

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE FERHAT ABBAS-SETIF (ALGERIE)
FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

MEMOIRE

Présenté au département de physique
Pour l'obtention du diplôme de

MAGISTER

Option : Energétique et mécanique des fluides

Par

M^{elle} NEHAOUA Nadia

THEME

**DETERMINATION
DES PARAMETRES D'UNE PHOTOPILE SOLAIRE
A JONCTION PN**

Soutenu le :

Devant le jury :

Président	Dr A. Boucenna	Professeur,	U.F.A-Sétif
Rapporteur	Dr M. Chegaar	Maître de conférences,	U.F.A-Sétif
Examineur	Dr Z. Ouennoughi	Professeur,	U.F.A-Sétif

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Ma MÈRE et Mon PÈRE pour leur amour, encouragement et leur patience pendant ce temps.

Monsieur M. CHEGAAR, qui a dirigé ce travail dans un esprit de confiance et d'amitié et qui a contribué à l'amélioration du manuscrit, Je tiens à lui exprimer ma profonde gratitude et mes vifs remerciements.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements au Prof. A. BOUCENNA qui a aimablement accepté de présider ce jury.

Je remercie également le Prof. Z. OUENNOUGHI qui n'a pas hésité d'évaluer le présent travail. Il m'honore par sa présence.

*Je tien à remercier mes professeurs de 1^{ère} année magister Messieurs : H. Mekias, L. Ben cheikh, H. Zaaq
et M. Guellal.*

Mes camarades: Zahira, Ilhem, Kamel, Yacine, Hamou et Mohamed Farouk,

Mademoiselle Zahra pour ses conseils et soutien

*Grand remerciement à Mon Frère NEHAOUA Lamri qui m'a préparé un excellent matériel pour
réaliser ce travail, pour sa disponibilité, conseil et soutien.*

Tous les membres de ma famille qui m'ont soutenu tout au long de ce travail.

SOMMAIRE

SOMMAIRE.....	01
ABREVIATION.....	05
LISTE DES FIGURES.....	07
LISTE DES TABLEAUX.....	08

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE.....	09
-----------------------------------	-----------

CHAPITRE I : CARACTERISTIQUES DE LA CELLULE SOLAIRE

I.1. Introduction	13
I.2. Notion préliminaire sur le rayonnement solaire	13
I.3. La cellule solaire	15
I.4. L'effet photovoltaïque.....	15
I.4.1. Le semi-conducteur	15
I.4.2. Dopage du semi-conducteur	16
I.4.3. Création de la jonction	17
I.4.4. L'effet photovoltaïque	18
I.5. Les caractéristiques énergétiques et électriques d'une cellule solaire	20
I.5.1. Les caractéristiques énergétiques	20
I.5.1.1. L'énergie disponible aux bornes de la cellule solaire	20
I.5.1.2. Le rendement d'une cellule PV	20
I.5.1.3. La réponse spectrale	21
I.5.2. Les caractéristiques électriques d'une cellule solaire	22
I.5.2.1. Caractéristique idéale et schéma équivalent	22
I.5.2.2. La caractéristique courant-tension	23
I.5.2.3. Paramètres caractéristiques	24
I.5.2.4. Le facteur de forme	25
I.5.2.5. Le rendement de conversion	26
I.6. Facteurs limitant le rendement	26
I.6.1. Absorption incomplète	26
I.6.2. Utilisation partielle d'énergie des photons	27
I.6.3. Réflexion	27
I.6.4. Rendement de collection	28
I.6.5. Facteur de tension	28
I.6.6. Facteur de forme	28

I.6.7. Taux d'ombrage	29
I.6.8. Résistance série	29
I.6.9. Résistance parallèle	31
I.7. Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire réelle.....	32
I.8. Effet de la température et de l'éclairement sur la caractéristique $I-V$	33
I.8.1. Influence de la température sur le fonctionnement de la cellule	33
I.8.2. Influence de l'éclairement sur le fonctionnement de la cellule.....	36
I.9. Module photovoltaïque.....	38
I.9.1. Groupement de cellules.....	38
I.9.2. Déséquilibres dans les groupements de cellules.....	41
I.10. Conclusion	42

CHAPITRE II : LES DIFFERENTS TYPES DE CELLULES SOLAIRES

II.1. Introduction	44
II.2. Les différentes filières photovoltaïques.....	44
II.3. Cellules solaires au silicium cristallin	45
II.3.1. Propriétés photovoltaïques de silicium	45
II.3.2. Silicium solaire	46
II.3.3. Silicium monocristallin	47
II.3.4. Silicium polycristallin	50
II.4. Les cellules solaires en couches minces	52
II.4.1. Cellule au silicium amorphe	52
II.4.2. Autres matériaux en couches minces.....	54
II.5. La cellule solaire organique	57
II.5.1. Semi-conducteur organique	57
II.5.2. Effet photovoltaïque dans les cellules solaires organiques	58
II.5.3. Structures des cellules photovoltaïques organiques	59
II.5.4. La structure bicouche	59
II.5.4. Structure réseau interpénétré	60
II.5.4. Structure laminée	60
II.6. Rendement de conversion des différents matériaux	61
II.7. Conclusion	62

*CHAPITRE III : EXTRACTION DES PARAMETRES DES CELLULES
SOLAIRES*

III.1. Introduction	64
III.2. Méthodes d'extraction des paramètres de la cellule solaire	65
III.2.1. Méthode des différents niveaux d'illumination	65
III.2.2. Méthode de surface	66
III.2.3. Méthode du point de puissance maximale	66
III.2.4. Méthode de Warashina et Ushirokawa	67
III.2.5. Méthode d'optimisation vertical	67
III.2.6. Méthode analytique des cinq points	68
III.2.7. Méthode d'optimisation de la conductance	69
III.2.8. Méthode de la conductance simple	71
III.3. Critiques générales	72
III.4. La méthode proposée	73
III.4.1. Principe de la méthode	73
III.4.2. Extraction des paramètres	75
III.4.3. Validation et test de la méthode	78
III.4.4. Résultats et discussion.....	79
III.5. Conclusion	84

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE	85
BIBLIOGRAPHIQUE	87

ABREVIATION

Général

<i>PV</i>	Photovoltaïque
<i>CPV</i>	Cellule photovoltaïque
<i>AM</i>	Air masse
<i>DDP</i>	Différence de potentiel
<i>c-Si</i>	Silicium cristallin
<i>a-Si</i>	Silicium amorphe
<i>m-Si</i>	Silicium monocristallin
<i>p-Si</i>	Silicium polycristallin
<i>SUP</i>	Silicium ultra pur

SYMBOLE

E_g	Energie de la bande interdite (gap)
E_c	Niveau d'énergie de la bande de conduction
E_v	Niveau d'énergie de la bande de valence
<i>SC</i>	Semi conducteur
$E_{\text{électrique}}$	Energie disponible aux bornes d'une cellule
$E_{\text{lumineuse}}$	Energie incidente
<i>RS</i>	Réponse spectrale
h	Constante de Planck
K	Constante de Boltzmann
λ	Longueur d'onde
c	Célérité de la lumière
ν	Fréquence du rayonnement
I_{obs}	Courant d'obscurité
I_s	Courant de saturation
I_d	Courant de la diode
V	Tension
Φ	L'irradiance du rayonnement incident (éclairage)

S	Surface de captation
α	Coefficient d'absorption
q	Charge électrique
T	Température
I_{ph}	Densité de courant photogénéré
n	Facteur d'idéalité
R_s	Résistance série
R_{sh}	Résistance shunt
G_{sh}	Conductance shunt
I_{cc}	Tension de court circuit
V_{oc}	Courant de circuit ouvert
P_{max}	Puissance maximale
P	Puissance électrique
P_0	Puissance lumineuse incidente
$I_m (I_{max})$	Courant maximum
$V_m (V_{max})$	Tension maximal
F_v	Facteur de tension

Technique expérimentale

CZ	Czochraski
FZ	Fusion par Zone
CVD	Déposition en phase vapeur

Matériaux utilisés

Si	Silicium
$GaAs$	Arséniure de Galium
$CdTe$	Tellurure de cadmium
CIS	Séléniure de Cuivre et d'Indium
SiO_2	dioxyde du Silicium
SiH_4	Silane

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I.1 : Répartition des spectres du rayonnement solaire.....	13
Figure I.2 : Dopage d'un semi-conducteur.....	17
Figure I.3 : Mise en contact de deux semi-conducteurs dopés	18
Figure I.4 : Migration sous l'effet d'un gradient de charge.....	18
Figure I.5 : Création de la barrière de potentiel au niveau de la zone de contact.....	18
Figure I.6 : Principe de l'effet photovoltaïque.....	19
Figure I.7 : Réponse spectrale d'une cellule PV au silicium	21
Figure I.8 : Schéma équivalent d'une cellule idéale.....	23
Figure I.9 : Caractéristique I-V de la cellule solaire éclairée.....	24
Figure I.10 : Exploitation du spectre solaire AM0 par une photopile en Si	27
Figure I.11 : Influence de la résistance série sur la caractéristique I-V et P-V d'une cellule solaire éclairée	30
Figure I.12 : Influence de la résistance série sur le η et FF.....	30
Figure I.13 : Influence de la résistance shunte sur la caractéristique I-V et P-V d'une cellule solaire éclairée.....	31
Figure I.14 : Influence de la résistance shunte sur le η et FF.....	32
Figure I.15 : Circuit équivalent d'une cellule solaire éclairée.....	33
Figure I.16 : La tension V_{co} en fonction de la température	34
Figure I.17 : Le courant I_{cc} en fonction de la température	34
Figure I.18 : Caractéristique courant-tension d'une cellule PV à éclairement constant en fonction de la température	35
Figure I.19 : Influence de la température sur la puissance générée	35
Figure I.20 : Influence de la température sur Rendement de conversion.....	36
Figure I.21 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V.....	37
Figure I.22 : Influence de l'éclairement sur la puissance générée	37
Figure I.23 : Influence de l'irradiation sur le rendement de conversion.....	38
Figure I.24 : Groupement de cellules en série.....	39
Figure I.25 : Groupement de cellules en parallèle.....	40
Figure I.26 : Panneau photovoltaïque.....	41

Chapitre II

Figure II.1 : Répartition des différentes formes de silicium dans la production industrielle en 2003	46
Figure II.2 : Les étapes de purification du silicium.	47
Figure II.3 : Tirage CZochralski	48
Figure II.4 : Tirage FZ	48
Figure II.5 : Cellule au silicium monocristallin	49
Figure II.6 : Principe de croissance par solidification directionnelle	50
Figure II.7 : Principe de croissance de silicium en coulée continue en creuset.....	50
Figure II.8 : Principales étapes de fabrication du matériau, de la cellule et du module	51
Figure II.9 : Cellule au silicium amorphe	53
Figure II.10 : Module en couches minces	55
Figure II.11 : Forme résonnantes d'un système conjugué	57
Figure II.12 : Schéma descriptif montrant les étapes de génération du photocourant	59
Figure II.13 : Structure d'une cellule hétérojonction et les niveaux d'énergie.....	59
Figure II.14 : Structure d'une cellule à hétérojonction en volume	60
Figure II.15 : Structure laminée	60
Figure II.16 : Evolution des rendements des cellules photovoltaïques	61

Chapitre III

Figure III.1 : Méthode graphique de détermination de R_s	66
Figure III.2 : La caractéristique I-V mesurée et calculée de la cellule solaire	82
Figure III.3 : La caractéristique I-V mesurée et calculée du module solaire	82
Figure III.4 : La caractéristique I-V mesurée et calculée de la cellule organique.....	83

LISTE DES TABLEUX

Tableau III.1 : Paramètres de la cellule et du module solaire extraits par plusieurs méthodes	81
Tableau III.2 : Paramètres de la cellule organique extraits par plusieurs méthodes.....	81

Introduction Générale

Sans énergie, notre monde ne pourrait fonctionner. En effet, l'homme, les machines et la nature en ont tous besoin. La demande totale d'énergie dans le monde s'accroît proportionnellement à la croissance démographique et au développement industriel et technologique. A l'échelon mondial, la production actuelle en énergie est essentiellement basée sur des ressources dites « non renouvelables » telles que le pétrole, le gaz naturel, le charbon ou encore l'uranium. Une fois ces ressources épuisées, l'homme sera condamné à trouver d'autres alternatives pour produire cette énergie dont il s'est rendu dépendant. Actuellement, 85% des besoins énergétiques sont couverts par les combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz). Outre les ressources fossiles sont principalement responsables de la production de CO₂ largué dans l'atmosphère et du changement induit sur le climat (réchauffement de la planète, pollutions radioactives, etc..).

Ces dernières années, la protection de l'environnement est devenue une préoccupation majeure. De nombreuses voies de recherches se sont donc orientées vers l'utilisation des énergies renouvelables, parmi les sources d'énergies renouvelables, on compte le vent, les flux marins et océaniques, la géothermie, le solaire photovoltaïque. Ce dernier est une source d'énergie très puissante. En effet, la puissance du rayonnement solaire au niveau du sol est d'environ 950 watt/m². La quantité totale d'énergie solaire reçue au niveau du sol pendant une semaine dépasse l'énergie produite par les réserves mondiales de pétrole, de carbone, de gaz et d'uranium. Mais dans la plupart des cas, une conversion de l'énergie du rayonnement solaire en électricité est nécessaire. Cette conversion peut être effectuée de manière directe ou indirecte.

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie renouvelable car elle utilise une source d'énergie d'origine naturelle qui est le soleil. Elle constitue donc une alternative aux énergies fossiles à plusieurs titres : elle est inépuisable, elle 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 l'intermédiaire d'un dispositif appelé « cellule photovoltaïque ou photopile » qui transforme l'énergie lumineuse en courant électrique.

La majorité des photopiles solaires utilisées actuellement sont à base du silicium qui est le matériau le plus commercialisé dans l'industrie photovoltaïque grâce à ses nombreux avantages: disponibilité, qualité photovoltaïque, multiplicité des formes employées

(silicium monocristallin, poly-cristallin et amorphe) qui assurent un bon rendement de conversion.

Les cellules solaires photovoltaïques fournissent l'énergie d'alimentation la plus importante et de long durée pour des satellites et des véhicules spatiaux. Comme elles sont utilisées dans des applications terrestres. Les cellules solaires sont habituellement évaluées en mesurant les caractéristiques courant tension du dispositif dans des conditions standard d'illumination et puis en extrayant un ensemble de paramètres à partir des données obtenus. Ces paramètres sont le courant de saturation, la résistance série, le facteur d'idéalité, le photocourant et la résistance shunt. Ces paramètres peuvent être employés pour le contrôle de la qualité pendant la production ou fournir des perspectives dans le fonctionnement des dispositifs, menant de ce fait aux améliorations de ces dispositifs.

Le travail présenté dans ce mémoire a porté sur la détermination des paramètres des cellules solaires à jonction PN. Il est présenté de la façon suivante :

- Dans le premier chapitre, nous décrivons le principe de l'effet photovoltaïque, les différentes caractéristiques énergétiques et électriques de la cellule PV. Puis, nous présentons les facteurs limitatifs du rendement, ainsi que l'influence de la température et l'éclairement sur le fonctionnement de la cellule solaire.
- Dans le second chapitre, nous donnons un aperçu général sur le matériau à base de silicium et ses propriétés photovoltaïques. Un autre aperçu, sur les autres technologies utilisées pour la fabrication des cellules solaires, sera aussi présenté.
- Dans le troisième chapitre, nous présentons les différentes méthodes déjà proposées pour l'extraction des différents paramètres caractéristiques des cellules solaires, et nous présentons une nouvelle méthode pour évaluer ces paramètres.
- En fin, nous terminons par une conclusion générale.

Chapitre I

Caractéristiques de la cellule solaire

I.1. INTRODUCTION

Après une brève présentation de l'élément énergétique essentiel qui constitue le rayonnement solaire, nous aborderons le principe de l'effet photovoltaïque, les différentes caractéristiques énergétiques et électriques de la cellule solaire seront récapitulées ainsi que, les facteurs limitant le rendement et le schéma électrique équivalent d'une cellule solaire.

I.2. NOTIONS PRELIMINAIRES SUR LE RAYONNEMENT SOLAIRE

Le développement, l'optimisation et la caractérisation d'une cellule solaire implique une certaine connaissance de la source d'énergie utilisée: le Soleil. La surface de celui-ci se comporte comme un corps noir à la température d'environ 5800 K. Ceci conduit à un pic d'émission situé à une longueur d'onde de 0.5 μm pour une puissance d'environ 60 MW/m^2 soit un total de $9.5 \cdot 10^{25}$ W. En tenant compte de la surface apparente du soleil et de la distance entre celui-ci et la terre, cela conduit à un éclairage moyen dans l'année de $1.36 \text{ kW}/\text{m}^2$ hors atmosphère [2].

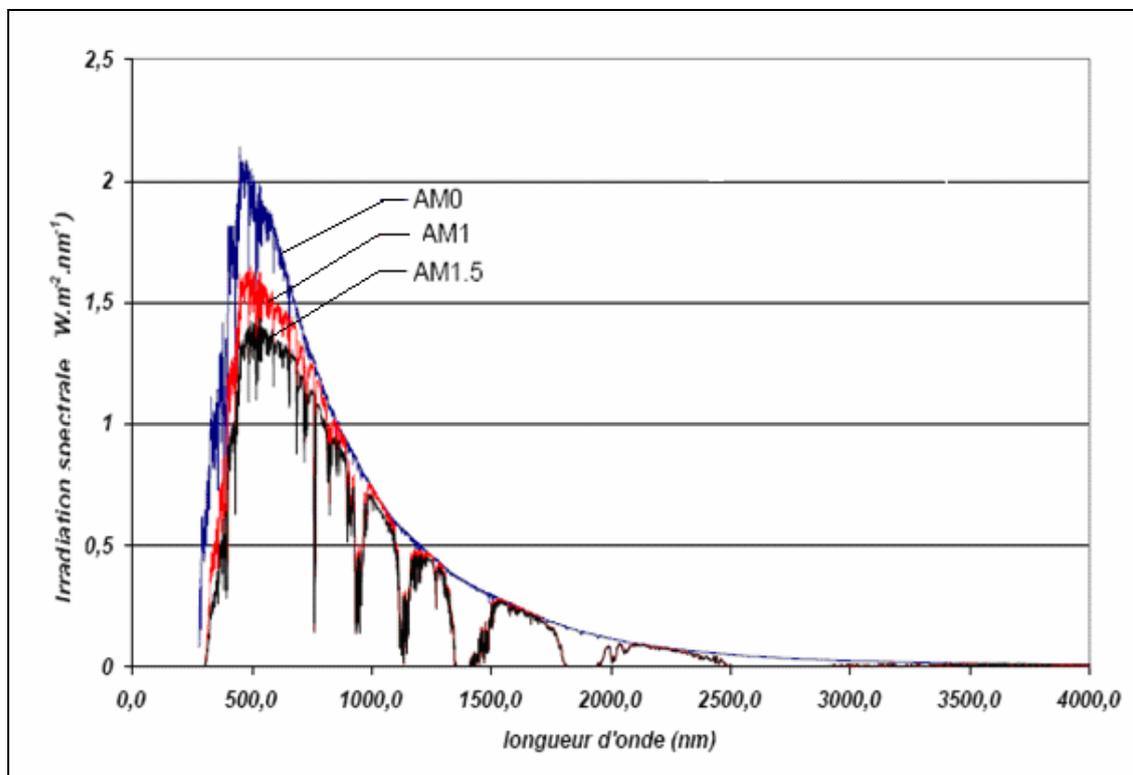


Figure I.1 : Répartition des spectres du rayonnement solaire [3].

Les matériaux des cellules solaires réagissent différemment selon la longueur d'onde de la lumière à laquelle ils sont soumis. Cependant, la connaissance de la distribution en longueur d'onde de l'énergie solaire est importante.

I.2.1. Nombre d'air masse

Pour tenir compte de la distance traversée par le rayonnement solaire, on définit un système de référence, la notion d'air masse ou masse atmosphérique (AM) a été introduite et est défini par [1] :

$$AM = \frac{p}{1013} \frac{1}{\sin \theta} \exp\left(-\frac{z}{7.8}\right) \quad (\text{I.1})$$

- p (N/m) : pression.
- θ (°) : élévation du soleil sur l'horizon (90° au zénith).
- z (Km) : altitude.

Dans les conditions normales et au niveau de la mer, l'expression simplifiée suivante est utilisée :

$$AM = \frac{1}{\sin \theta} \quad (\text{I.2})$$

Ainsi, lorsque le soleil est au zénith; on dit que l'on a les conditions AM1 car les rayons lumineux traversant une épaisseur d'atmosphère unité (7.8 Km). Avec un soleil à 30° sur l'horizon, on obtient les conditions AM2. Hors atmosphère, à haute altitude, on définit les conditions AM0. Le spectre AM1.5, correspondant à un angle du soleil de 48.2° sur la surface de la terre.

Il est important de comprendre les deux aspects recouverts par le concept de nombre d'air masse. D'une part, il caractérise la puissance transportée par le rayonnement solaire ; d'autre part, il sert à définir un spectre de référence pour calibrer les cellules étalons destinées à qualifier les performances des dispositifs photovoltaïques. Ainsi, les conditions standards de qualification des cellules sont un spectre AM1.5, une puissance incidente 1000 W/m² et une température de 25°C.

I.2.2. Structure de l'atmosphère

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit une atténuation et une modification de son spectre, par conséquent une atténuation non négligeable de l'énergie incidente. L'atténuation est due aux phénomènes d'absorption par les molécules des différentes couches de l'atmosphère, conditions climatiques, latitude du lieu d'observation et saison. Des gaz comme l'ozone (O_3), pour les longueurs d'ondes inférieures à $0.3 \mu\text{m}$, le dioxyde de carbone (CO_2) et la vapeur d'eau (H_2O), pour les infrarouges au dessus de $2 \mu\text{m}$, absorbent les énergies proches de leur énergie de liaison, ce qui conduit à des « trous » dans le spectre solaire visible au sol. Par ailleurs, les poussières et aérosols présents dans l'atmosphère conduisent à une absorption répartie quasiment sur toute la gamme spectrale, ce qui conduit à une baisse globale de la puissance incidente [4].

La dépendance des mécanismes d'atténuation vis-à-vis de la longueur d'onde explique les déficits du spectre solaire au sol (AM1.5) par rapport à celui mesuré hors atmosphère (AM0).

I.3. LA CELLULE SOLAIRE

La cellule solaire ou cellule photovoltaïque (CPV) dite aussi photopile solaire est l'élément de base de la conversion photovoltaïque. Elle est composée d'un matériau semi-conducteur (SC) capable de convertir directement la lumière incidente en électricité, son principe de fonctionnement repose sur « l'effet photovoltaïque ».

I.4. L'EFFET PHOTOVOLTAÏQUE

L'effet photovoltaïque a été mis en évidence pour la première fois par E. Becquerel en 1839. Il découvrit que certains matériaux délivraient une petite quantité d'électricité quand ils étaient exposés à la lumière. Albert Einstein expliqua le phénomène photoélectrique en 1912, mais il fallut attendre le début des années 50 pour sa mise en application pratique dans la réalisation d'une cellule solaire PV en silicium avec un rendement de 4.5%.

I.4.1. Le semi-conducteur

Les semi-conducteurs (SC) sont des matériaux qui conduisent le courant électrique moins bien que les métaux, mais mieux que les isolants. Ce sont des matériaux dont la

concentration en charges libres est très faible par rapport aux métaux. Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction). C'est l'énergie du « band gap » E_g , en électron-volt (eV).

