

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE FERHAT ABBAS-SETIF
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 :

BOUZIDI Kamel

THEME

**ÉTUDE COMPARATIVE DES MÉTHODES
D'EXTRACTION DES PARAMÈTRES DES
CELLULES SOLAIRES**

Soutenue le : 28/06/2007

Devant le jury :

Président	Dr H. Hachemi	Pr.	U.F.A. Sétif
Rapporteur	Dr M. Chegaar	M.C.	U.F.A. Sétif
Examineur	Dr Z. Ouennoughi	Pr.	U.F.A. Sétif
Invité	Dr H. Zaak	C.C.	U.F.A. Sétif

Remerciements

J'exprime mes remerciements en premier lieu à Monsieur **M. Chegaar**, pour m'avoir accueilli tout au long de ce travail. Je le remercie très sincèrement pour avoir dirigé mes travaux de thèse et suivi de près et d'une manière continue cette étude. Sa disponibilité, sa présence, son investissement et ses compétences m'ont permis de découvrir et d'aimer la physique.

Je remercie le professeur **H. Hachemi**, qui me fait l'honneur d'accepter de présider le jury de thèse

Je tiens à remercier le professeur **Z. Ouennoughi** et le directeur **H. Zaak** d'avoir répondu aimablement afin de juger ce travail en participant au jury de thèse.

Ces remerciements vont inévitablement aussi à mes collègues, *S. Yacine, M. Farouk, M. hammou, D. Zahira, N. Nadia, A. Meriem, B. Boudjema, A. Nacir et G. lyachi.*

Grand remerciement *ma mère, mon père et mes frères* pour leur amour, encouragement et leur patience pendant ce temps.

Je remercie tous ceux qui ont, de près ou de loin, contribué à l'aboutissement de ce travail.

Liste des symboles utilisés

Symbole	Description
AM	Air masse
E_g	Energie de la interdite (gap)
E_c	Energie de la bande de conduction
E_v	Energie de la bande de valence
E_F	Niveau de Fermi
RS	Réponse spectrale
QE	Rendement quantique
λ	Longueur d'onde
ν	Fréquence de 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)
q	Charge électrique
T	Température
I_{ph}	Le courant photogénéré
n	Facteur d'idéalité
R_s	Résistance série
R_{sh}	Résistance parallèle
G_{sh}	Conductance shunt
I_{cc}	Tension de court circuit
V_{oc}	Courant de circuit ouvert
P_{max}	Puissance maximale
P	Puissance électrique
P_{in}	Puissance lumineuse incidente
$I_m (I_{max})$	Courant maximum
$V_m (V_{max})$	Tension maximum

F_v	Facteur de tension
Si	Silicium
<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>GaAs</i>	Arsenieur de Galium
<i>CdTe</i>	Tellurure de cadmium
<i>CIS</i>	Sélénium de cuivre et d'Indium
<i>B</i>	Bore
<i>P</i>	Phosphore

Principales constantes

Charge de l'électron $e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$

Constante de Planck $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$

Constante de Boltzmann $k = 1,380 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$

Table des matières

Liste de symboles utilisés.....	1
Table des matières.....	3
Introduction générale.....	7
Chapitre I : Généralités sur les cellules solaires	
Introduction.....	11
I.1 Le Soleil.....	11
I.1.1 Caractéristiques générales.....	11
I.1.2 Son énergie.....	11
I.1.3 Le rayonnement solaire.....	12
I.2 Propriétés du composant photovoltaïque.....	14
I.2.1 Diagramme de bandes et dopage.....	14
I.2.1.1 Diagramme de bandes.....	14
I.2.1.2 Dopage.....	15
I.2.2 Principe de la jonction p-n.....	16
I.2.3 La conversion photon-électron.....	17
I.3 La cellule solaire.....	18
I.3.1 Fonctionnement d'une cellule solaire.....	18
I.3.2 Caractéristiques de la cellule photovoltaïque.....	19
I.3.2.1 Paramètres photovoltaïque.....	19
I.3.2.2 Circuit électrique équivalent.....	21
I.3.2.3 Réponse spectrale.....	23
I.3.3 Influence des paramètres sur la caractéristique courant-tension.....	24
I.3.3.1 Influence de l'éclairement.....	24
I.3.3.2 Influence de la température.....	24
I.3.3.3 Influence de la résistance série et la conductance parallèle.....	25
I.3.4 Structure des cellules photovoltaïques.....	28
I.3.4.1 Le silicium comme matériau de base pour le photovoltaïque.....	28
I.3.4.2 Les constituants de base d'une cellule photovoltaïque.....	29
I.3.5 Pertes de rendement.....	30

I.4 Les modules photovoltaïques.....	31
I.4.1 Association en série.....	32
I.4.2 Association en parallèle.....	33
I.4.3 Association en série-parallèle	34
Conclusion.....	35

Chapitre II : Etude comparative des méthodes d'extraction des paramètres des cellules solaires

Introduction.....	37
II.1 Simulation de la caractéristique courant -tension d'une cellule solaire.....	37
II.2 Méthodes d'extraction des paramètres d'une cellule solaire.....	39
II.2.1 Méthodes existantes.....	39
II.2.1.a Méthode d'optimisation verticale.....	39
II.2.1.b Méthode de Kaminski et al.....	40
II.2.1.c Méthode basée sur une fonction auxiliaire.....	42
II.2.2 Méthodes proposée.....	43
II.2.2.1 Principe de calcul des paramètres à l'obscurité	43
1. <i>Méthode de Gromov modifiée.</i>	43
2. <i>Méthode de Werner</i>	45
3. <i>Méthode de Mikhelashvili modifiée.</i>	47
II.2.2.2 Principe de calcul des paramètres sous éclairnement.....	48
1. <i>Méthode 1</i>	48
2. <i>Méthode 2</i>	51
3. <i>Méthode 3</i>	52
II.3 Test et comparaison des méthodes.....	55
Conclusion.....	55

Chapitre III : Résultats et discussion

Introduction.....	57
III.1 Application des méthodes	57

III.1.1 Application à une structure non éclairée.....	57
III.1.1.1 Méthode Gromov modifiée.....	58
III.1.1.2 Méthode de Werner.....	58
III.1.1.3 Méthode Mikhelashvili modifiée.....	59
III.1.1.4 Comparaison des méthodes.....	60
III.1.1.5 Discussion.....	60
III.1.2 Application à des structures éclairées.....	61
III.1.2.1 Méthode1.....	62
III.1.2.2 Méthode2.....	64
III.1.2.3 Méthode3	66
III.1.2.4 Discussion et comparaison.....	69
Conclusion.	69
Conclusion générale.....	71
Bibliographique.....	74
Annexe	79

Introduction générale

Depuis la révolution industrielle du 18^{ème} siècle, les besoins énergétiques de l'humanité n'ont cessé de croître en parallèle avec son évolution. Aujourd'hui, ce sont les sources d'énergies non renouvelables (charbon, pétrole, gaz, nucléaire) qui sont les plus exploitées dont le délai d'épuisement est estimé à quelques décennies. De plus, les risques en matière environnementale liés aux rejets de CO₂ dans l'atmosphère engendrant le phénomène de l'effet de serre ainsi que ceux provenant du stockage et de l'élimination des déchets nucléaires. Ces problèmes suscitent actuellement un vif intérêt pour les énergies renouvelables sous leurs multiples formes : éolienne, solaire thermique, photovoltaïque, hydroélectrique, biomasse, et géothermie, qui représentent aujourd'hui 7.5% de l'énergie totale mondiale.

L'énergie solaire possède de nombreux atouts tant sur le plan environnemental qu'économique. Pour un pays grand consommateur d'énergie, 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, à la réduction de la dépendance en pétrole importé et enfin à la croissance économique par la création de nouveaux emplois dans la fabrication et l'installation de nouveaux systèmes. Il apparaît donc que l'énergie solaire peut apporter de réelles solutions.

L'énergie photovoltaïque, reposant sur la transformation directe des rayons lumineux du soleil en électricité possède un potentiel important parmi les différentes énergies renouvelables. En effet, l'énergie solaire qui atteint chaque année la surface de la terre est équivalente à 10000 fois la consommation mondiale d'énergie primaire. Les cellules solaires sont un des principaux moyens de récupérer cette énergie et la transformer directement en électricité sans quasiment générer de pollution par effet photovoltaïque.

L'utilisation des cellules solaires a débuté dans les années 40 dans le domaine spatial pour des engins spatiaux (satellites, navettes,...). Les recherches d'après guerre ont permis d'améliorer leur performance et leur taille, mais il faudra attendre les crises énergétiques des années soixante dix pour que les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie photovoltaïque et ses applications terrestres (Habitation isolée, le pompage de l'eau, la réfrigération, l'éclairage).

Le fonctionnement de la cellule solaire est décrit généralement par sa caractéristique courant-tension dont l'analyse permet de déterminer un certain nombre de paramètres qui décrivent le modèle électrique non linéaire des cellules solaires. Ces paramètres sont généralement le courant de saturation, le photocourant, le facteur d'idéalité, la résistance série, et la conductance shunte.

La détermination des paramètres de la cellule solaire est une tâche très importante dans les deux phases de conception, du composant et du circuit. En effet, les paramètres d'un modèle sont étroitement liés aux mécanismes physiques internes agissant dans la cellule solaire. Leur connaissance est donc très importante pour améliorer la qualité du composant pendant la fabrication et la simulation du système. Les mesures (courant-tension) sous éclairage et sous l'obscurité sont habituellement utilisées pour extraire de ces divers paramètres.

Le présent travail est organisé comme suit :

Dans le premier chapitre nous rappelons les généralités sur les cellules solaires. Nous décrivons le fonctionnement et les caractéristiques de la cellule photovoltaïque. Nous abordons le principe de conversion photovoltaïque, les paramètres caractéristiques et la structure de la cellule photovoltaïque ainsi que les différentes sources de pertes influençant le rendement de conversion.

Le deuxième chapitre traite des méthodes d'extraction des paramètres. Nous commençons par une présentation des méthodes existantes, ensuite nous traitons des méthodes développées dans le cadre de ce travail.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation et la discussion des résultats obtenus.

Enfin, une conclusion générale couronne ce mémoire pour récapituler nos analyses, résultats et suggestions.

Chapitre I

Généralités sur les cellules solaires

Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons des généralités sur la source d'énergie solaire (le Soleil), et des notions sur les semi-conducteurs de base de la conversion photovoltaïque. Nous décrirons ensuite le fonctionnement des cellules photovoltaïques, leurs caractéristiques principales, les paramètres caractéristiques et l'architecture de la cellule photovoltaïque ainsi que les différentes sources de pertes influençant le rendement de conversion. Enfin, nous étudierons l'association des cellules solaire, en série, en parallèle et en série- parallèle.

I.1 Le Soleil

I.1.1 Caractéristiques générales [1,8]

Le Soleil est l'étoile la plus proche de notre planète. Elle apparaît sous la forme d'une sphère gazeuse de 696 000 km de rayon, soit 109 fois celui de la terre, et qui est placée à $150 \cdot 10^6$ km de la Terre. Cette distance est si grande que sa lumière nous parvient 8 minutes après avoir été émise. Sa masse est de 330 000 fois celle de la terre ($1,99 \cdot 10^{30}$ kg).

Notre Soleil est une énorme boule de gaz composée de 70% d'hydrogène et de 28% d'hélium, et en moindre quantité de carbone, d'azote et d'autres éléments. Au centre, il règne une pression 220 millions de fois plus grande que la pression atmosphérique de notre terre, entraînant une température de 15 millions K, et plusieurs millions de degrés dans les couches supérieures de son atmosphère.

I.1.2 Son énergie :

Les énergies renouvelables sont en grande partie issues du soleil, directement pour l'énergie solaire ou indirectement pour l'énergie éolienne (réchauffement des masses d'air), l'hydraulique (cycle de l'eau) et la biomasse (chlorophylle), et l'énergie issue de la gravitation (énergie marémotrice). Ces énergies sont théoriquement inépuisables puisque reproductibles mais elles sont disponibles en quantité limitée à un endroit et un instant donné.

L'énergie solaire est la source d'énergie renouvelable la plus disponible et la plus importante. En effet, même si seulement un millième de l'énergie solaire disponible était

utilisée, cela suffirait à assurer plus de trois fois la consommation énergétique de l'ensemble des habitants de la planète. Deux utilisations de l'énergie solaire sont offertes : la première étant de générer de la chaleur (le solaire thermique), la seconde étant de produire de l'électricité (le photovoltaïque) [21].

I.1.3 Le rayonnement solaire

La distribution des radiations lumineuses émises par le soleil est déterminée par la température de la surface de ce dernier, à savoir 5900 K environ. On considère que le soleil se comporte approximativement comme un corps noir. Les satellites ont permis de mesurer avec précision le spectre réel solaire hors de l'atmosphère terrestre, qui diffère légèrement du spectre théorique du corps noir.

La Figure I-1 donne le spectre du corps noir à 5900 k et le spectre solaire réel hors atmosphère. Ces spectres montrent les longueurs d'onde du rayonnement solaire sont comprise entre $0.2 \mu\text{m}$ (ultraviolet) et $4 \mu\text{m}$ (infrarouge); 97.5% de l'énergie est comprise dans la zone des longueurs d'onde inférieures à $2.5 \mu\text{m}$, notamment dans la zone du rayonnement visible comprise entre 0.4 et $0.78 \mu\text{m}$

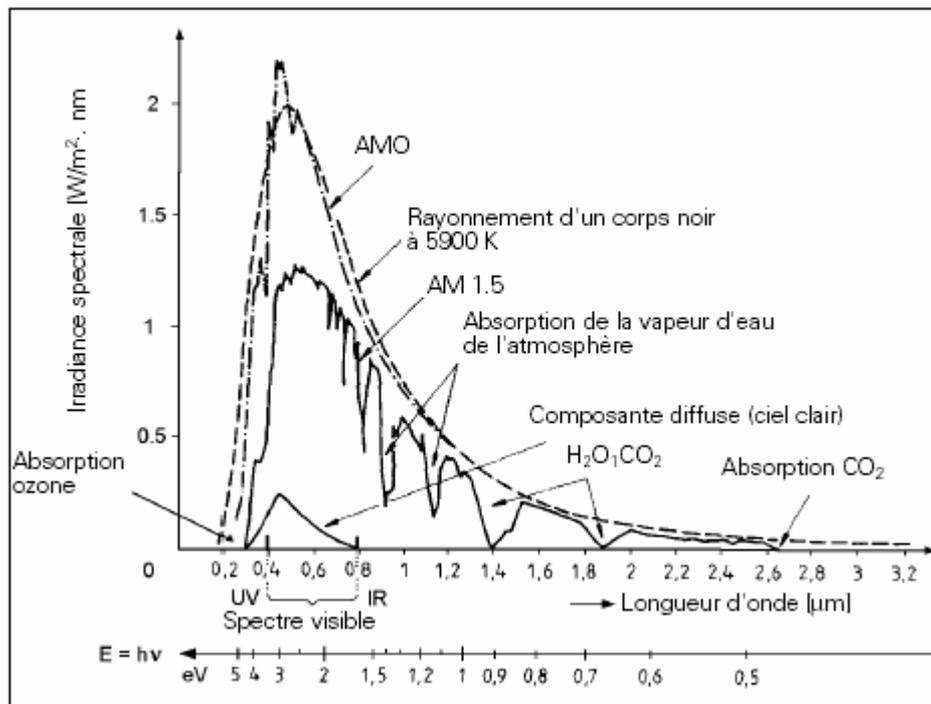


Figure I-1: Spectre du rayonnement solaire : a) hors atmosphère (AM0), b) au sol (AM1.5) [2].

Le rayonnement reçu par la Terre en incidence normale avoisine les 1400W/m^2 [15]. En traversant les différentes couches atmosphériques, l'atmosphère modifie le rayonnement solaire à travers des effets d'absorption et de diffusion dus :

- aux molécules gazeuses entrant dans sa composition : Azote (N_2) 78%, Oxygène (O_2) 21%, Argon (Ar) 0.9%, Dioxyde de Carbone, (CO_2) 0.3 % (variable), Ozone (O_3) (variable)... ainsi que la vapeur d'eau (H_2O) (très variable : de 0 à 4 %).
- aux particules qu'elle contient : aérosols, gouttelettes d'eau, poussières [22].

Le flux énergétique reçu au sol se réduit alors à 1000W/m^2 avec un spectre décalé vers le rouge par rapport au spectre hors atmosphère. Le spectre diffère donc entre l'espace et la surface du globe, il diffère également à la surface de la Terre en fonction du lieu. On le caractérise de façon globale par un nombre de masse d'air AM_x , x étant [6]:

$$x \approx \frac{1}{\sin \theta} \quad (\text{I.1})$$

θ représente l'angle entre la position du soleil et l'horizon (Figure I-2).

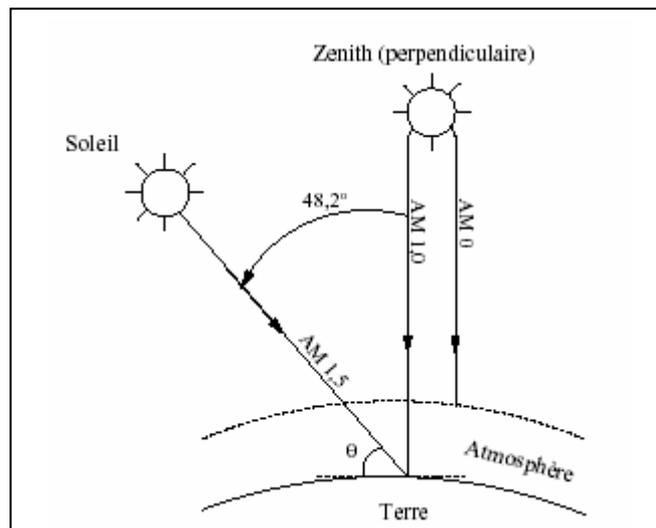


Figure I-2 : Description du nombre de masse d'air AM [7].

Par définition, AM_0 correspond au spectre solaire hors atmosphère (spectre valable pour les applications spatiales), AM_1 correspond à une position du soleil au zénith du lieu d'observation, et $\text{AM}_{1,5}$ pour un rayonnement solaire arrivant à $48,2^\circ$ sur la surface de la terre (spectre $\text{AM}_{1,5}$ considéré comme une condition standard pour le test des cellules solaires avec un éclairement de 1000W/m^2). Ces spectres sont représentés sur la Figure I-1.

I.2 Propriétés du composant photovoltaïque

I.2.1 Diagramme de bandes et dopage

I.2.1.1 Diagramme de bandes [1,19]

Dans un cristal constitué d'un arrangement régulier d'atomes, la particule en mouvement est soumise à un potentiel qui dépend des périodicités du réseau cristallin. Dans cette description, les résultats de mécanique quantique montrent l'existence des bandes d'énergies. Le diagramme de ces bandes est défini par la bande de conduction E_c , la bande interdite (gap) E_g , la bande de valence E_v et le niveau de Fermi E_F .

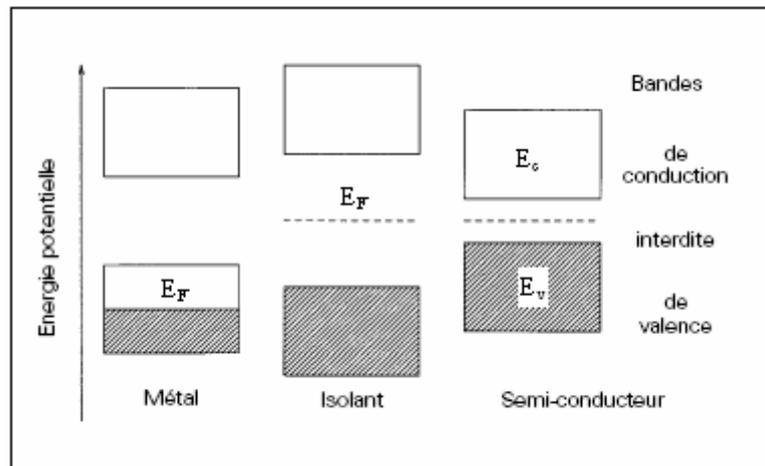


Figure I-3 : Diagramme de bandes d'un métal, d'un semi-conducteur et d'un isolant [18].

La bande de valence est occupée par des électrons (électrons de valence) qui sont liés au noyau et ne participent pas à la conduction. La bande interdite ($E_g = E_c - E_v$) ne possède aucun niveau d'énergie possible pour les électrons. Pour les semi-conducteurs les plus étudiés, sa valeur est relativement faible.

La bande de conduction correspond aux énergies des électrons libres qui participent à la conduction électrique. A température nulle, les électrons occupent tous des niveaux dans la bande de valence. Quand la température augmente, quelques électrons acquièrent de l'énergie et occupent des niveaux libres dans la bande de conduction. Pour les métaux, le gap est inexistant et les électrons libres peuvent participer à la conduction, et pour les isolants, le gap est très grand et la conduction est quasiment impossible.

I.2.1.2 Dopage

Un atome inséré dans le réseau cristallin du semi-conducteur et qui possède un électron de moins que celui-ci est une impureté de type "accepteur" (par exemple le Bore). A température nulle, l'accepteur est neutre. Mais, quand la température augmente, un électron de la bande de valence du semi-conducteur peut facilement ioniser l'impureté (B^-), laissant un trou dans la bande de valence, qui peut participer à la conduction électrique (conduction par trous). Le niveau d'énergie de l'électron de l'impureté ionisée doit être proche de la bande de valence. Il s'agit alors d'un semi-conducteur de type P, où les porteurs majoritaires sont les trous [19].

Un trou est en fait une lacune d'électrons dans la bande de valence. Cette lacune est équivalente à une charge positive, mobile, qui peut se propager d'un atome à un autre.

Pour les semi-conducteurs de type N, les impuretés possèdent un électron de plus que le semi-conducteur, qu'elles cèdent au niveau de la bande de conduction. Ce sont des impuretés de type "donneur" (comme le Phosphore). La conduction se fait par les électrons.

D'un point de vue énergétique, le dopage introduit des porteurs de charges au sein du matériau, modifiant ainsi l'énergie de Fermi de celui-ci. Pour les matériaux de type P (Figure I-4.b), cette énergie est proche de la bande de valence alors que pour les matériaux de type N (Figure I-4.a) elle est proche de la bande de conduction.

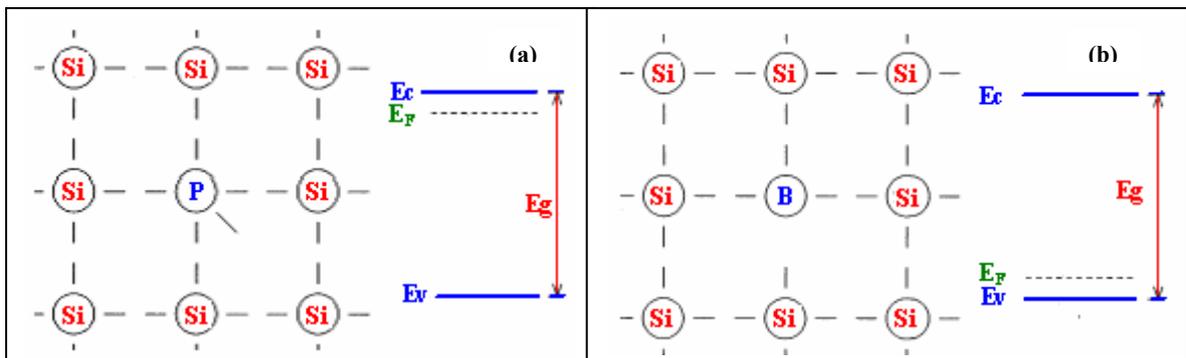


Figure I-4: (a) Silicium de type N, (b) Silicium de type P [18].

