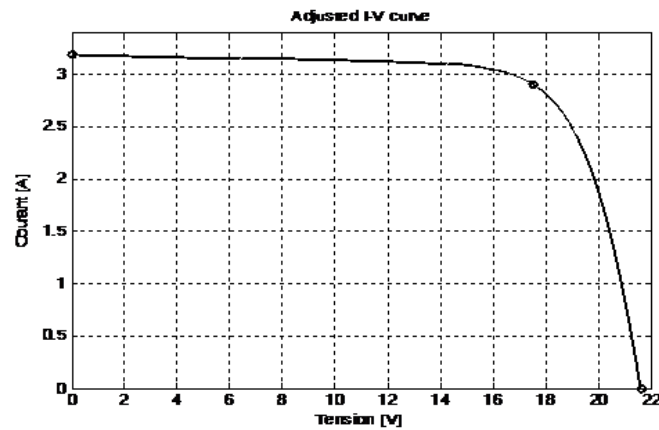
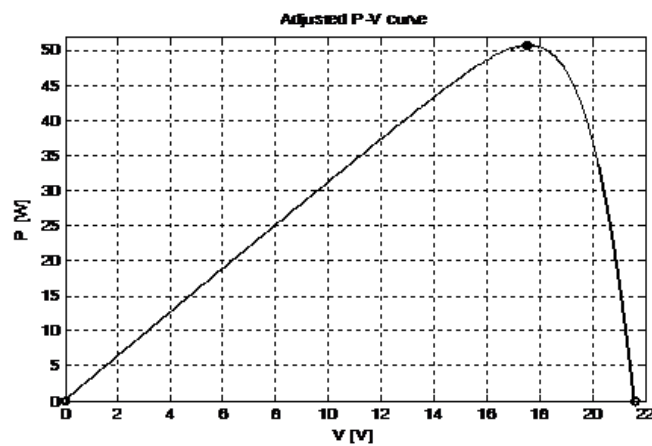


FIGURE 3.9 – Algorithme de la méthode employée pour ajuster le modèle $I - V$.

3.6 Validation du modèle en condition standard

Afin d'améliorer et d'étudier ce modèle, nous avons tracé la courbe courant/tension dans les conditions de test standards ($E = 1000w/m^2$, $T = 25^\circ$) ainsi que pour tester l'efficacité de ce modèle.

FIGURE 3.10 – Caractérisation $I - V$ de modèle.FIGURE 3.11 – Caractérisation $P - V$ de modèle.

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé un modèle mathématique pour étudier la performance des modules photovoltaïques, ce qui rend la conception optimale du système optique de l'autre.

Cette méthode a été utilisée pour déterminer les paramètres internes de module PV d'étudier les performances électriques du système optique.

On a aussi effectué une validation un modèles qui régissent le fonctionnement électrique des panneaux solaires.

Le modèle mathématique du générateur photovoltaïque est un outil indispensable pour l'étude et la simulation de systèmes photovoltaïques base et des composants.

4

SIMULATION DE LA PERFORMANCE DU MODULE PHOTOVOLTAÏQUE

Sommaire

4.1	Introduction	43
4.2	Influence de l'éclairement	44
4.3	Influence de la température	44
4.4	Les Tests Expérimentaux	45
4.5	Tests des modules UDTS avec quelque défaut	47
4.6	Conclusion	48

4.1 Introduction

Conception ou d'améliorer la performance du système photovoltaïque dépend des composants de modélisation des connaissances. Plus précisément, le module photovoltaïque. Et l'identification des équations non linéaires ($I - V$).

Dans ce chapitre, nous allons fournir des simulations de systèmes *PV* de module photovoltaïque pour les conditions d'utilisation d'un modèle mathématique (chapitre 3), ainsi que par des données expérimentales pour vérifier la validité de ce modèle.

4.2 Influence de l'éclairement

La figure présente un exemple des courbes pour différents niveaux de rayonnement :

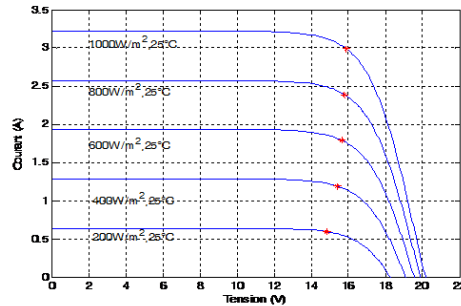


FIGURE 4.1 – Effet de l'éclairement sur les caractéristiques $I(V)$ d'un module photovoltaïque

On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même pour des valeurs faibles de l'éclairement reçu.