E_g est la valeur de l'écart entre les deux bandes ($E_g = E_c - E_v$). Les isolants sont caractérisés par un $E_g > 5$ eV et les semi-conducteurs par un $E_g < 5$ eV. Si le SC est exposé à la température ou à la lumière un électron peut « sauté » la bande interdite d'énergie E_g et peuplé la bande de conduction. Cette valeur seuil est propre à chaque matériau semi-conducteur et elle est de 1.0 à 1.8 eV pour les applications photovoltaïques. Elle est de 1.1 eV pour le silicium cristallin (c-Si), et 1.7 eV pour le silicium amorphe (a-Si) [5].

En quittant la bande de valence, l'électron laisse un « trou » qui va se comporter comme une charge positive, et qui va se recombiner avec le premier électron qu'il rencontrera. Il suffit donc de créer un champ électrique qui sépare les électrons des trous afin d'éviter qu'ils se recombinent, ce qui a également pour effet de créer un courant électrique.

1.4.2. Dopage du semi-conducteur

La méthode utilisée pour créer ce champ est celle du « dopage » par des impuretés. La technique du dopage d'un SC consiste en l'appauvrissement ou l'enrichissement du nombre d'électrons au sein de cristal. Pour ce faire, on introduit au sein de la structure du semi-conducteur un atome accepteur ou donneur d'électron [6].

- **Dopage de type N** : Il consiste à introduire dans la structure cristalline du semi-conducteur des atomes étrangers (atome de la cinquième colonne du tableau périodique) qui ont la propriété de donner chacun un électron excédentaire (charge négative), libre de se mouvoir dans le cristal. C'est le cas du phosphore (P) dans le silicium (Si).
- **Dopage de type P** : Il consiste à introduire dans la structure cristalline du SC des atomes étrangers (atome de la troisième colonne du tableau périodique). Le bore (B) est le dopant de type P le plus couramment utilisé pour le silicium qui a la propriété

de donner chacun un trou excédentaire (charge positive), libre de se mouvoir dans le cristal.

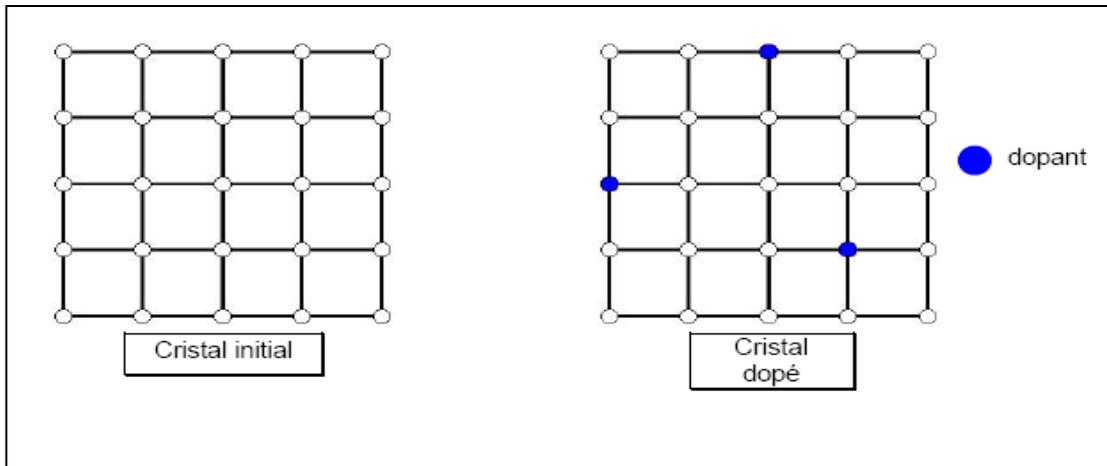


Figure 1.2 : Dopage d'un semi-conducteur [6].

I.4.3. Création de la jonction *PN*

Une Jonction *PN* résulte de la mise en contact de deux cristaux semi-conducteurs dopés respectivement avec des impuretés de types donneurs et accepteurs (*N*, *P*) (Figure 1.3). Sous l'effet d'un gradient de charge, les électrons excédentaires de la zone *N* vont avoir tendance à migrer vers la zone *P* déficitaire en électrons et inversement pour les trous de la zone *P* (Figure 1.4). Certains de ces électrons vont donc rester du côté *P* et de même pour certains trous ayant migré du côté *N*. Il en résulte une recombinaison des charges au niveau de la zone de contact et la création d'une *DDP* (différence de potentiel) locale au niveau de la zone de contact. C'est une barrière de potentiel.

En effet, cette *DDP* ne permet plus la migration d'éventuels électrons libres de *N* vers la zone *P* et de trous de la zone *P* vers la zone *N* (Figure 1.5). Ils sont aux contraires repoussés vers les bords de leur zone d'appartenance. La jonction *PN* est ainsi réalisée [6].

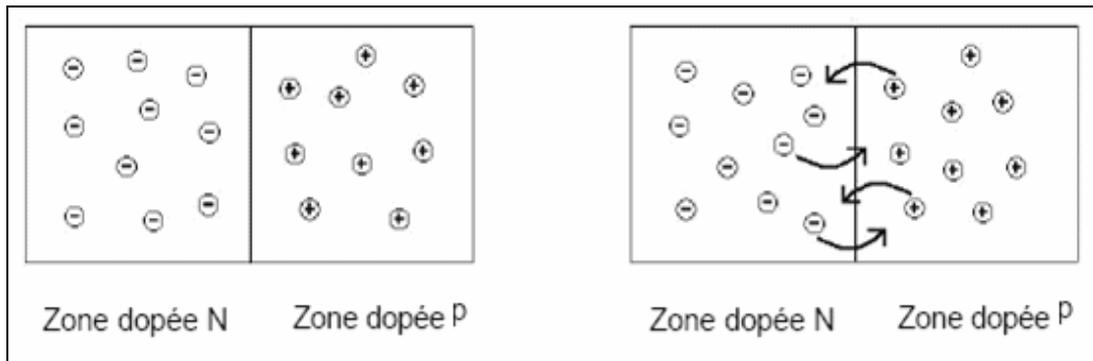


Figure 1.3: Mise en contact de deux semi-conducteurs dopés [6].

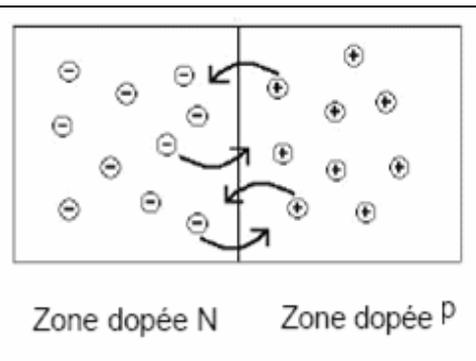


Figure 1.4: Migration sous l'effet du gradient de charge [6].

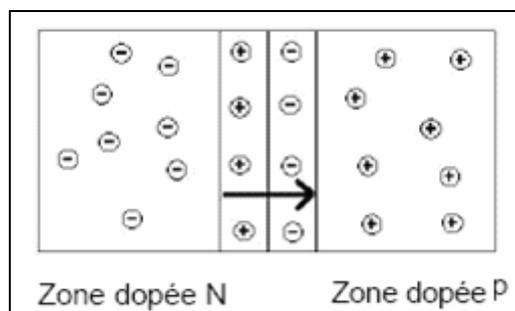


Figure 1.5: Création de la barrière de potentiel au niveau de la zone de contact [6].

I.4.4. L'effet Photovoltaïque

L'effet photovoltaïque repose principalement sur trois grands principes dont l'action conjuguée de manière quasi-simultanée engendre la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique :

- Absorption maximum de la lumière sur tout le spectre solaire.
- La création de paires électron-trou par photo excitation du semi-conducteur par rayon lumineux d'énergie supérieure à celle de la bande interdite.
- Séparation des charges et leurs collection.

Quand une jonction PN est éclairée par des photons d'énergie supérieure à la valeur du gap E_g , les électrons de la bande de valence du semi-conducteur vont pouvoir passer dans la bande de conduction et devenir libres. Ce phénomène va engendrer au sein de la structure du SC la création de paire électron-trou. Ces paires électron-trou générées sont séparées sous l'influence du champ électrique interne qui règne dans la zone de transition, dite de charge d'espace [7].

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones N et P et la zone de charge d'espace. Les photoporteurs auront un comportement différent suivant la région [8]

- Dans la zone n ou p , les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace 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 un photocourant de diffusion.
- Dans la zone de charge d'espace, les paires électron-trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique. Les électrons vont aller vers la région n et les trous vers la région p . On aura un photocourant de génération.

Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un photocourant résultant I_{ph} . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse.

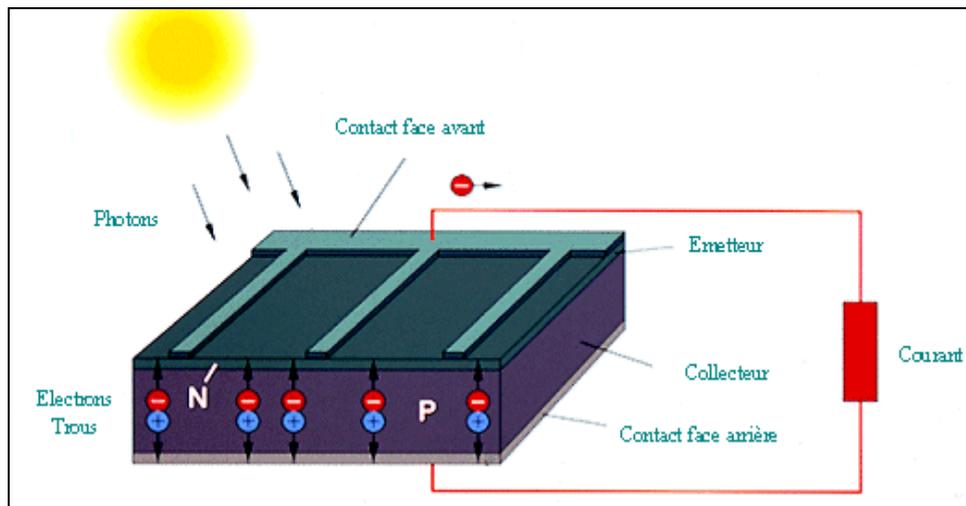


Figure 1.6: Principe de l'effet photovoltaïque [9].

I.5. LES CARACTERISTIQUES ENERGETIQUES ET ELECTRIQUES D'UNE CELLULE SOLAIRE

I.5.1. Les Caractéristiques énergétiques :

I.5.1.1. L'énergie disponible aux bornes d'une cellule :

Comme dans tous les systèmes énergétiques, l'énergie disponible aux bornes d'une cellule photovoltaïque est fonction de l'énergie entrante et des pertes, ce que l'on peut écrire de la manière suivante :

$$E_{\text{électrique}} = E_{\text{lumineuse}} - P_{\text{ert}} \quad (\text{I.3})$$

$E_{\text{électrique}}$: L'énergie disponible aux bornes de la cellule PV.

$E_{\text{lumineuse}}$: L'énergie incidente (flux lumineux)

P_{ert} : Les pertes (fondamentales et technologiques).

Le Watt-crête (Wc) est l'unité servant à définir la puissance disponible aux bornes d'une cellule ou d'un assemblage de cellules. La puissance crête d'une cellule, aussi nommée puissance « catalogue », représente la puissance électrique maximum délivrée dans les conditions suivantes dites conditions standards [10]:

- Eclairage solaire 1kW/m²
- Température de la cellule PV égale à +25°C.
- Répartition spectrale du rayonnement dit AM.1.5.

I.5.1.2. Le rendement d'une cellule PV :

Le rendement d'une photopile est le rapport entre l'énergie électrique qu'elle fournit et l'énergie du rayonnement (visible ou invisible à l'œil, lumineux ou solaire) reçue ou incidente, c'est-à-dire :

$$\eta = E_{\text{électrique}} / E_{\text{lumineuse}} \quad (\text{I.4})$$

L'énergie électrique disponible aux bornes d'une cellule photovoltaïque est fonction :

- Des caractéristiques du rayonnement : de la répartition spectrale, de l'angle d'incidence.

- De la quantité d'énergie reçue
- De la surface de la cellule
- De ses caractéristiques dimensionnelles
- Des conditions ambiantes de fonctionnement de la cellule PV (température de l'environnement, vitesse du vent...).

I.5.1.3. La réponse spectrale :

Une cellule photovoltaïque (PV) n'utilise pas toutes les longueurs d'onde du spectre solaire. On appelle réponse spectrale d'une cellule photovoltaïque l'efficacité avec laquelle elle transforme l'énergie d'un rayonnement d'une certaine longueur d'onde en énergie électrique. D'autre part c'est le rapport entre le courant généré par la cellule et la puissance lumineuse, en fonction des différentes longueurs d'onde formant le rayonnement incident. Cette efficacité dépend essentiellement des caractéristiques du matériau constituant la cellule PV.

La réponse spectrale (RS) est donnée par la relation : $RS = \frac{q\lambda}{hc} QE$.

QE représente le rendement quantique de la cellule, c'est-à-dire le rapport du nombre de porteurs générés sur le nombre de photons incidents. Pour une longueur d'onde donnée, le rendement quantique est égal à 1 si chaque photon génère un électron.

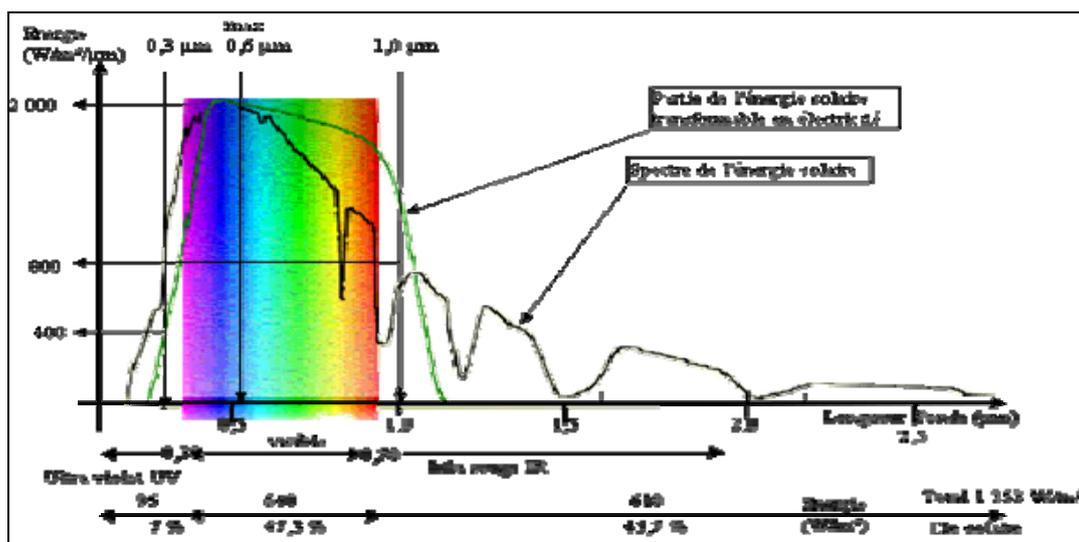


Figure 1.7: Réponse spectrale d'une cellule PV au silicium [10].

Lorsqu'une cellule PV est soumise au rayonnement solaire, seule une partie du rayonnement solaire sera transformée en électricité. Le rayonnement solaire est répartie sur une plage de longueurs d'onde débutant en deçà de l'ultraviolet (longueurs d'onde inférieures à 0.4 μm) et s'étendant au delà de l'infrarouge (longueurs d'onde supérieures à 0.7 μm). La cellule n'est sensible qu'à une partie du rayonnement solaire, celle comprise entre 0.35 et 1.1 μm , partie du rayonnement solaire essentiellement visible, et une partie du rayonnement ultraviolet (de 0.35 à 0.4 μm) et du rayonnement infrarouge (de 0.7 à 1.1 μm).

Cette sélection des longueurs d'onde s'explique par le fait que le photon doit avoir suffisamment d'énergie pour arracher un électron.

I.5.2. Les Caractéristiques Electriques d'une Cellule Solaire

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

$$I(V) = I_{ph} - I_d(V) \quad (\text{I.5})$$

Avec : I_{ph} : densité de courant photogénérer, il est proportionnelle à l'irradiance du rayonnement incident Φ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) et à la surface de captation S (m^2) de la cellule solaire,

$$I_{ph} = \alpha(T) \cdot \Phi \cdot S \quad (\text{I.6})$$

$\alpha(T)$: Coefficient d'absorption dépend faiblement de la température, il est d'ordre 0.35 AW^{-1} pour les cellules photovoltaïques au silicium monocristallin [11].

I_d : courant de la diode et dans le cas idéal est donné par l'équation de Shockley suivante $I_d = I_s \left(\exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right)$.

I.5.2.1. Caractéristique idéale et schéma équivalent

Pour une cellule solaire idéale l'équation (I.5) peut être écrite sous la forme suivante:

$$I(V) = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right] \quad (\text{I.7})$$

Où I_s est le courant de saturation de la diode, q la charge de l'électron, K la constante de Boltzmann, T la température et n le facteur d'idéalité de la diode.

Ainsi, dans une cellule solaire, deux courants s'opposent : le courant d'éclairement et un courant de diode appelé courant. La caractéristique d'une cellule sous obscurité est identique à celle d'une diode.

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque déduite de l'équation (I.7) est donné par la figure (I.8) et comprend un générateur de courant qui modélise l'éclairement et une diode en parallèle qui modélise la jonction PN .

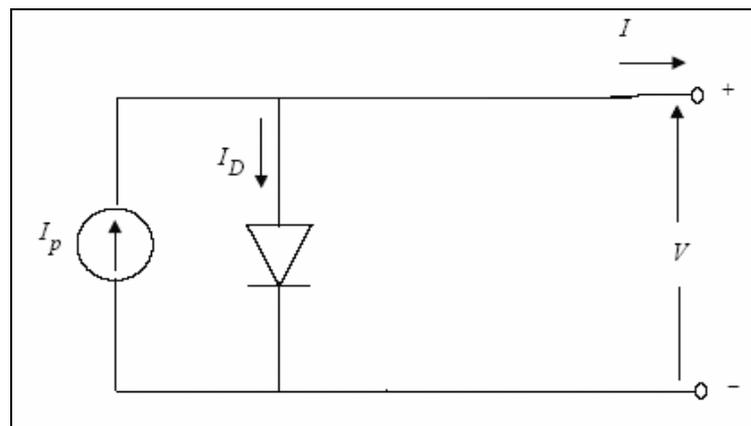


Figure I.8 : Schéma équivalent d'une cellule solaire idéale

I.5.2.2. La caractéristique courant tension :

La courbe caractéristique d'une cellule PV représente la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension aux bornes de la cellule PV depuis le court-circuit (tension nulle correspondant au courant maximum produit) jusqu'au circuit ouvert (courant nul pour une tension maximale aux bornes de la cellule).

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques dépend des conditions d'ensoleillement et de température à la surface de la cellule. Ainsi, chaque courbe courant tension correspond à des conditions spécifiques de fonctionnement.

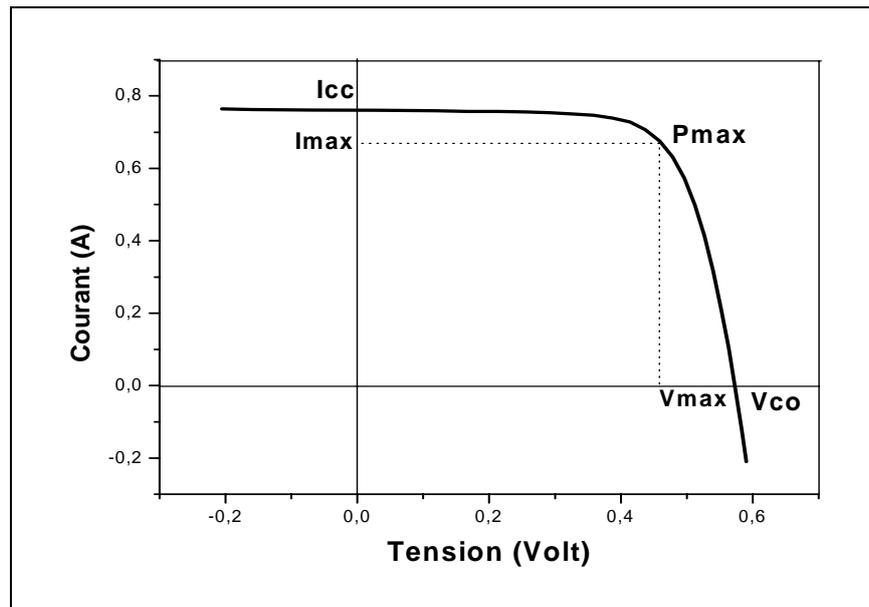


Figure 1.9 : Caractéristique I-V de la cellule solaire éclairée.

I.5.2.3. Paramètres caractéristiques

La caractéristique I-V d'une cellule solaire passe par trois points caractéristiques : I_{cc} , V_{oc} et P_{max} très important (voir figure 1.9). Ils interviennent de manière déterminante dans le calcul du facteur de forme et du rendement de la cellule [12].

➤ **Courant de court circuit, I_{cc}**

Le courant de court-circuit, I_{cc} , apparaît en un point de la courbe I-V où la tension est nulle. En ce point aussi, la puissance délivrée par la cellule est nulle. Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule c-à-d à l'éclairement $\Phi(W/m^2)$ et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement et de la température.

➤ **Tension en circuit ouvert, V_{oc}**

La tension en circuit ouvert, V_{oc} apparaît en un point de la courbe où le courant est nul. En ce point, la puissance délivrée par la cellule est nulle. Elle ne varie presque pas avec l'intensité lumineuse, elle ne dépend pas des dimensions. Dans le cas idéal, V_{oc} est donnée par la relation :

$$V_{oc} = \frac{KT}{q} \log \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (I.8)$$

➤ **La puissance caractéristique d'une cellule PV**

La puissance électrique P (W) produite par une cellule PV est égale au produit du courant continu fourni I par une tension continue donnée V :

$$P = V \cdot I \quad (I.9)$$

P(W), watt : Puissance mesurée aux bornes de la cellule PV

V(v), volt : Tension mesurée aux bornes de la cellule PV

I(A), Ampère : Intensité mesurée aux bornes de la cellule PV.

➤ **Puissance maximale, P_{max}**

Le courant I_m est la tension V_m correspondent respectivement au courant et à la tension pour les quelles la cellule solaire délivre sa puissance maximale P_{max} .

$$P_{max} = V_m \cdot I_m \quad (I.10)$$

I.5.2.4. Le facteur de forme, FF

On appelle facteur de forme FF le rapport entre la puissance maximale fournie par la cellule P_{max} , dans des conditions données, et le produit du courant de court-circuit I_{cc} par la tension de circuit ouvert V_{oc}

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} I_{cc}} = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{cc}} \quad (I.11)$$

Le nom « Facteur de Forme » dérive de la représentation graphique. Pour les bonnes cellules, FF est supérieur à 0.7. La résistance série et la conductance parallèle contribuent à la diminution de facteur de forme (FF).

I.5.2.5. Le rendement de conversion, η

Le rendement est le paramètre le plus généralement utilisé pour comparée les performances d'une cellule à une autre. Le rendement η des cellules solaires désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale, délivrée par la cellule à la puissance lumineuse incidente, P_0

$$\eta = \frac{P_{\max}}{SP_0} = \frac{FFI_{cc}V_{oc}}{SP_0} = \frac{I_m V_m}{SP_0} \quad (I.12)$$

S : est la surface de la cellule (m^2). Les valeurs typiques du rendement pour une cellule cristalline au silicium Si est de 6-25% et pour une cellule polycristalline de 6-20%.

