

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF

## **MEMOIRE**

Présenté à la Faculté des Sciences

Département de Physique

Pour l'obtention du diplôme de

## **MAGISTER**

**Option : Energétique et Mécanique des Fluides**

**Par**

**SALAHEDDINE BENSALÉM**

*Thème :*

*Effets de la température sur les paramètres caractéristiques  
des cellules solaires*

Soutenu le : 06/01/2011

Devant le Jury :

<b>Président :</b>	Dr K. KASSALI	Professeur	UFA SETIF
<b>Rapporteur :</b>	Dr M. CHEGAAR	Professeur	UFA SETIF
<b>Examineur :</b>	Dr Z. OUENNOUGHI	Professeur	UFA SETIF
<b>Examineur :</b>	Dr M. GUELLAL	Maître de conférences « A »	UFA SETIF

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## REMERCEMENTS

*J'exprime mes remerciements en premier lieu à Monsieur **M. Chegaar** professeur à l'université de Sétif, pour m'avoir accueilli tout au long de ce travail. Je le remercie très sincèrement pour avoir dirigé mes travaux du mémoire et suivi de près et d'une manière continue cette étude.*

*Je remercie **Pr K. Kassali** professeur à l'université de Sétif, qui me fait l'honneur d'accepter de présider le jury du mémoire.*

*Je tiens à remercier : **Pr Z. Ouennoughi** professeur à l'université de Sétif et **Dr M. Guellel** maître de conférences à l'université de Sétif d'avoir répondu aimablement afin de juger ce travail en participant au jury du mémoire.*

*Ces remerciements vont inévitablement aussi à mes enseignants et mes collègues.*

*Grand remerciement à mes parents, et à toute ma famille.*

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

---

## *Sommaire*

---

<b>Sommaire.....</b>	<b>III</b>
<b>Liste des symboles utilisés.....</b>	<b>VI</b>
<b>Principales constantes.....</b>	<b>VIII</b>
<b>Introduction générale.....</b>	<b>10</b>
 <b>CHAPITRE I– L’ENERGIE SOLAIRE ET LA CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE</b>	
<b>I.1. Introduction.....</b>	<b>13</b>
<b>I.2. L’énergie solaire.....</b>	<b>13</b>
I.2.1. Le soleil.....	13
I.2.2. Le pouvoir énergétique du soleil.....	14
I.2.3. Le rayonnement solaire.....	16
<b>I.3. La conversion photovoltaïque.....</b>	<b>19</b>
I.3.1. Définition.....	19
I.3.2. La cellule solaire.....	19
I.3.3. Caractéristique électrique.....	20
I.3.4. Circuit électrique équivalent.....	21
I.3.5. Les grandeurs caractéristiques d’une cellule solaire.....	22
I.3.6. Le mécanisme de la conversion photovoltaïque.....	24
I.3.7. Influence des différents paramètres sur la caractéristique $I(V)$ .....	26
1.3.7.1. Influence de l’éclairement et de la température.....	26
1.3.7.2. Influence de la résistance série et la conductance shunt.....	27
1.3.7.3. Influence du courant de saturation et du facteur d’idéalité.....	29
<b>I.4. Les modules photovoltaïques.....</b>	<b>31</b>
1.4.1. Association en série.....	31
1.4.2. Association en parallèle.....	32
1.4.3. Association en série parallèle.....	32
<b>I.5. Déséquilibres dans les groupements de modules.....</b>	<b>34</b>
1.5.1. La cellule solaire fonctionnant en récepteur .....	34
1.5.2. Déséquilibre dans un groupement série .....	35

1.5.3. Déséquilibre dans un groupement parallèle .....	35
<b>I.6. Les différents types de cellules solaires.....</b>	<b>36</b>
1.6.1. Les cellules solaires au silicium .....	36
1.6.2. Les cellules solaires à couche mince.....	37
1.6.3. Les cellules solaires organiques.....	38
<b>I.7. Conclusion.....</b>	<b>38</b>