L'irradiation standard, internationalement acceptée, pour mesurer la réponse des panneaux photovoltaïques est une intensité rayonnante de $1000\text{W}/\text{m}^2$ et une température de 25°C .

4.3 Influence de la température

La figure présente des courbes courant-tension pour différentes températures de fonctionnement de la cellule PV :

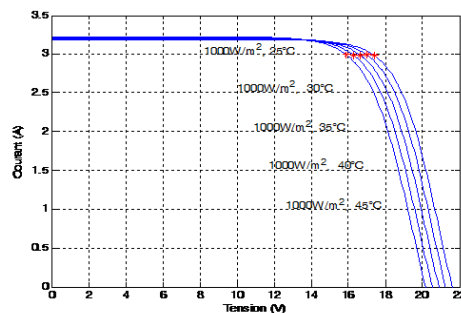


FIGURE 4.2 – Influence de la température sur les caractéristiques $I - V$ d'un module photovoltaïque..

On remarque que la température à une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert diminue assez fortement lorsque la température augmente. Par conséquent, la puissance délivrée ou de sortie du module. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site ne doit pas être négligée.

Il est important de savoir que la puissance du panneau diminue environ de 0,5 par chaque degré d'augmentation de la température de la cellule au dessus de 25°C .

4.4 Les Tests Expérimentaux

Nous avons utilisé dans ce banc d'essai un traceur de courbe $I - V$ de type EKO Instruments MP-160 (Fig.) pour caractériser les panneaux et tracer la caractéristique $I(V)$ du module photovoltaïque.

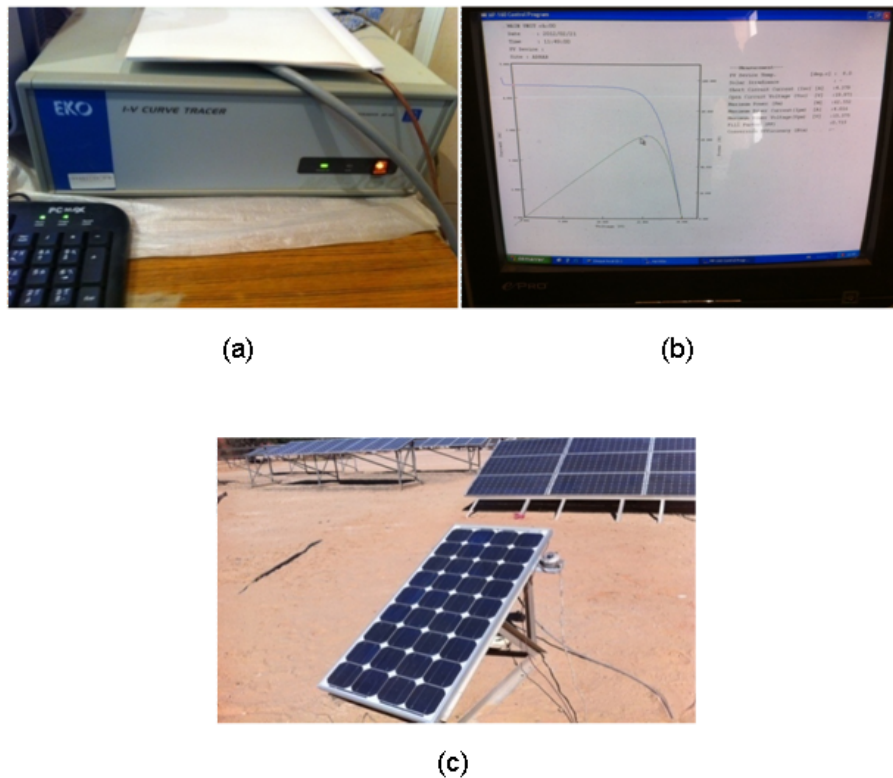


FIGURE 4.3 – Photos de banc d'essai (a) Traceur de courbe $I - V$ de type EKO Instruments MP-160. (b) Résultats expérimentaux affichés sur le PC. (c) Module photovoltaïque à caractériser.

Afin d'examiner la validité du modèle, on a comparé les courbes simulées avec les courbes expérimentales.