Le rendement dépend du spectre, de l'intensité de la lumière incidente et de la température. Autrement les conditions sous les quelles le rendement est mesuré doit être contrôlé, à fin de comparer les performances d'un dispositif à un autre.

I.6. FACTEURS LIMITANT LE RENDEMENT

En pratique, la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique n'est pas totale. Différentes pertes viennent influencer le rendement d'une cellule solaire. Elles sont dans la plupart des cas dues à la nature du matériau et à la technologie utilisée [14-15].

I.6.1. Absorption incomplète

Les photons dont l'énergie est inférieure à l'énergie du gap du semi-conducteur sont dissipés sous forme de chaleur. Plus E_g est élevée, plus la perte augmente. Pour le silicium cette perte est estimée à 23%. (Zone A figure 1.10)

Comme on trouve une absorption incomplète due à l'épaisseur de la cellule, où une partie des photons qui bien qu'ayant l'énergie nécessaire, traversent l'épaisseur de la cellule sans être absorbés. Le terme devient important quand la cellule est très fine ($<100 \mu m$), et peut être minimisé en utilisant une couche réfléchissante sur la face arrière de la cellule (réflecteur arrière).

I.6.2. Utilisation partiel d'énergie des photons

Tous les photons absorbés dont l'énergie est supérieure à celle nécessaire pour la génération du pair électron-trou sont perdus. L'excès de cette énergie se transforme en chaleur. Dans ce cas, plus E_g est élevée, moins ce phénomène est probable. Combinant ceci et le facteur de perte précédent, il s'avère qu'une énergie du gap de 0.9 eV donne l'utilisation maximum du spectre solaire terrestre dans la génération des porteurs. Dans ce cas, l'énergie utilisée est environ 46% de toute l'énergie incidente.

Cependant, le silicium cristallin avec une énergie du gap 1.1 eV, utilise environ 44% de l'énergie incidente et ce n'est pas loin de l'optimum (Zone B Figure 1.10).

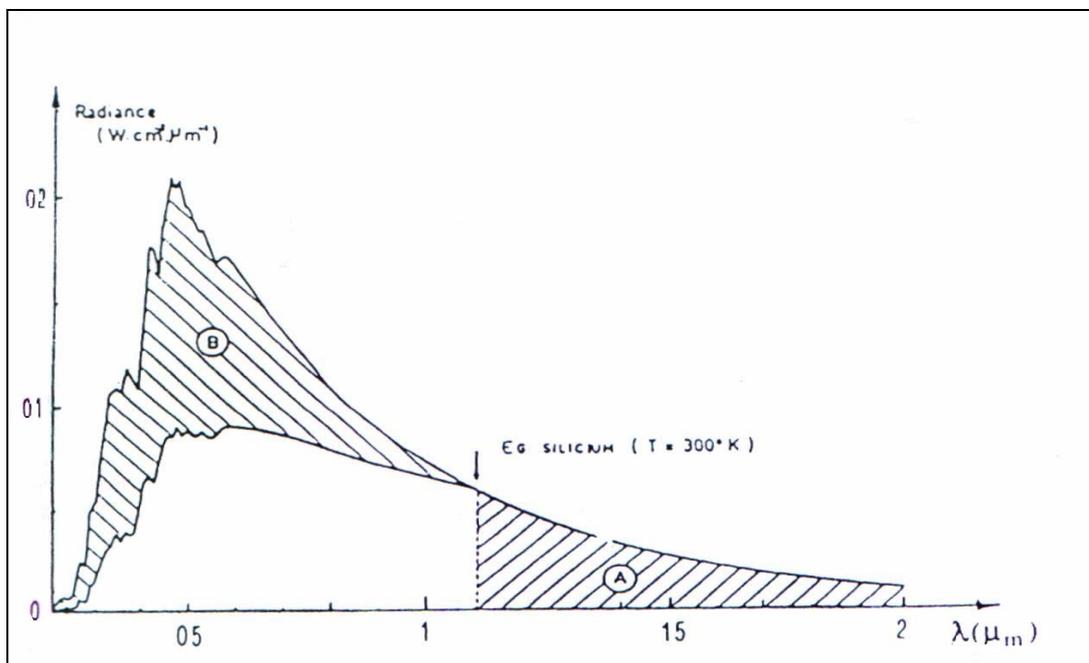


Figure 1.10 : Exploitation du spectre solaire AM0 par une Photopile en Si [14].

I.6.3. Réflexion

Le flux de photons absorbé par la cellule solaire PV ne représente qu'une fraction de flux incident, l'autre partie est perdue par réflexion à la surface. Les pertes par réflexion sont considérées comme un problème technologique qui peut être résolu et réduit jusqu'à 4 à 3 % par la mise en œuvre de traitements de surface par une seule couche anti-réfléchissante d'oxyde de Titanium (TiO_2) par exemple, ou par texturisation. Cette opération consiste en une attaque chimique de la surface du silicium. Cette attaque est

sélective en ce qui concerne les plans cristallographiques des matériaux et conduit alors à la création de pyramides de quelques microns d'hauteurs.

I.6.4. Rendement de collection

Seulement les électrons et les trous séparés par la DDP (différence de potentiel) peuvent atteindre les contacts et contribuent au courant de sortie. Le reste, qui se recombine dans le volume et à la surface avant et arrière, produit de la chaleur et n'effectue aucun travail utile. On l'appelle également « Rendement Quantique », correspond au rapport entre le nombre de porteurs de charge effectivement collectés et le nombre total photogénéré. Ce terme tient donc compte des recombinaisons de porteurs survenant dans le volume et en surface de la cellule, et il dépend directement de la durée de vie des porteurs minoritaires, aussi il dépend du coefficient d'absorption et surtout des caractéristiques des matériaux (puretés, défaut, propriétés électrique..).

Pour la plupart des cellules commerciales de bonne qualité, les pertes de collection sont maintenant moins que 5%.

I.6.5. Facteur de tension

Parmi les paramètres qui limitent le rendement de conversion d'une pile solaire, la largeur de la bande interdite E_g apparaît comme l'un des plus important. C'est en effet l'énergie nécessaire à la création de paire électron-trou. En outre, elle fixe la valeur de la tension de circuit ouvert. On emploie d'ailleurs le terme de facteur de tension pour exprimer le rapport entre ces deux:

$$F_v = \frac{V_{co} q}{E_g} \quad (I.13)$$

La phototension théorique maximale est la tension qui dépend de la concentration en impuretés. Celle-ci ne peut atteindre une valeur proche de la tension correspondant à la largeur de bande interdite, que pour des matériaux très dopés où le niveau de fermi est voisin du bord de bande.

I.6.6. Facteur de forme

Appelé aussi facteur de courbe (de remplissage), défini par :

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{cc}} \quad (I.14)$$

Le facteur de forme est inférieur à l'unité du fait du caractère exponentiel de la caractéristique courant tension de la cellule photovoltaïques. Un facteur de forme égale à 1 correspondrait en effet à une caractéristique I-V parfaitement rectangulaire. Ce paramètre dépend de la conception de la cellule, de la qualité de la jonction pn du matériau et de la résistivité des contacts métalliques.

I.6.7. Taux d'ombrage

Le taux d'ombrage, tient compte de la couverture partielle de la surface de la cellule par une partie opaque correspondant à la surface des contacts métalliques de la face avant. Il doit être minimale puisqu'il réduit proportionnellement le courant d'éclairement, car il empêche une partie du rayonnement incident d'atteindre la cellule. Il faut en outre que la collecte du courant par cette étroite surface métallisée s'accompagne de pertes minimales. Deux données qu'il paraît difficile de satisfaire simultanément.

Le taux d'ombre des photopiles se situe en principe entre 5 et 10% de la surface totale. Le choix de la technique de réalisation du contact de grille dépend de la géométrie recherchée, mais aussi du coût de l'opération lors d'une fabrication en série.

I.6.8. Résistance série

La résistance série R_s est due à la résistivité des différentes couches de la cellule, les résistances du contact des électrodes et la résistance de la grille collectrice. Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule. Ceci peut être réalisé en diminuant la résistivité du matériau utilisé [1].

Dans une cellule solaire, la résistance série cause un aplatissement de la caractéristique I-V. Elle ne modifie pas la tension de circuit-ouvert, mais lorsqu'elle est anormalement élevée, elle peut diminuer notablement la valeur du courant de court-circuit. C'est un facteur fondamental qui produit une chute de puissance à l'intérieur de la cellule. Dans le cas où la résistance shunt tend vers l'infini la puissance de sortie est donnée par:

$$P = IV = InU_T \log \left[1 + \frac{I_{ph} - I}{I_s} \right] - R_s I^2 \quad (I.15)$$

Où

$$U_T = \frac{KT}{q} \text{ est le potentiel thermodynamique}$$

L'équation fait apparaître une résistance série qui réduit de $R_s I^2$ la puissance utile du circuit extérieur. Le terme $R_s I^2$ devient excessif si R_s n'est pas rendue à des valeurs très faibles. La figure suivante représente l'influence du résistance série sur la caractéristique courant-tension $I = f(V)$ et sur la puissance générée aux de la cellule.

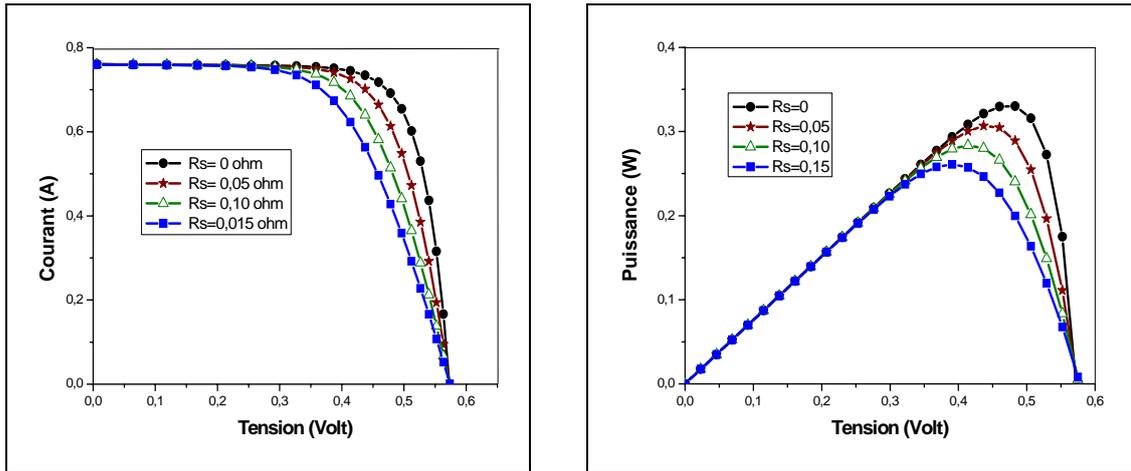


Figure 1.11 : Influence de la résistance série sur la caractéristique I-V et P-V d'une cellule solaire éclairée .

La figure suivante montre l'effet de la résistance série sur le rendement η et le facteur de forme FF.

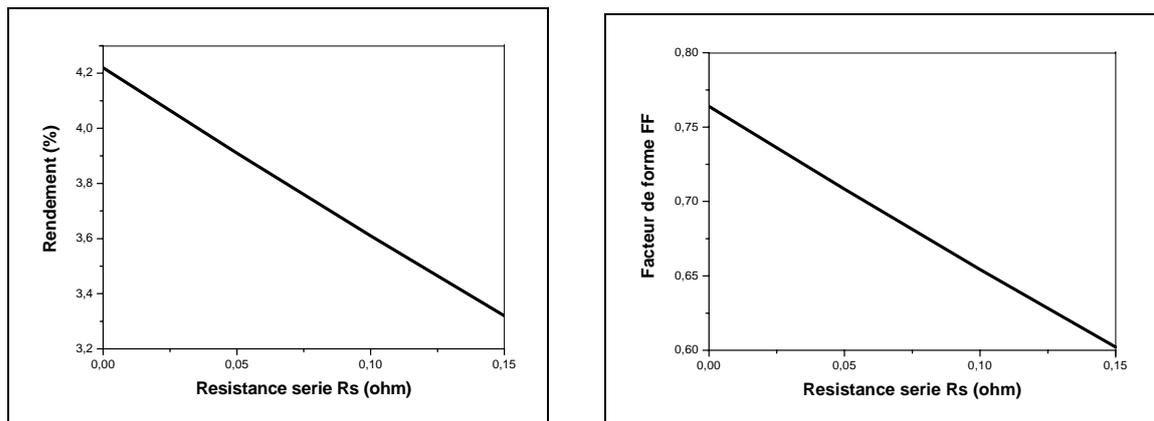


Figure 1.12 : Influence de la résistance série sur le η et FF [10].

I.6.9. Résistance parallèle

La résistance shunt $R_{sh} = \frac{1}{G_{sh}}$ est liée aux effets de bord et aux recombinaisons

volumiques. La pente de la courbe courant tension au point I_{cc} représente l'inverse de la résistance shunt. Cette valeur devra être la plus élevée possible [1].

Les figures ci-dessous montre l'influence de la résistance shunt R_{sh} , ou la conductance shunt G_{sh} sur la caractéristique courant tension et sur la puissance $P = f(V)$ d'une cellule solaire photovoltaïque. On peut facilement percevoir une anomalie à la lecture de la caractéristique $I-V$ par la présence d'une légère pente au voisinage du point de courant de court-circuit. La tension de circuit ouvert est diminuée et la zone basse tension présente une perte.

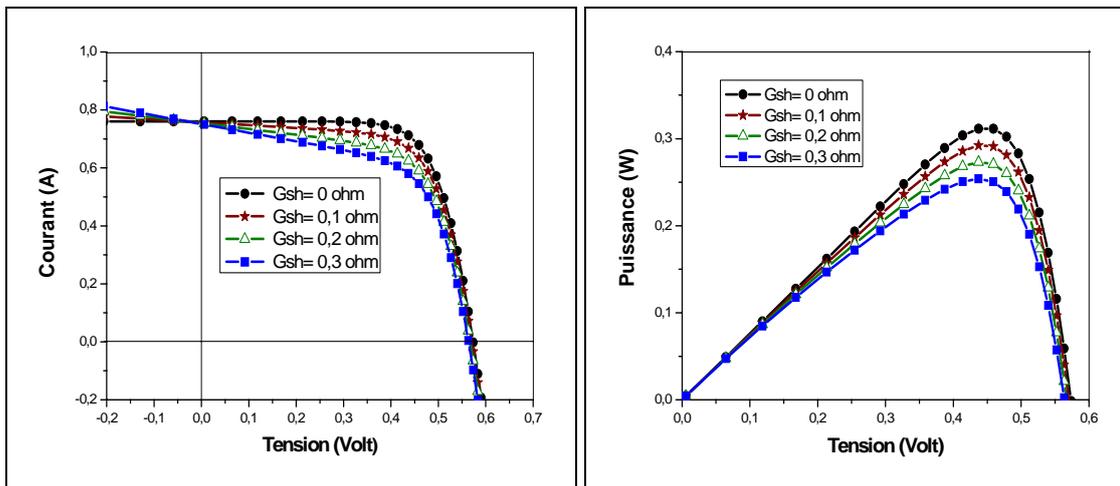


Figure 1.13 : Influence de la résistance shunt sur la caractéristique $I-V$ et $P-V$ d'une cellule solaire éclairée .

Dans la figure si après, l'influence de la résistance shunt sur le facteur de forme et le rendement de conversion.

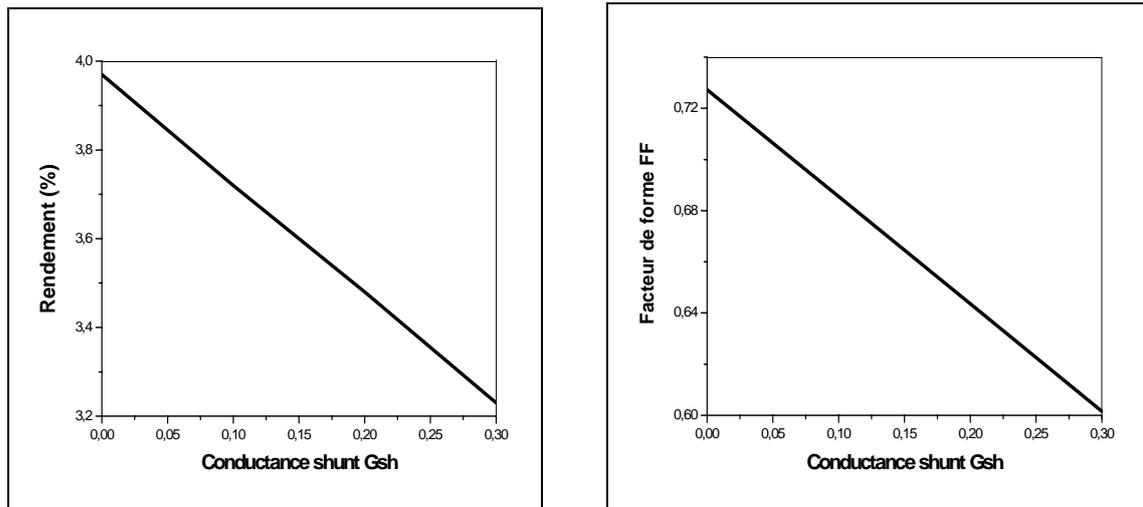


Figure 1.14 : Influence de la résistance shunt sur le rendement et le facteur de forme [10].

I.7. SCHEMA ELECTRIQUE EQUIVALENT D'UNE CELLULE SOLAIRE

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs dus à la fabrication et représentés sur le schéma équivalent par deux résistances ; une résistance série R_s et une résistance R_{sh} en parallèle sur le générateur de courant. La figure 1.15 montre un modèle électrique de la cellule solaire photovoltaïque.

L'équation caractéristique de la cellule réelle est alors donnée par :

$$\begin{aligned}
 I(V) &= I_{ph} - I_d(V) - I_p = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{nKT}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \\
 &= I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{\beta}{n}(V + IR_s)\right) - 1 \right] - G_{sh}(V + IR_s)
 \end{aligned}
 \tag{I.16}$$

avec :

$G_{sh} = 1/ R_{sh}$: est la conductance parallèle (l'inverse de résistance parallèle) ;

I_s : Courant de saturation ;

I_{ph} : Courant de photo-génération ;

$$\beta = q / KT ;$$

n : facteur d'idéalité de la diode ;

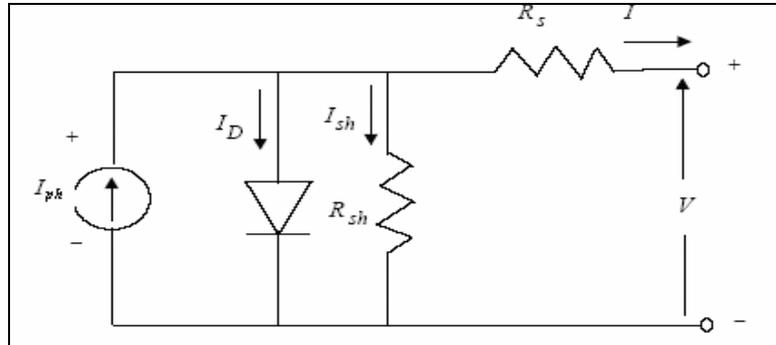


Figure 1.15 : Circuit équivalent d'une cellule solaire réelle éclairée.

Puisque le générateur photovoltaïque se composera de N cellules en série et M cellules en parallèle, la caractéristique I-V du générateur entier peut être dérivé en mesurant la caractéristique I-V d'une seule cellule avec un facteur de N en tension et M en courant. Cette opération est valable seulement pour des cellules identiques.

I.8. EFFET DE LA TEMPÉRATURE ET DE L'ECLAIREMENT SUR LA CARACTERISTIQUE I-V

L'irradiance et la température de la cellule solaire vont modifier la caractéristique I-V de la cellule, non dans sa forme générale, mais pour les valeurs I_{cc} , V_{oc} et le produit $I_m * V_m$.

I.8.1. Influence de la température sur le fonctionnement de la cellule

La température est un paramètre important dans le comportement des cellules solaires puisque les cellules sont exposées au rayonnement solaire, une très faible proportion est réfléchiée par la surface et environ 13% est extraite sous forme d'énergie électrique. En conséquence c'est plus de 85% de l'énergie incidente qui devra être dissipée sous forme de chaleur. Ceci conduit, sous rayonnement, à une température de fonctionnement relativement élevée si cette énergie non convertie en électricité n'est pas évacuée. Les performances électriques d'une cellule solaire au silicium sont très sensibles à la température [16].

Les courbes suivantes représentent l'évolution du courant et de la tension en fonction de la température de la cellule, les autres conditions extérieures restant fixes.

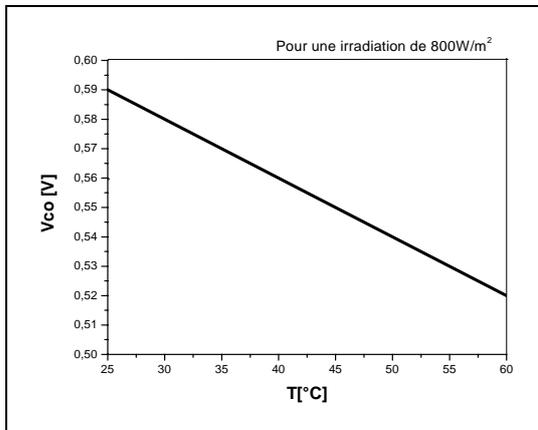


Figure 1.16: La tension V_{co} en fonction de la température [10].

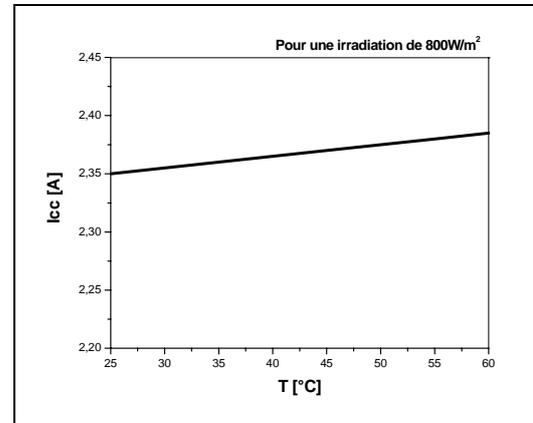


Figure 1.17 : Le courant I_{cc} en fonction de la température [10].

On observe une augmentation du photocourant, notamment à cause de la diminution de la largeur de la bande interdite, ce qui a permis d'utiliser un peu plus de photons de grande longueur d'onde. Par contre, la tension diminue et le point de puissance maximal se décale vers les faibles tensions [17].

Dans le cas d'une cellule au silicium, le courant augmente d'environ $25 \mu\text{A}/\text{cm}^2 \cdot \text{K}$, c'est-à-dire une variation de $0.1\%/K$, la tension de circuit ouvert décroît de $2.2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, soit une variation relative de 0.4% . Chaque degré de réchauffement occasionne une perte de rendement, ainsi que le point de puissance maximum peut connaître des variations significative et elle diminue de $0.4\%/K$.