I.2.2 Principe de la jonction P-N

Elle résulte de la juxtaposition dans un même matériau semi-conducteur de deux zones; l'une de type *P* et l'autre de type *N*. Dès la juxtaposition, des courants de diffusion de trous et d'électrons se développent autour de la jonction et créent, au voisinage immédiat de celle-ci, une barrière de potentiel qui s'oppose aux courants de diffusion des porteurs majoritaires de chaque zone. Lorsque l'équilibre est atteint, le champ électrique créé par la barrière de potentiel est suffisant pour équilibrer les courants de diffusion des porteurs majoritaires et des porteurs minoritaires, par suite de la largeur très faible de la jonction (de 0,2 à quelques micromètres), d'où un courant global de diffusion nul.

Les niveaux d'énergie au voisinage de la jonction sont donnés par la Figure I-5. Au niveau de la jonction, la bande d'énergie est centrée autour du niveau de Fermi E_F ,

Pour créer un courant dans la jonction *pn*, il est nécessaire :

- soit d'abaisser la barrière de potentiel en polarisant la jonction.
- soit d'apporter une énergie supplémentaire aux porteurs dans la bande de valence (énergie thermique, énergie lumineuse, etc.),
- et de collecter rapidement les charges ayant traversé la bande interdite avant leur recombinaison.

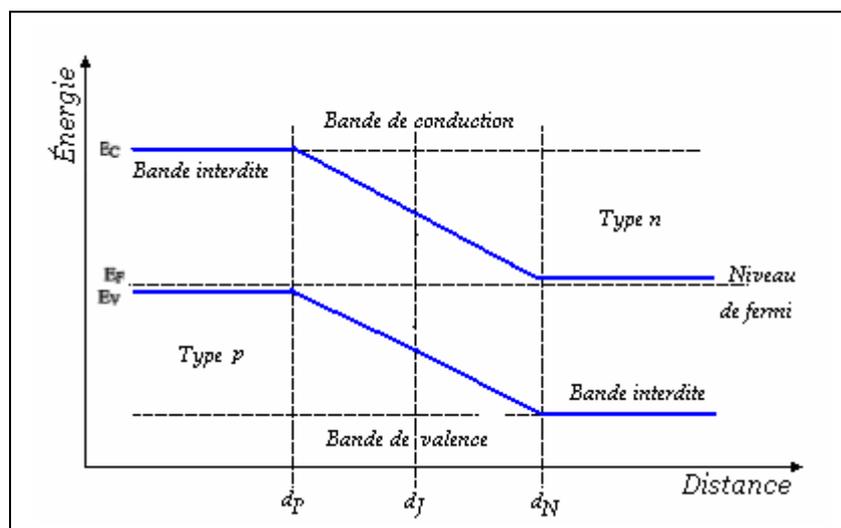


Figure I-5 : Diagramme de bandes d'énergie au voisinage de la jonction [10].

I.2.3 La conversion photon-électron

Pour créer un courant électrique dans un semi-conducteur, il faut lui fournir une énergie qui permet d'extraire des électrons de la bande de valence pour les transférer dans la bande de conduction, soit une énergie supérieure au gap de la bande interdite. La lumière dont les photons transportent une énergie $E=h\nu$ permet d'atteindre cet effet : c'est l'effet photovoltaïque.

La lumière pénétrant dans un semi-conducteur permet donc, si son énergie est supérieure au gap de faire passer le semi-conducteur de l'état isolant à l'état conducteur, ce phénomène augmentant lorsque la température du semi-conducteur s'élève. Lorsque un électron est extrait de la bande de valence pour passer dans la bande de conduction, il laisse derrière lui une lacune ou un trou à sa place : alors un autre électron proche de la bande de valence peut combler ce trou et laisser derrière lui à son tour un trou, on aura ainsi établi un courant de trous. Les deux types de courant ne seront pas différenciés, on parlera simplement de courant, qu'il s'agisse d'électrons ou de trous. De même on dit que l'absorption de l'énergie des photons par le semi-conducteur crée des paires de porteurs électron-trou.

Le principe de la conversion photon-électron à deux niveaux d'énergie est donné sur la Figure I-6.

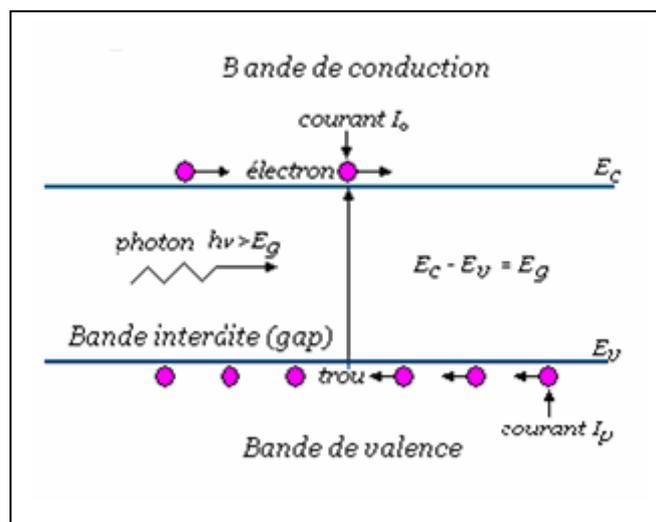


Figure I-6 : Principe de la conversion photon-électron [10].

I.3 La cellule solaire

I.3.1 Fonctionnement d'une cellule solaire

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

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

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant : d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque. Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électron-trou créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction p-n. D'autres structures, comme les hétérojonctions peuvent également être utilisées [14].

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la Figure I-7 :

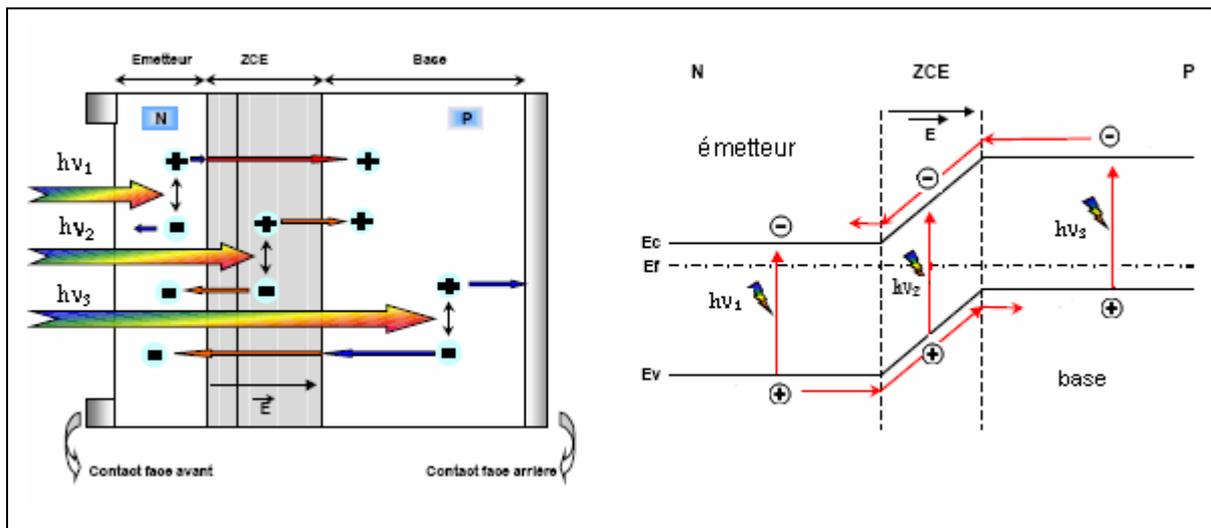


Figure I-7 : Structure et diagramme de bande d'une cellule solaire sous éclairement [12].

Sous éclairement les photons incidents créent des porteurs dans les zones N et P et dans la zone de charge d'espace (ZCE). Les paires électrons-trous photogénérées dans cette zone sont instantanément séparées par le champ électrique E régnant (Figure. I-7).

Les trous, charges positives, se voient accélérés vers la zone P, les électrons, charges négatives, vers la zone N. Trous et électrons deviennent alors majoritaires : c'est le photocourant de génération. Parallèlement, les porteurs minoritaires, trous générés côté N et électrons générés côté P, créent un gradient de concentration et diffusent dans le matériau. S'ils atteignent la ZCE sans se recombiner, le champ électrique leur fait traverser la zone déplétée afin d'atteindre la région où ils deviennent majoritaires : c'est le photocourant de diffusion.

La présence de contacts ohmiques assure la collecte des porteurs d'où la création d'un courant photogénéré I_{ph} , somme des deux contributions précédentes, et qui participe au courant total.

I.3.2 Caractéristiques de la cellule photovoltaïque

I.3.2.1 Paramètres photovoltaïques

Le tracé de la variation du courant en fonction de la tension, à l'obscurité et surtout sous éclairement, permet d'évaluer les performances d'une cellule solaire [11]. La Figure I-8 donne deux exemples de caractéristiques I-V, sans et sous éclairement.

À partir de la caractéristique I-V sous éclairement, on extrait différents paramètres photovoltaïques qui nous permettront de calculer le rendement de conversion de la cellule photovoltaïque :

- Le courant de court-circuit I_{cc} est le courant qui circule à travers la jonction sous illumination sans application de tension. Il est généralement approximé par I_{ph} [4,5].

$$I_{cc} \approx I_{ph} \quad (I.2)$$

-La tension de circuit ouvert V_{co} , est la tension mesurée lorsque aucun courant ne circule dans le dispositif photovoltaïque. Dans le cas idéal V_{co} est donnée par la relation [4,5] :

$$V_{co} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_s} - 1 \right) \quad (I.3)$$

- Les valeurs I_{\max} et V_{\max} sont définies de telle sorte que le produit $|I_{\max} V_{\max}|$ soit maximal. Ce dernier correspond à la puissance maximale P_{\max} pouvant être délivrée par la cellule photovoltaïque.

- Le facteur de forme **FF** est le rapport de la puissance maximale au produit de la tension en circuit ouvert et du courant de court-circuit soit [6, 11,15]:

$$FF = \frac{P_{\max}}{V_{co} I_{cc}} = \frac{V_{\max} I_{\max}}{V_{co} I_{cc}} \quad (I.4)$$

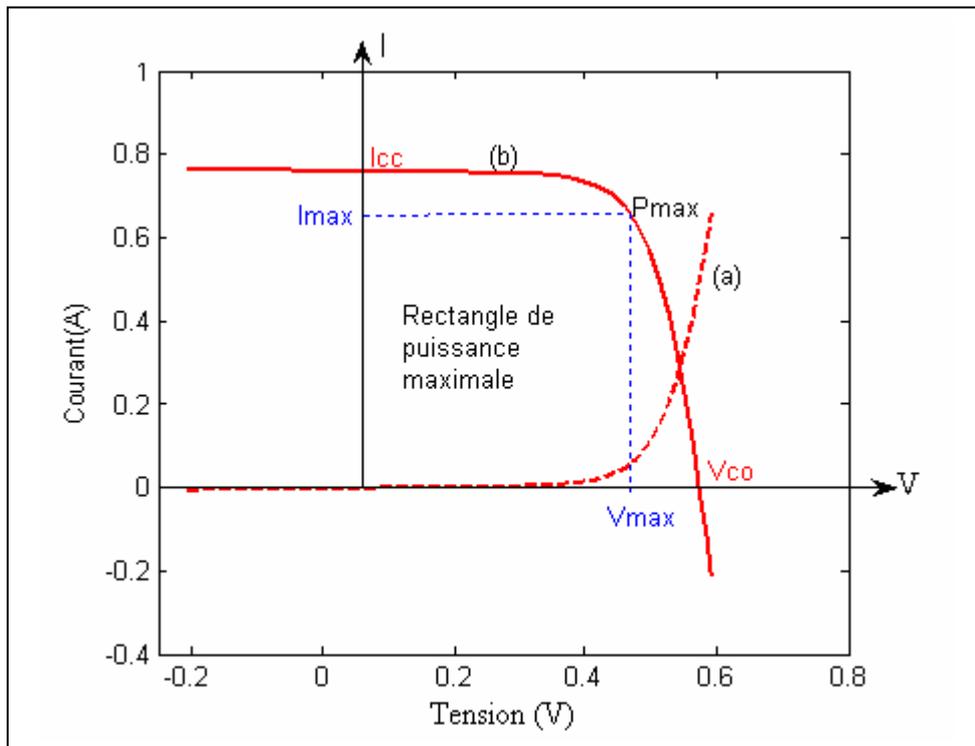


Figure I-8 : Caractéristique $I-V$ d'une cellule photovoltaïque.

(a) à l'obscurité (en tirets) ; (b) sous éclairement (en trait continu).

Le rendement, η des cellules photovoltaïque, exprimé en pourcentage désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente, P_{in}

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{FF \times I_{cc} \times V_{co}}{P_{in}} \quad (I.5)$$

Le rendement de conversion est un paramètre essentiel. En effet, la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule. Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert.

I.3.2.2 Circuit électrique équivalent

Le tracé du circuit équivalent d'un système est fréquemment utilisée afin de décrire son comportement électrique à l'aide de composants électrique (Source, résistance, diode) [12, 15]. Nous allons décrire ici par cette méthode une cellule solaire à l'obscurité et sous éclairage.

À l'obscurité, une cellule solaire suit le comportement d'une diode classique, elle commence à conduire lorsque la tension appliquée est supérieure à la tension de seuil V . Dans le cas d'une cellule idéale dans le noir, la caractéristique I-V est représentée par la relation suivante :

$$I_{obs} = I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (I.6)$$

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

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

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

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

Le schéma équivalent est représenté sur la Figure I-9 par un générateur de courant I_{cc} , une diode et deux résistances R_s et R_{sh} .

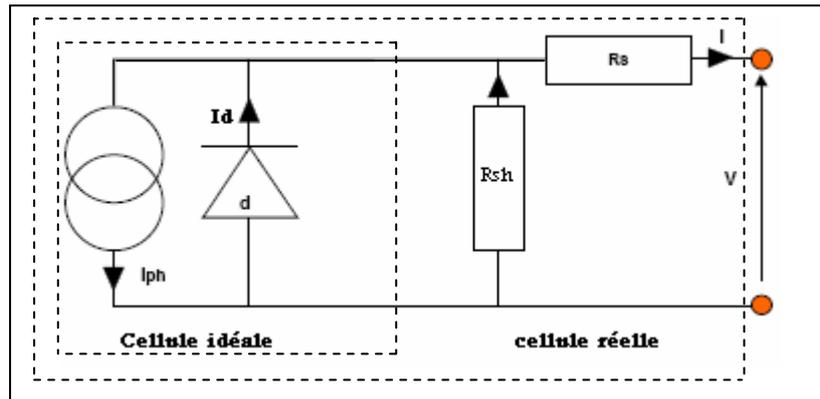


Figure 1-9 : Circuit équivalent d'une cellule solaire à jonction p-n [25].

↳ **Le générateur de courant** : il délivre le courant I_{ph} correspondant au courant photogénéré.

↳ **La diode d** : modélise la jonction pn

↳ **La résistance série R_s** : modélise les pertes résistives au sein de la photopile (les métallisations). Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule.

↳ **La résistance parallèle R_{sh}** : modélise les courants de fuite qui court-circuitent la Jonction (fuites par les bords de la cellule et au niveau de la jonction). Cette valeur devra être la plus élevée possible.

Le cas idéal est représenté par R_{sh} égale à l'infini et R_s égale à zéro. L'observation de la Figure I-9 nous conduit à modifier l'équation courant-tension (I.7) de la cellule photovoltaïque pour obtenir :

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1.8)$$

Ou ainsi :

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right) - G_{sh}(V + IR_s) \quad (1.9)$$

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

I.3.2.3 Réponse spectrale [12]

La réponse spectrale appelée aussi, rendement de collection à chaque longueur d'onde est défini comme étant le rapport entre le courant généré par la cellule et la puissance lumineuse incidente, en fonction des différentes longueurs d'onde formant le rayonnement incident.

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

QE représente le rendement quantique (quantum efficiency) de la cellule, c'est à dire le rapport entre le nombre d'électrons générés et le nombre de photons incidents.

On peut alors accéder au comportement et à l'efficacité de chaque région constitutive de la cellule, l'émetteur (en surface de la cellule) collecte les photons de faible longueur d'onde alors que la base ne prend en compte que les photons de grande longueur d'onde (Figure I-10).

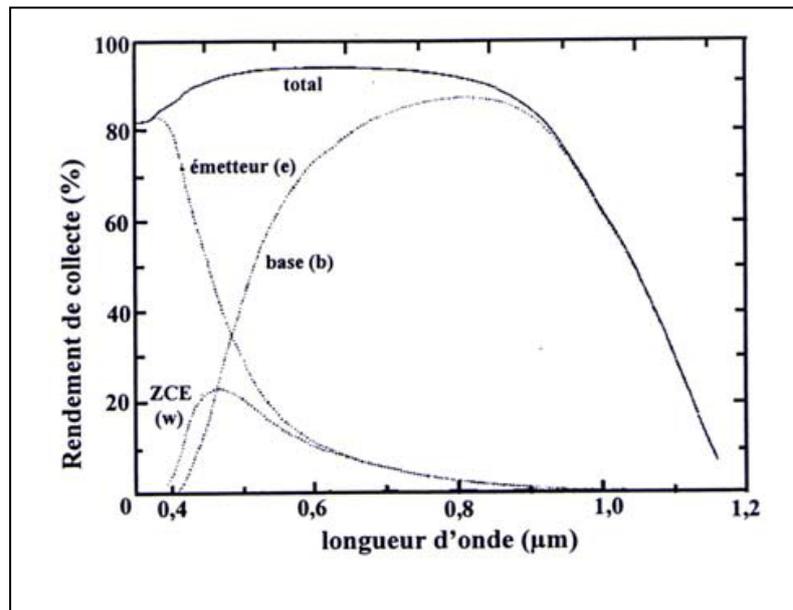


Figure I-10 : Exemple de réponse spectrale d'une cellule photovoltaïque [12].

I.3.3 Influence des paramètres sur la caractéristique courant–tension

I.3.3.1 Influence de l'éclairement

L'éclairement et la température de la cellule vont modifier la caractéristique I-V de la cellule solaire, non dans sa forme générale, mais pour les valeurs I_{cc} , V_{co} et le produit $I_{max}V_{max}$ [3]. La Figure I-11 présente les caractéristiques courant-tension d'une cellule monocristalline typique de $10 \times 10 \text{ cm}^2$ pour plusieurs intensités de rayonnement solaire [2]. On remarque que le courant de court circuit est directement proportionnel à l'intensité incidente. Par contre la tension de circuit ouvert n'est pas très dégradée lorsque l'intensité de flux incidente diminue. Donc la puissance maximale est proportionnelle à l'éclairement.

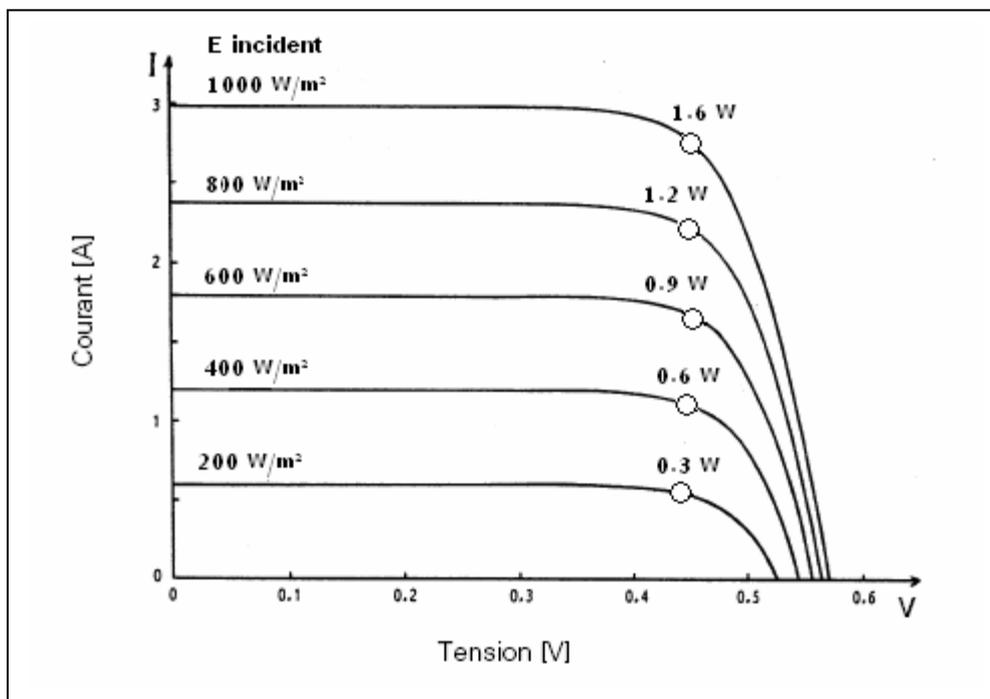


Figure I-11 : Influence de flux lumineux sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire [2].

I.3.3.2 Influence de la température

La température est un paramètre important dans le comportement des cellules solaires puisque les cellules sont exposées au rayonnement solaire. La Figure I-12 présente le comportement de la même cellule sous une lumière de 1 kW/m^2 et à des températures entre 0 et 80°C [2].

On remarque une augmentation du photocourant lorsque la température augmente; ceci peut être expliqué par une meilleure absorption de la lumière, le gap baisse lorsque la température augmente. Cet accroissement peut être négligé au point de puissance maximale. En même temps, on assiste une diminution nette de la tension de circuit ouvert (environ 2 à 2.5mV par degré, soit une variation relative de 0.41% par degré). L'augmentation de température se traduit donc au total par une diminution de la puissance maximale disponible d'environ de 0.35 % par degré.

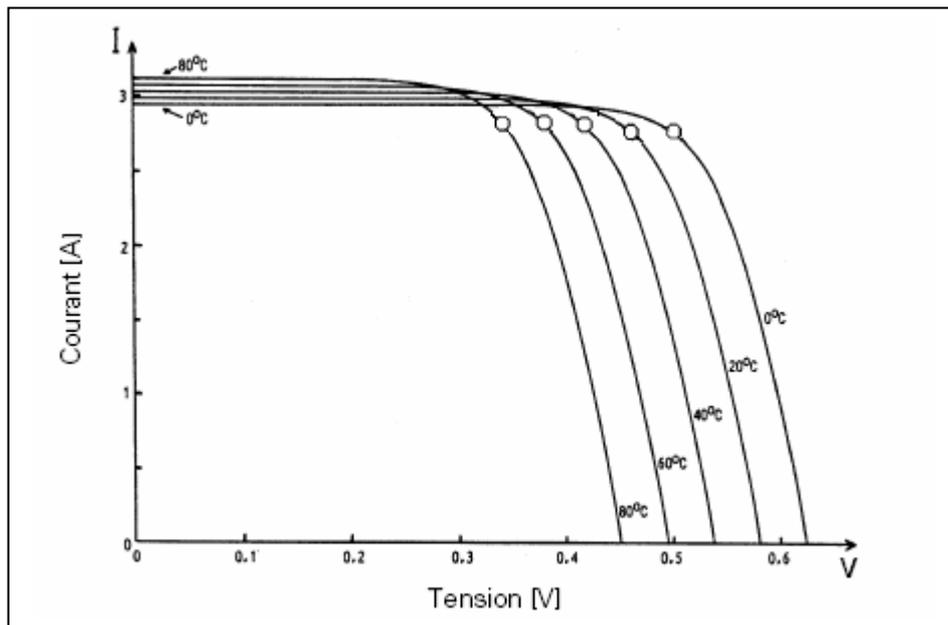


Figure I-12 : Influence de la température sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire [2].

I.3.3.3 Influence de la résistance série et la conductance parallèle

Les résistances parasites R_s et R_{sh} vont modifier la caractéristique I-V. Les Figures I-13 et I-14 montrent respectivement l'influence de la résistance série d'une cellule solaire sous éclairement et à l'obscurité.