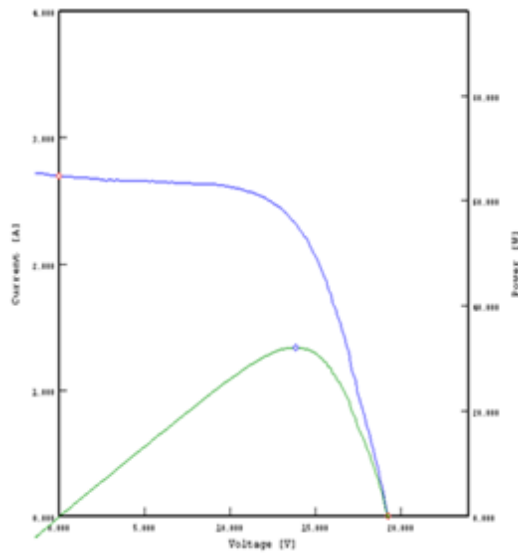


FIGURE 4.4 – Courbe expérimentale

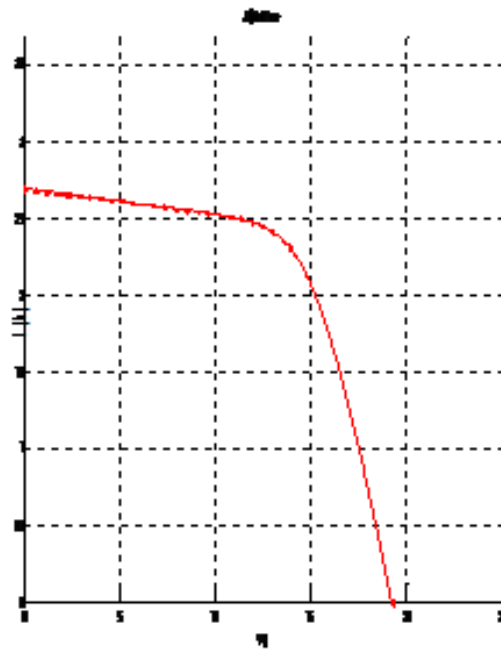


FIGURE 4.5 – Courbe simulation

On a remarqué dans cette comparaison les résultats expérimentaux et simulations le même démontrant l'efficacité de ce modèle mathématique.

4.5 Tests des modules UDTS avec quelque défaut

Nous avons choisi quelques modules photovoltaïques dans lequel les défauts, afin de procéder à des essais expérimentaux car ils nous paraissent les figures suivantes.

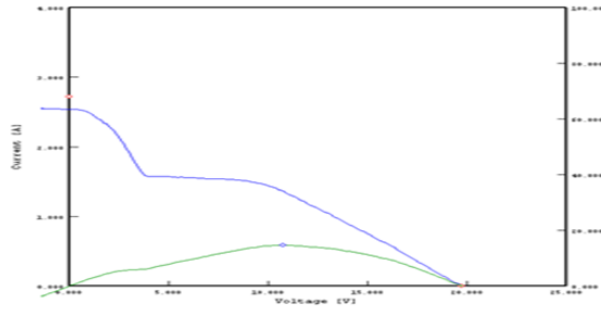


FIGURE 4.6 – Courbe de module UDTS verre cassé.

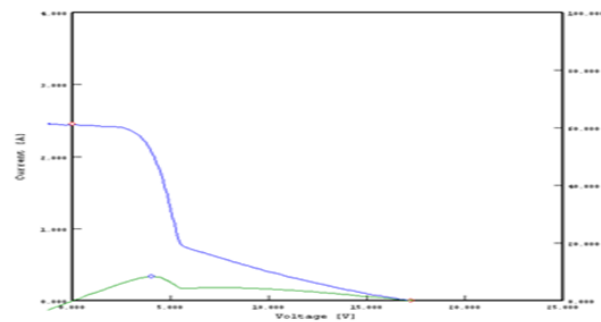


FIGURE 4.7 – Courbe de module UDTS cellule ombré.

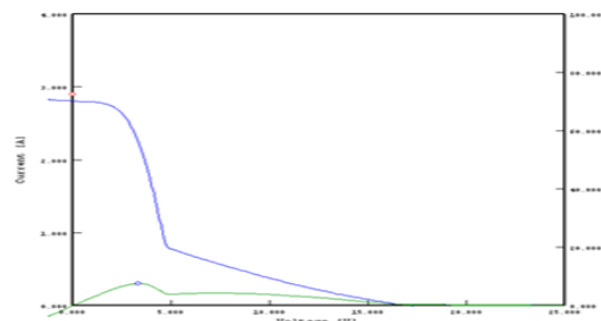


FIGURE 4.8 – Courbe de module UDTS sans diode.