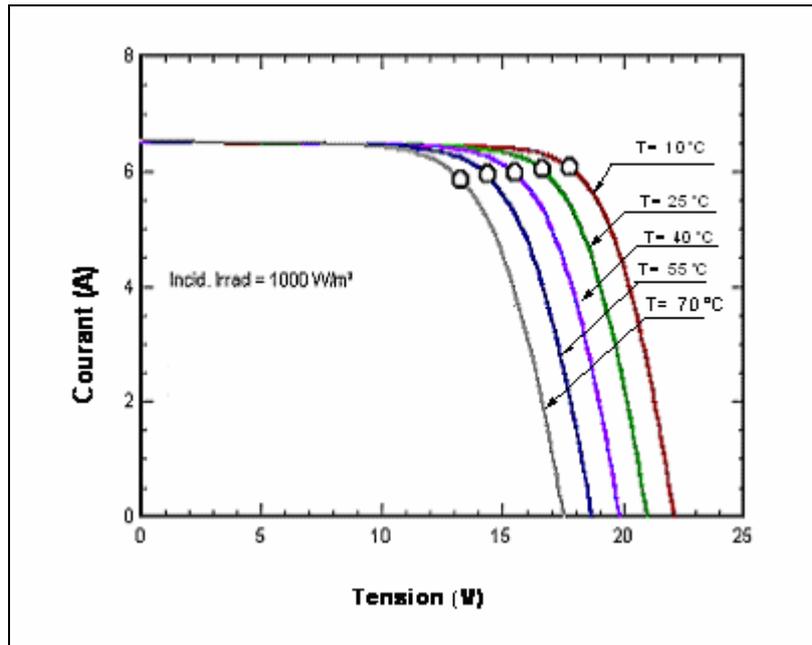


Figure 1.18 : Caractéristique courant tension d'une cellule PV à éclairement constant en fonction de la température [10].

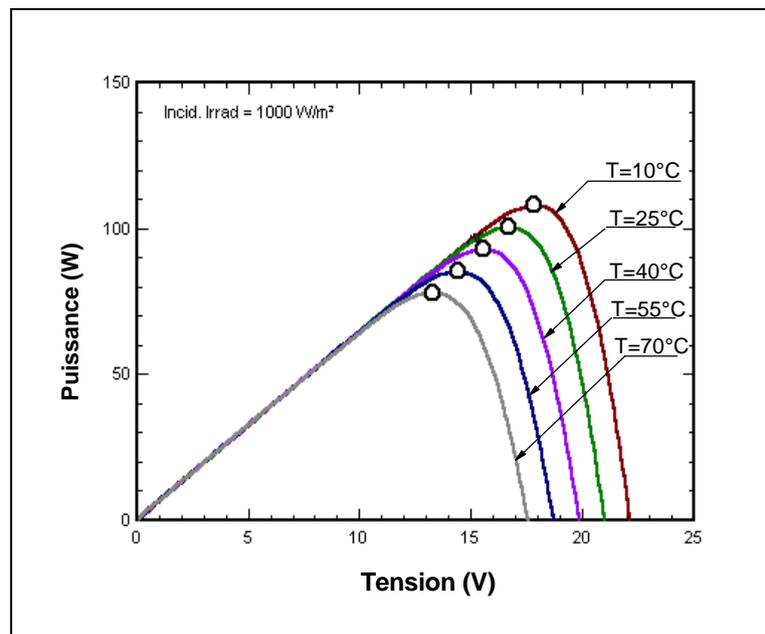


Figure 1.19: Influence de la température sur la puissance générée [10].

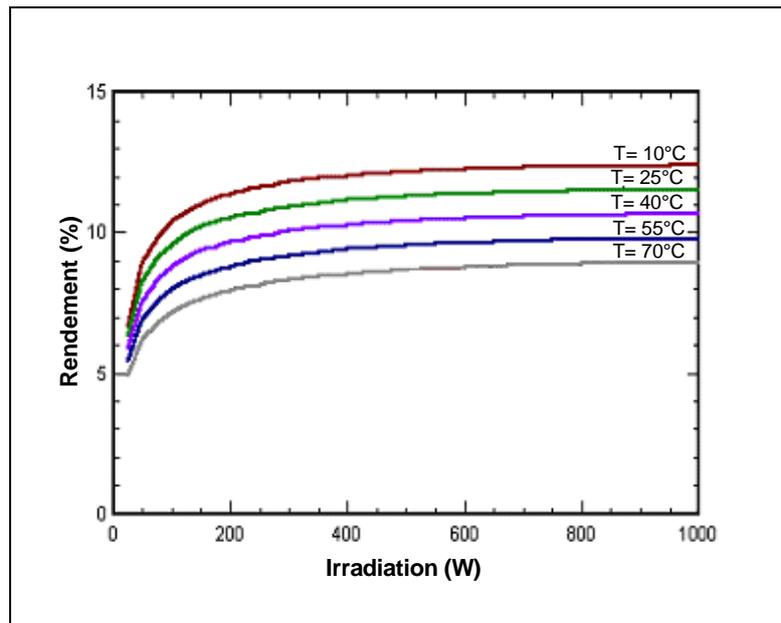


Figure 1.20 : Influence de la température sur le rendement de conversion [10].

I.8.2. Influence de l'éclairement sur le fonctionnement de la cellule

L'énergie électrique produite par une cellule PV dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. Le photocourant est pratiquement proportionnel à l'éclairement ou aux flux lumineux (à l'irradiation pour un spectre donnée). La figure suivante représente le réseau de courbe $I = f(V)$ obtenu pour une cellule solaire sous divers éclairement Φ et à température constante, T_0 .

Les figures suivantes permettent de visualiser l'influence de la valeur de l'éclairement sur le courant et la puissance. On peut également choisir de visualiser la puissance maximale qui fera apparaître la caractéristique $P = f(V)$.

On remarque également que le courant de court-circuit varie proportionnellement avec l'intensité du flux incident par contre une faible diminution de la tension en circuit ouvert lorsque le flux incident diminue [17].

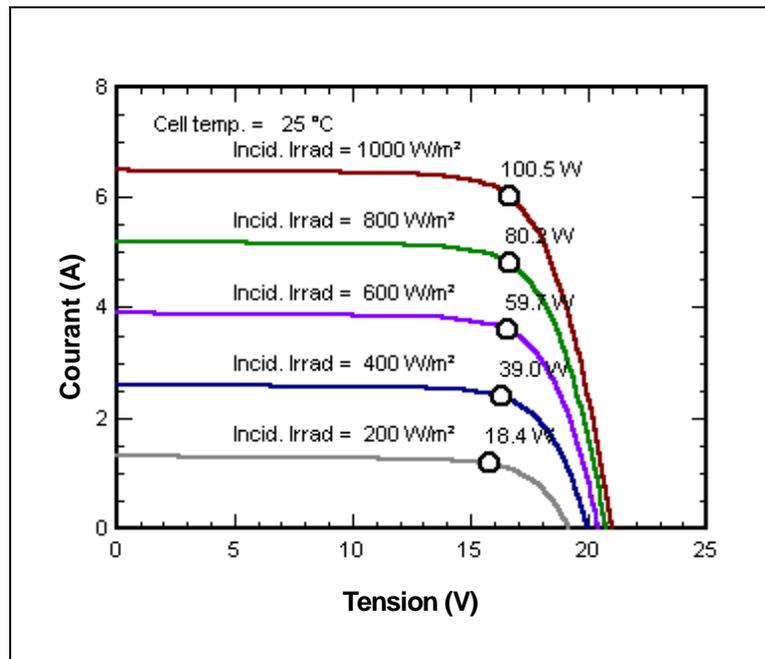


Figure 1.21: Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I-V$ [10].

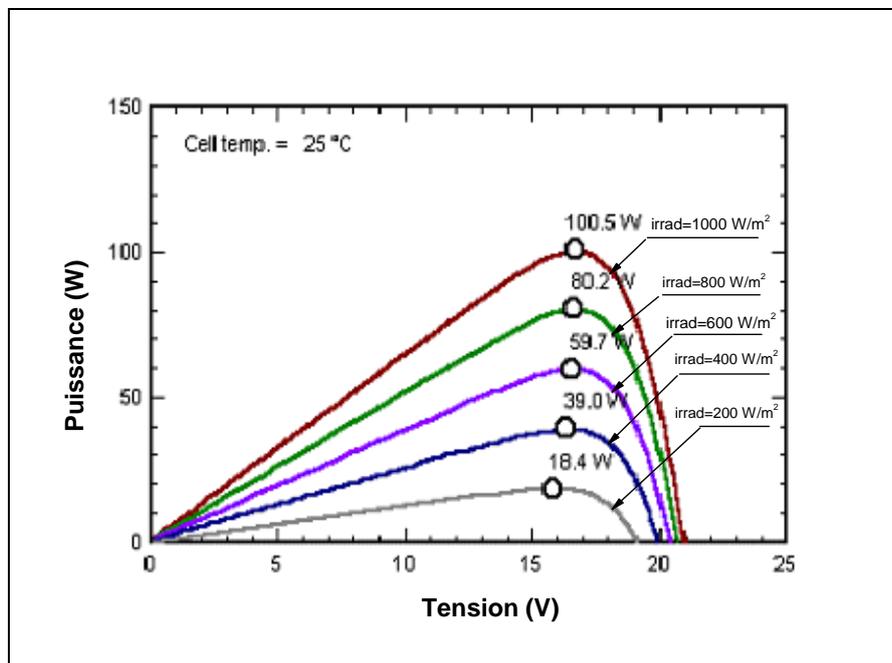


Figure 1.22 : Influence de l'éclairement sur la puissance générée [10].

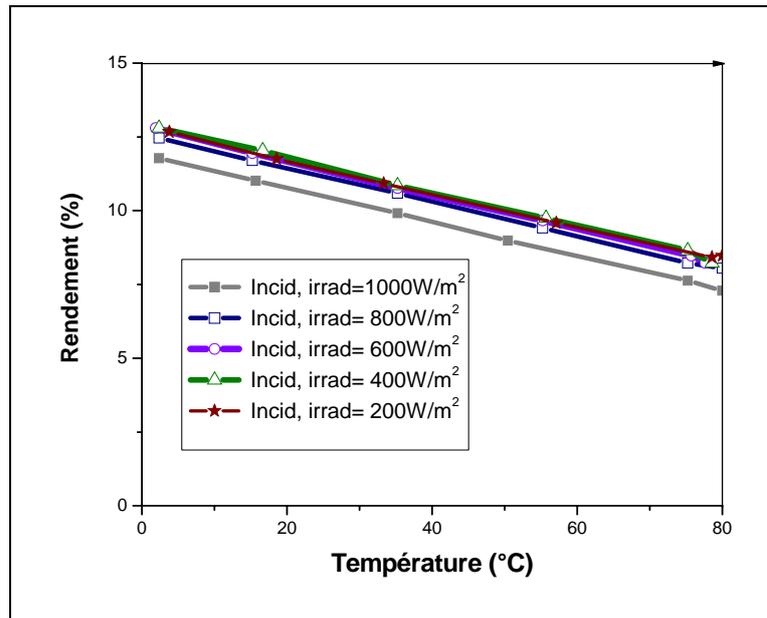


Figure 1.23 : Influence de l'irradiation sur le rendement de conversion [10].

I.9. MODULE PHOTOVOLTAÏQUE

I.9.1. Groupement de cellules

La cellule photovoltaïque ne produit qu'une très faible puissance électrique de 1 à 3 Watt avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module photovoltaïque. Les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension [11].

I.9.1.1. Groupement de cellules en série :

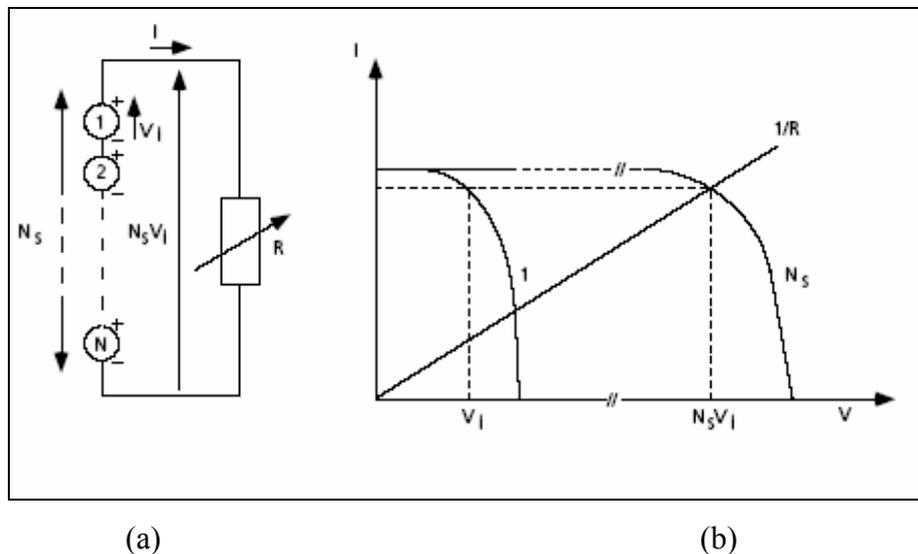
La tension générée par une cellule étant très faible, il faudra dans la majorité des cas associer en série un certain nombre de cellules pour obtenir des tensions compatibles avec les charges à alimenter. C'est ce qui est réalisé dans un module photovoltaïque, où les cellules sont positionnées sous forme d'une guirlande dont les deux extrémités sont ramenées vers une boîte de connexion. Les électrodes supérieures d'une cellule sont connectées à la face arrière de la cellule suivante [11].

La figure (I.24.a) correspondant à la mise en série de N_s générateurs de courant, le courant généré par les cellules est le même dans toute la branche ainsi que dans la charge. Il ne faudra connecter en série que des cellules identiques. La figure (I.24.b) présente la caractéristique courant-tension du groupement. La tension de groupement est égale à la somme des tensions délivrées par chacune des cellules.

$$V = \sum V_c \quad (\text{I.17})$$

V (Volt) : la tension du groupement.

V_c (Volt) : la tension de chacune des cellules d'indice 'c'.



(a)

(b)

Figure I.24 : Groupement de cellules en série [11].

I.9.1.2. Groupement de cellules en parallèle :

Il est possible d'augmenter le courant fourni à une charge en plaçant en parallèle plusieurs cellules ou modules photovoltaïques comme indiqué la figure (I.25.a). Les générateurs de courant représentent soit des cellules individuelles, soit des cellules en série (module), soit des modules en série (branche). Dans ce cas, c'est la tension générée qui est la même pour toutes les cellules (ou tous les modules ou toutes les branches). Donc, il ne faudra connecter en parallèle que des cellules (ou des modules, ou des branches) identiques [11].

Le courant de groupement sera égal à la somme des courants produits par chacune des cellules.

$$\begin{aligned}
 I &= \sum I_c \\
 I &= N_p I_c
 \end{aligned}
 \tag{I.18}$$

I (A) : courant circulant dans l'assemblage.

I_c (A) : courant circulant dans chaque cellule d'indice « c ».

N_p : nombre d'éléments en parallèle.

La figure (I.25.b) présente la caractéristique courant-tension pour le groupement parallèle considéré.

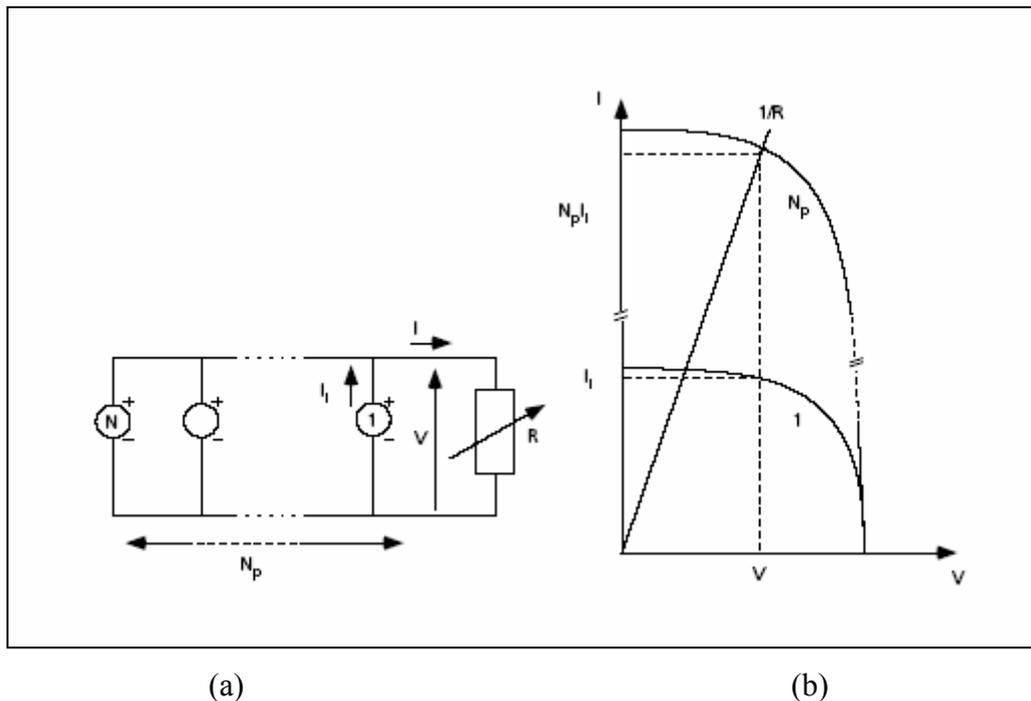


Figure I.25 : Groupement de cellules en parallèle [11].

I.9.1.3. Le panneau photovoltaïque

A fin d'obtenir des puissances supérieures, de quelque kW à quelque MW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer en série et en parallèle plusieurs modules. Une association série-parallèle de modules photovoltaïques aura une caractéristique I-V théorique semblable à la courbe du module de base, et obtenue en modifiant les échelles sur les deux axes. Il est évident que, de même que pour les cellules, il ne faudra associer en série-parallèle que des modules identiques. La figure (I.26) présente un tel groupement de N_{ms} modules en série dans une branche et de N_{bp} branches en parallèle. Si P_m , V_m et I_m sont les caractéristiques du module de base, les

caractéristiques correspondantes du panneau photovoltaïque seront : $N_{ms} \cdot N_{bp} \cdot P_m$ pour la puissance, $N_{ms} \cdot V_m$ pour la tension et $N_{bp} \cdot I_m$ pour le courant.

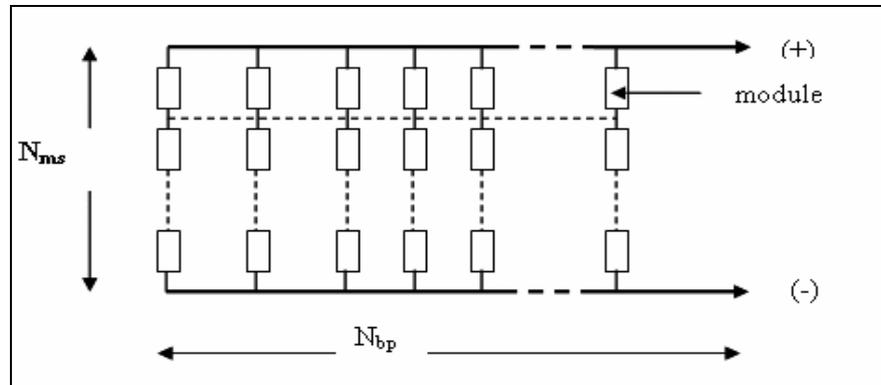


Figure I.26 : Panneau photovoltaïque [11].

I.9.2. Déséquilibres dans les groupements de cellules

Dans la réalité, malgré un tri soigneux des cellules et des modules, il arrive, d'une part que l'on trouve quelques disparités intrinsèques dans les caractéristiques électriques des cellules ou des modules, d'autre part que les conditions de fonctionnement induisent ces disparités [10-11].

Par exemple, l'occultation partielle d'une cellule par une feuille morte la transforme immédiatement en un récepteur, une charge électrique résistive, qui au lieu de générer de l'énergie va en recevoir de la part des autres cellules bien éclairées. Elle devra dissiper une énergie thermique qui peut dépasser largement l'énergie qu'elle est habilitée à dissiper de par sa structure et son encapsulation. On peut donc s'attendre à des dégradations redoutables qui peuvent aller jusqu'à l'incendie si des précautions ne sont pas prises au niveau des installations.

I.9.2.1. Déséquilibres dans un groupement série

Si une cellule est occultée (si elle ne reçoit plus qu'une faible partie de l'énergie solaire reçue par les cellules voisines), elle ne peut délivrer qu'un courant limité. Elle fonctionne donc en inverse (comme un récepteur soumis à une tension inverse de celle

produite en direct) par rapport aux autres cellules du module. Ces cellules délivrent un courant supérieur à ce courant limité. En fonctionnant ainsi, un échauffement de la cellule apparaît et peut provoquer le claquage de la cellule.

Les recherches sur ce sujet ont montré que dans le cas des cellules PV au silicium, au-delà d'une tension inverse de 20 V, la probabilité de claquage d'une cellule (destruction de la jonction électrique) devient importante. Pour limiter la tension inverse maximum susceptible de se développer aux bornes d'une cellule, les fabricants de modules photovoltaïques placent donc une diode parallèle, appelée diode by-pass, toutes les 18 à 36 cellules (selon les applications).

I.9.2.1. Déséquilibres dans un groupement parallèle

Cependant, si une ou plusieurs cellules sont occultées, elles deviennent réceptrices car la tension de fonctionnement est supérieure à la tension de circuit ouvert. Bien qu'une cellule puisse dissiper un courant important, il est préférable de disposer d'une diode anti-retour, laquelle empêche également de gaspiller dans une autre cellule occultée une partie de la puissance produite par les cellules fonctionnant normalement. Pour limiter ces pertes et protéger les cellules, on place donc une diode en série, appelée diode série, toutes les N cellules (n étant fonction des caractéristiques du montage).

I.10. CONCLUSION

Dans ce chapitre, les principales caractéristiques de la cellule solaire sont présentées. Nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire. Ensuite, nous avons présenté le principe de l'effet photovoltaïque pour comprendre le fonctionnement des cellules solaires. Les caractéristiques énergétiques et électriques de la cellule sont définies. Les différents facteurs limitatifs du rendement ainsi que l'étude de l'influence de la température et de l'éclairement sur le fonctionnement de la cellule solaire photovoltaïque sont présentés. En fin, la notion du module photovoltaïque ou groupement des cellules et le déséquilibre dans ses groupements ont été présentés.

Chapitre II

Les différents types de cellules solaires

II.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous essayons de donner un aperçu général sur les différentes filières employées dans le domaine photovoltaïque. Les différents types de cellules solaires sont présentés avec une description générale du silicium comme matériau de base dans le domaine photovoltaïque, avec un passage rapide sur l'évolution du rendement de conversion de différentes technologies.

II.2. LES DIFFERENTES FILIERES PHOTOVOLTAIQUES

L'un des facteurs prépondérants pour le choix du matériau est la largeur de son gap E_g . Il impose le nombre de photons du rayonnement solaire participant à la conversion et la tension de sortie de la cellule élémentaire [18].

Parmi les autres facteurs de choix figurent la disponibilité du matériau à l'état cristallin, la température de fonctionnement et la facilité de créer une jonction dans ce matériau.

Selon les matériaux utilisés, on réalisera des homojonctions, c'est-à-dire des jonction PN au sein d'un même semi-conducteur (silicium ou germanium) par implantation d'impuretés de type P ou N, ou des hétérojonctions à partir de deux semi-conducteurs différents (par exemple, composés de cuivre et de cadmium).

Les matériaux photovoltaïques se situent dans les colonnes 2, 3, 4 et 5 de la classification périodique (4 électrons sur la dernière couche), où le silicium est le plus utilisé, et sous formes de composés dits III-V et II-VI qui permettent des liaisons assurant une dernière couche électronique à 8 électrons. Les hétérojonctions à base de sulfures (CdS et Cu_2S) puis, plus récemment, à base de gallium (GaAs), font l'objet d'étude pour lequel des rendements prometteurs en laboratoire ont été obtenus [18].