Les deux caractéristiques courant-tension se déforment rapidement sous l'effet de la résistance série. Elle agit sur la partie à tension élevée de la caractéristique directe. Sous éclairement, l'augmentation de R_s diminue la pente de la courbe I (V) et ne modifie pas la tension de circuit ouvert, mais lorsque la résistance série est anormalement élevée, elle peut diminuer notablement la puissance extraite aux bornes de la cellule.

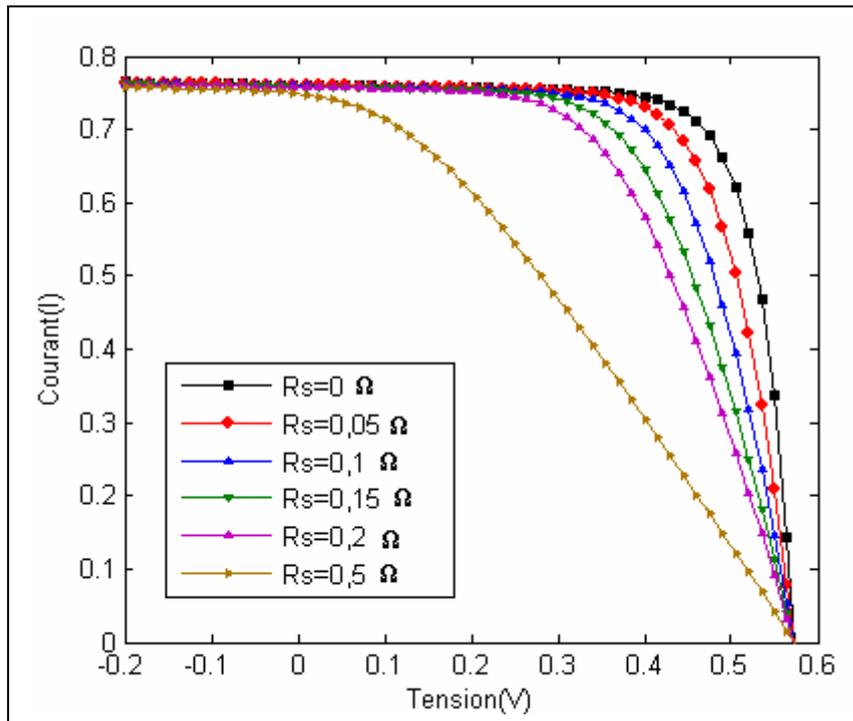


Figure I-13 : Effet de la résistance série sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire éclairée.

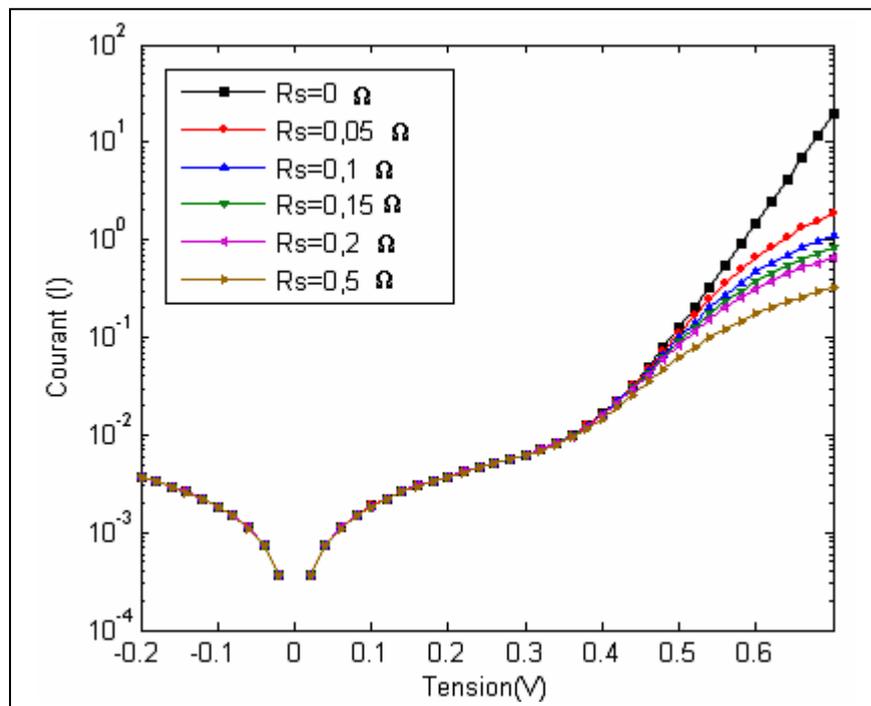


Figure I-14 : Effet de la résistance série sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire non éclairée.

Les Figures I-15 et I-16 montrent l'influence de la conductance parallèle sur les caractéristiques courant-tension d'une cellule solaire à l'obscurité et sous éclairage.

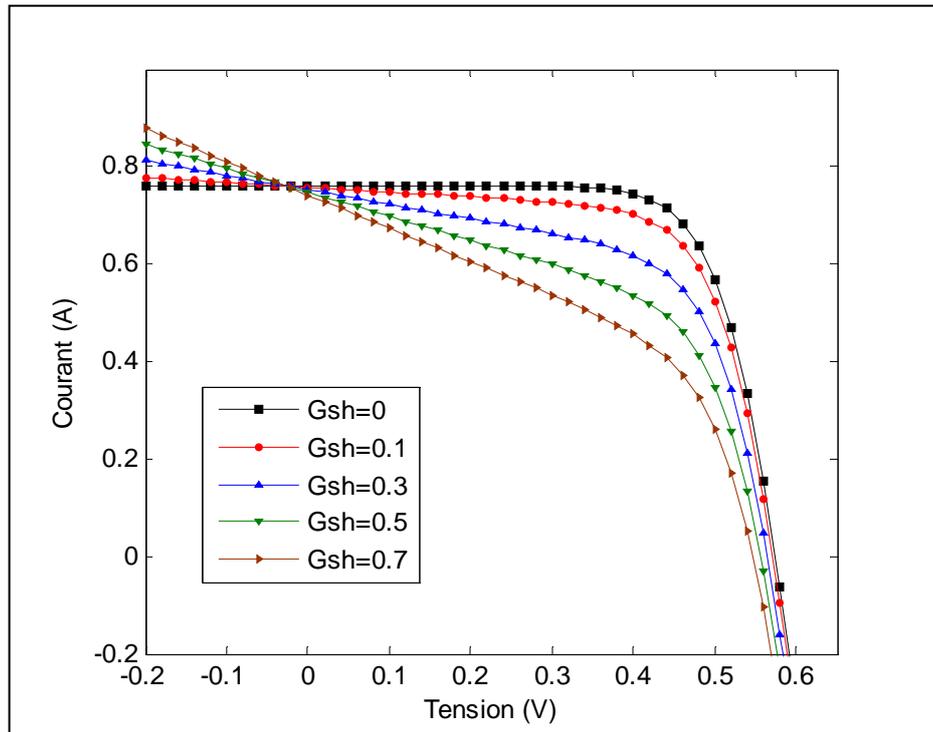


Figure I-15 : Effet de la conductance parallèle sur la caractéristique I-V sous éclairage.

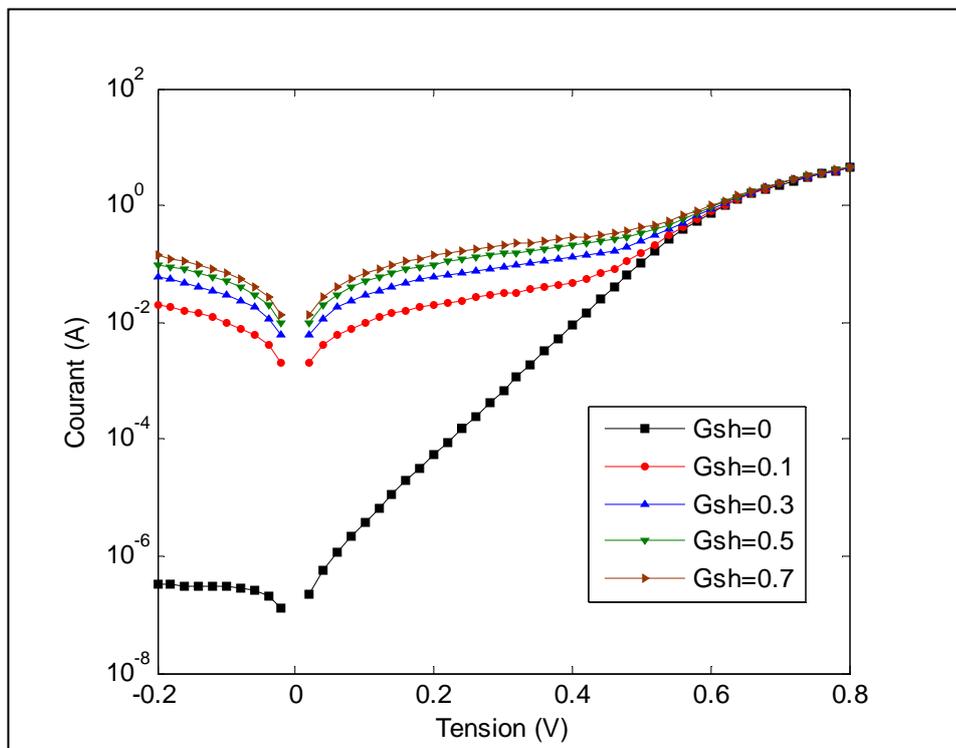


Figure I-16 : Effet de la conductance parallèle sur la caractéristique I-V à l'obscurité.

On observe que la conductance parallèle agit sur la partie à faible tension de la caractéristique courant-tension à l'obscurité. Sous éclaircissement l'effet de diminution de la conductance parallèle G_{sh} est d'augmenter la pente de la courbe $I(V)$.

I.3.4 Structure des cellules photovoltaïques

I.3.4.1 Le silicium comme matériau de base pour le photovoltaïque

L'industrie photovoltaïque est concentrée à plus de 90% [14] sur l'utilisation du silicium comme matériau de base (Figure I-17). Ce semi-conducteur présente en effet, différents avantages : il est abondant à la surface du globe car facilement extrait à partir du sable. Il n'est pas toxique comme certains semi-conducteurs III-V. Il peut se doper facilement (avec le phosphore ou le bore). Son seul véritable inconvénient est son gap indirect à 1,1 eV. Ceci entraîne une absorption du rayonnement plus faible qu'avec un matériau à gap direct : pour absorber 90% du spectre solaire, il faudra utiliser une épaisseur de 100 μm pour le silicium, alors que seulement 1 μm de GaAs suffisent. De plus, la largeur de bande interdite du silicium fait qu'il n'est pas le mieux adapté pour capter la part optimale du spectre solaire entre 1 et 1,7 eV : le GaAs , avec une largeur de bande interdite de 1,38 eV, permet d'accéder à des rendements théoriques plus élevés.

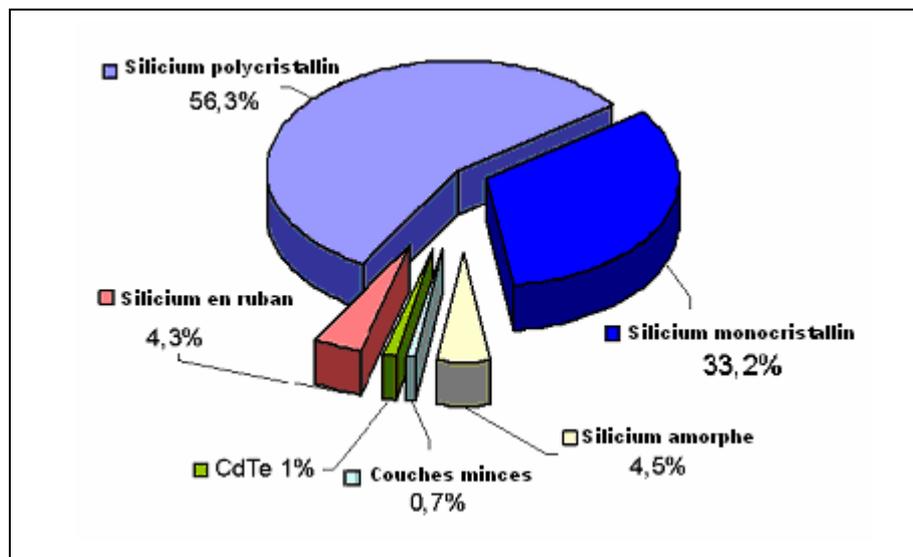


Figure I-17: Utilisation des matériaux photovoltaïques en 2003 [14].

I.3.4.2 Les constituants de base d'une cellule photovoltaïque

L'architecture des dispositifs photovoltaïques modernes se révèle particulièrement complexe, nous allons nous limiter à une description simplifiée de la cellule [12].

Comme nous l'avons vu précédemment, la jonction P-N constitue le coeur de la cellule photovoltaïque. Les porteurs vont être générés soit dans les zones N ou P, soit dans la zone de charge d'espace. Les contacts métalliques, en face avant et en face arrière, constituent la structure de collecte permettant de récupérer les porteurs photogénérés.

La quantité de photons pénétrant la cellule photovoltaïque dépend de la réflectivité de sa surface. La réflectivité caractérise la quantité de photons réfléchi par la surface, soit une perte du rayonnement incident. Pour minimiser la réflexion de la lumière en surface, cette dernière est recouverte d'une couche anti-reflet (CAR). Le rôle de la couche anti-reflet est d'adapter l'indice optique entre le milieu extérieur et la cellule pour minimiser la réflexion du flux de photons incident.

La texturisation de surface peut également être utilisée pour limiter la réflectivité de la surface. La texturisation consiste à modifier la planéité de la surface en introduisant un relief, généralement de forme pyramidale. Ce dernier, tout en augmentant la surface, induit des réflexions multiples sur les facettes le constituant, piégeant ainsi un maximum de lumière. La texturisation de surface peut se faire par voie chimique, par voie mécanique, par gravure plasma ou par utilisation de silicium poreux [12].

Une cellule photovoltaïque typique est représentée sur la Figure I-18:

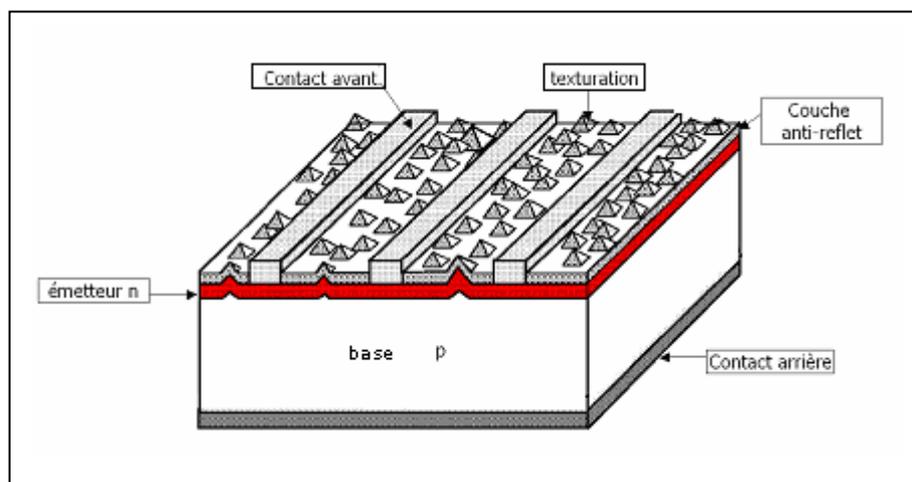


Figure I-18 : Représentation simplifiée d'une cellule solaire [9].

I.3.5 Pertes de rendement

En pratique, la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique n'est pas totale. Différentes pertes viennent influencer le rendement d'une cellule. Elles sont dans la plupart des cas dues à la nature du matériau et à la technologie utilisée. Les pertes principales représentées dans la Figure 1-19, proviennent de l'absorption incomplète du spectre solaire (perte de 23.5% pour le cas du silicium) ainsi que du phénomène de thermalisation (les photons d'énergie supérieure au gap ne pourront générer qu'une seule paire/électron trou. L'excès d'énergie est perdu sous forme de chaleur). Sous un éclairement de AM1.5, cette perte est évaluée à 33 % dans le cas du silicium [9].

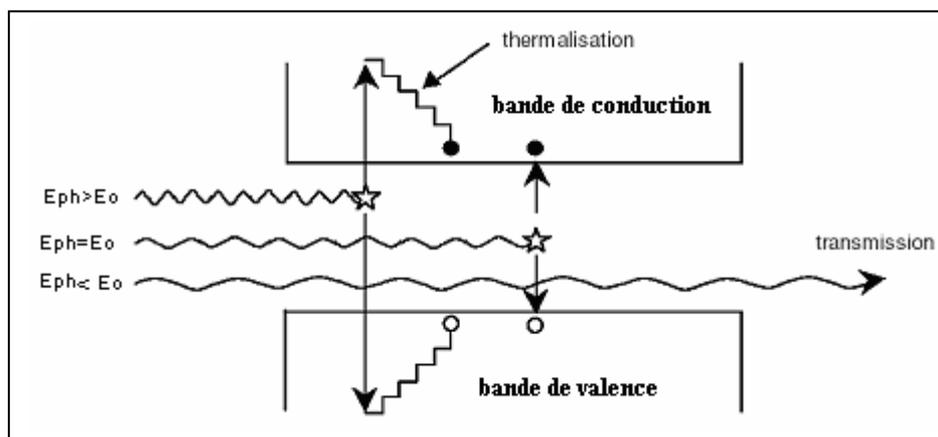


Figure I-19 : Schéma illustrant les deux pertes principales

- l'absorption incomplète du spectre solaire et le phénomène de thermalisation [9].

D'autres facteurs de pertes diminuent encore le rendement de la cellule réelle comme :

– **Facteur de tension** : Le facteur de tension $F_v = V_{co} q / E_g$ est le rapport de la tension maximale aux bornes de la cellule (V_{co}) et la tension de gap (E_g/q). La tension (V_{oc}) ne pourra pas dépasser la tension de gap E_g/q .

– **Facteur de forme FF** : Même dans le cas d'une cellule idéale, ne peut dépasser 0,89 [14], puisque les équations courant-tension sont régies par des équations sous forme exponentielle : $\exp(qV/kT)$. Il ne pourra donc pas exister de courbe courant/tension rectangulaire (voir la caractéristique courant-tension de la Figure I-8). Ce paramètre dépend de la conception de la cellule, de la qualité de la jonction p-n et du matériau, de la résistivité des contacts métalliques, etc....

- **Réfectivité de la surface** : La quantité de rayonnement incident pénétrant le semi-conducteur est limitée par le coefficient de réflexion R de ce dernier. Pour un flux de photons incidents φ_0 , le flux pénétrant le matériau est $(1-R).\varphi_0$, la quantité $R.\varphi_0$ étant réfléchi. Afin de diminuer les réflexions, la surface de la cellule est texturée et recouverte d'une couche anti-reflet
- **Taux d'ombre** : Il correspond à la surface de semi-conducteur masquée par les contacts métalliques opaques. On estime que le taux d'ombre représente 5 à 6% environ de la surface totale [12].
- **Le rendement de collecte** : Le rendement de collecte correspond au rapport entre le nombre de porteurs de charge effectivement collectés et le nombre total photogénérés. 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 (le temps moyen entre la génération et la recombinaison d'un porteur minoritaire).
- **Les pertes ohmiques** des métallisations avant et arrière et du matériau (R_s) ainsi que les pertes dues à la résistance parallèles (R_{sh}).

I.4 Les modules photovoltaïques

Le «module» photovoltaïque est par définition un ensemble de photopiles assemblées pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition à la lumière. En effet, une photopile élémentaire ne génère pas suffisamment de tension. Il faut donc toujours plusieurs photopiles en série pour générer une tension utilisable [2].



Figure I-20 : Module photovoltaïque [25].

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation. De plus, la fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique.

I.4.1 Association en série

La caractéristique courant-tension d'un groupement quelconque de cellules sera homothétique de la courbe $I(V)$ d'une cellule de base. Il sera de même pour le réseau de caractéristiques. En conséquence, tout ce qui a été dit pour une cellule individuelle restera valable pour un groupement [3].

En additionnant des N_s cellules ou des modules identiques en série (Figure I-21.a), le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série. La Figure I-21.b présente la courbe de puissance du groupement ainsi réalisé.

La caractéristique du groupement (G) est obtenue en multipliant point par point et pour un même courant la tension individuelle par N_s . En particulier, l'impédance optimale du groupement sera N_s fois plus grande que celle de la cellule (ou module) de base. Les résistances séries s'ajoutent et les résistances parallèles s'ajoutent également.

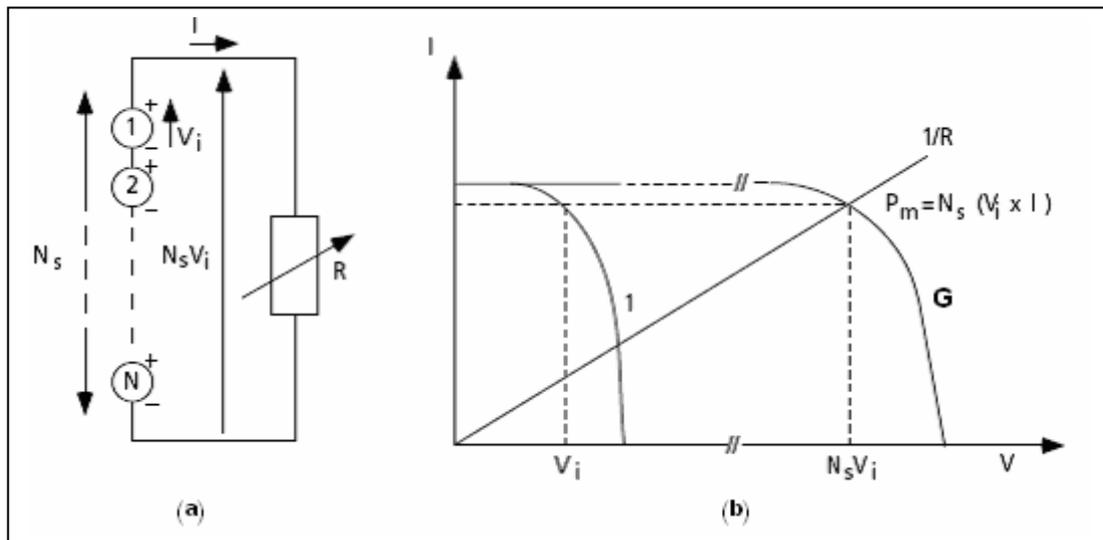


Figure I-21 : Cellules identiques en série [3,4].

Si les cellules des modules en série ne sont pas identiques ou si certaines cellules sont partiellement ombragées, la tension d'utilisation des modules en série sera légèrement diminuée (voir Figure I-22). Pour une impédance de charge faible, les cellules moins efficaces peuvent devenir réceptrices si le courant d'utilisation est inférieur au courant produit par ces cellules. Ainsi, pour une impédance nulle (court-circuit), une cellule ombragée sera soumise à ses bornes à une tension inverse égale à la somme des tensions

délivrées par les autres cellules. La puissance que devra dissiper cette cellule sera de $P_2 = V_t \times I$ [17].

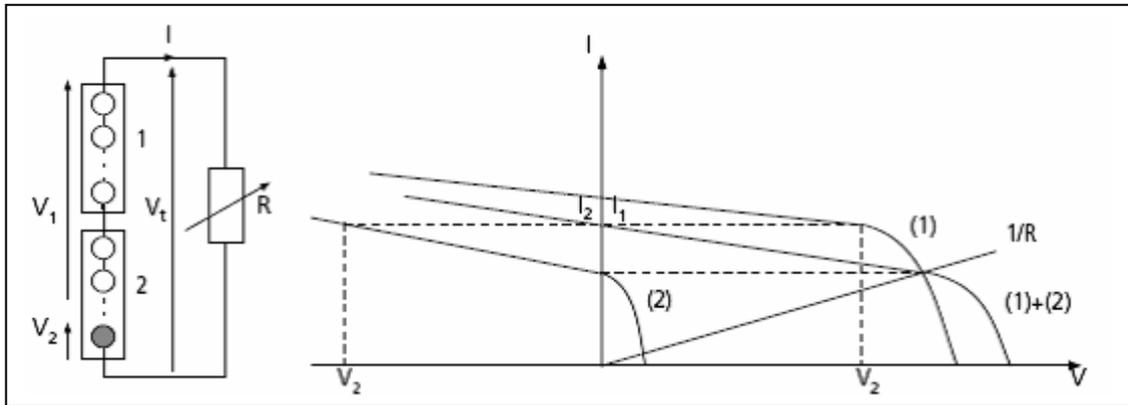


Figure I-22 : Modules en séries avec cellules occultées [17].