## CHAPITRE II– EFFETS DE LA TEMPERATURE SUR LES PARAMETRES CARACTERISTIQUES DES CELLULES SOLAIRES

<b>II.1. Introduction.....</b>	<b>40</b>
<b>II.2. Effets de température sur la caractéristique <math>I(V)</math> expérimentale.....</b>	<b>40</b>
<b>II.3. Méthode d'extraction des paramètres.....</b>	<b>42</b>
II.3.1. Description de la méthode.....	42
II.3.2. Application de la méthode.....	45
<b>II.4. Description de l'évolution des paramètres en fonction de la température.....</b>	<b>45</b>
II.4.1. Le courant de court circuit ( $I_{cc}$ ) .....	45
II.4.2. La tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ) .....	47
II.4.3. Le facteur de forme ( $FF$ ) .....	47
<b>II.5. Conclusion.....</b>	<b>48</b>

## CHAPITRE III– RESULTATS ET DISCUSSION

<b>III.1. Introduction.....</b>	<b>50</b>
<b>III.2. Le courant de court circuit (<math>I_{cc}</math>) .....</b>	<b>50</b>
<b>III.3. La tension de circuit ouvert (<math>V_{co}</math>) .....</b>	<b>51</b>
<b>III.4. Le facteur de forme (<math>FF</math>) .....</b>	<b>53</b>
<b>III.5. Les deux résistances parasites.....</b>	<b>54</b>

III.5.1. La résistance série ( $R_s$ ).....	54
III.5.2. La résistance shunt ( $R_{sh}$ ) .....	55
<b>III.6. Conclusion.....</b>	<b>56</b>
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>59</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>62</b>

## LISTE DES SYMBOLES UTILISES

<i>Symbole</i>	<i>Description</i>
$I_{ph}$	<i>Le photo-courant</i>
$R_s$	<i>La résistance série</i>
$R_p$	<i>La résistance parallèle</i>
$I_s$	<i>Courant de saturation</i>
$n$	<i>Le facteur d'idéalité</i>
$I(V)$	<i>La caractéristique courant- tension de la photopile</i>
$I$	<i>Le courant électrique</i>
$V$	<i>La tension électrique</i>
$+$	<i>Rayonnement bêta plus</i>
$e$	<i>Neutrino électronique</i>
	<i>Rayonnement (photon) gamma</i>
$UA$	<i>Unité astronomique</i>
$\text{Å}$	<i>Angstrom</i>
	<i>Longueur d'onde</i>
$AM_x$	<i>Air mass</i>
$h$	<i>L'hauteur du Soleil</i>
$p$	<i>La zone p de la jonction</i>
$n$	<i>La zone n de la jonction</i>
$CAR$	<i>Couche anti-réfléchissante</i>
$I_{obs}$	<i>Courant d'obscurité</i>
$V_{th}$	<i>Le potentiel thermique</i>
$K$	<i>La constante de Boltzmann</i>
$T$	<i>La température absolue</i>
$q$	<i>La charge électrique d'un électron en valeur absolue</i>

$R_{sh}$	<i>La résistance shunt</i>
$G_{sh}$	<i>La conductance shunt</i>
$I_d$	<i>Courant de la diode</i>
$V_j$	<i>La tension aux bornes de la jonction p-n</i>
$I_{cc}$	<i>Courant de court circuit</i>
$V_{co}$	<i>Tension de circuit ouvert</i>
$P_m$	<i>Puissance maximale</i>
$I_m$	<i>Curant du point du fonctionnement</i>
$V_m$	<i>Tension du point du fonctionnement</i>
$FF$	<i>Le facteur de forme</i>
$\eta$	<i>Le rendement</i>
$S$	<i>La surface de la cellule</i>
$E$	<i>L'éclairement</i>
	<i>Coefficient de variation relative du <math>I_{cc}</math></i>
$E_g$	<i>Energie du gap</i>
	<i>Ohm</i>
$ZCE$	<i>Zone de charge d'espace</i>
$\vec{E}$	<i>Le champ électrique</i>
$E_c$	<i>Le niveau énergétique le plus bas de la bande de conduction</i>
$E_v$	<i>Le niveau énergétique le plus haut de la bande de valence</i>
$E_f$	<i>Le niveau de Fermi</i>
$L_n$	<i>Longueur de diffusion des électrons</i>
$L_p$	<i>Longueur de diffusion des trous</i>
$G$	<i>Groupement de cellules solaires</i>
$N_s$	<i>Groupement de N cellules ou de modules identiques en série</i>
$N_p$	<i>Groupement de N cellules ou de modules identiques en parallèle</i>