La première technologie photovoltaïque recourt au silicium cristallin. On utilise les techniques de la microélectronique: fabrication de cellules de silicium sur des galettes de monocristaux par lithographie traditionnelle ou gravure au laser. Le silicium polycristallin, produit à partir des déchets de l'industrie électronique, assure des rendements relativement faibles. Le silicium monocristallin, actuellement des tranches de 6 pouces de diamètre, permet un meilleur rendement. Avec des rainurages et des concentrateurs, les rendements peuvent même être portés à 20%. L'inconvénient de cette technologie est son coût de production élevé.

La deuxième technologie fait appel aux couches minces de silicium amorphe. Elle est largement répandue. Elle est moins onéreuse, elle a aussi des rendements inférieurs. Autres matériaux semi-conducteurs que le silicium, par exemple le tellure de cadmium (CdTe) et le diséléniure d'indium et de cuivre (CIS). Le tellure de cadmium permet un rendement de 15%. Les jonctions cuivre/indium/sélénium se caractérisent par des rendements supérieurs à 15%, de même que les multijonctions à base d'arséniure de gallium (AsGa). Une voie prometteuse semble être celle des multi-couches, chacune d'entre elles étant sensible à des photons d'énergies différentes. Le rendement anticipé serait de 30%.

Le troisième type de technologie utilise de nouveaux matériaux en particulier les matériaux organiques (polymère et molécules).

II. 3. CELLULES SOLAIRES AU SILICIUM CRISTALLIN

Les cellules au silicium cristallin sont les plus répandues. Elles se présentent sous forme de plaquette rondes, carrées ou pseudo carrées. Si l'on parle de matériau cristallin, c'est parce que le silicium qui les constitue est ordonné, avec un arrangement parfait des atomes, selon une structure atomique ordonnée de type tétraédrique.

Si la photopile est constituée d'un seul cristal, on parle de silicium monocristallin, et elle a un aspect uniforme et gris bleuté, parfois noir. Si par contre la photopile est faite de silicium multicristallin (on dit couramment polycristallin), elle est composée de plusieurs cristaux assemblés, et présente l'aspect mosaïque compacte de fragments cristallins bleutés de quelques millimètres à quelques centimètres, appelés grain.

II.3.1. Propriétés photovoltaïques du silicium

L'industrie photovoltaïque est concentrée à plus de 90% sur l'utilisation de silicium comme matériau de base. Le silicium est le deuxième élément de la croûte terrestre après l'oxygène ou il existe le plus souvent sous sa forme oxydée (sable, silice, quartz). Ce dernier, se présente sous différentes forme (Fig II.1), les plus répandues étant le silicium monocristallin (m-Si), polycristallin (p-Si) et amorphe (a-Si).

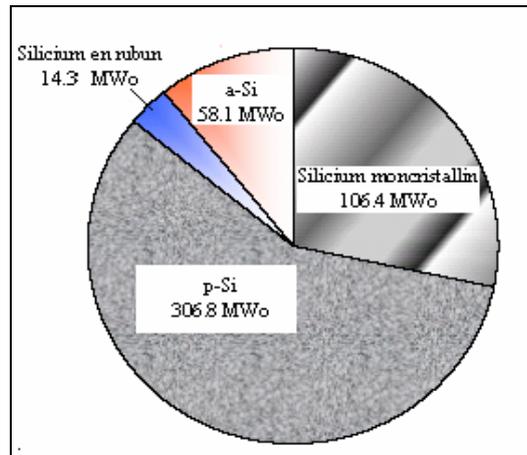


Figure II.1 : Répartition des différentes formes du silicium dans la production industrielle en 2003 [1].

Le silicium offre de nombreux avantages, c'est un matériau non toxique contrairement à certains matériaux semi-conducteurs III-V. Outre ses propriétés semi-conducteur, le silicium présente un oxyde naturel SiO_2 qui trouve de nombreuses applications en microélectronique. Enfin, il est aisé de modifier les propriétés électriques du silicium en introduisant dans la matrice cristallin des atomes dopants tel que le Bore (induisant un dopage de type P) ou le phosphore (induisant un dopage de type N) [19].

D'un point de vue photovoltaïque, le seul inconvénient du silicium réside dans sa structure électronique qui présente un gap indirect, gap à 1.12 eV ne correspondant pas exactement au maximum d'intensité du spectre solaire. Par conséquent, l'absorption du rayonnement solaire par le silicium sera plus faible que celle d'un semi-conducteur à gap direct comme l'arséniure de gallium GaAs.

II.3.2. Silicium solaire

Le silicium, à la base de toute l'industrie électronique moderne, est obtenu par réduction de la silice dans un four électrique, ce qui fournit le matériau dit métallurgique dont la pureté est de 98% environ. Celui-ci est purifié à son tour, sous forme de gaz trichlorosilane ou silane. Après pyrolyse de ces derniers, le matériau obtenu sert de produit de départ pour la croissance. Le silicium provient aussi des chutes de l'industrie

électronique, source qui devient depuis peu insuffisante. En 2001, pour 4200 tonnes de silicium cristallin utilisées, seulement 2200 tonnes provenaient des rebuts de l'industrie des semi-conducteurs. Les fabricants investissant dans l'industrie du photovoltaïque, annoncent de développer des techniques qui utiliseront moins de matière.

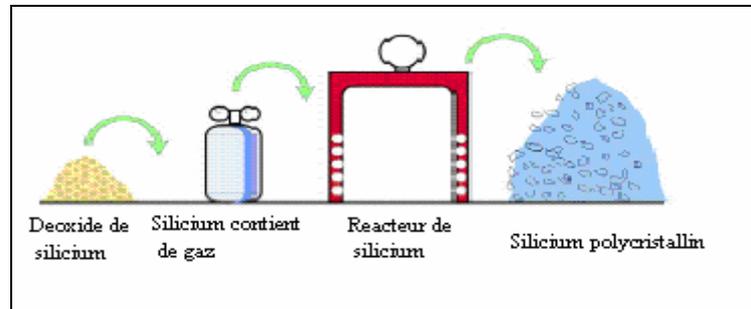


Figure II.2 : Les étapes de purification du silicium [25].

II.3.3. Silicium monocristallin

II.3.3.1. Technique de croissance de monocristaux

Pour passer de silicium pur, polycristallin, à un matériau monocristallin utilisable pour les composants électroniques, il existe deux méthodes :

- ❖ La première, la plus classique, connue sous le nom de procédé Czochralski, consiste à étirer des barreaux cylindriques à partir de silicium fondu et de scier ensuite ces barreaux en wafers.

Le polycristal est fondu dans un creuset avec un peu de dopage, par exemple le bore pour obtenir un matériau de base de type p. au sommet de ce bain, on place un bouture de silicium monocristallin dans l'orientation précise que l'on veut obtenir et l'on fait croître le cristal sous la bouture en tirant, tournant et contrôlant très précisément la température.

On fait croître ainsi dans la même orientation que la bouture des cristaux de 1 à 2m de long et jusqu'à 30 cm de diamètre. Pour obtenir des tranches de silicium (wafers) d'environ 200 à 400 μm , épaisseur utilisable, il faut ensuite couper le matériau avec une scie à fils.

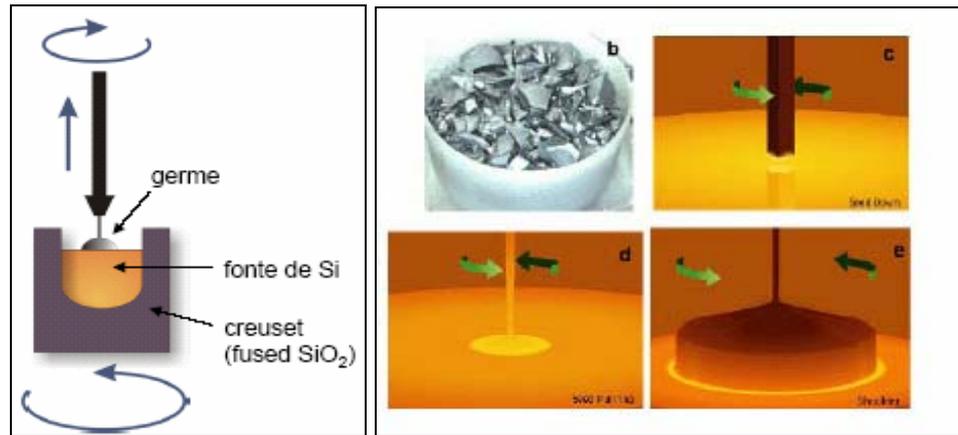


Figure II.3 : Tirage CZochralski [24-25].

❖ La deuxième, est connu sous le nom de la technique de la Zone Flottante (tirage FZ), Un lingot polycristallin et un germe monocristallin sont nécessaires, le premier étant disposé au-dessus du second et l'interface entre les deux étant fondue par des bobines RF de chauffage coulissantes qui repassent plusieurs fois pour répéter l'effet de ségrégation par la phase liquide aussi longtemps que nécessaire. Les impuretés s'accumulent dans la zone fondue ce qui implique une recristallisation de lingots poly-cristallin et une seconde purification.

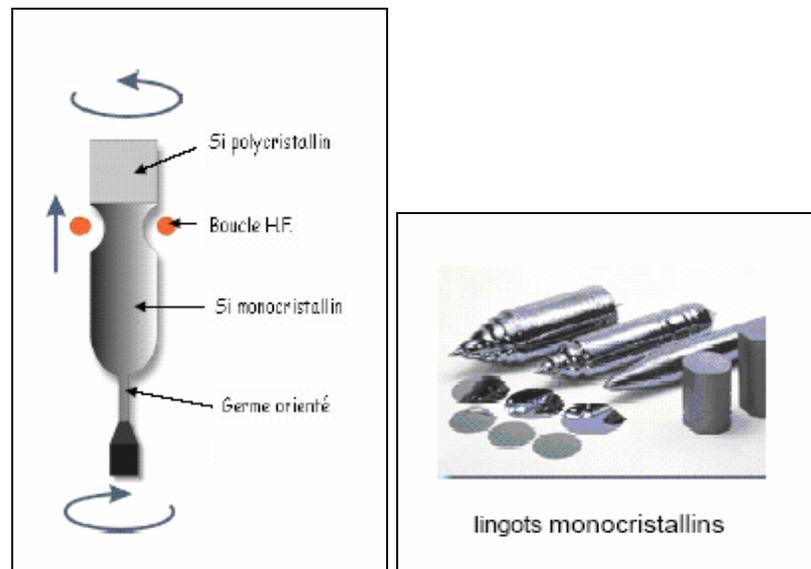


Figure II.4 : Tirage FZ [25].

II.3.3.2. Cellule monocristalline

C'est la cellule de la première génération, qui s'approche le plus du modèle théorique, ces cellules souffrent néanmoins de deux inconvénients d'une part leur prix élevé, d'autre part une durée d'amortissement de l'investissement en énergie élevée. Cette durée d'amortissement est le temps durant lequel une cellule solaire doit produire de l'énergie pour rembourser l'énergie qui a été nécessaire à sa production. Cette durée peut aller jusqu'à 7 ans pour les cellules monocristallines, cellules qui sont néanmoins tout à fait appropriées pour des applications nécessitant de bonnes performances, tels que les véhicules électro-solaires [22]. Les étapes de fabrication de cellule seront :

- ✓ Le décapage de la surface pour éliminer les défauts de sciage, on essaie en général d'obtenir une surface texturée en petites pyramides pour améliorer la collection de la lumière dans toutes les directions ;
- ✓ Une diffusion de phosphore pour réaliser la jonction (phosphine, 20 minutes à 900°C), ce dopage va contrebalancer le dopage initial p de la matière pour obtenir une couche n^+ en surface et n à la jonction;
- ✓ Un décapage de l'arrière et des côtés pour éliminer le phosphore amené partout lors de la diffusion mais non désiré ;
- ✓ Un dopage de l'arrière avec de l'aluminium (sérigraphie et cuisson), ce qui crée une surface améliorant la collection des porteurs.
- ✓ Le dépôt d'une couche antireflet sur l'avant;
- ✓ Le dépôt de la grille de métallisation sur l'avant;
- ✓ Le dépôt d'un métal soudable sur l'arrière;
- ✓ Le test et tri de toutes les cellules fabriquées.

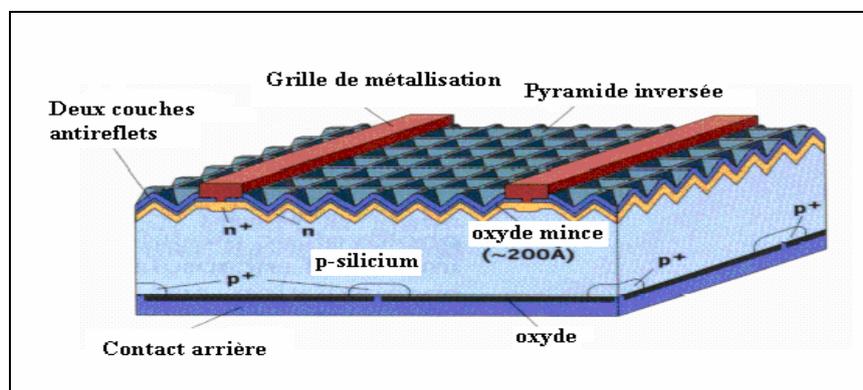


Figure II.5 : Cellule au silicium monocristallin [30].

La cellule au silicium monocristallin couramment disponible sur le marché atteint actuellement les rendements les plus élevés. Ces procédés assez onéreux, ainsi que l'utilisation d'un matériau de grande pureté et d'une grande quantité d'énergie pour sa fabrication, font de la cellule monocristalline la plus chère du marché.

II.3.4. Silicium polycristallin

II.3.4.1. Technique de croissance de polycristallin

Par contre, dans un polycristal, les monocristaux sont séparés les uns des autres par des zones perturbées, les joints de grains et chaque cristal de plus petite dimension n'a pas la même orientation que son voisin. On privilégiera les techniques de croissance qui assurent la formation d'une structure colonnaire avec de gros cristaux (d'où l'appellation silicium polycristallin, p-Si) afin de limiter les effets néfastes des joints de grains. Cette technique par solidification directionnelle, où des blocs de plus de 250 kg peuvent être obtenus par refroidissement contrôlé du silicium en fusion dans un moule de nature appropriée (souvent en quartz), est plus rapide et moins coûteuse en énergie qu'une croissance d'un lingots Cz ou FZ (24 à 48 h contre quelques semaines pour ces derniers). Cependant ce matériau contraint et disloqué est également contaminé par des impuretés résiduelles de la charge de silicium constituée par des rebuts de l'industrie de la microélectronique [23].

Pour fabriquer ce matériau, on refond tous les déchets provenant du tirage de monocristaux dans un creuset carré à température et atmosphère contrôlées. Le bloc obtenu est souvent un gros rectangle de 22 cm de côté et 15 cm de profondeur qui sera ensuite taillé en 4 parts de 10 x 10 x 15 cm avant d'être débité en wafers [23].

Le procédé économise ainsi de la surface, les wafers étant carrés et le rendement en matière est bon, les seules pertes provenant des bords en contact avec le creuset qui sont contaminés par des impuretés du creuset. La recristallisation a également pour effet d'améliorer localement la pureté du matériau, les impuretés étant concentrées aux frontières entre cristaux.

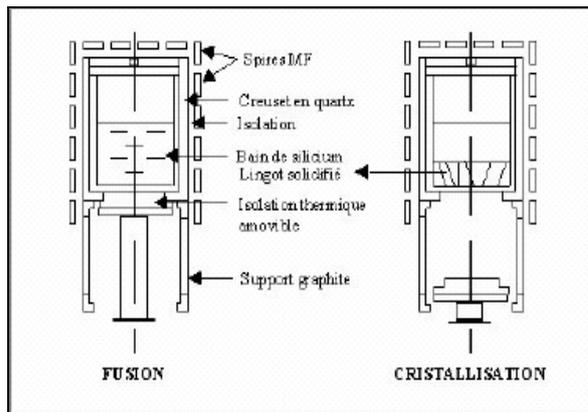


Figure II.6: Principe de croissance par solidification directionnelle [28].

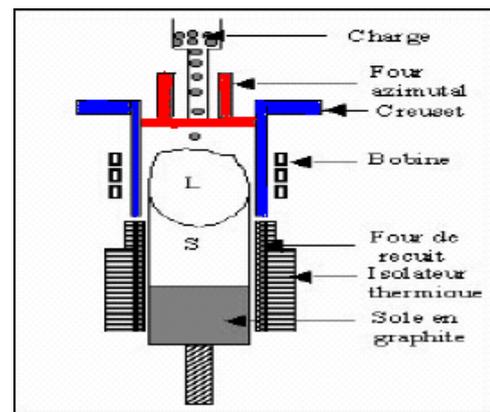


Figure II.7: Principe de croissance de silicium en coulée continue en creuset [28].

II.3.4.2. Cellule polycristalline

Le principal défaut des cellules monocristallines est leur coût qui provient en grande partie de l'utilisation d'un matériau de grande pureté et demandant beaucoup d'énergie pour sa fabrication. Les cellules polycristallines jouent un rôle de plus en plus important dans les marchés photovoltaïques. Bien qu'elles soient moins efficaces que les cellules monocristallines. Elles se caractérisent par un important avantage coût/watt par rapport à beaucoup de processus monocristal sur le marché. Les caractéristiques électriques des cellules polycristallines sont similaires aux monocristallines (même gap), seuls certains défauts différencient ce matériau qui est actuellement le plus utilisé pour les cellules dont les rendements de conversion atteignent 11 à 15% en général [28,29]. Les principales étapes de fabrication du matériau, de la cellule et du module sont récapitulées dans la figure ci-dessous.

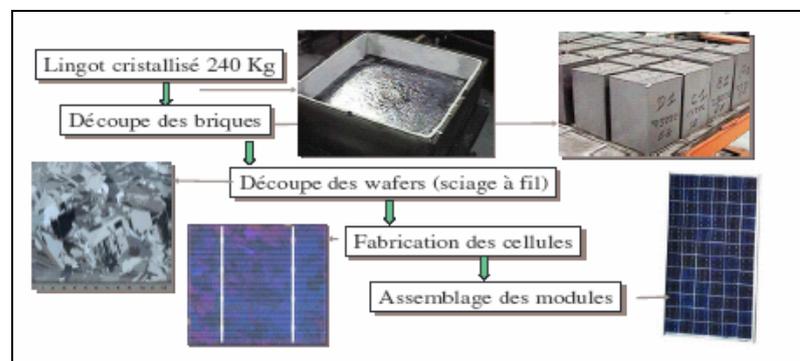


Figure II.8 : Principales étapes de fabrication du matériau, de la cellule et du module [28].

II.4. CELLULE SOLAIRE EN COUCHES MINCES

Les cellules PV en couches minces constituent ce que certains appellent les cellules de seconde génération car elles font historiquement suite aux cellules en silicium cristallin relativement épaisses. L'intérêt de la technologie couche mince vient de la faible quantité de matériau nécessaire à la fabrication d'une cellule comparativement aux cellules classiques. Contrairement aux cellules silicium monocristallin, on ne dépose que la quantité de matériau photosensible efficace pour absorber l'essentiel du rayonnement solaire (quelques microns d'épaisseur suffisent). Par ailleurs, on utilise des méthodes de fabrication moins coûteuses qui permettent de plus d'utiliser des substrats flexibles. Les cellules couche mince les plus développées utilisent comme matériau de base le silicium amorphe, le Diséléniure de Cuivre Indium (CIS) et le Tellurure de Cadmium (CdTe).

II.4.1. Cellule au silicium amorphe

II.4.1.1. Silicium amorphe, a-Si

Le silicium amorphe, a été la première technologie en couche mince, apparu en 1976, est une forme non cristalline du silicium. Sa structure atomique est désordonnée, non cristallisée, mais il possède un coefficient d'absorption supérieur à celui du silicium cristallin ce qui autorise de très faibles épaisseurs de l'ordre du micron diminuant ainsi le risque de pénurie de silicium avec une faible consommation énergétique durant le cycle de production. Son défaut structural a été corrigé en ajoutant l'hydrogène qui sature les liaisons pendantes. Le silicium amorphe est souvent comparé au silicium cristallin car il est du même matériau (le silicium), et qu'il fait aussi partie de la famille des semi-conducteurs. Par contre, il se distingue de son cousin cristallin par des avantages [31] :

- ✓ Possibilité de le déposer en grandes surfaces unitaires de l'ordre de m^2 d'un seul tenant.
- ✓ Possibilité de le déposer sur des surfaces non planes ou souples : intéressant pour la déposition sur cylindres ou sphère.
- ✓ Facilité de fabrication et technologie basse température ($<300^\circ C$).
- ✓ Forte absorption de la lumière visible.
- ✓ Bande interdite (gap) plus élevée (1.7eV contre 1.1eV pour le silicium cristallin), qui permet d'obtenir des courant inverses dans l'obscurité plus faible.

Par contre, ses deux points faibles sont le rendement de conversion et la dégradation sous lumière, qui est de mieux en mieux surmontés par des artifices technologiques tel qu'en particulier par une superposition de deux structures *P-I-N* en "tandems" ou de trois couches actives très minces. On a réduit ainsi la dégradation sous lumière de 30% à 10%.

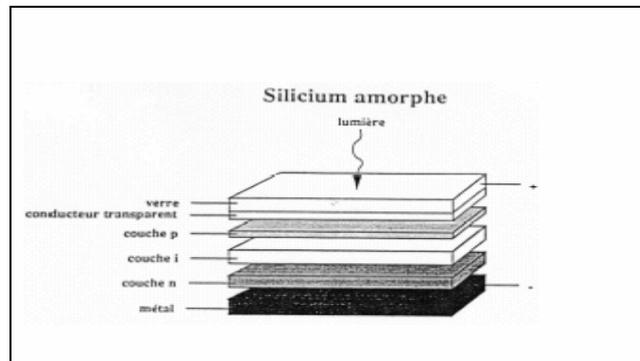


Figure II.9. Cellule au silicium amorphe [28].

L'application de silicium amorphe dans la fabrication des cellules photovoltaïques (Figure II.9), utilisé le plus souvent dans des alimentations qui nécessitent de petites puissances, ce type de cellules solaires est assez répandu dans les calculatrices, les montres ou les chargeurs de batteries. De tels dispositifs sont réalisés par une structure de diode, la mise en contact de deux couches dopées provoque la création d'un champ électrique. En comparaison avec les cellules cristallines, la seule différence essentielle d'une cellule amorphe réside dans le fait que les deux zones dopées ne sont pas directement mises en contact, une couche intrinsèque est déposée entre ces deux couches. Les couches dopées amorphes sont de mauvaise qualité (beaucoup de défauts), les charges créées dans ces couches ne pourront pas être collectées (car la recombinaison domine). La couche intrinsèque est donc nécessaire afin que les paires électron-trou responsable de l'effet photovoltaïque puissent être collectées [31].

II.4.1.2. Procédé de fabrication

La fabrication des cellules PV au silicium amorphe (Figure II.9) nécessite moins de silicium et moins d'énergie que celle des cellules au silicium cristallin. Avec ce type de matériau peu coûteux par rapport aux autres formes de silicium, on a de faibles rendements (5 à 6%) et des problèmes de stabilité apparaissent rapidement lorsqu'on l'expose au soleil et aux intempéries (à partir de quelques centaines d'heures).