I.4.2 Association en parallèle

La Figure I-23 présente la courbe de puissance d'un groupement de N_p cellule ou de N_p module en parallèles. Cette fois-ci, c'est la tension de chacun des éléments qui doit être identique, les courants s'ajoutant, la nouvelle courbe est obtenue en multipliant point par point et pour chaque valeur de tension, le courant de la cellule élémentaire par N_p . L'impédance optimale du groupement sera N_p fois plus faible que celle de l'élément de base.

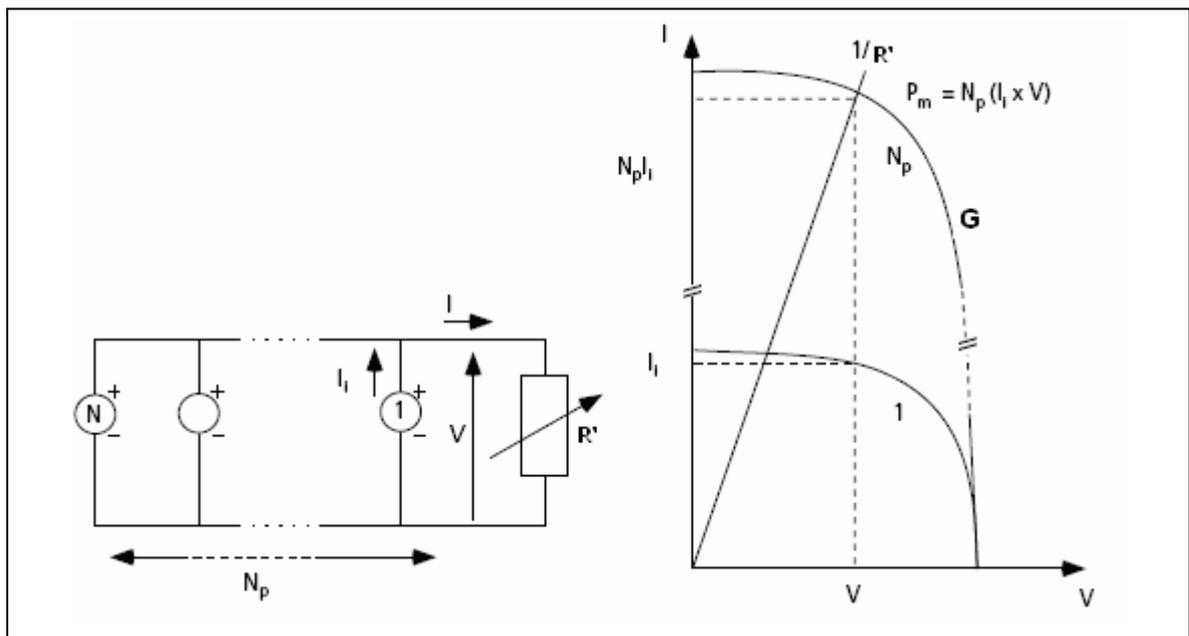


Figure I-23 : Cellules identiques en parallèles [3,4].

Si les modules en parallèles ne sont pas identiques ou si quelques cellules d'un module sont ombragées, le courant d'utilisation total des modules sera plus faible. Pour une impédance de charge élevée, les modules moins performants deviendront récepteurs si la tension d'utilisation est supérieure à la tension produite par ces modules. Une dissipation de puissance importante peut devenir dangereuse au niveau de la cellule la plus faible de ces modules.

Ainsi pour le cas le plus critique où la charge est nulle et le circuit ouvert, le courant des branches des modules performants se dissipera dans la branche la moins performante [17].

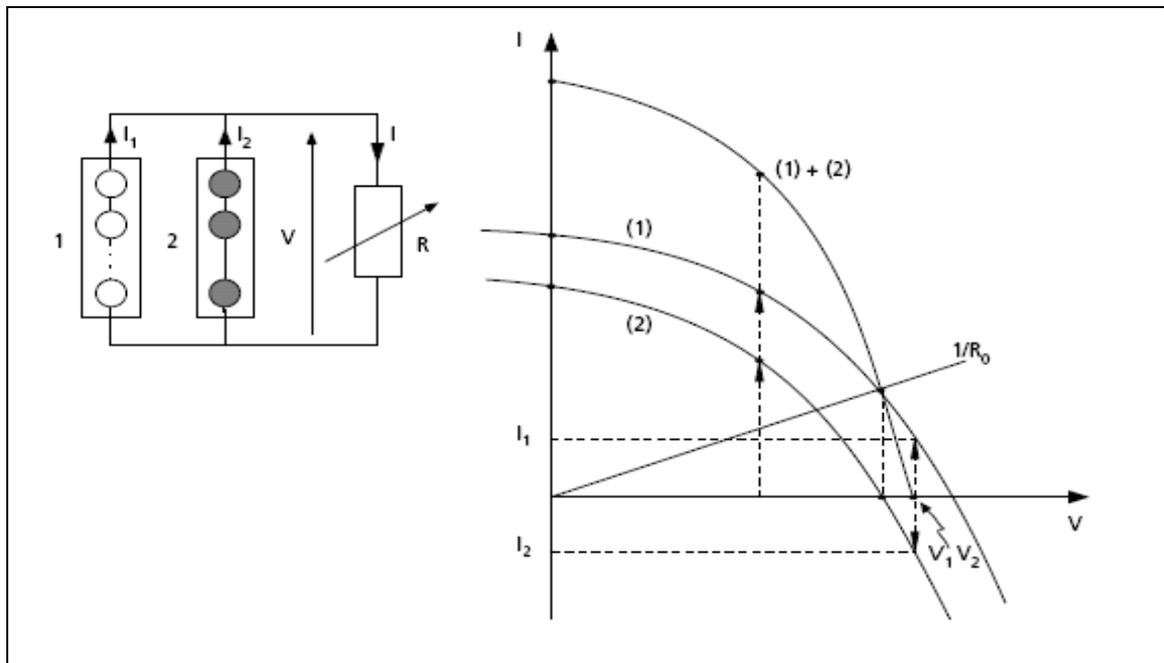


Figure I-24 : Modules en parallèles avec cellules occultées [17].

I.4.3 Association en série-parallèle

Le champ photovoltaïque est l'ensemble des panneaux montés en série et en parallèle pour atteindre une tension et un courant plus grands. Une association série-parallèle de modules photovoltaïques aura une caractéristique $I(V)$ théorique en tout point homothétique à celle des module de base, et obtenue en modifiant les échelles sur les deux axes. La Figure I-25 présente un tel groupement de N_{ms} modules en séries dans une branche, et N_{bp} branches en parallèle.

Si P_m est la puissance crête disponible sur un module, la puissance disponible aux bornes de ce panneau photovoltaïque sera $N_{ms} N_{bp} P_m$ dans le cas idéal où tous les modules ont des caractéristiques électriques rigoureusement identiques. Cette puissance pourra être obtenue sous les conditions de référence (1 kWm^{-2} et 25°C) sur la charge optimale du groupement R_{optg} telle que [3] :

$$R_{optg} = (N_{ms}/N_{bp}).R_{optm} \quad (\text{I-10})$$

Où R_{optm} est la charge optimale du module de base dans les mêmes conditions.

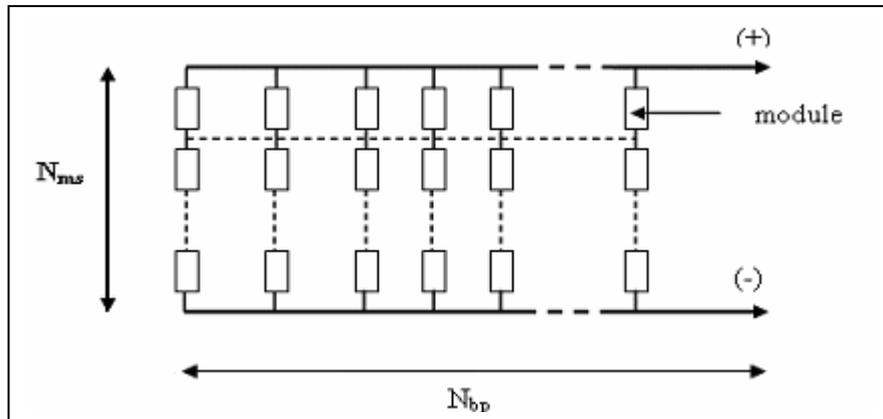


Figure I-25 : Champ photovoltaïque [3,4].

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions sur le soleil et le rayonnement solaire. Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques, leurs caractéristiques principales ainsi que l'étude de l'influence des divers paramètres (la température, l'éclairement et les résistances parasites) sur ces caractéristiques. Puis nous avons abordé les paramètres limitant leur rendement ainsi que l'étude de l'association des cellules en série, en parallèle et en série-parallèle.

Chapitre II

Etude comparative des méthodes d'extraction des paramètres des cellules solaires

Introduction

Le fonctionnement de la cellule solaire est décrit généralement par la caractéristique courant-tension (I-V) dont l'analyse permet d'obtenir des informations sur les mécanismes de transport électriques et sur les imperfections des étapes technologiques utilisées pour l'obtention du dispositif.

Dans ce chapitre nous décrivons une étude comparative de différentes méthodes d'analyse de la caractéristique (I-V) d'une cellule solaire sous éclairement et à l'obscurité qui permet dans le cadre du modèle du dispositif à une diode de calculer les paramètres de la cellule solaire. Ce modèle constitue cependant l'approximation de base la plus utilisée dans l'étude systématique des cellules solaires et de l'influence des procédés de fabrication [28].

En se basant sur la caractéristique courant-tension mesurée, différentes méthodes ont été proposées par plusieurs auteurs [26-44] pour déterminer les paramètres qui décrivent le modèle électrique non linéaire des cellules solaires. Ces paramètres sont généralement le courant de saturation, la résistance série, le facteur d'idéalité et la conductance parallèle. Certaines de ces méthodes utilisent la caractéristique I-V mesurée sous éclairement à un seul ou différent niveau d'éclairement [26-32], certains utilisent des conditions à l'obscurité [33-34], tandis que d'autres utilisent des mesures d'obscurité et d'illumination [35-36]. Les méthodes récentes sont basées sur les caractéristiques I-V mesurées et la conductance du composant [37-38]. De plus, des méthodes utilisent des procédures d'intégrations [39] basées sur le calcul de l'aire limitée par la courbe I (V). Des méthodes d'optimisations au sens des moindres carrés [38-46] ont été aussi proposées.

Le modèle que nous avons utilisé pour décrire la relation entre le courant et la tension dans la cellule solaire à l'obscurité est donné par l'expression :

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{\beta(V - R_s I)}{n}\right) - 1 \right] + G_{sh}(V - R_s I) \quad (\text{II.1})$$

Où $\beta = q/kT$ est l'inverse de la tension thermique, q est la charge électrique, k est la constante de Boltzmann, T est la température. I_s , n , R_s et G_{sh} sont respectivement le courant de saturation, le facteur d'idéalité ou de qualité, la résistance série, la conductance parallèle.

Le modèle qui décrit la cellule solaire éclairé s'écrit :

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{\beta(V + R_s I)}{n}\right) - 1 \right] - G_{sh}(V + R_s I) \quad (\text{II.2})$$

Où I_{ph} est le photocourant.

Ce modèle peut être appliqué aussi pour des modules qui sont constitués de cellules identiques reliées en série ou en parallèle

Notre travail consiste à extraire numériquement les paramètres I_s , n , R_s , G_{sh} et I_{ph} de la caractéristique courant-tension représentés par les équations (II.1 et II.2). Différentes méthodes seront présentées dans ce chapitre et sont appliquées à différentes caractéristiques expérimentales courant-tension des cellules solaires et des modules.

II.1 Simulation de la caractéristique I-V d'une cellule solaire

Le modèle mathématique de la cellule solaire débouche sur la caractéristique simulée $I(V)$, qui se présente sous forme d'une équation non linéaire $f(V, I) = 0$ donnée par (II.2). C'est une équation implicite dont la résolution fait appel à des méthodes numériques [57].

La méthode choisie pour notre étude est la méthode de Newton-Raphson dont l'algorithme de cette méthode est le suivant :

- ☒ Etant donnée ε un critère d'arrêt;
- ☒ Etant donnée N , le nombre maximal d'itérations;
- ☒ Etant donnée I_0 , une valeur initiale de la solution;

☒ Effectuer
$$I_{i+1} = I_i - \frac{f(V, I_i)}{\frac{\partial f(V, I_i)}{\partial I}};$$

Si $|I_{i+1} - I_i| < \varepsilon$ Convergence atteinte ;

- ☒ Ecrire la solution I_{i+1}

Arrêt

- ☒ Si le nombre maximal d'itérations N est atteint et la convergence non atteinte
- ☒ Retour à l'étape 4. [16,20]

En considérant les valeurs théoriques de I_s , n , R_s , G_{sh} , et de I_{ph} , la résolution de l'équation (II.1/ II.2) par l'algorithme précédent donne la caractéristique I-V simulée du composant .

II.2 Méthodes d'extraction des paramètres d'une cellule solaire

II.2.1 Méthodes existantes

II.2.1.a Méthode d'optimisation verticale

La méthode des moindres carrés (Least Mean Square : LMS) est l'une des méthodes les plus utilisées pour modéliser les caractéristiques I-V expérimentales par une fonction analytique prédéterminée. A. Ferhat-Hamida et al [48] ont proposés cette méthode qui consiste à minimiser l'écart moyen absolu ou relatif entre l'ensemble de N mesures I^{ex} et l'ensemble des résultats I^{th} calculés par le modèle de l'équation (II.2). En d'autres termes, il s'agit de minimiser (optimiser) la fonction suivante :

$$S = \sum_{i=1}^N \left(\frac{I_i^{ex} - I_i^{th}}{I_i^{th}} \right)^2 \quad (\text{II.a.1})$$

L'analyse mathématique nous révèle que ce minimum est atteint au point où le gradient de S par rapport aux paramètres s'annule. Dans ce cas, les paramètres sont $(I_s, R_s, n, G_{sh}, I_{ph})$, ceci se traduit par:

$$\overrightarrow{grad}(S) = \begin{cases} \partial S / \partial I_s \\ \partial S / \partial R_s \\ \partial S / \partial n \\ \partial S / \partial G_{sh} \\ \partial S / \partial I_{ph} \end{cases} \quad (\text{II.a.2})$$

Il s'agit donc de résoudre un système d'équations non linéaires. Une méthode de résolution efficace du type Newton-Raphson ou Levenberg-Marquardt permet de trouver la solution. Cette méthode a été appliquée à des cellules solaires sous éclairage et à des diodes Schottky à base du 4H-SiC [5].

II.2.1.b Méthode de Kaminski et al.

Cette technique a été décrite par Kaminski dans son papier [34] pour extraire les différents paramètres d'une cellule solaire à l'obscurité.

Le modèle à deux exponentielles a été utilisé pour modéliser la caractéristique I-V des cellules :

$$I = I_{s1}[\exp(\alpha_1(V - IR_s) - 1)] + I_{s2}[\exp(\alpha_2(V - IR_s) - 1)] + \frac{V - IR_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.b.1})$$

Avec :

$$\alpha_i = \frac{q}{n_i k T} ; n_i : \text{facteur d'idéalité} ; I_{s_i} : \text{courant de saturation} ;$$

Pour l'extraction de paramètres, la courbe est séparée dans deux régions (La Figure II-1).

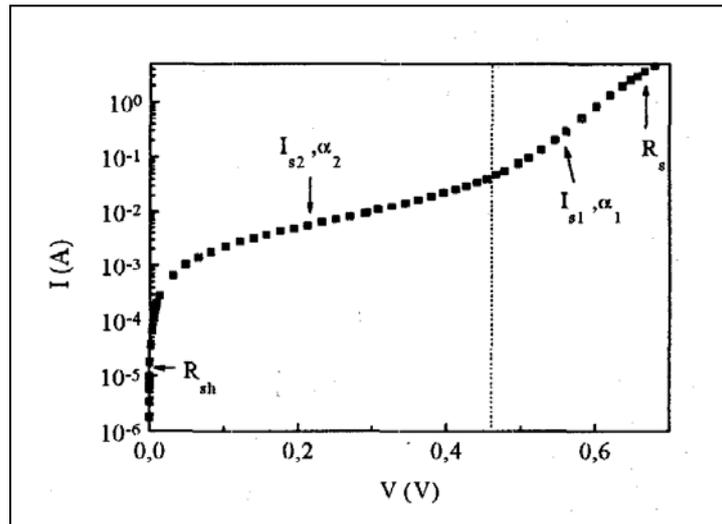


Figure II-1 : Courbe $I(V)$ à l'obscurité avec les deux différentes régions.

Pour une tension supérieure à 0.45 V, la courbe peut être décrite par la relation :

$$I = I_{s1}[\exp(\alpha_1(V - IR_s) - 1)] \quad (\text{II.b.2})$$

Pour une tension inférieure à 0.45 V, l'équation suivante est utilisée :

$$I = I_{s2}[\exp(\alpha_2(V - IR_s) - 1)] + \frac{V - IR_s}{R_{sh}} \quad (\text{II. b.3})$$

Pour $I \gg I_s$ l'équation (II.b.2) est approximée par :

$$\ln I = \ln I_s + \alpha(V - IR_s) \quad (\text{II.b.4})$$

Pour un point quelconque (I_0, V_0) de la courbe $(I-V)$ on a :

$$\ln I_0 = \ln I_s + \alpha(V_0 - I_0 R_s) \quad (\text{II.b.5})$$

Par soustraction des équations (II.b.4) et (II.b.5) on obtient :

$$\frac{\ln(I/I_0)}{I - I_0} = -\alpha R_s + \alpha \frac{V - V_0}{I - I_0} \quad (\text{II.b.6})$$

Posant : $x = (V - V_0)/(I - I_0)$ et $y = \ln(I/I_0)/(I - I_0)$

On obtient :

$$y = \alpha(-R_s + x) \quad (\text{II.b.9})$$

La régression linéaire d'Eq. (II.b.9) donne α et R_s . I_s est ensuite extrait à partir d'une régression linéaire de la courbe $\ln I$ en fonction de $(V - IR_s)$.

En considérant, les valeurs des paramètres extraits de la première exponentielle, le courant aux bornes de la cellule est corrigé comme suit :

$$I_c = I - I_1 = I_{s2}[\exp(\alpha_2(V_c))] \quad (\text{II.b.10})$$

Où :

$$V_c = V - R_s I \quad (\text{II.b.11})$$

Et

$$I_1 = I_{s1}[\exp(\alpha_1 V_c)] \quad (\text{II.b.12})$$

I_{s2} et α_2 sont extraite à partir d'une régression linéaire de la courbe $\ln I_c$ en fonction de V_c .

Enfin la résistance de shunt est calculée de la relation suivante :

$$R_{sh} = \left[\left(\frac{dI}{dV} \right)_{V \rightarrow 0} - \alpha_1 I_{s1} - \alpha_2 I_{s2} \right] \quad (\text{II. b.13})$$

II.2.1.c Méthode basée sur une fonction auxiliaire

Lee et al [52] ont proposé une méthode d'extraction des paramètres d'une diode Schottky. Cette méthode a été modifiée par Chegaar et al [53] pour couvrir le cas des cellules solaires sous éclairnement.

La méthode consiste introduire une fonction et une fonction auxiliaire $F(V)$ donnée par :

$$F(V) = V - V_a \ln(I_{ph} - I) \quad (\text{II. c.1})$$

Où V_a est une tension arbitraire.

G_{sh} , I_{ph} sont évalués à partir des expressions suivantes :

$$\begin{cases} I_{ph} = I_{sc} \\ G_{sh} = - \left. \frac{dI}{dV} \right|_{I=I_{sc}} \end{cases} \quad (\text{II. c.2})$$

I_{sc} est le courant de court circuit.

Pour des tensions tel que $V + R_s I \gg kT$ la relation suivante est utilisée :

$$I = I_{ph} - I_s \exp\left(\frac{\beta}{n}(V + IR_s)\right) \quad (\text{II.c.3})$$

A partir de l'équation (II.c.3), nous pouvons écrire :

$$V = -R_s I + \frac{n}{\beta} (\ln(I_{ph} - I) - \ln I_s) \quad (\text{II.c.4})$$

L'équation (II.c.1) peut s'écrire :

$$F(I) = aI + b \ln(I_{ph} - I) + C \quad (\text{II.c.5})$$

Où :

$$\begin{cases} a = -R_s \\ b = \frac{n}{\beta} - V_a \\ c = -\frac{n}{\beta} \ln I_s \end{cases} \quad (\text{II.c.6})$$

Pour une valeur de V_a nous calculons $F(I)$ pour chaque point (V, I) , puis nous déterminons les constantes a , b et c en utilisant la méthode des moindres carrés non linéaire et à partir des valeurs obtenus on peut déduire les paramètres R_s , n et I_s .

II.2.2 Méthodes proposées

II. 2.2.1 Principe de calcul des paramètres à l'obscurité

1. Méthode de Gromov modifiée

Cette technique est basée sur la méthode de Gromov et al [55] développée pour extraire les différents paramètres des diodes-Schottky de PtSi/Si. Nous avons modifié cette méthode (on tenant compte de la conductance parallèle et la caractéristique I-V inverse) pour l'appliquer à la cellule solaire non éclairée.

Partant de l'équation (II.1) que l'on peut écrire pour $V - R_s I \gg kT$ sous la forme :

$$I = G_A V + I_0 \left[\exp\left(\frac{\beta}{n}(V - IR_s)\right) \right] \quad (\text{II.1.1})$$

Avec :

$$\begin{cases} I_0 = \frac{I_s}{1 + G_{sh} R_s} \\ G_A = \frac{G_{sh}}{1 + G_{sh} R_s} \end{cases} \quad (\text{II.1.2})$$

On peut décomposer la caractéristique I-V en deux zones (Figure II-1) :

La première correspondant à la partie inverse (V négative) ou le terme exponentiel devient négligeable devant le terme linéaire, dans cette zone on peut tirer G_A par une simple régression linéaire à partir de l'expression (II.1.1) en posant $I_0=0$ à la première boucle du calcul.

La deuxième zone correspondant à la partie de la caractéristique directe ou le terme exponentiel devient important par rapport au terme linéaire.