Grâce à cette Figure 6,7et 8 nous pouvons voir que la performance des modules *PV* ont diminué considérablement en raisons des facteurs externes et les conditions climatiques (ombre - sable - la vulnérabilité au sabotage).

4.6 Conclusion

La caractérisation occupe une place importante dans l'étude du fonctionnement d'un module photovoltaïque. Dans cet aspect, le présent chapitre a été consacré à une étude expérimentale des caractéristiques $I - V$ de plusieurs modules photovoltaïques exposés aux aléas du climat saharien.

Conclusion Générale

Les travaux présentés dans cette étude concernent les performances des modules photovoltaïques et les facteurs qui caractérisent le fonctionnement des modules photovoltaïques dans les conditions réelles (milieu saharien).

Les paramètres de l'équation des modules permettent d'analyser leurs caractéristiques électriques et leurs performances. Pour cela, leur estimation est d'une grande importance puisque le comportement d'un module photovoltaïque joue un rôle primordial dans la balance énergétique du système photovoltaïque entier. D'un autre côté, nous trouver un modèle mathématique exact et précis pour l'étude les performances d'une part, et de faire un dimensionnement optimal d'un système photovoltaïque d'autre part, on a présenté les résultats obtenus, basées sur la fiche technique, en utilisant une méthode numérique sans avoir besoin d'effectuer plusieurs testes expérimentaux sur le module photovoltaïque.

Cette méthode a permis de déterminer les paramètres internes électriques du module pour pouvoir étudier les performances d'un système photovoltaïque. On a aussi montré un très bon accord entre l'expérience et la simulation d'une part, et d'autre part la validation des modèles qui régissent le fonctionnement électrique des panneaux solaires.

Dans la dernière étude, nous avons sélectionné quelques panneaux photovoltaïques pour des essais expérimentaux, qui ont montré une baisse du rendement des panneaux photovoltaïques.

Bibliographie

- [1] Zouache Foudil(2009), Étude de la concentration solaire sur les performances des systèmes photovoltaïque, Thèse de Magistère en Électronique, Université De Mentouri Constantine.
- [2] Sadok Med, Contribution a l'étude des performances d'une installation photovoltaïque de puissance, Thèse de Magistère, Centre de développement des énergies renouvelables, le 08 janvier 1995.
- [3] M. Petibon Stéphane, Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques, Thèse doctorat, l'Université Toulouse III - Paul Sabatier, Le 20 Janvier 2009.
- [4] Sadok Med, Détermination des Paramètres, Performances et Etude de la Dégradation des Modules Photovoltaïques en milieu saharien, Thèse doctorat, Université Aboubakr BELKAÏD - TLEMCEM, le 13 novembre 2011.
- [5] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, et E. R. Filho, "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays", IEEE transactions on power electronics, vol. 24, no. 5, may 2009.
- [6] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, E. Ruppert F, "Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays", Brazilian journal of power electronics, vol. 14, no. 1, février. 2009.
- [7] Office fédéral des questions conjoncturelles Service de la technologie, Centrales photovoltaïques : Guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets, A l'usage des bureaux d'ingénieurs, Coordination romande du programme d'action "Construction et énergie" EPFL-LESO, Juin 2006. , Case postale 12, 1015 Lausanne.
- [8] Direction des ressources en électricité, Les systèmes photovoltaïques Guide de l'acheteur, © Sa Majesté la Reine du Chef du Canada, 2003, No de catalogue : M92-28/2001F, ISBN : 0-662-86306-2.
- [9] C. Carrero, J. Amador, et S. Arnaltes, "A single procedure for helping PV designers to select silicon PV module and evaluate the loss resistances", Renewable Energy, 2007.
- [10] Catalogue du module isofotón, Fabrica : Parque Technológico Andalucía (PTA) C/Severo Ochoa, 50. 29590 Malaga, Espana, www.isofoton.com, Septiembre 2007.

-
- [11] M. Yaichi, A. Neçaibia, M. Sadok, " Etude, Caractérisation et Estimation des Paramètres du Module Photovoltaïque Isotopique-75W ", Le 2ème Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables, octobre 2012.
- [12] Alain Ricaud, photopiles solaires, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne(suisse)1997.
- [13] Dr.jan F.Kreider and Dr.Frank Kreith,solar energy handbook,McGraw-hill series in modern structures,America 1981.