Le procédé de fabrication des cellules photovoltaïques au silicium amorphe comporte plusieurs étapes distinctes [28]:

- ❖ **La préparation du support :** le support peut prendre la forme d'un substrat rigide (en général du verre) ou semi-rigide (silicium métallurgique en ruban, quartz ou céramique par exemple). Il est découpé à la dimension désirée (qui définira également ses caractéristiques électriques: puissance, tension de sortie...).
- ❖ **Le dépôt de l'électrode :** on dépose sur le substrat une pellicule transparente à base d'oxyde d'étain qui servira d'électrode transparente dans un four à passage.
- ❖ **Le dépôt du film de silicium amorphe :** Dans cette technologie, le silicium est produit directement sur le support à partir du gaz silane SiH_4 . En fait, les plaques de verre sont placées dans une enceinte chauffée où l'on fait le vide, puis du silane est injecté et décomposé par une décharge radiofréquence; le silicium libéré se dépose alors sur les plaques. La présence d'hydrogène est également nécessaire pour la qualité du matériau. L'adjonction des dopants est réalisée par ajout de gaz phosphore PH_3 ou borane B_2H_6 au silane.
- ❖ **La découpe de film de silicium amorphe :** la pellicule de silicium amorphe est découpée au laser.
- ❖ **Le dépôt de l'électrode par évaporation :** l'électrode (généralement de l'aluminium) est déposée par évaporation. Deux rubans en aluminium étamé sont soudés par ultrason de part et d'autre de la surface active pour obtenir les sorties.
- ❖ **L'encapsulation et le moulage du cadre :** les modules PV au silicium amorphe sont protégés sur leur face arrière par un film vinyle, par adhésion sur un support plastique ou par une deuxième plaque de verre. Les modules sont contrôlés avant d'être mis sur le marché.

II.4.2. Autres matériaux en couches minces

Les nouvelles couches minces, semblent représenter une alternative à la technologie cristalline. Le tellure de cadmium (CdTe), l'arséniure de gallium (GaAs) ainsi que le diséléniure de cuivre et d'indium (CIS) donnent de grands espoirs aux chercheurs. Toutes

ces filières ont permis d'obtenir des photopiles ayant des rendements supérieurs à 16 % en laboratoire. La figure suivante montre un module en couche mince.

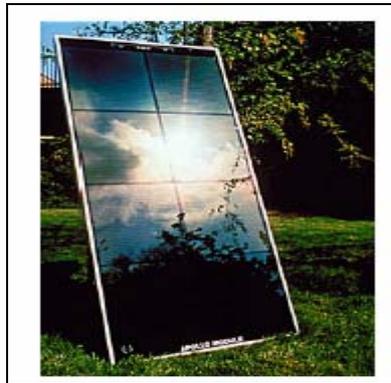


Figure II.10 : Module en couches minces [30].

❖ Matériaux à base de tellurure de cadmium

Ce matériau est intéressant du fait de ses propriétés optiques optimales, c'est-à-dire une bande interdite directe de l'ordre de 1.5 eV et une grande absorption dans tout le spectre solaire. Il est ordinairement déposé sur du CdS (sulfure de cadmium) de type n, qui sert de couche avant, pour former une hétérojonction (jonction à deux matériaux). Les résultats de laboratoire sont très intéressants avec notamment un rendement de 15%. Des problèmes non dérisoires se posent, à savoir [18] :

- ✓ La difficulté de réaliser des contacts électriques ohmiques stables.
- ✓ Les meilleurs rendements ont été obtenus sur des cellules utilisant comme substrat le silicate de bore, substrat fort coûteux.
- ✓ La diffusion du sodium de verre ne semble pas profiter au CdTe et, au contraire, le sodium paraît avoir un effet négatif sur la durée de vie des porteurs minoritaires dans les cellules de CdTe.
- ✓ La sensibilité de cette cellule à la vapeur d'eau.
- ✓ L'agressivité pour l'environnement, du fait de la présence du Cd qui est toxique et polluant.

❖ Matériaux à base de CIS

Le diséléniure de cuivre et d'indium (CIS) est un matériau composé de type I-III-VI, de structure chalcopyrite, très prometteur pour la conversion photovoltaïque, puisque le rendement de l'hétérojonction (n) CdS- (p) CuInSe₂ se situe autour de 25%.

Il s'agit d'un semi-conducteur assez particulier. Jusqu'alors réalisé sous vide selon des méthodes onéreuses. Le coefficient d'absorption est très important. Le CIS est composé d'atomes de sélénium, gros et immobiles, d'indium, plus petits, et surtout de cuivre, mobiles. Ils forment un réseau cristallin irrégulier et instable: des atomes étrangers de fer, d'or ou de sodium se rencontrent couramment et les atomes composant le CIS n'ont pas tous des places bien définies au sein de la structure. En fait, si des défauts apparaissent régulièrement dans la structure cristalline du semi-conducteur, ils sont tous aussi régulièrement réparés. L'acteur principal de cette guérison est le cuivre qui se déplace au hasard dans le solide. Ainsi, il n'y a quasiment pas de dégradation au cours du temps : les photopiles réalisées avec une couche de CIS par Siemens-Solar sont quasi intactes après huit ans de fonctionnement à l'extérieur. Ce procédé présente un triple avantage [17-18]:

- ✓ Il confère de bonnes performances aux cellules photovoltaïques: rendement de conversion supérieur à 10%, grande stabilité chimique.
- ✓ Il est bien adapté pour traiter de grandes surfaces telles que des façades en verre ou des verrières de toits.
- ✓ Il diminuerait nettement les coûts de fabrication des modules photovoltaïques.

❖ **Matériaux à base AsGa**

Les cellules photovoltaïques en couches minces qui adoptent le composé semi-conducteur arséniure de gallium (AsGa), sont caractérisées par un haut rendement mais sont très coûteuses dans leur fabrication. Sous forme de cellule polycristallin en couche mince, le AsGa présente de faible performance mais, utilisé sous forme de monocristal, il peut permettre des rendements de conversion élevés. Leur utilisation est aujourd'hui essentiellement limitée aux applications spatiales [18].

Par ses propriétés physiques, le AsGa se rapproche beaucoup du matériau optimal pour les photopiles. En raison de son coefficient d'absorption élevé dans le spectre visible, toute la lumière est absorbée par une couche de surface dont l'épaisseur ne dépasse pas 1 μm . L'arsenic est un produit rare et cher dont le coût pour un degré de pureté élevé. Le gallium n'est pas aussi rare, mais un matériau de grande pureté.

II.5. LA CELLULE SOLAIRE ORGANIQUE

La troisième génération de cellules solaires utilise de nouveaux matériaux, en particulier matériaux organiques, et de nouvelles techniques de fabrication qui structurent la matière à l'échelle du nanomètre. Bien qu'encore caractérisées par des efficacités relativement faibles par rapport à leurs équivalents inorganiques, les cellules organiques pourraient révolutionner le marché du PV grâce à leur faible coût de fabrication et leur facilité d'utilisation (flexibilité, légèreté).

II.5.1. Semi conducteur organique

Un semi-conducteur organique est un composé organique, sous la forme d'un cristal ou d'un polymère, qui montre des propriétés similaires aux semi-conducteurs inorganiques. Ces propriétés sont la conduction par les électrons et les trous, ainsi que la présence d'une bande interdite. Ces matériaux ont donné naissance à l'électronique organique, ou électronique des plastiques. Par organique, on entend que les molécules utilisées sont à base de carbone, comme les molécules à la base de la vie. On dit *organique* par opposition aux semi-conducteurs inorganiques, tel le silicium [5].

Le caractère SC d'un matériau organique est dû à la présence d'un système conjugué, c'est-à-dire à l'alternance de liaisons simple et doubles. La différence de longueur des liaisons permet d'envisager deux formes résonnantes énergétiquement équivalentes schématisées sur la figure suivante [32].



Figure II.11 : Forme résonnantes d'un système conjugué [32].

La conductivité dans un semi-conducteur organique est assurée par les porteurs de charge, dont on connaît bien deux sortes : les électrons (électrons π^*) et les trous (électrons π non paires). Généralement, les solides organiques sont isolants. Toutefois, dans les cristaux organiques formés par des molécules contenant des liens conjugués π , ou encore les polymères contenant des liens conjugués π , les électrons peuvent circuler librement dans les recouvrements de nuages d'électrons π , ce qui permet la conduction d'électricité. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques sont des exemples de ce type de semi-conducteur. Malgré tout, les polymères conducteurs ont une grande résistance,

comparativement aux conducteurs inorganiques. On peut doper les matériaux organiques avec des métaux pour augmenter leur conductivité [5].

Les semi-conducteurs organiques possèdent des caractéristiques similaires aux semi-conducteurs inorganiques. Le tableau suivant présente leurs correspondances de façon succincte :

S-C inorganique	S-C organique
Bande de valence	HOMO
Bande de conduction	LUMO
Bande interdite	Bande interdite

LUMO : Orbitale moléculaire non occupée la plus basse.

HOMO : Orbitale moléculaire occupée la plus haute.

De plus, comme les semi-conducteurs inorganiques, les semi-conducteurs organiques peuvent être dopés, c'est-à-dire qu'on peut y produire des électrons en excès (dopage N) ou des trous (dopage P). Cependant, cette technique est trop énergétiquement coûteuse pour doper des films de semi-conducteurs organiques, ces derniers étant trop fragiles pour ce genre d'intervention. La technique préconisée est donc d'exposer le film de semi-conducteur organique à une vapeur d'un oxydant ou d'un réducteur, ce qui aura comme effet d'arracher ou d'ajouter des électrons au film.

II.5.2. Effet photovoltaïque dans les cellules solaires organiques

L'effet photovoltaïque est basé sur la conversion lumineuse en énergie électrique. Cette conversion implique un ensemble de processus physiques (Figure II.12) [12] :

- **Absorption des photons incidents et génération d'excitons** : l'absorption des photons par le matériau organique, contrairement à l'inorganique, engendre des excitons (un exciton est formé d'une paire électron-trou liée par attraction électrostatique).
- **Diffusion et dissociation des excitons** : le mouvement de l'exciton dans le matériau s'effectue par saut d'une molécule à une autre, jusqu'à ce qu'il atteigne un site de dissociation qui permet de séparer les porteurs de charges. Cette séparation peut être obtenue suivant divers processus : une excitation thermique,

présence d'impuretés, champ électrique généré, et selon les structures, par la jonction de deux semi-conducteurs de nature et de type différents (hétérojonction), ou par la barrière de potentiel entre un métal et un semi-conducteur (diode Schottky).

- **Transport et collection de charges:** le transport de charges vers les électrodes est contrôlé par la mobilité des porteurs dans les couches organiques. Celle-ci est affectée par la recombinaison des charges et les interactions avec les atomes et les charges du milieu.

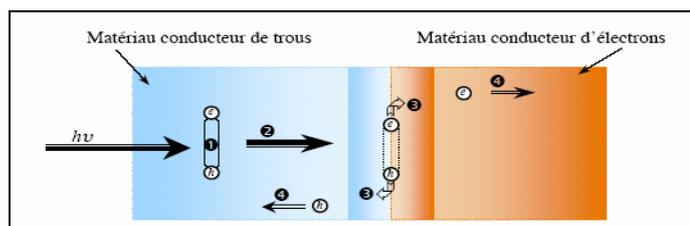


Figure II.12 : Schéma descriptif montrant les étapes de génération du photocourant [1].

II.5.3. Structures des cellules photovoltaïques organiques

II.5.3.1. La structure bicouche

Appelée aussi structure hétérojonction ou PN; elle est composée de deux matériaux de natures différentes (donneur et accepteur d'électrons) mis en contact entre deux électrodes (figure II.13). Les interfaces donneur/anode (ITO) et accepteur/cathode (Al) sont ohmiques.

Dans ce cas, la zone active pour la conversion photovoltaïque se trouve à l'interface entre le donneur et l'accepteur. Le champ électrique créé à cette interface est dû à la différence entre le potentiel d'ionisation du donneur et l'affinité électronique de l'accepteur. Il permet la dissociation des excitons qui atteignent ce site. Ainsi, les charges libres vont migrer séparément vers leurs électrodes respectives : les électrons par l'accepteur vers la cathode et les trous par le donneur vers l'anode [12].

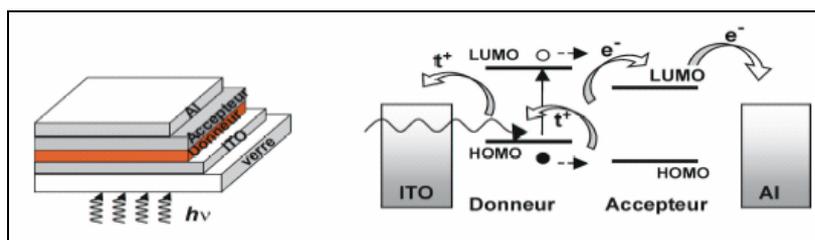


Figure II.13 : Structure d'une cellule hétérojonction et les niveaux d'énergie [12].

II.5.3.2. Structure réseau interpénétré

Appelée aussi structure hétérojonction en volume, elle consiste en une couche composite de donneur (D) et d'accepteur (A) déposée entre deux électrodes (figure II.14). Le principal avantage de cette structure est que le mélange des deux matériaux (D et A) permet de multiplier les zones interfaciales entre eux et de réduire ainsi les problèmes de pertes par recombinaison des excitons photogénérés loin de l'interface (recombinaison bimoléculaire) [12].

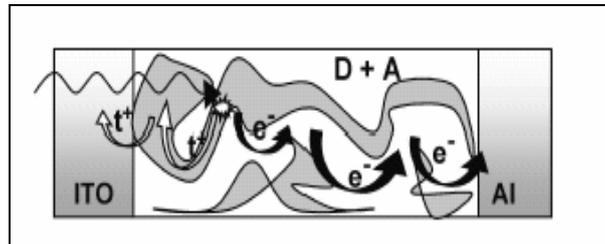


Figure II.14 : Structure d'une cellule à hétérojonction en volume [12].

II.5.3.3. Structure laminée

Dans cette structure, le donneur et l'accepteur sont déposés sur l'anode (ITO) et la cathode (Al) respectivement. Ensuite, les deux plaquettes obtenues sont mises en contact, en appliquant une légère pression et en chauffant l'une d'elle (figure II.15). Ainsi, les molécules peuvent diffuser d'une couche à l'autre pendant le processus de laminage pour former une couche de mélange D+A, où les excitons peuvent se dissocier. La structure laminée présente l'avantage d'élaborer et de traiter indépendamment les deux couches organiques [12].

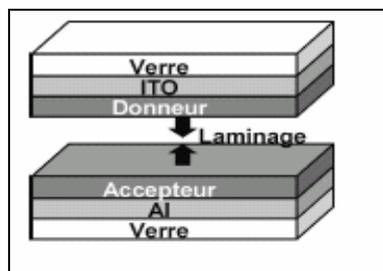


Figure II.15 : Structure laminée.

II.6. RENDEMENT DE CONVERSION DES DIFFERENTS MATERIAUX

La figure II.16 représente l'évolution des rendements des cellules photovoltaïques des différents matériaux : à base de silicium cristallin, de couches minces à base de silicium amorphe ou polycristallin ou de chalcogénures (CIS) et les nouveaux matériaux organiques.

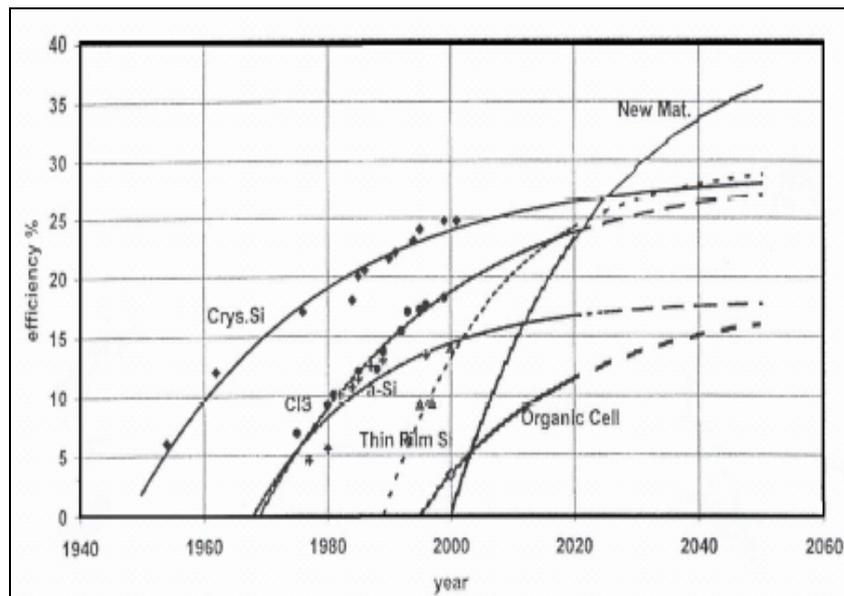


Figure II.16 : Evolution des rendements des cellules photovoltaïques [28].

Les matériaux à base de silicium cristallin évoluent sans cesse, vers des substrats plus minces, des film minces de Si cristallisés sur des substrats étranger ou transférés par pelage sur un verre ou un plastique et sans oublier les potentialités des matériaux nano ou microcristallins afin que cette filière reste compétitive dans les vingt ans à venir avec les matériaux en couches minces (CIS, ...) [28].

En effet, c'est à l'horizon 2010-2015 que la plupart des experts entrevoient une production industrielle plus significative à base de films minces avant l'émergence de nouveaux concepts de cellules à base de matériaux polymères ou organiques (actuellement respectivement 3 et 10 % de rendement en laboratoire avec encore des problèmes de stabilité) [28].

II.7. CONCLUSION

Ce chapitre nous a permis d'aborder et de présenter les différentes technologies utilisées dans le domaine photovoltaïque pour la production des cellules solaires, ainsi que le matériau de base constitutif du dispositif le silicium et ses propriétés photovoltaïques.

La technologie actuelle mise en œuvre et les matériaux utilisés (silicium) limite la commercialisation de ces dispositifs en raison de leurs coûts élevés. Depuis quelques années, les cellules photovoltaïques à base de matériaux organiques sont développées dans le but de remplacer les cellules à base de silicium et de réduire le coût des technologies utilisées.

Cependant, les cellules PV à base de matériaux organiques nécessitent des investigations supplémentaires afin d'améliorer le rendement de conversion et la stabilité de la cellule. Le meilleur rendement obtenu avec ces cellules est inférieur à 4 % et un rendement minimal de 10 % est vraisemblablement requis pour un développement industriel. Dans le but d'améliorer les performances des cellules organiques, de nombreux matériaux et différentes architectures ont été développés.

Chapitre III

Extraction des paramètres des cellules solaires

III.1. INTRODUCTION

Les cellules solaires doivent être contrôlées une fois que leur fabrication est terminée et pendant leur utilisation normale sur site et sous différentes conditions de température et d'éclairement. Cependant, l'évaluation des performances de telles cellules nécessite la connaissance d'un certain nombre de paramètres à partir des données expérimentales. Ces paramètres sont le courant de saturation I_s , la résistance série R_s , le facteur d'idéalité n , la résistance parallèle R_{sh} (ou conductance parallèle G_{sh}) et le photocourant I_{ph} .

On trouve dans la littérature plusieurs méthodes d'extraction des paramètres proposées par plusieurs auteurs qui ont considéré l'évaluation des paramètres un sujet de recherche très important [33-42]. La majorité d'entre elles extraient les paramètres à partir de la caractéristique $I-V$ expérimentale. Certaines méthodes utilisent la caractéristique $I-V$ mesurée sous éclairement impliquant un seul ou différents niveaux d'éclairement [33-36], d'autres méthodes suggérées impliquent les deux conditions d'éclairement et d'obscurité [37-39], d'autres encore utilisent les mesures dynamiques [40-41] ou bien des procédures d'intégrale [42] basées sur le calcul de la surface sous la courbe courant-tension.

On peut répartir les méthodes d'extraction en différentes classes :

- Des méthodes standards: l'analyse de la partie linéaire de $\log(I)$ en fonction de V .
- Méthodes basées sur les intégrales du courant par rapport à la tension.
- Méthodes basées sur la construction d'une fonction auxiliaire: faire des manipulations algébriques des données $I-V$ pour construire des fonctions auxiliaires simples.
- Méthodes basées sur la conductance: Ces méthodes sont basées sur la dérivées du courant par rapport à la tension.
- Méthodes basées sur les algorithmes d'optimisations.

La caractéristique courant-tension ($I-V$) de la cellule solaire peut être présentée soit par un modèle à deux diodes ou bien par un modèle à une seule diode. Sous des conditions de fonctionnement normal, le modèle à une seule diode est le modèle le plus utilisé pour les cellules solaires.

Dans ce cas, la caractéristique courant-tension ($I-V$) d'une cellule solaire sous éclairement est donnée par la relation :

$$\begin{aligned} I &= I_{ph} - I_d - I_p \\ &= I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{\beta}{n}(V + IR_s)\right) - 1 \right] - G_{sh}(V + IR_s) \end{aligned} \quad (\text{III.1})$$

Ici I_d est le courant de la diode et I_p décrit le courant parallèle passant à travers la résistance parallèle R_{sh} ($R_{sh}=1/G_{sh}$). I_{ph} , I_s , n et R_s sont respectivement le photocourant, le courant de saturation, le facteur d'idéalité et la résistance série. $\beta = \frac{q}{kT}$ est l'inverse de la tension thermique. k est la constante de Boltzmann, T est la température et q la charge électrique. A l'obscurité le photocourant est nulle, $I_{ph}=0$.

Ce modèle peut être appliqué aussi pour des modules où les cellules sont reliées en séries ou en parallèle, à condition que ces cellules soient identiques.

Dans la section suivante, différentes méthodes d'extraction des différents paramètres, proposées par plusieurs auteurs, ont été revues. Une nouvelle méthode qui permet d'évaluer les différents paramètres caractéristiques de différentes cellules solaires et des groupements de cellules sous éclairement, a été proposée.

III.2. METHODES D'EXTRACTION DES PARAMETRES DE LA CELLULE SOLAIRE

III.2.1. Méthode des différents niveaux d'illumination

Wolf et Rauschenbach [33] ont proposé une méthode de détermination de la résistance série à partir de la caractéristique $I-V$ obtenue sous deux niveaux d'éclairement qui donne I_{cc1} et I_{cc2} respectivement, comme courant de court circuit. La détermination graphique en chaque courbe, de l'abscisse V_1 et V_2 des points tels que les ordonnées sont

$$I_i = I_{cci} - \delta \quad (i=1,2) \quad (\text{III.2})$$

avec une intensité arbitraire δ , mène a

$$R_s = \frac{V_1 - V_2}{I_{cc1} - I_{cc2}} \quad (\text{III.3})$$

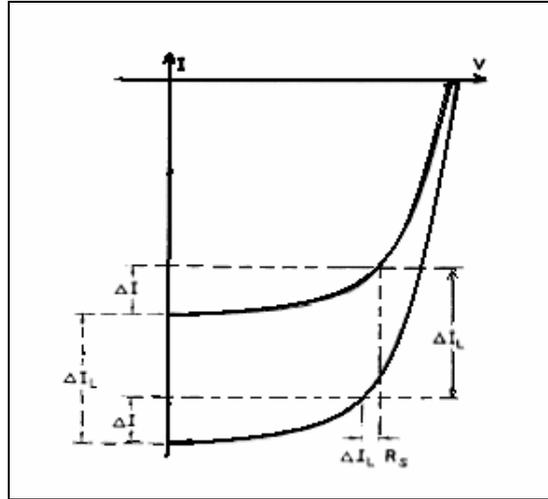


Figure III.1 : Méthode de graphique de détermination de R_s

III.2.2. Méthode de la surface

Soit A la surface entre la caractéristique $I-V$ sous un éclairage constant et les axes du courant et de la tension. En considérant le modèle à une seule exponentielle, une résistance parallèle, R_{sh} , infinie et un facteur d'idéalité constant, n , cette technique montre que la résistance série R_s peut se mettre sous la forme suivante [14] :

$$R_s = 2 \left(\frac{V_{co}}{I_{cc}} - \frac{A}{I_{cc}^2} - \frac{nkT}{qI_{cc}} \right) \quad (\text{III.4})$$

III.2.3. Méthode du point de puissance maximale

Cette méthode utilise la caractéristique courant- tension ($I-V$) de la cellule solaire sous un éclairage constant et un modèle à une seule diode avec une résistance parallèle infinie et un facteur d'idéalité constant. L'expression de la résistance série, R_s , obtenue est donnée [14] par :

$$R_s = \frac{V_m}{I_m} - \frac{1}{\beta (I_{ph} - I_m)} \quad (III.5)$$

Ou

$$\beta = \left(\frac{1}{2V_m - V_{co}} \right) \cdot \left[\frac{I_m}{I_{ph} - I_m} + \ln \left(\frac{I_{ph} - I_m}{I_{ph}} \right) \right] \quad (III.6)$$

Avec : $I_{ph} = I_{cc}$

Il a été montré que cette technique et la précédente présentent un inconvénient majeur. Celui ci réside dans l'obtention d'une valeur négative de la résistance série R_s , ce qui n'a pas de sens physique.