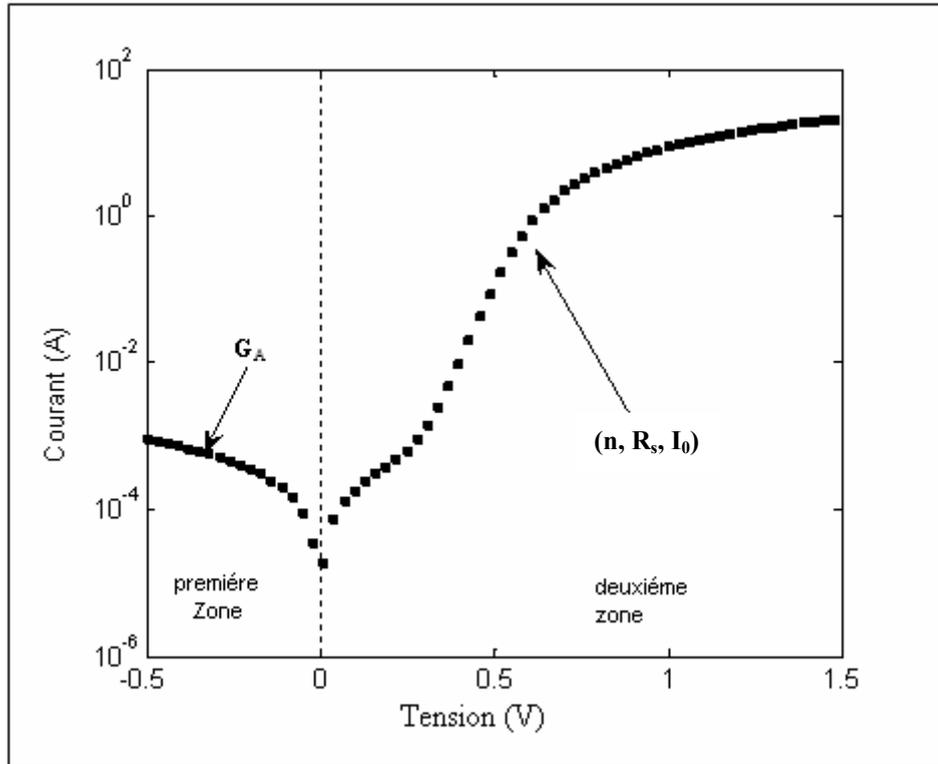


Figure II-1 : La caractéristique I-V à l'obscurité considérant les deux différentes zones.

La valeur calculée de G_A donne le produit ($G_A V$) soustrait du courant mesuré, on obtient le courant généré par la cellule définie par :

$$I_c = I - G_A V \tag{II.1.3}$$

A partir de l'équation (II.1. 1), nous pouvons écrire :

$$V = -\frac{n}{\beta} \ln I_0 + R_s I + \frac{n}{\beta} \ln I_c \tag{II.1.4}$$

Cette expression peut être présentée par :

$$F(I) = C_0 + C_1 I + C_2 \ln I_c \tag{II.1.5}$$

Où:

$$\begin{cases} C_0 = -\frac{n}{\beta} \ln I_0 \\ C_1 = R_s \\ C_2 = \frac{n}{\beta} \end{cases} \tag{II.1.6}$$

L'appliquant la méthode des moindres carrés à l'équation (II.1.5) permet d'obtenir les valeurs des facteurs C_0 , C_1 , C_2 à partir de la caractéristique I-V de la cellule. Ceci résulte le système des équations suivantes :

$$\begin{cases} C_1 \sum_{i=1}^N I_i^2 + C_2 \sum_{i=1}^N I_i \ln I_{ci} + C_0 \sum_{i=1}^N I_i = \sum_{i=1}^N I_i V_i \\ C_1 \sum_{i=1}^N I_i + C_2 \sum_{i=1}^N \ln I_{ci} + C_0 N = \sum_{i=1}^N V_i \\ C_1 \sum_{i=1}^N I_i \ln I_{ci} + C_2 \sum_{i=1}^N \ln^2 I_{ci} + C_0 \sum_{i=1}^N \ln I_{ci} = \sum_{i=1}^N V_i \ln I_{ci} \end{cases} \quad (\text{II.1.7})$$

Il s'agit donc de résoudre le système (II.1.7) par la règle de Kramer. I_i, V_i sont les valeurs mesurées du courant au $i^{\text{ème}}$ point de N points mesurés. I_{ci} est le courant expérimental corrigé. Les valeurs de la résistance série, du facteur d'idéalité et du courant I_0 sont déterminées à partir des équations suivantes :

$$\begin{cases} R_s = C_1 \\ n = \beta C_2 \\ I_0 = \exp(-C_0/C_2) \end{cases} \quad (\text{II.1.8})$$

Les valeurs de R_s et I_0 trouvées de (II.1.8) et substituées dans (II.1.2) permettent de déterminer G_{sh} , et I_s qui sont définies par le système suivant :

$$\begin{cases} G_{sh} = \frac{G_A}{1 - G_A R_s} \\ I_s = \frac{I_0}{1 - G_A R_s} \end{cases} \quad (\text{II.1.9})$$

2. Méthode de Werner

Werner [56] a élaboré plusieurs techniques d'extraction des paramètres des diodes Schottky et de la jonction pn. Il a utilisé la conductance faible signaux ($G = dI/dV$) pour déduire trois fonctions linéaires qu'il dénomme *plot A*, *plot B* et *plot C*, et cette dernière technique que nous avons appliquée dans le cas des cellules solaires non éclairées.

Pour $V - R_s I \gg kT$ on peut approximer l'équation (II.1) par :

$$I = G_{sh}V + I_s \left[\exp\left(\frac{\beta}{n}(V - IR_s)\right) \right] \quad (\text{II.2.1})$$

La conductance parallèle (G_{sh}) est déterminée de la caractéristique inverse de la cellule par une simple régression linéaire.

La valeur calculée de G_{sh} donne un courant $I_p = G_{sh}V$, soustrait du courant mesuré, on obtient le courant généré par la cellule I_c .

L'équation (II.2.1) s'écrit :

$$I_c = I_s \left[\exp\left(\frac{\beta}{n}(V - I_c R_s)\right) \right] \quad (\text{II.2.2})$$

De cette équation nous obtenons la conductance $G = dI_c/dV$ de la cellule :

$$G = \frac{\beta}{n} I_c [1 - R_s G] \quad (\text{II.2.3})$$

Posant :

$$R_{dr} = \frac{1}{G} \quad (\text{II.2.4})$$

Ce qui donne une autre possibilité de l'équation (II.2.3) :

$$R_{dr} = \frac{1}{G} = \frac{n}{\beta I_c} + R_s \quad (\text{II.2.5})$$

D'autre part :

$$R_{dr} = \frac{dV}{dI_c} = \frac{1}{I_c} \frac{dV}{d(\ln I_c)} \quad (\text{II.2.6})$$

Donc :

$$\frac{dV}{d(\ln I_c)} = R_s I_c + \frac{n}{\beta} \quad (\text{II.2.8})$$

Le tracé de $dV/d(\ln I_c)$ en fonction de I_c donne une droite de pente R_s . L'intersection avec l'axe des y donne n/β . Le courant de saturation I_s sera déterminé par substitution les valeurs de n , R_s et de G_{sh} obtenus dans l'équation (II.1).

3. Méthode de Mikhelashvili modifiée

Mikhelashvili et al [54] ont proposé une méthode pour extraire les différents paramètres d'une diode Schottky, de la jonction p-n et de la jonction p-i-n. La technique est basée sur la caractéristique (I-V) mesurée à l'obscurité et le paramètre α définie par :

$$\alpha = \frac{d(\ln I)}{d(\ln V)} \quad (\text{II.3.1})$$

En se basant sur ce paramètre, nous avons modifié cette méthode pour couvrir le cas d'une cellule solaire.

Les paramètres à déterminer dans un premier temps sont G_A , I_0 et R_s de (II.1.1) et à partir du système (II.1.9) on déduit les valeurs de G_{sh} et de I_s .

G_A est évalué de la caractéristique I-V inverse de la cellule par une simple régression linéaire.

En tenant compte du courant corrigé I_c défini dans (II.1.3), le paramètre α_c est donné par :

$$\alpha_c = \frac{d(\ln I_c)}{d(\ln V)} \quad (\text{II.3.2})$$

On utilise l'équation (II.1.4) pour calculer ce paramètre qui prend après les calculs la forme suivante :

$$\alpha_c = \frac{qV}{nkT + qR_s I_c} \quad (\text{II.3.3})$$

La courbe qui présente la caractéristique α_c-V de la cellule solaire passe par un maximum α_m avant de diminuer. Pour la valeur maximale α_m de α_c correspondant au courant corrigé I_{cm} et à la tension V_m . Les valeurs α_m , I_{cm} et V_m sont facilement déterminées en différenciant Eq. (II.3.3) par rapport à V , et on pose ($d\alpha_c/dV=0$). Elles sont liées aux paramètres de la cellule solaires :

$$\begin{cases} R_s = \frac{V_m}{I_{cm} \alpha_m^2} \\ n = \frac{qV_m(\alpha_m - 1)}{kT \alpha_m^2} \\ I_0 = \exp(-(\alpha_m + 1)) \end{cases} \quad (\text{II.3.4})$$

Substituant les valeurs de R_s et de I_0 obtenus dans (II.1.2), les valeurs de G_{sh} et de I_s sont déduites à partir de (II.1.9).

II.2.2.2 Principe de calcul des paramètres sous éclaircissement

Dans cette section nous avons modifiée les méthodes d'extractions proposées dans (II.2.2.1) pour couvrir le cas d'une cellule solaire éclairée. Ces méthodes représentent des nouvelles techniques pour extraire les paramètres I_s , n , R_s , G_{sh} et I_{ph} de la caractéristique I-V sous éclaircissement.

1. Méthode 1

Cette méthode est basée sur la caractéristique courant–tension sous éclaircissement d'une cellule solaire pour l'évaluation de ses paramètres caractéristiques avec une seule diode du modèle de circuit. Cette méthode inclut la présentation $I=f(V)$ de la fonction standard (II.2) en tant que $V=f(I)$ et la détermination des facteurs C_0 , C_1 , C_2 de cette fonction qui fournissent le calcul des paramètres de la cellule solaire.

Partant de l'équation (II.2) que l'on peut écrire sous la forme :

$$I = \frac{I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{\beta}{n}(V + IR_s)\right) - 1 \right] - G_{sh}V}{1 + G_{sh}R_s} \quad (\text{II.4.1})$$

L'équation précédente peut être écrite aussi :

$$I = I_{pA} - I_0 \left[\exp\left(\frac{\beta}{n}(V + IR_s)\right) - 1 \right] - G_A V \quad (\text{II.4.2})$$

Avec :

$$\begin{cases} I_{pA} = \frac{I_{ph}}{1 + G_{sh}R_s} \\ I_0 = \frac{I_s}{1 + G_{sh}R_s} \\ G_A = \frac{G_{sh}}{1 + G_{sh}R_s} \end{cases} \quad (\text{II.4.3})$$

Pour les basses et négatives tensions de polarisation où le comportement de la courbe $I=f(V)$ est linéaire, la partie exponentielle est négligeable et l'équation (II.4.2) peut être écrite sous la forme :

$$I = I_{pA} - G_A V \quad (\text{II.4.4})$$

G_A, I_{pA} sont évalués donc à partir de (II.4.4) par une simple régression linéaire.

La valeur calculée de G_A donne le produit ($G_A V$) qui peut être ajouté au courant mesuré, on obtient le courant corrigé à travers la cellule solaire qui est donné par :

$$I_c = I + G_A V \quad (\text{II.4.5})$$

Pour des tensions directe assez grandes $V + R_s I \gg kT$ où le comportement de la courbe $I=f(V)$ est exponentielle, le courant à travers la cellule est donné par :

$$I_c = I_{pA} - I_0 \left[\exp\left(\frac{\beta}{n}(V + IR_s)\right) \right] \quad (\text{II.4.6})$$

Pour évaluer la résistance de série R_s , le facteur d'idéalité n et le courant de saturation I_s , on utilise (I) au lieu de (V) comme variable indépendante dans l'équation (II.4.6), et nous obtenons :

$$V = \frac{n}{\beta} \ln \frac{I_{pA}}{I_0} - R_s I + \frac{n}{\beta} \ln \left(1 - \frac{I_c}{I_{pA}} \right) \quad (\text{II.4.7})$$

Cette expression peut être présentée sous la forme :

$$F(I) = C_0 + C_1 I + C_2 \ln \left(1 - \frac{I_c}{I_{pA}} \right) \quad (\text{II.4.8})$$

Où :

$$\begin{cases} C_0 = \frac{n}{\beta} \ln \frac{I_{pA}}{I_0} \\ C_1 = -R_s \\ C_2 = \frac{n}{\beta} \end{cases} \quad (\text{II.4.9})$$

Les valeurs des facteurs C_0 , C_1 , C_2 peuvent être obtenues à partir de la caractéristique expérimentale I-V de la cellule en utilisant la méthode des moindres carrés. Ceci résulte système des équations suivantes :

$$\begin{cases} C_1 \sum_{i=1}^N I_i^2 + C_2 \sum_{i=1}^N I_i \ln \left(1 - \frac{I_{ci}}{I_{pA}} \right) + C_0 \sum_{i=1}^N I_i = \sum_{i=1}^N I_i V_i \\ C_1 \sum_{i=1}^N I_i + C_2 \sum_{i=1}^N \ln \left(1 - \frac{I_{ci}}{I_{pA}} \right) + C_0 N = \sum_{i=1}^N V_i \\ C_1 \sum_{i=1}^N I_i \ln \left(1 - \frac{I_{ci}}{I_{pA}} \right) + C_2 \sum_{i=1}^N \ln^2 \left(1 - \frac{I_{ci}}{I_{pA}} \right) + C_0 \sum_{i=1}^N \ln \left(1 - \frac{I_{ci}}{I_{pA}} \right) = \sum_{i=1}^N V_i \ln \left(1 - \frac{I_{ci}}{I_{pA}} \right) \end{cases} \quad (\text{II.4.10})$$

Le système donné peut être facilement résolu en utilisant la règle de Kramer. N est le nombre de données expérimentales, $(I_i - V_i)$ sont les valeurs mesurées du courant-tension au $i^{\text{ème}}$ point, $i=1 \dots N$. I_{ci} est la valeur du courant corrigé correspondant à I_i .

Les valeurs de la résistance série, du facteur d'idéalité et du courant I_0 sont déterminées à partir des équations suivantes :

$$\begin{cases} R_s = -C_1 \\ n = \beta C_2 \\ I_0 = I_{pA} \exp(-C_0/C_2) \end{cases} \quad (\text{II.4.11})$$

Substituant les valeurs obtenues de R_s et de I_0 dans (II.4.3), les valeurs G_{sh} , I_{ph} , et I_s sont extraits à partir de:

$$\begin{cases} G_{sh} = \frac{G_A}{1 - G_A R_s} \\ I_{ph} = \frac{I_{pA}}{1 - G_A R_s} \\ I_s = \frac{I_0}{1 - G_A R_s} \end{cases} \quad (\text{II.4.12})$$

2. Méthode 2

Ouennoughi et Chegaar [37] ont proposée une méthode d'extraction des paramètres des cellules solaires sous éclairage et dite de la *conductance simple*. Cette méthode est basée sur la première technique de Werner (*plot (A)*). Dans cette section nous avons modifié la troisième technique de Werner (*plot (C)*), pour extraire les paramètres d'intérêt.

Pour les tensions inverses assez grandes ($-eV \gg kT$), et avec une résistance parallèle $R_{sh} \gg R_s$. La conductance parallèle G_{sh} est déterminée de la caractéristique inverse de la cellule par une simple régression linéaire.

La valeur calculée de G_{sh} donne un courant $I_p = G_{sh}V$, ajoutait au courant mesuré, on obtient le courant généré par la cellule I_c définie par :

$$I_c = I + G_{sh}V \quad (\text{II.5.1})$$

On considère que $I_{ph} \cong I_{cc}$ ou I_{cc} est le courant de court-circuit et est déterminé à partir de la courbe $I(V)$. Puisque $I_s \ll I_{ph}$ pour la majorité des cellules solaires, cette approximation est acceptable.

Sous la caractéristique directe de la cellule et pour $(V + R_s I) \gg kT$ le courant à travers la cellule est donné par :

$$I_c = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{\beta}{n}(V + IR_s)\right) \right] \quad (\text{II.5.2})$$

D'autre part :

$$V + R_s I = V(1 - G_{sh}R_s) + I_c R_s \quad (\text{II.5.3})$$

Le terme $G_{sh}R_s$ est négligé devant 1 ($R_{sh} \gg R_s$). L'équation (II.5.2) peut se mettre donc sous la forme :

$$I_c = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{\beta}{n}(V + I_c R_s)\right) \right] \quad (\text{II.5.4})$$

De cette équation nous obtenons la conductance $G = dI_c/dV$ de la cellule :

$$G = -\frac{\beta}{n}(I_{ph} - I_c)[1 + R_s G] \quad (\text{II.5.5})$$

En posant :

$$R_{dr} = \frac{1}{G} \quad (\text{II.5.6})$$

On peut déduire une autre possibilité de l'équation (II.5.5) :

$$R_{dr} = \frac{1}{G} = \frac{n}{\beta(I_{ph} - I_c)} + R_s \quad (\text{II.5.7})$$

D'autre part :

$$R_{dr} = \frac{dV}{dI_c} = -\frac{dV}{d(I_{ph} - I_c)} = \frac{1}{(I_{ph} - I_c)} \frac{dV}{d \ln(I_{ph} - I_c)} \quad (\text{II.5.8})$$

Finalement :

$$\frac{dV}{d \ln(I_{ph} - I_c)} = R_s(I_{ph} - I_c) + \frac{n}{\beta} \quad (\text{II.5.9})$$

La courbe $\frac{dV}{d \ln(I_{ph} - I_c)}$ en fonction de $(I_{ph} - I_c)$ est une droite dont la pente et le point d'intersection extrapolé à $(I_{ph} - I_c = 0)$ permettent de déterminer les paramètres n et R_s . Le courant de saturation I_s sera déterminé par substitution des valeurs de n , R_s , G_{sh} et de I_{ph} dans l'équation (II.2).

3. Méthode 3

En se basant sur l'équation (II.2) nous décrivons une nouvelle méthode pour extraire les valeurs de I_s , n , R_s , G_{sh} , et de I_{ph} à partir de la caractéristique (I-V) sous éclairage de la cellule solaire.

Les cellules solaires sont modélisées par l'équation :

$$I = I_{pA} - I_0 \left[\exp\left(\frac{\beta}{n}(V + IR_s)\right) \right] - G_A V \quad (\text{II.6.1})$$

Avec :

$$\begin{cases} I_{pA} = \frac{I_{ph}}{1 + G_{sh}R_s} \\ I_0 = \frac{I_s}{1 + G_{sh}R_s} \\ G_A = \frac{G_{sh}}{1 + G_{sh}R_s} \end{cases} \quad (\text{II.6.2})$$

Pour les basses et négatives tensions G_A et I_{pA} sont évalués à partir de l'équation (II.4.4) par une simple régression.

Pour évaluer la résistance de série, le facteur d'idéalité et le courant de saturation de diode, on utilise l'équation (II.6.1) qui peut se mettre sous la forme :

$$V = \frac{n}{\beta} \ln(I_{pA} - I_c) - \frac{n}{\beta} \ln I_0 - R_s I_c \quad (\text{II.6.3})$$

Où I_c est le courant corrigé.

On introduit le paramètre delta (δ) défini par :

$$\delta = \frac{d \ln(I_{pA} - I_c)}{d \ln V} \quad (\text{II.6.4})$$

Après quelques étapes du calcul, le paramètre δ calculé de l'équation (II.6.4) prend la forme suivante :

$$\delta = \frac{qV}{nkT + qR_s(I_{pA} - I_c)} \quad (\text{II.6.5})$$

La courbe qui présente la caractéristique $\delta - V$ de la cellule solaire augmente atteignant un maximum δ_m avant de diminuer (Figure II-2).

Pour la valeur maximale δ_m de δ correspondant au courant corrigé I_{cm} et à la tension V_m , les valeurs δ_m , I_{cm} et V_m sont facilement déterminées en différenciant Eq. (II.6.5) par rapport à V et on pose ($d\delta/dV=0$).

Les valeurs δ_m , I_{cm} et V_m sont liées aux paramètres de la cellule solaire :

$$\left\{ \begin{array}{l} R_s = \frac{V_m}{(I_{pA} - I_{cm})\delta_m^2} \\ n = \frac{qV_m(\delta_m - 1)}{kT\delta_m^2} \\ I_0 = (I_{pA} - I_{cm}) \exp \left[\frac{1}{1 - \delta_m} \left(\delta_m + \frac{I_{cm}}{I_{pA} - I_{cm}} \right) - \delta_m \right] \end{array} \right. \quad (\text{II.6.7})$$

Substituant les valeurs de R_s et de I_0 obtenues dans (II.6.2), les valeurs G_{sh} , I_{ph} , et I_s sont extraits à partir du système (II.4.12).

On trouve dans l'Annexe les détails des calculs du paramètre δ et les relations décrites dans (II.6.7).

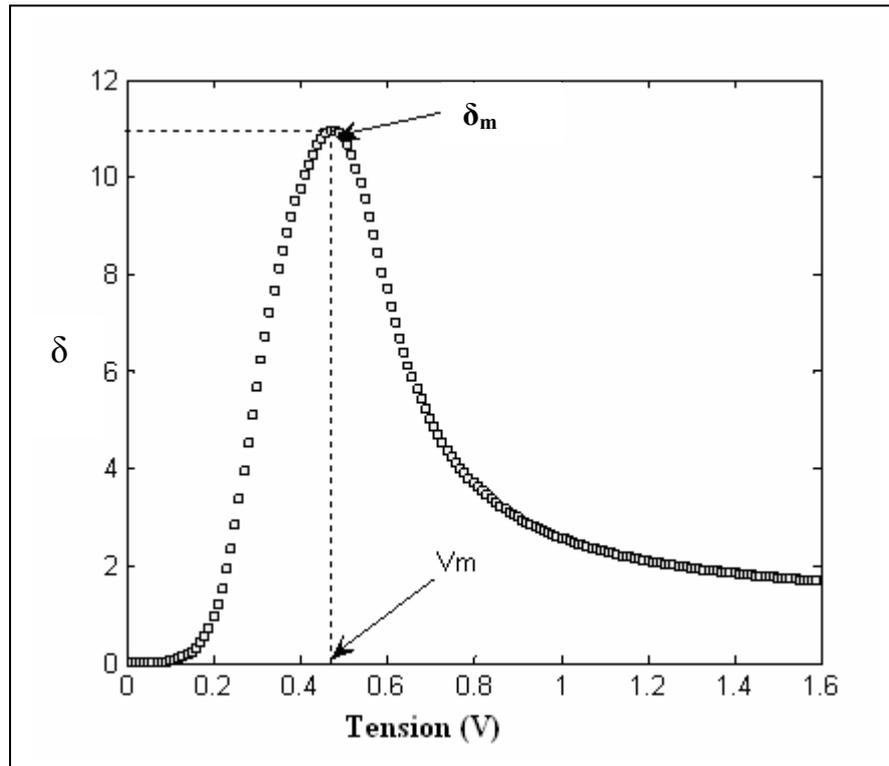


Figure II- 2 : Caractéristique ($\delta - V$) simulée de la cellule solaire : $R_s=0.0364\Omega$, $n=1.48$, $I_s=0.3223\mu\text{A}$, $G_{sh}=0.0186\Omega^{-1}$ et $I_{ph}=0.7608\text{A}$.

II.3 Test et comparaison des méthodes

Dans le but de tester la qualité des courbes calculées avec les paramètres extraits, on calculera la déviation standard qui est définies par l'expression suivante :

$$\sigma = \left(\frac{\sum_{i=1}^N |e_i|^2}{N} \right)^{1/2} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

e_i est l'erreur relative du courant en %, et est donné par:

$$e_i = (I_i - I_{i,cal}) (100 / I_i) \quad (\text{II.4})$$

Pour chaque méthode. N est le nombre de données expérimentales, I_i est la $i^{\text{ème}}$ valeur du courant expérimental et $I_{i,cal}$ est le courant calculé pour chaque valeur V_i .

Pour faire la comparaison, nous avons calculé la déviation standard entre les données expérimentales et les données calculées avec chacune des méthodes en excluant les valeur de V proche de V_{co} (tension de circuit ouvert) où le courant n'est pas bien défini, et la méthode qui donne une déviation minimums est la meilleure.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté en premier temps quelques méthodes de la littérature s'intéressant à l'extraction des paramètres des cellules solaires. Ensuite nous avons traité les méthodes développées dans le cadre de ce travail afin de déterminer les valeurs du photocourant I_{ph} , du courant de saturation I_s , du facteur d'idéalité n , de la résistance série R_s et de la conductance parallèle G_{sh} des caractéristiques courant-tension de la cellule solaire.

Nous avons proposée trois méthodes pour une cellule non éclairée, et ainsi trois différentes méthodes pour une cellule solaire éclairée. Ces méthodes sont basées sur la caractéristique courant-tension de la cellule solaire.

Chapitre III

Résultats et discussion

Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation et la discussion des résultats obtenus, en appliquant les méthodes de calculs proposées dans le chapitre précédent à des caractéristiques mesurées courant-tension de différentes cellules solaires et modules à fin de déterminer les paramètres d'une cellule solaire.

III.1 Application des méthodes

Les résultats obtenus sont représentés en deux sections :

La première correspond aux résultats obtenus pour une caractéristique I-V mesurés d'une cellule solaire non éclairée en appliquant les méthodes de *Gromv modifiée*, de *Werner*, et de *Mikhelashvili modifiée*.

La deuxième correspond aux résultats obtenus pour des caractéristiques expérimentales I-V des cellules et des modules solaires sous éclairage en appliquant la méthode 1, la méthode 2 et la méthode 3.

III.1.1 Application à une cellule non éclairée

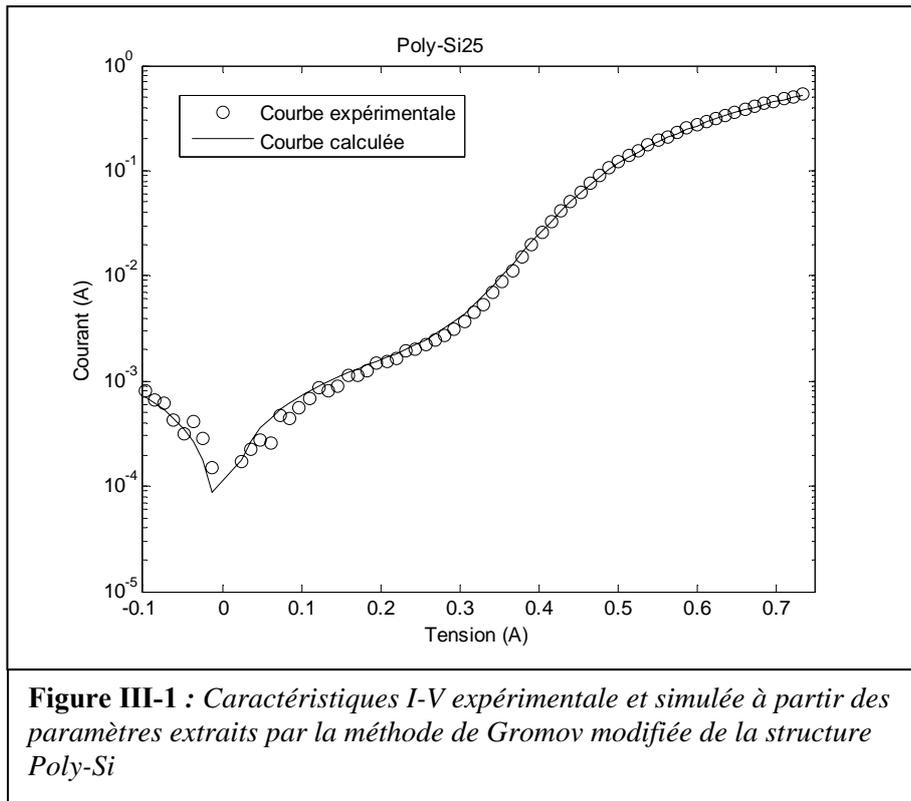
Dans cette section, nous avons appliquée les méthodes de *Gromov modifiée*, de *Werner* et de *Mikhelashvili modifiée* à une cellule solaire au silicium polycristallin de 80 cm² de surface et à une température de 25°C (Poly-Si25) pour extraire ses différents paramètres à l'obscurité.

Les Figures III-1, III-2 et III-4 montrent la caractéristique I-V expérimentale et celles calculée en considérant les paramètres extraits par les différentes méthodes d'extraction à l'obscurité.

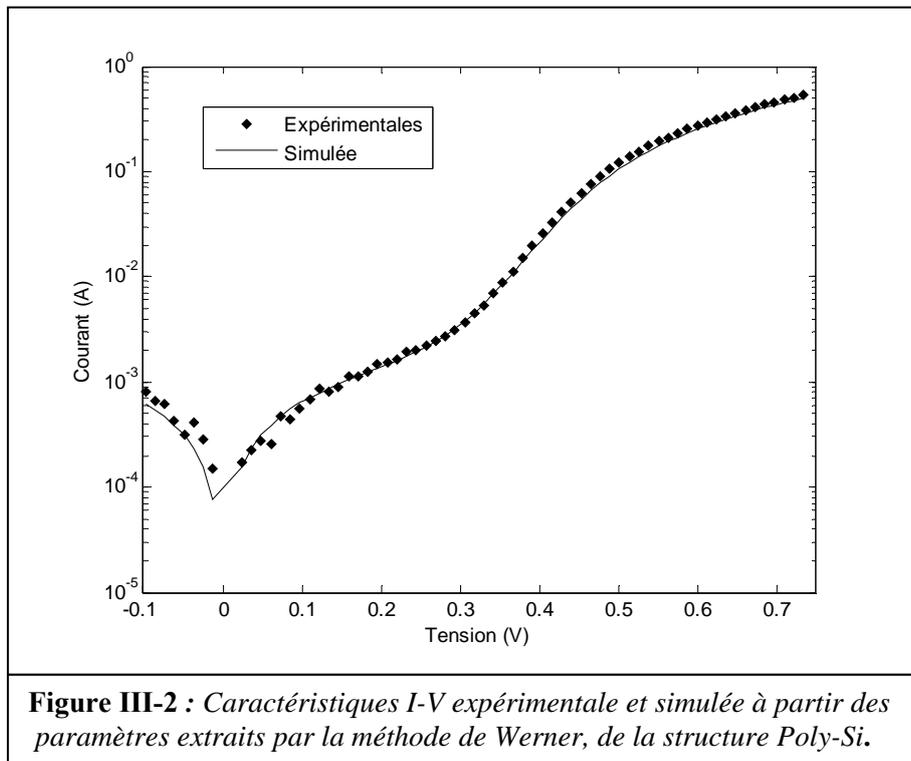
La Figure III-3 illustre le principe de la méthode de *Mikhelashvili modifié* appliquée à la structure Poly-Si en prenant le maximum α_m de la caractéristique (α_c -V) et ensuite extrait les paramètres d'intérêt à partir de ce maximum.

Pour faire la comparaison entre les trois méthodes précédentes, les valeurs des paramètres de R_s , n , I_s et de G_{sh} extraites par chacune des méthodes sont représentées sous forme histogrammes sur la Figure III-5.

III.1.1.1 Méthode Gromov modifiée



III.1.1.2 Méthode de Werner



III.1.1.3 Méthode Mikhelashvili modifiée

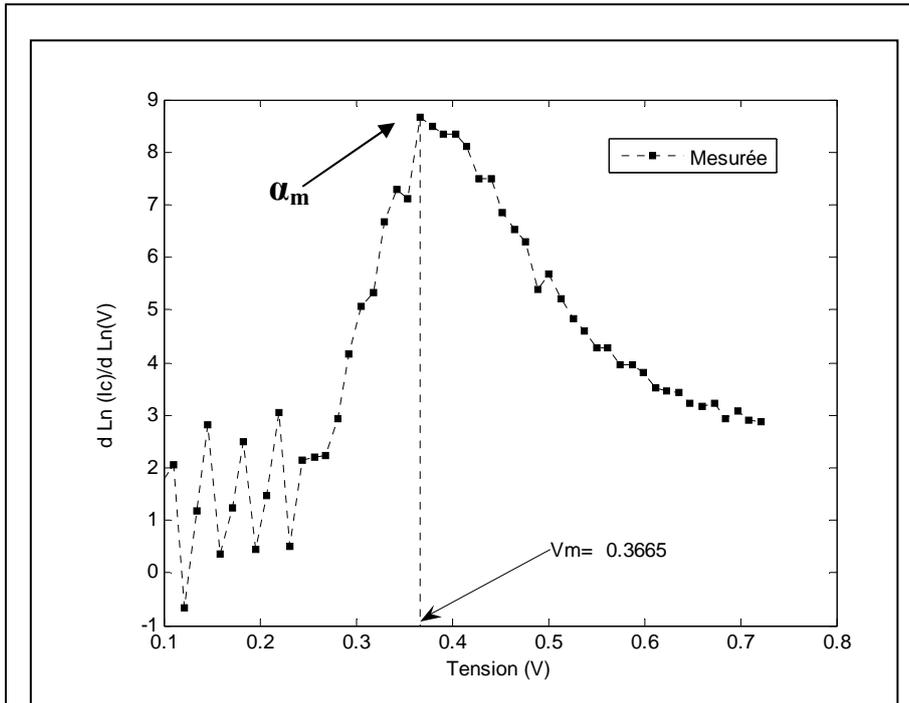


Figure III-3 : Principe de la méthode de Mikhelashvili appliquée à la structure Poly-Si.

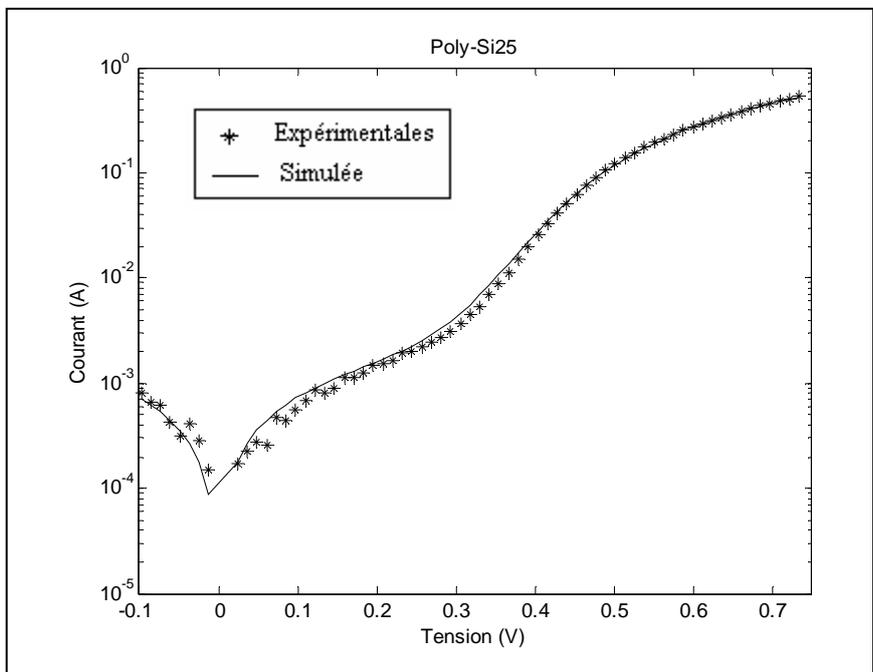


Figure III-4 : Caractéristiques I-V expérimentale et simulée à partir des paramètres extraits par la méthode de Mikhelashvili modifiée, de la structure Poly-Si.

III.1.1.4 Comparaison des méthodes

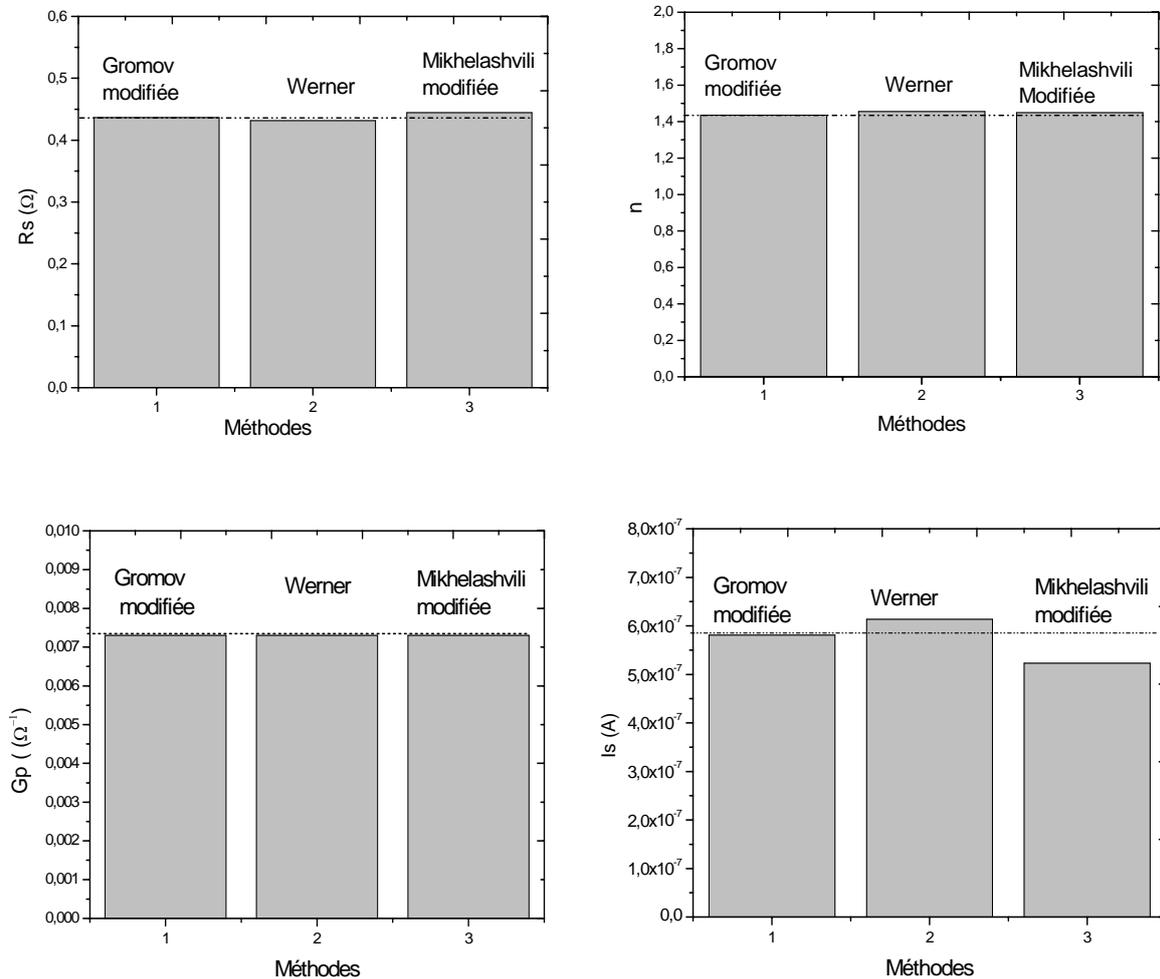


Figure III-5 : Paramètres caractéristiques d'une cellule solaire extraits par différentes méthodes à l'obscurité.

III.1.1.5 Discussion

On note d'après les Figure III-1, III-2 et III-4 que les trois méthodes donnent une bonne concordance entre les données expérimentales et celles simulées avec des déviations standards acceptables (0.7097% pour la méthode de *Gromov modifiée*, 0.9995% pour la méthode de *Werner*, et de 1.9462% pour la méthode de *Mikhelashvili modifiée*).

D'après la Figure III-5, on remarque que tous les paramètres extraits par les méthodes développés sont très proches.

On remarque que les méthodes de *Werner* et de *Mikhelashvili modifiée* ne donnent pas une très bonne précision de calcul en comparaison avec la méthode de *Gromov modifiée*. Ce ci peut être interprété comme suit : le pas de la tension est assez grand pour pouvoir évaluer les dérivées premières avec une bonne précision. Donc la méthode de *Gromov modifiée* donne les meilleurs résultats parmi les méthodes traitées.

III.1.2 Application à des structures éclairées

Dans cette section, les méthodes 1, 2 et 3 sont appliquées à deux cellules solaires et deux modules solaires éclairés.

Ces quatre structures sont comme suit :

- Une cellule solaire commerciale (R.T.C. France) au silicium de 57 mm de diamètre ; (Cell33)
- Un module solaire (Photowatt-PWP 201) dans lequel 36 cellules solaires polycristallines sont connectées en série ; (Module45)
- Une cellule solaire au silicium monocristallin de 100 cm² de surface ; (Cell25)
- Un module solaire CIS de 734 cm² de surface. (Module25)

Les températures des caractéristiques I-V mesurées sont ; 33°C pour la première cellule solaire (Cell33), 45°C pour le premier module solaire (Module45) et 25°C pour les deux autres structures (Cell25 et Module25). Les deux premières structures utilisées ont été prises du travail de Easwarakhanthan et al. [45]

Les résultats obtenus par chacune des méthodes et pour les quatre structures sont reportés dans le Tableau III-1.

Les Figures présentées ci-dessous illustres la caractéristique I-V expérimentale et celle simulée à partir des paramètres extraits par chacune des méthodes appliquées aux différentes structures solaires (Cell33, Module45, Cell25, et Module25).

III.1.2.1 Méthode 1

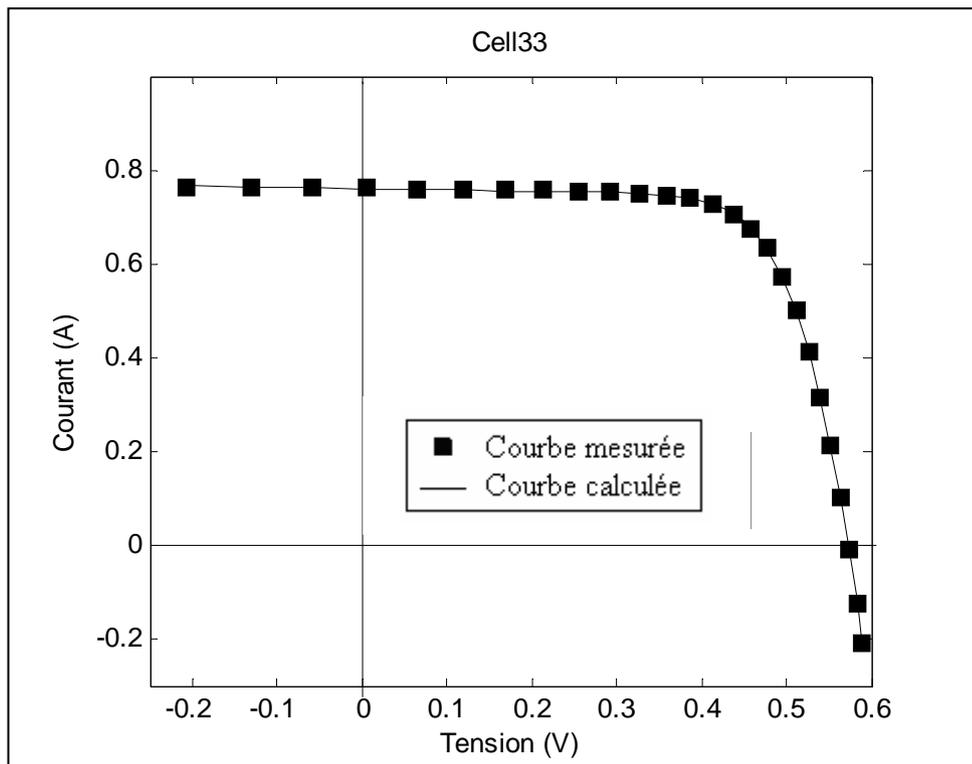


Figure III-6 : Caractéristiques I-V expérimentale et simulée en considérant les paramètres extraits par la méthode 1, de la structure Cell33

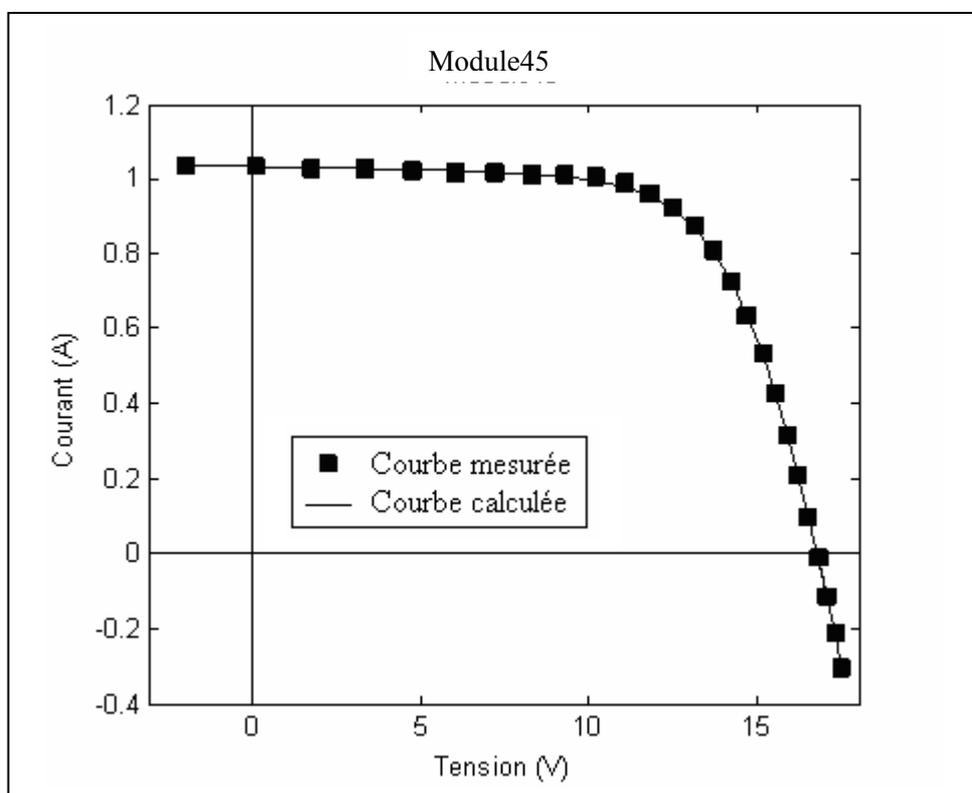


Figure III-7 : Caractéristiques I-V expérimentale et simulée en considérant les paramètres extraits par la méthode 1, de la structure Module45

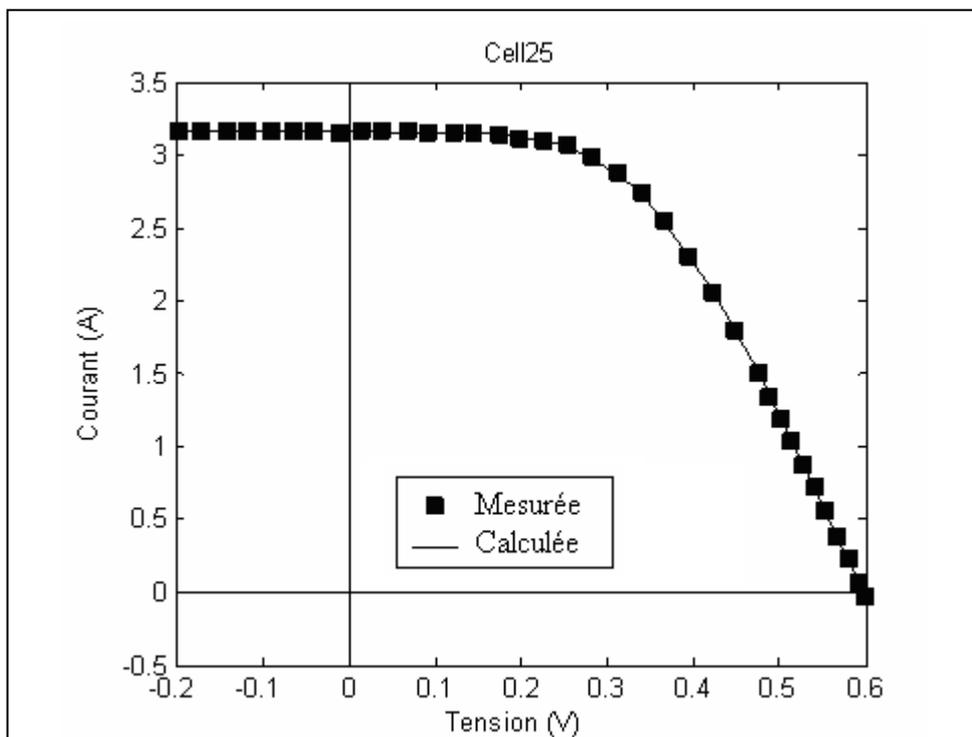


Figure III-8 : Caractéristiques I-V expérimentale et simulée en considérant Les paramètres extraits par la méthode 1, de la structure Cell25