III.2.4. Méthode de Warashina et Ushirokawa

Warashina et Ushirokawa [43] ont développé une méthode graphique élégante pour obtenir la résistance série R_s et le facteur d'idéalité n . Ces auteurs utilisent la résistance dynamique au lieu de la conductance dynamique, ils ont choisi de tracer $-\frac{dV}{dI}$ en fonction de $(I_{cc} - I)^{-1}$. La valeur de R_s a été obtenue à partir de $-\frac{dV}{dI}$ lorsque $(I_{cc} - I)^{-1}$ tend vers zéro.

Cette méthode a été critiquée par d'autres auteurs [44] qui ont confirmé que l'application de cette méthode nécessite des valeurs de R_s très basse (environ 0.01 Ω) ou un courant parallèle très faible.

III.2.5. Méthode d'optimisation verticale

Cette méthode se base sur un algorithme d'optimisation des moindres carrés non linéaires basée sur la méthode de Newton modifiée par l'introduction du paramètre de Levenberg. Elle a été proposée par Easwarakhanthan et al [45] et utilisée pour l'extraction des cinq paramètres de la cellule solaire éclairée. Le problème était de minimiser la fonction objective S respectivement à l'ensemble des paramètres P.

$$S(P) = \sum_{i=1}^N [I_i - I_i(V_i, P)]^2 \quad (\text{III.7})$$

Où P est l'ensemble des paramètres inconnues $P = (I_{ph}, I_s, n, R_s, G_{sh})$ et I_i, V_i sont le courant et la tension mesurés respectivement au i^{eme} point de N points mesurés.

La méthode de Newton est employée pour obtenir une approximation à la solution exacte pour l'ensemble résultant de l'équation non linéaire $F(P) = 0$. Le procédé de Newton est donné par :

$$(P_j) = (P_{j-1}) - [J(P)]^{-1} F(P) \quad (\text{III.8})$$

Où $J(P)$ est la matrice du Jacobi

III.2.6. Méthode analytique des cinq points

La méthode consiste à calculer les paramètres caractéristiques de la cellule solaire à partir des valeurs de la tension en circuit ouvert V_{co} , du courant de court circuit I_{cc} , de la tension V_m et du courant I_m au point de fonctionnement maximum, la pente au point, R_{s0} , du circuit-ouvert et la pente au point, R_{sh0} , du court-circuit mesuré à partir de la caractéristique $I-V$, les expression dérivée sont données par [46] :

$$R_{sh} = R_{sh0} = - \left. \frac{dV}{dI} \right|_{I=I_{cc}} \quad (\text{III.9})$$

$$n' = \frac{\beta A}{B + C'} \quad (\text{III.10})$$

Avec

$$\begin{aligned} A &= V_m + R_{s0} I_m - V_{co} \\ B &= \ln \left(I_{cc} - \frac{V_m}{R_{sh0}} - I_m \right) - \ln \left(I_{cc} - \frac{V_{co}}{R_{sh}} \right) \\ C' &= \frac{I_m}{I_{cc} - \frac{V_{co}}{R_{sh}}} \\ I_s &= \left(I_{cc} - \frac{V_{co}}{R_{sh}} \right) \exp \left(-\beta \frac{V_{co}}{n} \right) \end{aligned} \quad (\text{III.11})$$

$$R_s = R_{s0} - \frac{n'}{\beta I_s} \exp\left(-\beta \frac{V_{co}}{n'}\right) \quad (\text{III.12})$$

$$I_{ph} = I_{cc} \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) + I_s \left(\exp \beta \frac{I_{cc} R_s}{n'} - 1\right) \quad (\text{III.13})$$

$$\text{Où } R_{s0} = - \left. \frac{dV}{dI} \right|_{V=V_{co}} \quad (\text{III.14})$$

$$n = 10 n' \quad (\text{III.15})$$

Les deux paramètres R_{s0} et R_{sh0} sont obtenus à partir de la caractéristique mesurée par une simple régression linéaire.

La méthode analytique à cinq points donne de bons résultats. Elle est plus rapide et plus simple. L'inconvénient de cette méthode consiste dans la connaissance des paramètres $(I_{cc}, V_{co}, I_m, V_m)$ ce qui introduit des incertitudes en mesurant le courant de court circuit, la tension de circuit ouvert et en localisant le point de puissance maximal pour déterminer ensuite la tension maximum et le courant maximum correspondant ainsi que dans la détermination graphique des pentes. Ce qui empêche une solution précise pour les paramètres et donne une courbe qui ne peut représenter exactement la caractéristique courant-tension (I-V) entièrement.

III.2.7. Méthode d'optimisation de la conductance

Cette méthode [48] emploie la caractéristique courant-tension (I-V) mesurée et le calcul de la conductance résultante du dispositif.

L'utilisation de la conductance réduit le nombre des paramètres caractéristiques de la cellule à déterminer de cinq paramètres à quatre paramètres seulement. Puis, un algorithme d'optimisation de la méthode de moindre carrée non linéaire basé sur la méthode de Newton est par conséquent utilisé pour évaluer les paramètres. Alors, l'objectif de cette méthode est de réduire à un minimum la fonction S en ce qui concerne l'ensemble des paramètres P où :

$$S(P) = \sum_{i=1}^N [G - G_i(V_i, I_i, P)]^2 \quad (\text{III.16})$$

Où P est l'ensemble des paramètres inconnus $P = (I_s, n, R_s, G_{sh})$ et I_i, V_i sont les valeurs mesurées de courant-tension respectivement, la conductance calculée $G_i = \frac{dI_i}{dV_i}$ respectivement au $i^{\text{ème}}$ point parmi les N points mesurés. La conductance différentielle est calculée numériquement pour toute la caractéristique $I-V$ en utilisant une méthode basée sur le principe de moindre carré.

La conductance peut être donnée par :

$$G = - \frac{\chi}{1 + R_s \chi} \quad (\text{III.17})$$

Où χ est donnée par :

$$\chi = \frac{\beta}{n} \{ I_{ph} + I_s - I - G_{sh} (V + R_s I) \} + G_{sh} \quad (\text{III.18})$$

Le terme entre accolades est égale à $I_s \exp\left(\frac{\beta}{n}(V + IR_s)\right)$ et lorsqu'il est remplacé dans l'équation (III.16), la conductance devient indépendante du photocourant I_{ph} . Par conséquent, le nombre des paramètres à calculer est réduit de cinq paramètres $P = (I_{ph}, I_s, n, R_s, G_{sh})$ à seulement quatre paramètres $P' = (I_s, n, R_s, G_{sh})$. Le cinquième paramètre peut être facilement calculé à partir de l'équation (III.1) pour $V=0$ ce qui donne l'équation suivante :

$$I_{ph} = I_{cc} (1 + R_s G_{sh}) + I_s \left(\exp \frac{\beta I_{cc} R_s}{n} - 1 \right) \quad (\text{III.19})$$

Cette méthode est non seulement basée sur la caractéristique courant-tension ($I-V$) mais également sur la dérivé de cette caractéristique, c'est-à-dire la conductance G .

La résolution de l'équation suivante minimise la somme des carrées:

$$F(P) = \frac{\partial S}{\partial P} = 0 \quad (\text{III.20})$$

La méthode du Newton est utilisée pour obtenir une approximation à la solution exacte, seulement que le procédure de convergence de cette méthode peu avoir des difficultés ce qui nécessite des valeurs initiales de l'ensemble des paramètres, P .

$$(P_j) = (P_{j-1}) - [J(P)]^{-1} F(P) \quad (\text{III.21})$$

Ou $J(P)$ est la matrice Jacobienne et ses éléments sont défini par :

$$J = \frac{\partial F}{\partial P} \quad (\text{III.22})$$

Cette méthode évite les problèmes d'oscillations parce que les valeurs initiales sont assez proches des paramètres optimaux. Par conséquent, pour améliorer la précision des paramètres et la qualité de la caractéristique calculée il faut utiliser des petits pas pour la tension afin d'obtenir des valeurs plus précises de la conductance.

Pour surmonter le problème de convergence de la méthode Newton, la technique de la conductance simple est utilisée.

III.2.8. Méthode de la conductance simple

Cette technique est basée sur la méthode de Werner [49] développée pour l'extraction des différents paramètres de la diode Schottky et la jonction pn. Cette méthode a été modifiée par Ouennoughi et Chegaar [50] pour l'appliquer à la cellule solaire sous éclairement pour l'extraction de ses paramètres.

Cette technique est basée sur la caractéristique courant-tension ($I-V$) mesurée et la conductance calculée du dispositif. L'utilisation de cette méthode permet l'extraction de deux paramètres, la résistance série et le facteur d'idéalité [50].

Pour $V + R_s I \gg kT$, le courant à travers la diode est donné par :

$$I = I_{ph} - I_s \exp\left(\frac{\beta}{n}(V + IR_s)\right) \quad (\text{III.23})$$

La conductance est donnée par $G = \frac{dI}{dV}$:

$$G = -\frac{\beta}{n}(1 + R_s G)(I_{ph} - I) \quad (\text{III.24})$$

Cette expression peut être écrite aussi sous la forme :

$$\frac{G}{I_{ph} - I} = -\frac{\beta}{n}(1 + R_s G) \quad (\text{III.25})$$

L'équation (III.25) montre que le tracé de $\frac{G}{I_{ph} - I}$ en fonction de la conductance donne une ligne droite qui entraîne la détermination de $-\frac{\beta}{n}$ de l'intersection avec l'axe y et $-\frac{\beta R_s}{n}$ de l'intersection avec l'axe des x.

Cette méthode donne de bons résultats pour le module et la cellule solaire respectivement. Cependant, elle nécessite l'utilisation de petits pas de la tension pour améliorer et arriver à des paramètres plus précis, et par conséquent réduire le bruit obtenu par l'utilisation de la dérivé G de la courbe $I-V$ au lieu de la courbe $I-V$ mesurée qui fait apparaître une incertitude dans les paramètres.

III.3. CRITIQUES GENERALES

Les principaux inconvénients des méthodes peuvent être résumés comme suit :

- Méthode nécessite une préconnaissance de quelques paramètres $(I_{cc}, V_{co}, I_m, V_m)$ pour l'extraction des paramètres ce qui conduit à des incertitudes dans le calcul de ces paramètres.
- Méthode ne prenant pas en compte la résistance parallèle et considère le facteur d'idéalité comme constant.
- Méthode donnant des valeurs des paramètres qui n'ont pas de sens physique (exemple: R_s négative).
- Les méthodes basées sur la conductance possèdent deux inconvénients majeurs:
 - Elles sont sensibles aux bruits de mesure et de calcul de G.
 - Elles exigent un pas de tension très petits pour bien approximer la dérivé.

D'autres méthodes récentes [51-53] ont été appliquées avec succès sur différentes cellules solaires. Ortiz et al [51] ont proposé une méthode élégante pour extraire les cinq paramètres de la cellule solaire en plastique basés sur le calcul de la fonction Co-contents (CC) à partir de la solution analytique exacte de la caractéristique courant-tension éclairée. Une méthode précise utilisant la fonction de Lambert a été présentée par Jain et Kapoor [52] pour évaluer les différents paramètres de la cellule organique. Une combinaison

d'optimisation latérale et verticale a été employée [53] pour extraire les paramètres d'une cellule solaire éclairée.

III.4. LA METHODE PROPOSEE

Pour les générateurs photovoltaïques, il est très important d'obtenir une petite valeur de la résistance série et de pouvoir la déterminer avec une grande exactitude, parce qu'elle joue un rôle très important sur le facteur de forme et dans l'amélioration du rendement de conversion.

Dans ce cas, nous avons développé une nouvelle méthode d'extraction des paramètres basés seulement sur la caractéristique courant-tension ($I-V$) mesurée et sous éclairement. Notre méthode donne de bons résultats. Elle est très simple à employer et présente l'avantage d'être indépendante du pas de la tension contrairement à la méthode dérivative.

Cette technique est basée sur la méthode de Kaminski [54] développée pour extraire les différentes paramètres d'une cellule solaire à l'obscurité avec une seule exponentielle. Nous avons modifié cette méthode pour pouvoir l'appliquer aux cellules solaires sous éclairement. Le modèle utilisé est à une seule exponentiel avec une résistance série et une résistance parallèle.

III.4.1. Principe de la méthode

Après correction du courant de la cellule en considérant la valeur de la résistance shunt et pour $V + R_s I \gg kT$, le courant à travers la diode est donnée par :

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{\beta}{n}(V + IR_s)\right) - 1 \right] \quad (\text{III.26})$$

La méthode est basée sur la caractéristique courant-tension ($I-V$) mesurée et consiste à écrire la relation précédente sous forme linéaire. La relation (III.26) peut être écrite sous la forme:

$$I_{ph} - I = I_s \left[\exp \left(\frac{\beta}{n} (V + IR_s) \right) - 1 \right]$$

Pour $I_s \ll I$ on a :

$$\begin{aligned} I_{ph} - I &= I_s \left[\exp \left(\frac{\beta}{n} (V + IR_s) \right) \right] \\ \log(I_{ph} - I) &= \log(I_s) + \frac{\beta}{n} (V + IR_s) \end{aligned} \quad (\text{III.27})$$

Pour un point définit par (V_0, I_0) on a :

$$\log(I_{ph} - I_0) = \log(I_s) + \frac{\beta}{n} (V_0 + I_0 R_s) \quad (\text{III.28})$$

Par soustraction des deux expressions précédentes, on obtient:

$$\begin{aligned} \log(I_{ph} - I) - \log(I_{ph} - I_{c0}) &= \frac{\beta}{n} (V + IR_s) - \frac{\beta}{n} (V_0 + I_0 R_s) \\ \log(I_{ph} - I) - \log(I_{ph} - I_{c0}) &= \frac{\beta}{n} [(V + IR_s) - (V_0 + I_0 R_s)] \end{aligned}$$

L'équation précédente peut être écrite sous la forme

$$\log \left(\frac{I_{ph} - I}{I_{ph} - I_0} \right) = \frac{\beta}{n} [(V - V_0) + (I - I_0) R_s]$$

Par simplification

$$\frac{1}{(I - I_0)} \log \left(\frac{I_{ph} - I}{I_{ph} - I_0} \right) = \frac{\beta}{n} \left[\frac{(V - V_0)}{(I - I_0)} + R_s \right] \quad (\text{III.29})$$

On pose :

$$Y = \frac{1}{(I - I_0)} \log \left(\frac{I_{ph} - I}{I_{ph} - I_0} \right) \quad (\text{III.30})$$

Et

$$X = \frac{(V - V_0)}{(I - I_0)} \quad (\text{III.31})$$

Le point (V_0, I_0) est un point de la caractéristique $I-V$.

On obtient l'équation linéaire suivante pour $I_s \ll I$:

$$Y = \frac{\beta}{n}(R_s + X) \quad (\text{III.32})$$

III.4.2. Extraction des paramètres

Après le développement du principe de la méthode, la détermination des valeurs des différents paramètres caractéristiques de la cellule solaire commence par la résistance parallèle $R_{sh} (= 1/G_{sh}) \gg R_s$, la conductance parallèle G_{sh} est évaluée à partir de la caractéristique en polarisation inverse par une simple régression linéaire [47]. Le calcul de la conductance parallèle G_{sh} donne le courant parallèle $I_p = G_{sh}V$.

Avant l'extraction du facteur d'idéalité n et la résistance série R_s , les valeurs mesurées de la caractéristique courant-tension ($I-V$) utilisées dans la relation (III.26) doivent être corrigées en prenant en compte la valeur de la conductance parallèle.

L'équation linéaire (III.32) nous permet de déterminer les valeurs du facteur d'idéalité et la résistance série. On doit d'abord calculer l'ensemble des valeurs de X-Y comme suit :

On considère un ensemble de données $I_i - V_i$ qui donne lieu à un ensemble de valeurs X-Y à partir des relations (III.30) et (III.31), avec i variant de 1 à N (ou N est le nombre de points mesurés). Puis, on calcule les valeurs de X-Y pour $I_0 = I_{i0}$ et $I = I_{i0+1}$ jusqu'à $I = I_N$, ceci donne $(N-1)$ paires de valeurs X-Y. Ensuite avec $I_0 = I_{i0+1}$ et $I = I_{i0+2}$ jusqu'à I_N on obtient $(N-2)$ valeurs de paire X-Y, et ainsi de suite, jusqu'à la dernière valeur de I qui est $I = I_{N-1}$. Enfin, on obtient un nombre $N(N-1)/2$ valeurs de paire X-Y.

Après le calcul de X-Y, la régression linéaire (III.32) nous permet d'obtenir les valeurs de n et R_s .

On pose :

$$\begin{cases} a = \frac{\beta}{n} \\ \text{et} \\ b = \frac{\beta R_s}{n} \end{cases} \quad (\text{III.33})$$

L'équation (III.32) devient :

$$Y = aX + b \quad (\text{III.34})$$

Cela revient donc à déterminer les valeurs des paramètres a et b (respectivement le coefficient directeur de la droite et son ordonnée à l'origine) qui minimisent la somme ci-dessous.

$$\phi(a, b) = \sum_{i=1}^N (Y - Y_i)^2 = \sum_{i=1}^N [aX_i + b - Y_i]^2 \quad (\text{III.35})$$

On a :

$$\begin{cases} \frac{\partial \phi}{\partial a} = 2 \sum_{i=1}^N (aX_i + b - Y_i)X_i = 0 \\ \frac{\partial \phi}{\partial b} = 2 \sum_{i=1}^N (aX_i + b - Y_i) = 0 \end{cases} \quad (\text{III.36})$$

Les deux conditions précédentes peuvent se mettre sous forme d'un système d'équation à deux inconnues.

$$\begin{cases} \left(\sum_{i=1}^N X_i^2 \right) a + \left(\sum_{i=1}^N X_i \right) b = \left(\sum_{i=1}^N X_i Y_i \right) \\ \left(\sum_{i=1}^N X_i \right) a + Nb = \left(\sum_{i=1}^N Y_i \right) \end{cases} \quad (\text{III.37})$$

La solution du système est :

$$\begin{cases} a = \frac{1}{Det} \left[N \left(\sum_{i=1}^N X_i Y_i \right) - \left(\sum_{i=1}^N X_i \right) \left(\sum_{i=1}^N Y_i \right) \right] \\ b = \frac{1}{Det} \left[\left(\sum_{i=1}^N X_i^2 \right) \left(\sum_{i=1}^N Y_i \right) - \left(\sum_{i=1}^N X_i \right) \left(\sum_{i=1}^N X_i Y_i \right) \right] \end{cases} \quad (III.38)$$

Avec

$$Det = N \left(\sum_{i=1}^N X_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^N X_i \right)^2 \quad (III.39)$$

Dès que les valeurs de a et b sont obtenus, on peut déduire directement les valeurs correspondantes de la résistance série R_s et le facteur d'idéalité n à partir du système (III.33):

$$n = \frac{\beta}{a} \quad \text{et} \quad R_s = \frac{bn}{\beta}$$

Pour la majorité des cellules solaires, le photocourant est égale au courant de court-circuit $I_{ph} \cong I_{cc}$ (I_{cc} est déterminé à partir de la courbe $I-V$ lorsque $V=0$) cette approximation est acceptable et n'introduit aucune erreur significative dans les calculs.

Après avoir déterminé les quatre paramètres précédents (G_{sh}, R_s, n, I_{ph}), le courant de saturation est évalué en utilisant la méthode standard basé sur la caractéristique courant-tension ($I-V$) en traçant la courbe donnant $\ln(I_{ph} - I_{cor})$ en fonction de V_{cor} . Il faut noter que la caractéristique courant-tension est corrigée en tenant compte de l'effet de la résistance série comme suit :

$$\log(I_{ph} - I_{cor}) = \log(I_s) + \frac{\beta}{n} V_{cor} \quad (III.40)$$

Où

$$\begin{cases} I_{cor} = G_{sh} (V + IR_s) \\ V_{cor} = V + IR_s \end{cases}$$

Lorsqu'on trace $\log(I_{ph} - I_{cor})$ en fonction de V_{cor} . La valeur du courant de saturation I_s apparaît à partir de l'intersection entre cette ligne droite et l'axe des y, une nouvelle valeur du facteur d'idéalité apparaît par l'intersection avec l'axe des x. la deuxième valeur du

facteur d'idéalité est 1.4770 pour la cellule, 49.1510 pour le module et 2.2040 pour la cellule organique.

Une nouvelle valeur du photocourant (I_{ph}) peut être calculée à partir de la relation (III.1) pour une tension nulle ($V = 0$) et $I = I_{cc}$, et en considérant les valeurs extraites de G_{sh} , R_s , n et I_s .

$$I_{cc} = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{\beta I_{cc} R_s}{n}\right) - 1 \right] - G_{sh} I_{cc} R_s$$

Donc

$$I_{ph} = I_{cc} (1 + G_{sh} R_s) + I_s \left(\exp\left(\frac{\beta I_{cc} R_s}{n}\right) - 1 \right) \quad (III.41)$$

La deuxième valeur du photocourant I_{ph} trouvée par cette deuxième technique est 0.76012A pour la cellule, 1.0316 A pour le module et $7.927 \cdot 10^{-3}$ A pour la cellule organique.

III.4.3. Validation et test de la méthode

Pour contrôler l'estimation entre les valeurs expérimentales et le modèle théorique, une erreur est calculée comme suit :

$$e_i = (I_i - I_{i,cal})(100 / I_i) \quad (III.42)$$

Où $I_{i,cal}$ est le courant calculé à partir de chaque valeur de la tension mesurée V_i , en résolvant l'équation implicite (III.1) avec les paramètres évalués par cette méthode ($G_{sh}, R_s, n, I_s, I_{ph}$). (V_i, I_i) Sont respectivement le courant et la tension mesurés au i^{eme} point parmi les N points mesurés en évitant les mesures près des conditions de circuit ouvert où le courant n'est pas bien défini.

Pour tester le modèle, une analyse statistique des résultats a été faite. L'erreur quadratique moyenne, RMSE, renseigne sur l'erreur moyenne commise en valeur absolue entre les valeurs observées et les valeurs simulées. Plus l'erreur quadratique moyenne est faible, plus les valeurs simulées par le modèle sont proches des observations. L'erreur moyenne, MBE, mesure l'écart moyen entre les valeurs observées et les valeurs

simulées. Elle renseigne sur la tendance du modèle à sur estimer (erreur moyenne positive) ou sous estimer (erreur moyenne négative) les observations. L'erreur moyenne absolue, MAE, correspond à la moyenne des erreurs relatives absolues. Plus cette valeur est proche de zéro et plus le modèle a une erreur moyenne faible. Elles sont définies par les relations suivantes :

$$\begin{aligned} RMSE &= \left(\sum |e_i|^2 / N \right)^{1/2} \\ MBE &= \sum e_i / N \\ MAE &= \sum |e_i| / N \end{aligned} \quad (\text{III.43})$$

N est le nombre des points mesuré prenait en compte.