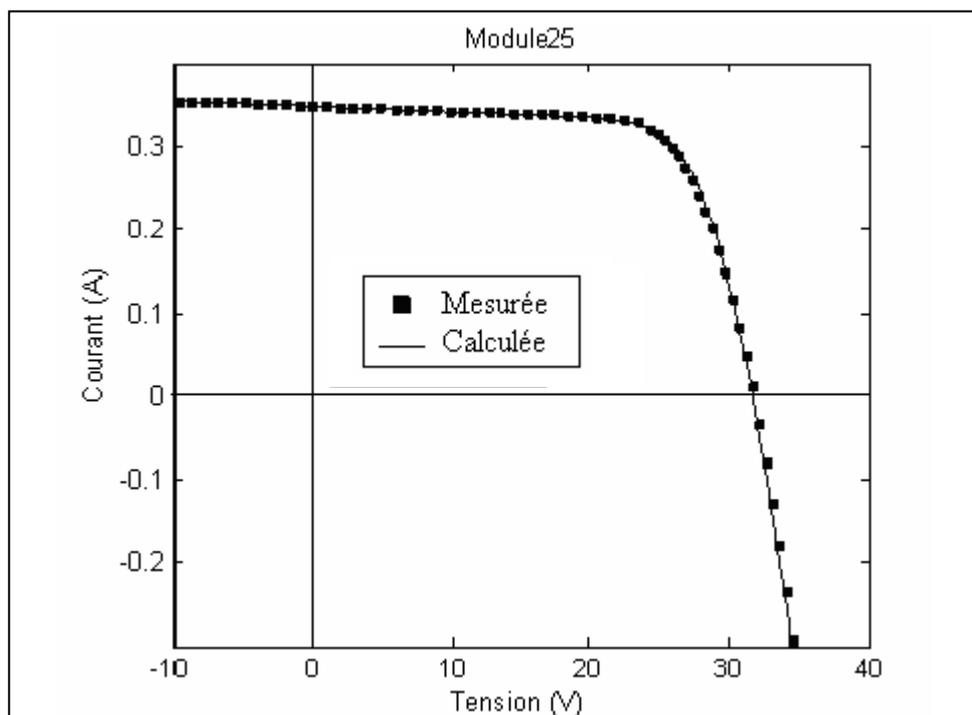


Figure III-9 : Caractéristiques I-V expérimentale et simulée en considérant les paramètres extraits par la méthode 1, de la structure Module25

III.1.2.2 Méthode 2

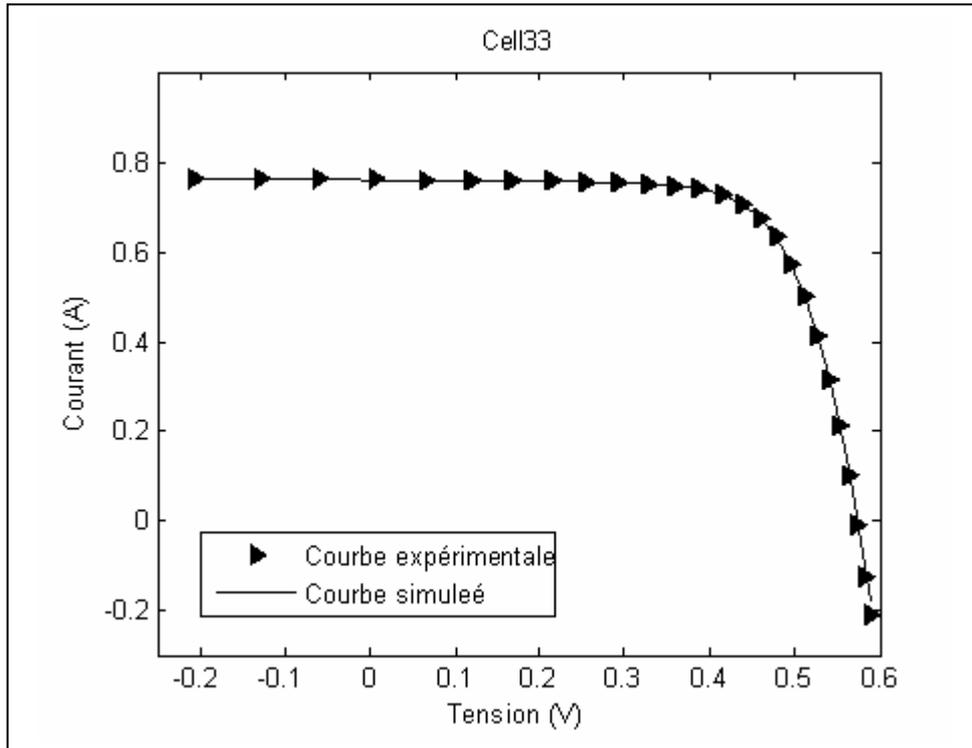


Figure III-10 : Caractéristiques I-V expérimentale et simulée à partir des paramètres extraits par la méthode 2, de la structure Cell33

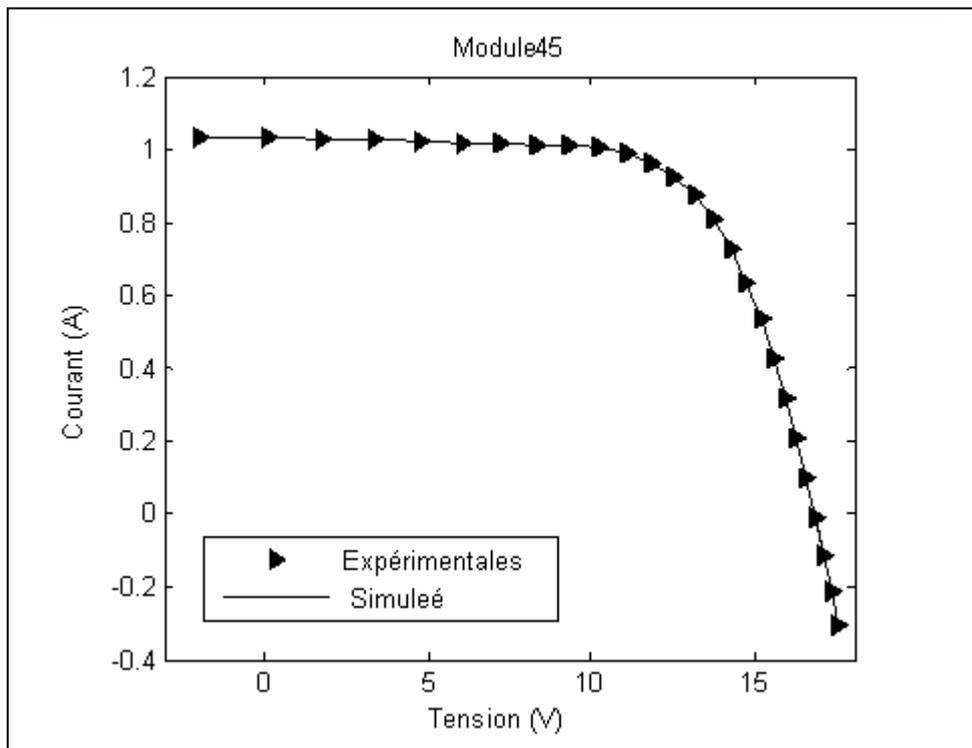
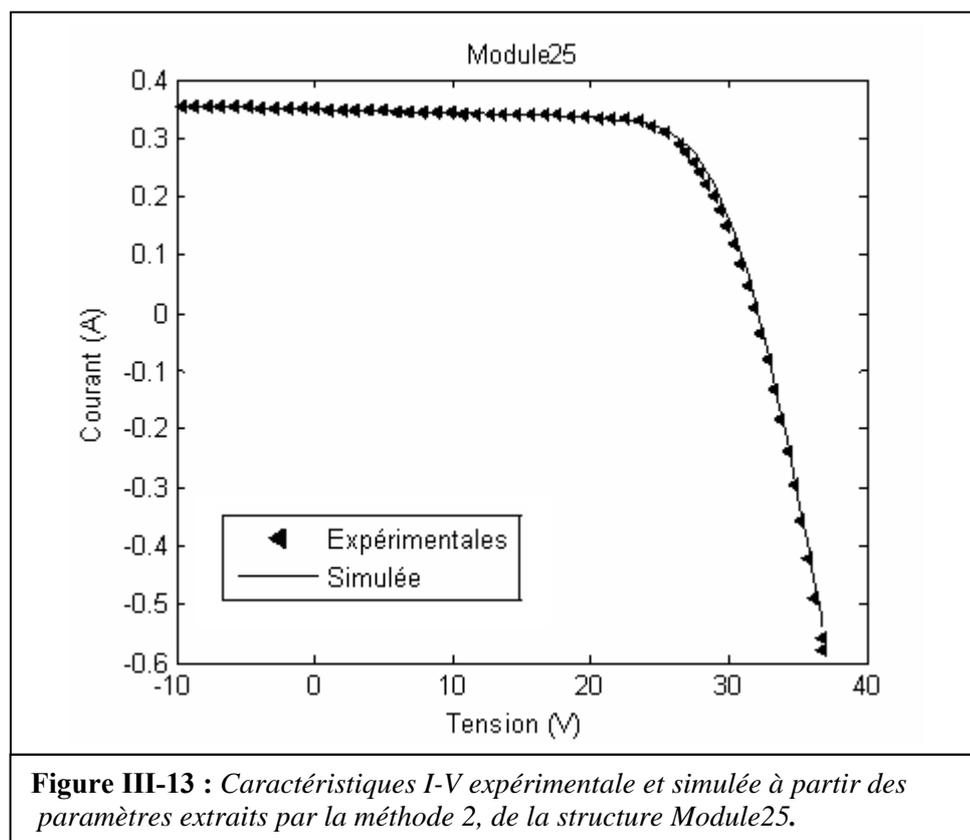
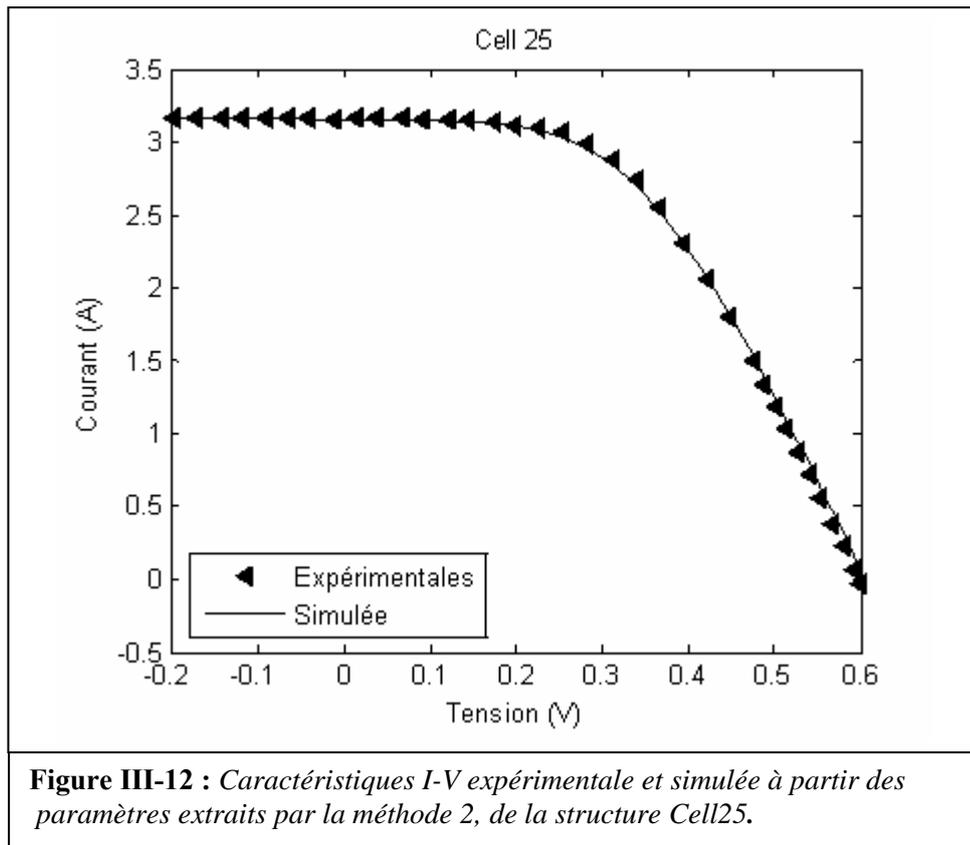


Figure III-11 : Caractéristiques I-V expérimentale et simulée à partir des paramètres extraits par la méthode 2, de la structure Module45 .



III.1.2.3 Méthode 3

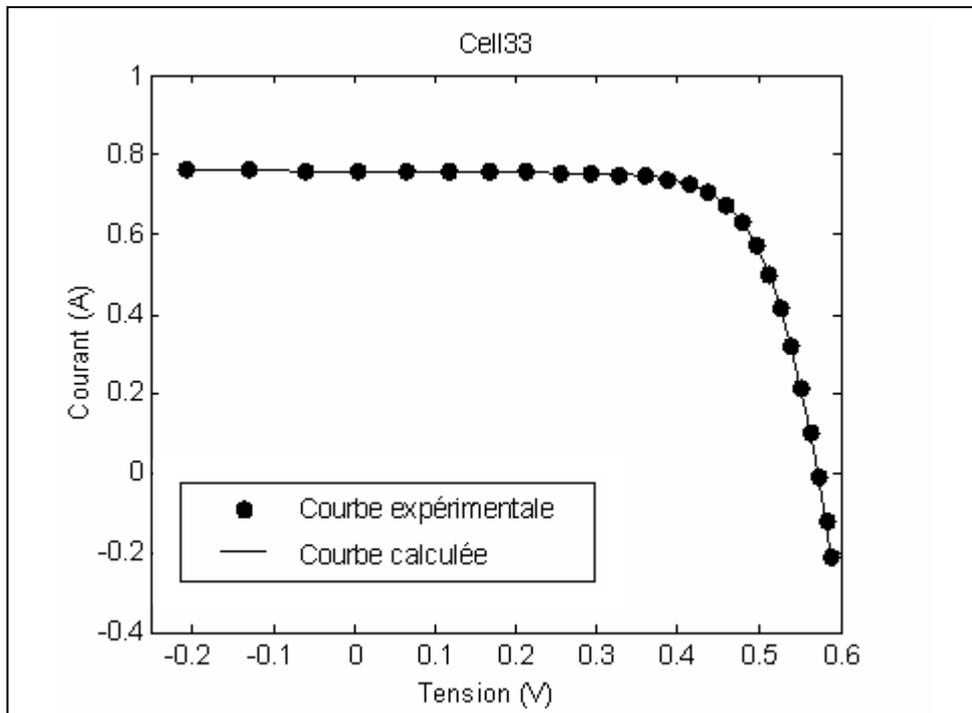


Figure III-14 : Caractéristiques I-V expérimentales et simulée en considérant les paramètres extraits par la méthode 3, de la structure Cell33

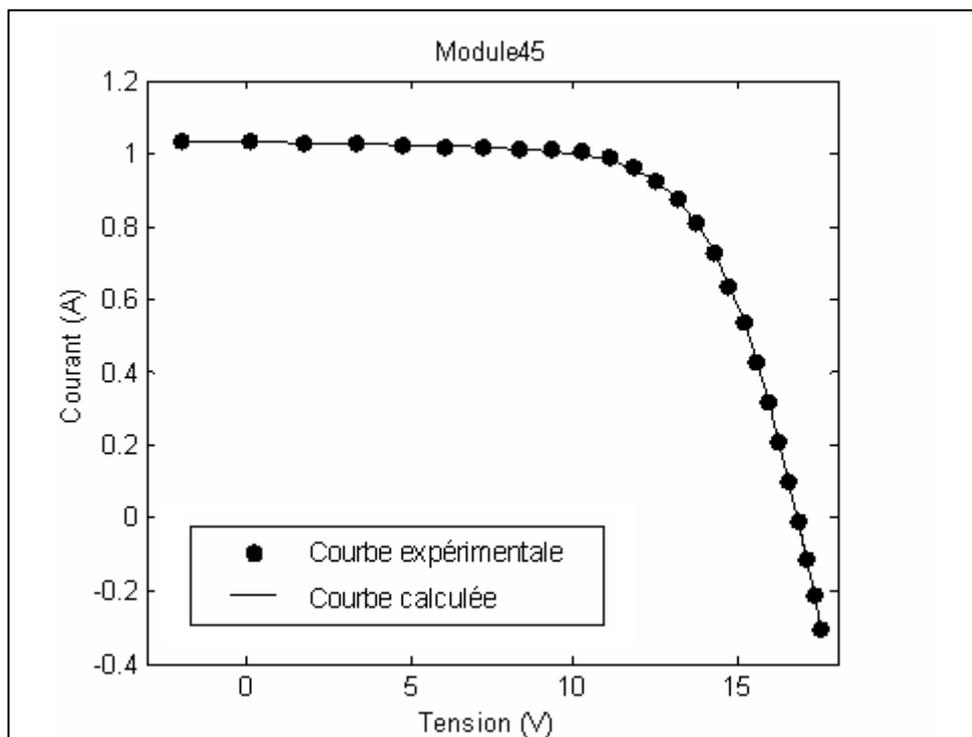


Figure III-15 : Caractéristiques I-V expérimentale et simulée en considérant les paramètres extraits par la méthode 3, de la structure Module45.

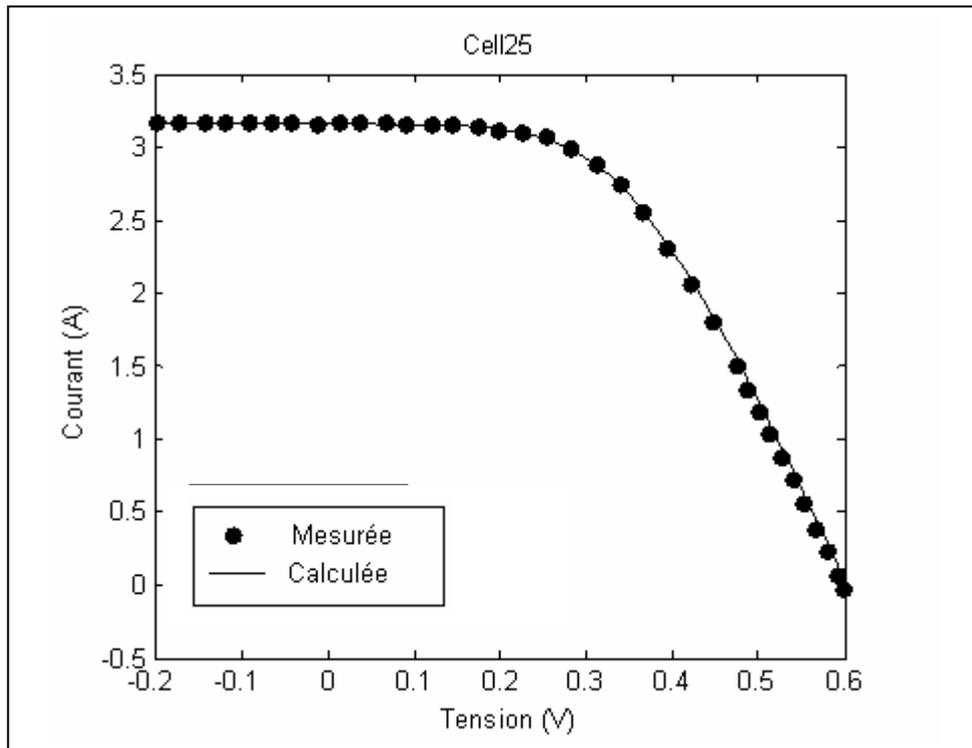


Figure III-16 : Caractéristiques I-V expérimentale et simulée en considérant les paramètres extraits par la méthode 3, de la structure Cell25

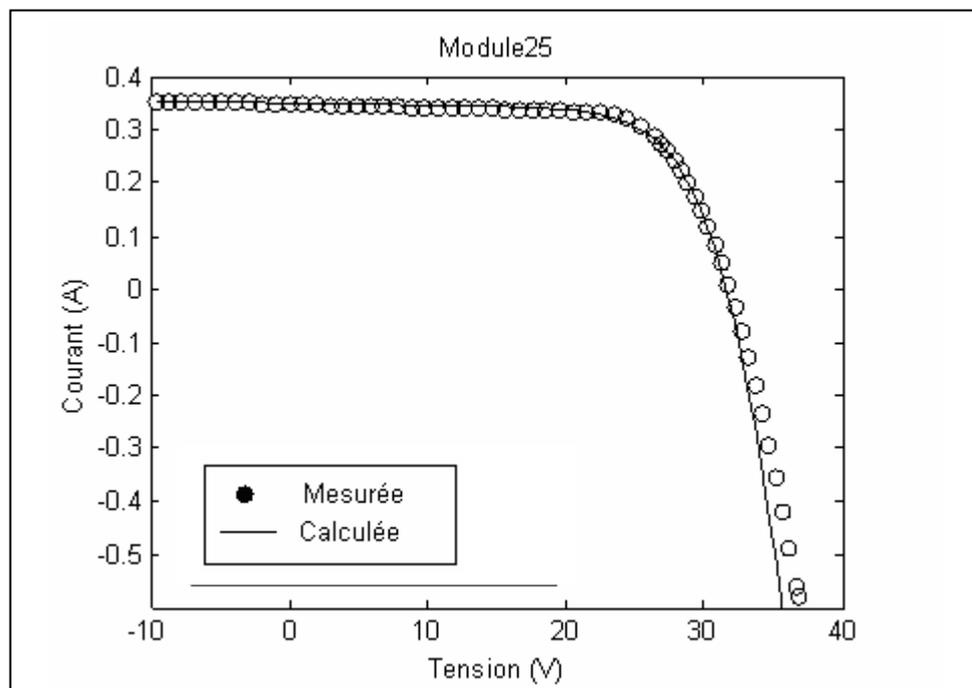


Figure III-17 : Caractéristiques I-V expérimentale et simulée en considérant les paramètres extraits par la méthode 3, de la structure Module25

Tableau III-1 : Paramètres caractéristiques des cellules et des modules extraits par différentes méthodes sous éclairement.

Paramètre	Réf [45]	Méthode1	Méthode 2	Méthode 3
<u>Cellule à 33°C</u>				
G_{sh} (Ω^{-1})	0.0186	0.0166	0.01726	0.0166
R_s (Ω)	0.0364	0.0364	0.0377	0.0328
n	1.4837	1.4816	1.511	1.4983
I_s (μA)	0.3223	0.3267	0.41789	0.3943
I_{ph} (A)	0.7608	0.7607	0.7608	0.7607
σ (%)	0.6251	0.3161	1.0129	0.3381
<u>Module à 45°C</u>				
G_{sh} (Ω^{-1})	0.00182	0.00181	0.0012	0.00181
R_s (Ω)	1.2057	1.2030	1.3328	1.1922
n	48.450	48.1862	48.594	47.1960
I_s (μA)	3.2876	3.0760	4.118	2.3528
I_{ph} (A)	1.0318	1.0339	1.0342	1.0339
σ (%)	0.7805	0.6130	2.233	0.7314
<u>Cellule à 25°C</u>				
G_{sh} (Ω^{-1})		0.0262	0.0526	0.0262
R_s (Ω)		0.0613	0.0654	0.0636
n		1.7538	1.7720	1.7135
I_s (μA)		5.6766	5.2754	3.5440
I_{ph} (A)		3.1656	3.1669	3.1658
σ (%)		0.4567	1.6545	1.8415
<u>Module à 25°C</u>				
G_p (Ω^{-1})		0.0006	0.00057	0.00063
R_s (Ω)		6.1001	5.550	3.4858
n		64.5980	69.53	63.040
I_s (μA)		0.0016	0.0052	0.0019
I_{ph} (A)		0.3499	0.3500	0.3494
σ (%)		0.9182	1.825	8.533

III.1.2.4 Discussion et comparaison

On remarque sur les Figures III-6, III-7, III-8 et III-9 que la méthode 1 donne une très bonne concordance entre les caractéristiques I-V expérimentales et calculées avec des déviations standards inférieures à 1%.

Les Figures III-10, III-11, III-12 et III-13 montrent que la méthode 2 donne des résultats acceptables pour toutes les structures solaires avec des déviations standard inférieures à 2.5%.

En appliquant la méthode 3, on observe d'après les Figures III-14, III-15 qu'on obtient une bonne concordance entre les courbes mesurées et calculées avec une faible déviation standard (0.3381% pour la Cell33 et 0.7314% pour le Module45) et des résultats acceptables sur les Figures III-16, III-17 avec une déviation de 1.8415% pour la Cell25 et de 8.533% pour le Module25.

D'après le Tableau III-1, l'accord entre les résultats obtenus par les trois méthodes et ceux publiés précédemment [45] sont remarquables dans les cas de la Cell33 et du Module 45.

Le problème rencontré durant le développement et l'application de la méthode 2 et de la méthode 3, est dû au pas de la tension du fait que le calcul des dérivées première soit de mauvaise précision, ce qui se répercute sur la détermination des différents paramètres de la cellule solaire.

D'après les figures précédentes et le Tableau III-1, on remarque que la méthode 1 donne le meilleur résultat parmi les méthodes qu'on traite avec une déviation standard de 0.3161% pour la cellule33, 0.6130% pour le Module45, 0.4567 pour la cellule25, et de 0.9182% pour le module45.

Conclusion

Nous avons présentée une étude comparative des méthodes d'extraction des paramètres des cellules solaires, à savoir les méthodes de *Gromov modifiée*, de *Werner*, et de *Mikhelashvili modifiée* pour des cellules solaires non éclairée, et les méthodes une, deux , et trois pour des cellules solaires éclairées.

Les méthodes de calcul que nous avons exposées permettent très rapidement de calculer les paramètres d'une cellule solaire à partir de la caractéristique courant-tension mesurée ou théorique à l'obscurité ou sous éclairage. Les résultats obtenus sont en bon accord avec ceux édités précédemment, et les courbes montrent généralement une bonne concordance entre les caractéristiques I-V expérimentale et calculée avec des déviations standards acceptables.

Les méthodes proposées sont faciles, directe n'exigent pas la connaissance antérieure de n'importe lequel des paramètres d'intérêt et moins critique à la fidélité de dispositif de mesure.

D'après l'analyse des résultats obtenus par les différentes méthodes, on peut conclure que la méthode de *Gromov modifiée* et *la méthode 1* sont respectivement les plus adaptés à l'extraction des paramètres des cellules solaires à l'obscurité et sous éclairage.

Conclusion générale

L'une des options les plus prometteuses, permettant d'abandonner à long terme les sources d'énergie qui portent atteinte à l'environnement, est la transformation directe de l'énergie solaire en électricité au moyen de cellules solaires photovoltaïques ou photopiles. Le photovoltaïque est la plus jeune des énergies renouvelables, il a l'avantage d'être non polluant, souple et fiable.

Pour un éclairage et une température donnés la caractéristique courant-tension $I(V)$ nous renseigne sur le comportement de la cellule solaire. L'objectif de ce travail est de développer des méthodes d'extraction des paramètres d'une cellule solaire basées sur la caractéristique I-V de la cellule à l'obscurité et sous éclairage.

Nous avons rappelé, dans un premier lieu des généralités sur la cellule solaire. On a détaillé son fonctionnement, sa structure, ses paramètres et ses caractéristiques à l'obscurité et sous éclairage. Ces caractéristiques sont influencées par plusieurs facteurs tel que la température, le flux lumineux, la résistance série et la résistance parallèle. Ensuite et afin d'augmenter la puissance générée aux bornes de la cellule nous avons étudié l'association des cellule en série, en parallèle et en série-parallèle.

Après avoir rappelé quelques méthodes d'extraction des paramètres d'une cellule solaire, nous avons proposé de nouvelles méthodes d'extraction du photocourant I_{ph} , du courant de saturation I_s , du facteur d'idéalité n , la résistance série R_s et de la conductance parallèle G_{sh} des caractéristiques I-V de la cellule solaires.

Ces méthodes sont réparties en deux classes :

- Les méthodes d'extraction à l'obscurité à savoir la méthode de *Gromov modifiée*, la méthode de Werner, et la méthode de *Mikhelashvili modifiée*.
- Les méthodes d'extraction sous éclairage à savoir la méthode 1, la méthode 2, et la méthode 3.

Notre étude nous a conduit à des résultats qui montrent clairement une bonne concordance entre les caractéristiques I-V expérimentale et celles calculées de différentes structures solaires en utilisant les méthodes proposés. Ces méthodes sont faciles, directes, n'exigent pas la connaissance antérieure de n'importe lequel des paramètres d'intérêt et moins critique à la fidélité de dispositif de mesure.

La comparaison entre les méthodes développées montre que les valeurs des paramètres extraits sont très proches, ainsi les méthodes de Gromov modifiée et la première méthode sont respectivement les meilleurs et les plus adaptés à l'extraction des paramètres des cellules solaires à l'obscurité et sous éclairage.

Bibliographie

- [1] M. Orgeret. Les piles solaires, le composant et ses applications. Masson, Paris, 1985
- [2] A. Labouret, M. Viloz, Energie solaire photovoltaïque, Dunod, Paris, 2003
- [3] Bernard Equer, Energie solaire photovoltaïque, volume1, Ellipses Edition Marketing et l'Unesco, 1993.
- [4] Alain Ricaud, Photopiles solaires, Presses polytechniques et universitaires ramandes, Lausanne, 1997.
- [5] A. Ferhat Hamida, Modélisation des phénomènes de transport et étude du rendement dans les structure métal/isolant/semiconducteur, Thèse de Doctorat, Sétif, 2006
- [6] Mimoun Oukachmih, Les cellules photovoltaïques à base de matériaux organiques discotiques, Thèse de doctorat, Toulouse, 2003.
- [7] Salima Alem-Boudjemline, Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques plastiques, Thèse de doctorat, Angers, 2004.
- [8] Benoit Brousse, Réalisation et caractérisation de cellules photovoltaïques organiques obtenues par dépôt physique, Thèse de doctorat, Limoge, 2004.
- [9] Yannick Vashetti, Modélisation, caractérisation et réalisation de nouvelles structures photovoltaïques sur substrat de silicium mince, Thèse de doctorat, Strasbourg, 2005.
- [10] Chenouf Hakim, Optimisation du procédé technologique de réalisation d'une cellule solaire par la technique de diffusion, Thèse de magistère, Batna, 2005.
- [11] Lionel Sicot, Étude et réalisation de cellules photovoltaïque en polymère, Thèse de doctorat, Paris, 1999
- [12] 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.

- [13] M. Chegaar, Extracting solar cell parameters and estimating the atmospheric effects on their performance, Thèse de Doctorat d'Etat, Sétif, 2002.
- [14] Nichiporuk Oleksiy, Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités, Thèse de doctorat, Lyon, 2005.
- [15] Rémi de Bettignies, Cellules photovoltaïques organiques dérivées de nouveaux systèmes conjugués, Thèse de doctorat, Angers, 2003.
- [16] Moualkia Hassiba, Simulation d'une cellule solaire en couches minces à base d'oxyde de Zinc, Thèse de magister, Constantine, 2003.
- [17] J. Royer, T. Djiako, E. Schiller, B. Sada Sy, Le pompage photovoltaïque, IEPF/Université d'Ottawa/EIER/CREPA, Institut de l'Énergie des Pays ayant en commun l'usage du Français, 1998.
- [18] J. Cottier, A. Mermoud, M. Viloz, J. Graf, Centrales photovoltaïques, Guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets, Berne, 1996.
- [19] L. Montes, R. Herino, Mesures d'impédance en milieu liquide du silicium et du silicium poreux, Stage de Licence Physique, Grenoble, 1997
- [20] Kamouche Leila, Modèle de fonctionnement d'une station solaire photovoltaïque en prévision de panne, Thèse de magister, Constantine, 2002.
- [21] Potentiel en énergie renouvelable de saint-Quentin-En-Yvelines, Agence locale de maîtrise de l'énergie ALMeSOY, Décembre 2003.
Disponible sur : www.arenaidf.org
- [22] http://Ceos.cnes.fr/ceos1/Sciences/baghygb/intro/fr/contt_f.htm
- [23] <http://web.univ-pau.fr/~scholle/ecosystemes/4-pv/41-pri/41-pg-fr.htm>
- [24] http://www.cmhc-schl.gc.ca/fr/co/enlo/efenreco/efenreco_003.cfm
- [25] THUILLIER, Bruno, Caractérisation structurale des contacts ohmiques réalisés à partir d'encre métalliques sur cellules photovoltaïques en silicium multicristallin Thèse de doctorat : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2001
Disponible sur : <http://docinsa.insa-lyon.fr/these/pont.phpid=thuillier>

-
- [26] BP Solar, Informations Techniques « informations générales sur le photovoltaïque », décembre 2000, France. disponible sur [www. Bp Solar .com](http://www.BpSolar.com)
- [27] M. Wolf, H. Rauschenbach, *Advan. Energy Convers.*, 3 (1963) 455.
- [28] JP. Charles, M. Abdelkrim, YH. Muoy, P. Mialhe, *Solar Cells*, 4 (1981) 169.
- [29] SK. Agrawal, R. Muralidharam, A. Agrawala, VK. Tewary, SC. Jain, *J. Phys.* 14 (1981) 1634.
- [30] J. Cabestany, L. Castaner, *Rev. Phys. Appl.*, 18 (1983) 565.
- [31] D. Laplaze, I. Youm, *Solar Cells*, 14 (1985) 167.
- [32] M. Warashina, A. Ushirokawa, *Jpn. J. App. Phys.*, 19 (1980) 179.
- [33] D. Laplaze, I. Youm, *Solar Cells*, 14 (1985) 179.
- [34] Kaminski, JJ. Marchand, A. Laugier, *Solid-State Electron.* 43 (1999) 741.
- [35] K. Rajkanan, J. Shewchun, *Solid-State Electron*, 22 (1979) 193.
- [36] A.G. Aberle, SR. Wenham, M.A. Green, In: 23th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, (1993) 133.
- [37] Z. Ouennoughi, M. Chegaar, *Solid-State Electron.*, 43 (1999) 1985–1988.
- [38] M. Chegaar, Z. Ouennoughi, A. Hoffmann, *Solid-State Electron*, 45 (2001) 293–296.
- [39] GL. Arango, E. Sanchez, *IEEE Trans. Electron Devices*, vol.29, pp. 1511, 1982.
- [40] DSH. Chan, JR. Phillips, JCH. Phang, *Solid-State Electron*, 29 (1986) 329–37.
- [41] J. Cabestany, L. Castaner, *J. Phys D: Appl. Phys.*, 16 (1983) 2547.
- [42] D. Fuchs, H. Sigmund, *Solid-State Electron*, 29 (1986) 791.
- [43] JP. Charles, I. Mekkaoui-Allaoui, G. Bordure, *Solid-State Electron*, 28 (1985) 807–820.
- [44] SK. Datta, K. Mukhopadhyay, S. Bandopadhyay, H. Saha, *Solid-State Electron*, 11 (1992) 1667.

-
- [45] T. Easwarakhanthan, J. Bottin, I. Bouhouch, C. Boutrit, *Int. J. Solar Eng.*, 4 (1986) 1–12.
- [46] DSH. Chan, GR. Philips, JCH. Phang, *Solid-State Electron.*, 29 (1986) 329–337.
- [47] H. d. Rovel, *Semiconductor and Semimetals*, Vol II, New York, 1975
- [48] A. Ferhat-Hamida, Z. Ouennoughi, A. Hoffmann, R. Weiss, *Solid-State Electronics*, 46 (2002) 615-619.
- [49] R. L. Burden, J. D. Faires. *Numerical Analysis*, Prindle, Weber & Schmidt, Boston, 1985.
- [50] C.F. Gerald, P.O. Wheatley, *Applied Numerical Analysis*, Addition, Wesley, 1984.
- [51] B. Démidovitch, L. Maron, *Elément de calcul Numérique*, Mir, Moscou, 1979.
- [52] T. C. Lee, S. Fung, C. D. Beling and Au H.L, *J Appl. Phys* **72**, (1992) 4739-4742
- [53] M. Chegaar, G. Azzouzi, P. Mialhe *Solid-State Electronics*, 50 (2006)1234-1237
- [54] V. Mikhelashvili, G. Eisenstein, V. Garber *J Appl. Phys* 85,(1999) 6873
- [55] D. Gromov, V. Pugachevich. *J Phys. : Appl Phys.A.59* (1994) 331-333.
- [56] J.H. Werner, *Appl. Phys. A* 47 (1988)291-300
- [57] A. Gourdin, M. Boumahrat, *Méthodes numériques appliquées*. Alger 1990.

Annexe

A. Calculs de la méthode 1

A.1 Le paramètre delta δ

Le paramètre δ est défini dans l'équation (II.6.4) par la relation:

$$\delta = \frac{d \ln(I_{pA} - I_c)}{d \ln V}$$

Partant de l'équation (II.6.3), et posant $x = \ln V$ et $y = \ln(I_{pA} - I_c)$ dans cette équation, nous obtenons :

$$e^x = \frac{n}{\beta} y - R_s (I_{pA} - e^y) - \frac{n}{\beta} \ln I_0 \quad (\text{A.1})$$

$$\Rightarrow x = \ln \left(\frac{n}{\beta} y - R_s (I_{pA} - e^y) - \frac{n}{\beta} \ln I_0 \right) \quad (\text{A.2})$$

Différenciant Eq. (A.2) par rapport a y, on obtient :

$$\frac{dx}{dy} = \frac{\frac{n}{\beta} + R_s e^y}{\frac{n}{\beta} y - R_s (I_{pA} - e^y) - \frac{n}{\beta} \ln I_0} \quad (\text{A.3})$$

$$= \frac{\frac{n}{\beta} + R_s e^y}{\frac{n}{\beta} y - R_s (I_{pA} - e^y) - \frac{n}{\beta} \ln I_0} \quad (\text{A.4})$$

Donc :

$$\frac{dy}{dx} = \frac{x}{\frac{n}{\beta} + R_s e^y} \quad (\text{A.5})$$

Remplaçant les expressions de x, y et β dans (A.5) on trouve :

$$\frac{d \ln(I_{pA} - I_c)}{d \ln V} = \frac{qV}{nkT + qR_s (I_{pA} - I_c)} \quad (\text{A.6})$$

Ce que nous donne l'expression de δ :

$$\delta = \frac{qV}{nkT + qR_s (I_{pA} - I_c)} \quad (\text{A.7})$$

A.1 Les paramètres R_s , n et I_0

A.1.1 Calcul la résistance R_s

La dérivée de δ par rapport à V donne :

$$\frac{d\delta}{dV} = \frac{q(nkT + qR_s(I_{pA} - I_c)) - q^2VR_s \left(\frac{d(I_{pA} - I_c)}{dV} \right)}{(nkT + qR_s(I_{pA} - I_c))^2} \quad (\text{A.8})$$

D'après l'équation (II.6.3) :

$$\frac{d(I_{pA} - I_c)}{dV} = \frac{q(I_{pA} - I_c)}{nkT + qR_s(I_{pA} - I_c)} \quad (\text{A.9})$$

Substituant l'équation (A.9) dans (A.8), et on pose $\frac{d\delta}{dV} = 0$ nous obtenons :

$$(nkT + qR_s(I_{pA} - I_{cm})) - qV_m R_s \left(\frac{q(I_{pA} - I_{cm})}{nkT + qR_s(I_{pA} - I_{cm})} \right) = 0 \quad (\text{A.10})$$

$$\Rightarrow (nkT + qR_s(I_{pA} - I_{cm}))^2 = q^2V_m R_s (I_{pA} - I_{cm}) = 0 \quad (\text{A.11})$$

Avec :

V_m et I_{cm} sont les valeurs maximales correspondantes au maximum de δ (δ_m).

L'équation (A.11) peut se mettre sous la forme :

$$(nkT + qR_s(I_{pA} - I_{cm}))^2 = \frac{q^2V_m^2 R_s (I_{pA} - I_{cm})}{V_m} \quad (\text{A.12})$$

$$\Rightarrow R_s = \left(\frac{nkT + qR_s(I_{pA} - I_{cm})}{qV_m} \right)^2 \frac{V_m}{(I_{pA} - I_{cm})} = \frac{1}{\delta_m^2} \frac{V_m}{(I_{pA} - I_{cm})} \quad (\text{A.13})$$

On a donc :

$$R_s = \frac{V_m}{(I_{pA} - I_{cm})\delta_m^2} \quad (\text{A.14})$$

A.1.2 Calcul de facteur d'idéalité n

L'équation (A.7) s'écrit pour V_m :

$$\delta_m = \frac{qV_m}{nkT + qR_s(I_{pA} - I_c)} \quad (\text{A.15})$$

$$\Rightarrow nkT + qR_s(I_{pA} - I_c) = \frac{qV_m}{\delta_m} \quad (\text{A.16})$$

$$\Rightarrow n = \frac{q}{kT} \left(\frac{V_m}{\delta_m} - R_s(I_{pA} - I_c) \right) \quad (\text{A.17})$$

D'après l'Eq. (A.14)

$$R_s(I_{pA} - I_c) = \frac{V_m}{\delta_m^2} \quad (\text{A.18})$$

Donc (A.17) peut être écrite sous la forme:

$$n = \frac{q}{kT} \left(\frac{V_m}{\delta_m} - \frac{V_m}{\delta_m^2} \right) = \frac{qV_m}{kT} \left(\frac{1}{\delta_m} - \frac{1}{\delta_m^2} \right) \quad (\text{A.19})$$

Finalement n donné par :

$$n = \frac{qV_m(\delta_m - 1)}{kT\delta_m^2} \quad (\text{A.20})$$

A.1.1 Calcul du courant I_0

Partant de l'équation (A.15) et (II.6.3) on trouve:

$$\delta_m = \frac{q \left[\frac{n}{\beta} \ln \left(\frac{I_{pA} - I_{cm}}{I_0} \right) - R_s I_{cm} \right]}{nkT + qR_s(I_{pA} - I_{cm})} \quad (\text{A.21})$$

$$= \frac{nkT \ln \left(\frac{I_{pA} - I_{cm}}{I_0} \right) - qR_s I_{cm}}{nkT + qR_s(I_{pA} - I_{cm})} \quad (\text{A.22})$$

$$\Rightarrow \delta_m (nkT + qR_s(I_{pA} - I_{cm})) + qR_s I_{cm} = nkT \ln \left(\frac{I_{pA} - I_{cm}}{I_0} \right) \quad (\text{A.22})$$

$$\Rightarrow \ln\left(\frac{I_{pA} - I_{cm}}{I_0}\right) = \delta_m + \frac{\delta_m q R_s (I_{pA} - I_{cm})}{nkT} + \frac{q R_s I_{cm}}{nkT} \quad (\text{A.23})$$

Substituant l'équation (A.14) dans (A.23) on obtient :

$$\ln\left(\frac{I_{pA} - I_{cm}}{I_0}\right) = \delta_m + \frac{qV_m}{nkT\delta_m} + \frac{qV_m}{nkT\delta_m^2} \left(\frac{I_{cm}}{I_{pA} - I_{cm}}\right) \quad (\text{A.24})$$

$$= \delta_m + \frac{qV_m}{nkT} \left[\frac{1}{\delta_m} + \frac{1}{\delta_m^2} \left(\frac{I_{cm}}{I_{pA} - I_{cm}}\right) \right] \quad (\text{A.25})$$

D'autre part le paramètre n est donné par l'équation (A.20)

Donc (A.24) s'écrit :

$$\ln\left(\frac{I_{pA} - I_{cm}}{I_0}\right) = \delta_m + \frac{qV_m}{kT \left(\frac{qV_m}{kT} \left(\frac{\delta_m - 1}{\delta_m^2} \right) \right)} \left[\frac{1}{\delta_m} + \frac{1}{\delta_m^2} \left(\frac{I_{cm}}{I_{pA} - I_{cm}}\right) \right] \quad (\text{A.26})$$

$$= \delta_m + \frac{\delta_m^2}{(\delta_m - 1)} \left[\frac{1}{\delta_m} + \frac{1}{\delta_m^2} \left(\frac{I_{cm}}{I_{pA} - I_{cm}}\right) \right] \quad (\text{A.27})$$

$$\Rightarrow \frac{I_{pA} - I_{cm}}{I_0} = \exp \left[\delta_m + \frac{\delta_m^2}{(\delta_m - 1)} \left(\frac{1}{\delta_m} + \frac{1}{\delta_m^2} \left(\frac{I_{cm}}{I_{pA} - I_{cm}}\right) \right) \right] \quad (\text{A.28})$$

$$\Rightarrow I_0 = \frac{I_{pA} - I_{cm}}{\exp \left[\delta_m + \frac{\delta_m^2}{(\delta_m - 1)} \left(\frac{1}{\delta_m} + \frac{1}{\delta_m^2} \left(\frac{I_{cm}}{I_{pA} - I_{cm}}\right) \right) \right]} \quad (\text{A.29})$$

$$\Rightarrow I_0 = (I_{pA} - I_{cm}) \exp \left[-\delta_m - \frac{\delta_m^2}{(\delta_m - 1)} \left(\frac{1}{\delta_m} + \frac{1}{\delta_m^2} \left(\frac{I_{cm}}{I_{pA} - I_{cm}}\right) \right) \right] \quad (\text{A.30})$$

Finalement I_0 s'écrit par l'équation suivante :

$$I_0 = (I_{pA} - I_{cm}) \exp \left[\frac{1}{1 - \delta_m} \left(\delta_m + \frac{I_{cm}}{I_{pA} - I_{cm}} \right) - \delta_m \right] \quad (\text{A.31})$$

ملخص:

في هذه المذكرة، نقترح دراسة و مقارنة طرق استخراج الوسائط الكهربائية المميزة للخلية الشمسية لنموذج أحادي ثنائي القطب. هذه الوسائط هي: التيار الكهربائي المشبع I_s ، المقاومة على التسلسل R_s ، معامل المثالية n ، التيار الكهرضوئي I_{ph} و مقلوب المقاومة على التفرع G_{sh} . التقنيات المقترحة، التي تقوم على أساس الخاصية تيار- فرق الكون، طُبقت بنجاح على خلية شمسية و مجموعة من الخلايا.

Résumé:

Dans cette thèse, nous proposons une étude comparative des méthodes d'extraction des paramètres caractéristiques des cellules solaires à l'obscurité et sous éclairage dans le cadre du modèle du dispositif à une diode. Ces paramètres sont le courant de saturation I_s , la résistance série R_s , le facteur d'idéalité n , le photo-courant I_{ph} et la conductance parallèle G_{sh} .

Les techniques proposées sont basées sur des caractéristiques courant-tension des cellules solaires à l'obscurité et sous éclairage. Ces méthodes ont été appliquées avec succès à de différents types de cellules et de modules solaires.

Abstract:

In this thesis, a comparative study of different methods for extracting solar cell parameters under dark and illuminated conditions considering the single diode lumped circuit model. These parameters are usually the saturation current I_s , the series resistance, the ideality factor n , the photocurrent I_{ph} and the shunt conductance G_{sh} .

The suggested techniques are based on the current-voltage characteristics of the solar cells. They have been successfully applied to different solar cells and modules.

Key words: solar cells, extraction, parameters, dark, illumination.