III.4.4. Résultats et discussion

La méthode développée est appliquée à une cellule et un groupement de cellules éclairés pour pouvoir extraire les cinq paramètres caractérisant les dispositifs.

Les trois structures solaires éclairées sont comme suit :

- Une cellule solaire commercial (R.T.C France), à base de silicium, de 57 mm de diamètre.
- Un module solaire (Photowatt- PWP 201) dans lequel 36 cellules solaires, à base de silicium polycristallin, sont connectées en série.
- Une cellule solaire organique.

Les données courant-tension ($I-V$) expérimentales, à une température de 33°C pour la cellule solaire et 45°C pour le module, ont été prise du travail de Easwarakhanthan et al [45]. Celle de la cellule organique est prise du travail d'Ortiz et al [51] à température 27°C. Le photocourant à été définit comme le courant de court-circuit $I_{ph} \cong |I_{cc}|$. La caractéristique en polarisation inverse a été employée pour calculer la conductance parallèle $G_{sh} = \frac{1}{R_{sh}}$ en utilisant une simple régression linéaire pour la cellule et le module.

Par contre, la conductance shunt a été calculée à partir de la caractéristique en polarisation directe pour la cellule organique. La résistance série et le facteur d'idéalité ont

été obtenus à partir de la relation linéaire (III.32) en utilisant la méthode des moindres carrées.

Les résultats que nous avons obtenus par cette méthode pour la cellule et le module solaire au silicium sont reportés dans le tableau III.1. Nous avons aussi reportés dans le tableau les résultats obtenus par trois autres méthodes prises du travail de Chegaar et al [47] ainsi que les erreurs correspondantes. Ces trois méthodes sont :

- Minimisation au sens des moindres carrées (LSQ), objet du travail de Easwarakhanthan et al [45].
- Méthode de l'optimisation de la conductance (CndOpt) [48].
- Et la technique de la conductance simple (SmpCnd) [50].

Le tableau III.2 présente les résultats obtenus pour la cellule organique comparée aux trois autres méthodes prise de travail d'Ortiz [51].

En utilisant la méthode proposée ici pour la cellule, le module solaire au silicium et la cellule organique, les résultats obtenus sont comparables avec ceux déjà publiés concernant les mêmes dispositifs [47, 51]. L'accord entre les résultats obtenus par cette méthode et ceux publiés précédemment sont remarquables pour les différents dispositifs.

Les figures III.2, III.3 et III.4, montrent les caractéristiques courant-tension ($I-V$) calculée et expérimentale de la cellule et du module solaire au silicium et la cellule organique. Les carrés noirs représentent les valeurs expérimentales de la cellule solaire et le trait continu représentent la courbe calculée à partir de l'équation (III.1) avec les paramètres présentés dans le tableau III.1 et III.2.

	Vrt Opt [45]	Smp Cod [50]	Cnd Opt [48]	Notre méthode
<u>Cell (33°C)</u>				
$G_{sh} (\Omega^{-1})$	0.0186	0.02386	0.0202	0.02386
$R_s (\Omega)$	0.0364	0.0385	0.0364	0.01226
n	1.4837	1.456	1.5039	1.4152
$I_s (\mu A)$	0.3223	0.46	0.4039	0.4463
$I_{ph} (A)$	0.7608	0.7603	0.7608	0.7601
RMSE	0.388	9.147	0.312	0.5273
MBE	-0.122	4.470	-0.168	-0.1348
MAE	0.257	4.493	0.219	0.4307
<u>Module (45°C)</u>				
$G_{sh} (\Omega^{-1})$	0.00182	0.00145	0.005	0.00145
$R_s (\Omega)$	1.2057	1.2293	1.146	1.092
n	48.450	48.93	51.32	48.93
$I_s (\mu A)$	3.2876	46	6.77	3.8236
$I_{ph} (A)$	1.0318	1.030	1.035	1.0310
RMSE (%)	0.705	13.435	6.790	0.767
MBE (%)	0.215	7.030	5.334	-0.238
MAE (%)	0.549	7.034	5.373	0.567

Tableau III.1 : Paramètres de la cellule et du module solaire au silicium extraits par plusieurs méthodes.

	Co-content function [51]	Méthode Optimisation[51]	Méthode de cinq point [51]	Notre méthode
$G_{sh} (\Omega^{-1})$	0.00507	0.00492	0.00451	0.00575
$R_s (\Omega)$	8.59	6.21	0.804	1.0277
n	2.31	2.32	3.45	2.2039
$I_s (nAcm^{-2})$	13.6	13.6	957	6.3593
$I_{ph} (mAcm^{-2})$	7.94	7.82	7.63	7.92
RMSE (%)	2.8743	1.1750	3.8663	1.9141
MBE (%)	1.1485	0.1054	0.9802	-0.2164
MAE (%)	1.5536	1.1750	2.1249	1.4631

Tableau III.2 : Paramètres de la cellule organique extraits par plusieurs méthodes.

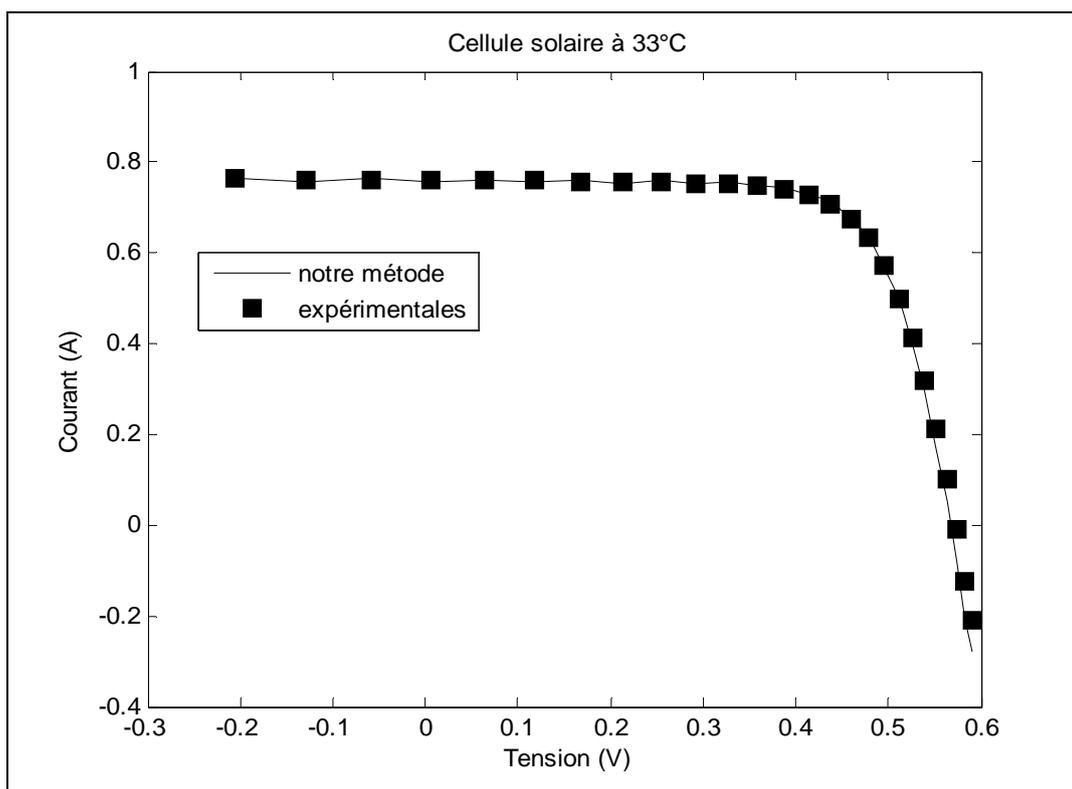


Figure III.2 : Caractéristique I-V de la cellule solaire : expérimentale (■) et simulée (-).

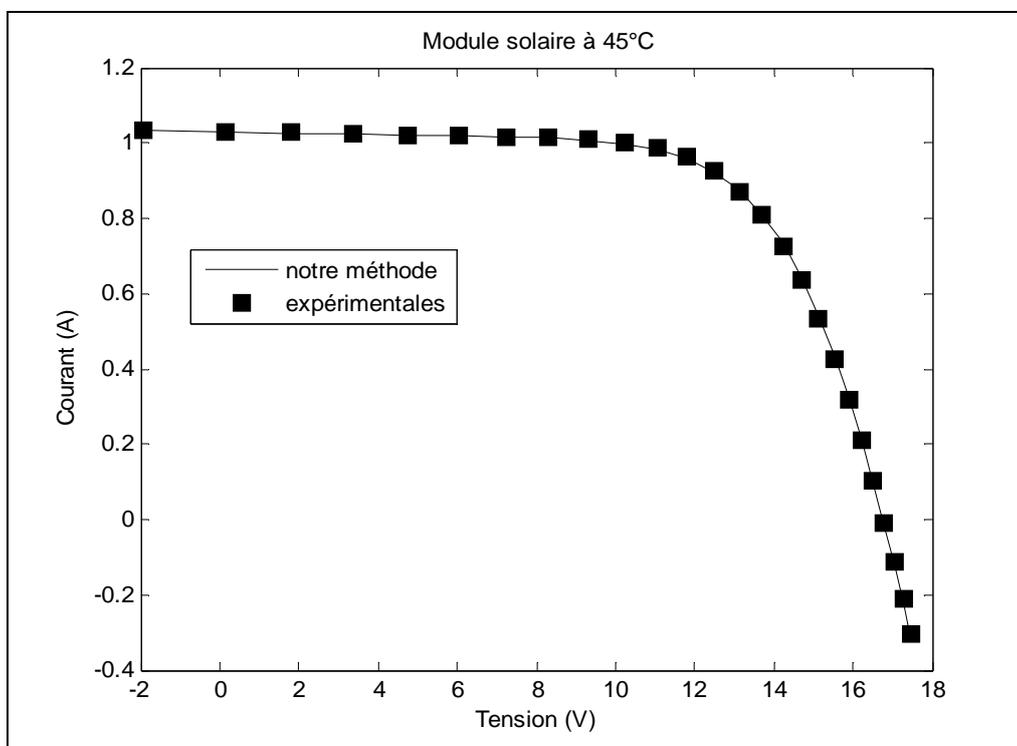


Figure III.3 : Caractéristique I-V du module solaire : expérimentale (■) et simulée (-).

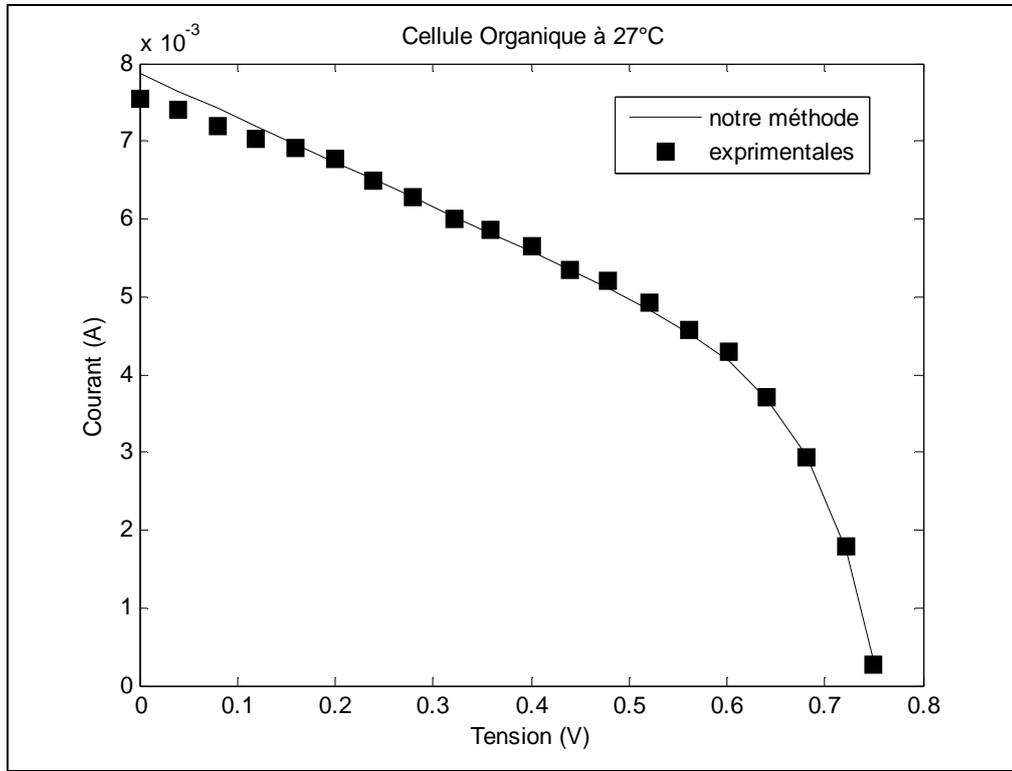


Figure III.4 : Caractéristique I-V de la cellule organique : expérimentale (■) et simulée (-).

III.5. CONCLUSION

Un rappel des différentes méthodes d'extractions des paramètres des cellules solaires a été fait. Une nouvelle méthode, pour l'extraction des paramètres des cellules solaires sous éclairage a été proposée. Cette méthode est basée sur la caractéristique courant-tension ($I-V$) mesurée. Notre méthode a été appliquée avec succès sur une cellule solaire et un module commerciaux et une cellule organique. Les résultats obtenus sont en bon accord avec ceux publiés précédemment. La méthode proposée est rapide et très simple à appliquer. Elle présente l'avantage d'être indépendante du pas de la tension contrairement aux autres méthodes et qu'elle n'impose aucune condition de limitation de l'intervalle de tension.

CONCLUSION GENERALE

L'énergie solaire possède de nombreux atouts tant sur le plan environnemental qu'économique. L'énergie solaire peut être une solution à l'amélioration de la qualité de l'air, à la limitation des émissions de gaz à effet de serre.

Il semble que d'importantes recherches soient en cours partout, en faveur des cellules solaires. On a tenté dans ce travail, de présenter les notions fondamentales de la cellule solaire. Cette technologie solaire utilise les propriétés des matériaux semi-conducteurs pour convertir directement le rayonnement solaire en électricité, en plus plusieurs facteurs contribuent à la limitation du rendement de conversion ainsi que le fonctionnement de la cellule solaire est influencé par la température et l'éclairement.

L'industrie PV actuelle repose essentiellement sur la technologie silicium. Des systèmes photovoltaïques ont été fabriqués à base de silicium (monocristallin, multicristallin et silicium amorphe). Il existe cependant d'autres technologies prometteuses comme les films en couche mince (a-Si, CdTe, AsGa), les matériaux organiques ou les nanoparticules, mais à ce jour elles sont encore en phase de développement. Le silicium est voué à dominer le marché pendant encore au moins quinze ans.

Finalement, On a voulu à la fois présenter les différentes méthodes d'extraction des paramètres d'une cellule solaire sous éclairement. Puis, une nouvelle méthode a été proposée pour extraire les cinq paramètres caractéristiques d'une cellule solaire et d'un groupement de cellule en série. Ces paramètres sont: le courant de saturation, facteur d'idéalité, résistance série, conductance shunt et le photocourant. Notre méthode est très simple à utiliser et rapide, comme elle n'impose aucune condition sur la tension. Contrairement aux autres méthodes déjà publiées, cette méthode est indépendante du pas ce qui est un inconvénient majeur pour la majorité des méthodes.

La détermination et l'extraction des paramètres d'une cellule solaire à jonction pn, est un sujet de travail qui s'intègre dans les efforts entrepris dans le but du contrôle de la qualité des cellules durant leurs fabrication ou l'analyse des performances de ces cellules une fois sur site. Les résultats obtenus à partir des caractéristiques I-V expérimentales sont comparables à ceux déjà obtenus par d'autres méthodes et une bonne concordance a été remarquée.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Mimoun Oukachmih, Les cellules photovoltaïques à base de matériaux organiques discotiques, Thèse de doctorat, Toulouse, 2003.
- [2] Nichiporuk Oleksiy, Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités, Thèse de doctorat, Lyon, 2005.
- [3] Benoit Brousse, Réalisation et caractérisation de cellules photovoltaïques organiques obtenues par dépôt physique, Thèse de doctorat, Limoge, 2004.
- [4] A. A. Sfeir et G. Guarracino, Ingénierie des systèmes solaires, application à l'habitat, Technique et documentation, PARIS.
- [5] Site : www.Semi-Conducteur-Wikipédia.htm, consulté le : 13/03/2006.
- [6] BP Solar, Effet photovoltaïque, décembre 2000, France.
- [7] La filière photovoltaïque, « l'hydrogène, les nouvelles technologies de l'énergie », Clefs N° 50/51, hiver 2004/2005, Site «<http://www.cea.fr/actualité/publication.htm>».
- [8] Rickaud Fors, Photovoltaic effect: Diode I-V Characteristics, Solid State Physics, January 31, 2006.
- [9] BP Solar, Informations Techniques « informations générales sur le photovoltaïque », décembre 2000, France.
- [10] Le site : <http://www.univ-pau.fr/~scholl/ecosystemes.html>, consulté (18/11/2006).
- [11] Bernard Equer, Energie solaire photovoltaïque, volume1, Ellipses Edition Marketing et l'Unesco, 1993.
- [12] Salima Alem-Boudjemline, Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques plastiques, Thèse de doctorat, Angers, 2004.
- [13] Bruno Thuillier, Caractérisation structurale des contacts ohmiques réalisés à partir d'encres métalliques sur cellule photovoltaïques en silicium multicristallin, Thèse de doctorat, Lyon, 2001.
- [14] M. Chegaar, Extracting solar cells parameters and estimating the atmospheric effects on their performance, Thèse de Doctorat d'Etat, Univ. Sétif, 2002.
- [15] R. J. Van Overstraeten, R. P. Mertens, Physics, technology and use of photovoltaic, Published by Adam Hilger Ltd, Techno House, USA, 1986.
- [16] K. Agroui, Etude de comportement thermique de module photovoltaïque de technologie monoverre et biverre au silicium cristallin, Rev. Energ. Ren., pp. 7 -11, 1999.
- [17] Alain Ricaud, Photopiles solaires, Presses polytechniques et universitaires ramandes, Lausanne, 1997.
- [18] Chenouf Hakim, Optimisation du procédé technologique de réalisation d'une cellule solaire par la technique de diffusion, Thèse de magister, Batna, 2005.

- [19] Sébastien Quoizola, Epitaxie en phase vapeur de silicium sur silicium mesoporeux pour report sur substrats économiques et application photovoltaïque bas coût, Thèse de doctorat, Lyon, 2003.
- [20] D. Y. Goswami et al, "Energy conversion", Mechanical Engineering Handbook, Ed. Frank Kreith, Boca Raton: CRC press LLc, 1999.
- [21] Philippe Menanteau, Apprentissage de la diversité et compétition entre options technologiques pour la production d'électricité photovoltaïque, Cahier de recherche n°15, Mai, 1998.
- [22] Site: <http://www.sses-ch/fr/technique/photovoltaique.htm>, consulté (20/2/2006).
- [23] Energie solaire, site : www.energiesolaire.tk , consulté (30/9/2006).
- [24] Ji Youn Lee, Rapid thermal processing of silicon solar cells passivation and diffusion, Thèse de Doctorat, Corée de sud, 2003.
- [25] Urs Staufer, Microfabrication, Institut de Microtechnique Université de Neuchâtel.
- [26] M. Orgeret, Les piles solaires, le composant et ses applications. Masson, Paris, 1985.
- [27] Pascal Pernet, Développement de cellules solaires en silicium amorphe de type N-I-P sur substrats souple. Thèse de doctorat, Lausanne, EPFL, 2001.
- [28] J. C. Muller, Nouvelles avancées technologiques des cellules photovoltaïques, upr du CNRS n°292, Strasbourg.
- [29] Peter Munster, Silicium intrinsèque et dopé in situ déposé amorphe par SAPCVD puis cristallisé en phase solide, Thèse de doctorat, Matisse, 2001.
- [30] André Claverie, Electricité solaire pour les zones rurales, 13eme session de l'école d'été Unesco, Conférence du 12 juillet, Paris, 2004.
- [31] Patrick Chabloz, Les couches épaisses en silicium amorphe application comme détecteurs de Rayons X. Thèse de doctorat, Lausanne, EPFL, 1996.
- [32] Lionel Sicot, Etude et réalisation de cellules photovoltaïques en polymère, Thèse de doctorat, Paris, 1999.
- [33] Martin Wolf and Hans Rauschenbach, Series resistance effects on solar cell measurements, Advanced Energy Conversion, vol. 3, pp. 455-479, 1963.
- [34] MS. Imamura, JI. Portscheller, Proc. VIII IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Seattle, p. 102, 1970.
- [35] JP. Charles, M. Abdelkrim, YH. Muoy, P. Mialhe, Solar Cells, vol. 4, pp. 169, 1981.
- [36] D. Laplace, I. Youm, Solar Cells, vol. 14, pp. 167-177, 1985.
- [37] K. Rajkanan, J. Shewchun, Solid State Electron, vol. 22, pp. 193, 1979.
- [38] AG. Aberle, SR. Wenham, MA. Green. 23rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, p. 133, 1993.

- [39] E. Van Kerschaves, R. Einhans, J. Szlufcik, J. Nijs, R. Mertens, Proc.14th European Communities Photovoltaic Solar Energy Conference, p. 2438, 1997.
- [40] J. Boucher, M. Ilescu, J. Vialas, Proc. of 1st European Communities Photovoltaic Solar energy conference, p. 1044, 1978.
- [41] P.J. Chen, S.C. Pao, A. Neugroschel and F.A. Lindholm, IEEE Trans. Electron Devices, vol. 25, pp 386, 1978
- [42] G.L. Aranjo and E. Sanchez, IEEE Trans. Electron Devices, vol. 29, pp. 1511, 1982.
- [43] M. Warashina and A. Ushirokawa, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 19, pp. 179, 1980.
- [44] P. Miahle, A. Khoury and J.P. Charles, Phys. Stat. Sol (a), vol. 82, pp. 403, 1984.
- [45] T. Easwarakhanthan, J. Bottin, I. Bouhouch and C. Boutrif, Int. J. Solar energy, vol. 4, pp. 1-12, 1986.
- [46] D.S.H. Chan, G.R. Philips and J.C.H. Phang, Solid State Electron, vol. 29, pp. 329, 1986.
- [47] M. Chegaar, Z. Ouennoughi and F. Guechi, Vacuum, vol. 75, pp. 367-372, 2004.
- [48] M. Chegaar, Z. Ouennoughi and A. Hoffmann, Solid state Electronics, vol. 45, pp. 293-296, 2001.
- [49] J.H. Werner, Appl. Phys. A., vol. 47, pp. 291, 1988.
- [50] Z. Ouennoughi and M. Chegaar, Solid state Electronics, vol. 43, pp. 1985-1988, 1999.
- [51] A. Ortiz-Cond, F.J. Garcia Sanchez and J. Muci, Solar Energy Material and Solar Cells, vol. 90, pp. 352-361, 2006.
- [52] A. Jain Kapoor, Solar Energy Materials and Solar cells, vol. 86, pp. 197-205, 2005.
- [53] M. Houari-Merbah, M. Belhamel and I. Tobias, Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 87, pp. 225-233, 2005.
- [54] A. Kaminski, J. J. Marchand and A. Laugier, Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 51, pp. 221-231, 1998.