	<i>Fréquence du rayonnement</i>
$N_{ms}$	<i>Groupement de N module en série</i>
$N_{bp}$	<i>N branches en parallèle</i>
$mssp$	<i>(puissance) maximale de sous-station photovoltaïque</i>
$R_m$	<i>La résistance de charge optimale du module de base</i>
$R_{mssp}$	<i>La résistance de charge optimale de sous-station photovoltaïque</i>
$P$	<i>La puissance électrique</i>
$I_c$	<i>Le courant corrigé</i>
$C$	<i>La vitesse de la lumière dans le vide</i>

### **PRINCIPALES CONSTANTES**

<i>La charge électrique d'un électron (en valeur absolue)</i>	$q=1.60281 \times 10^{-19} \text{ C}$
<i>La constante de Boltzmann</i>	$K=1.38066 \times 10^{-23} \text{ J/K} = 8.61400 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$
<i>La vitesse de la lumière dans le vide</i>	$C=2.99792 \times 10^8 \text{ m/s}$

# *Introduction générale*

L'énergie est la complication essentielle pour l'homme dans le monde actuel, ses sources, est la question que le futur va poser à l'homme.

Cependant l'histoire réserve parfois des surprises. Avec la diminution du stock mondial d'hydrocarbures d'origine fossile (pétrole, gaz et charbon), la demande énergétique sans cesse croissante, la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante, les énergies renouvelables (solaire, marine, éolienne, etc.) reviennent au premier plan de l'actualité; leur exploitation arrange beaucoup l'environnement.

L'énergie solaire photovoltaïque<sup>1</sup> est l'une des énergies renouvelables et la plus utilisée. Elle consiste à convertir directement le rayonnement électromagnétique (solaire ou autre) en électricité. Elle utilise pour ce faire des convertisseurs photovoltaïques ou cellules photovoltaïques ou encor cellules solaires qui représentent l'élément de base dans la conversion photovoltaïque.

L'utilisation des cellules solaires comme convertisseurs d'énergie solaire a fait apparaître le besoin d'étudier ces systèmes afin de les optimiser, et par conséquence développer l'exploitation de cette nouvelle source d'énergie renouvelable propre et qui n'émet pas de gaz à effet de serre, pour ces derniers raisons la branche solaire photovoltaïque mérite vraiment d'être mise à contribution.

L'expérience montre que le fonctionnement des cellules solaires dépend fortement de plusieurs paramètres; internes (lié au dispositif lui-même; la technologie d'élaboration du dispositif photovoltaïque) et externes (lié à l'entourage du fonctionnement: éclairement, température, etc.). L'étude de l'influence de ces différents paramètres sur le fonctionnement des photopiles solaires est possible à travers la connaissance de l'influence de chaque paramètre sur la caractéristique  $I-V$  de la cellule.

L'éclairement et la température sont deux paramètres extrêmement importants dans le comportement des cellules solaires. Ils influent énormément sur la caractéristique  $I-V$  de la cellule solaire. D'où, l'importance de l'étude de l'influence de l'éclairement et de la température pour optimiser les performances des systèmes photovoltaïques puisqu'elles sont exposées au rayonnement solaire.

---

<sup>1</sup> Ce mot vient du Grec « *phôtos* » qui signifie lumière et de « *Volta* » du nom du physicien italien Volta Alessandro Comte (1745-1827) qui, en 1800, inventa la pile électrique [1].

La température est un paramètre très important et ne peut être négligé dans le comportement des cellules solaires. Sachant que sur le total d'énergie incidente, une très faible portion est réfléchiée par la surface du capteur et une petite portion est extraite sous forme d'énergie électrique, en conséquence c'est la grande partie de l'énergie incidente qui devra être dissipée sous forme de chaleur. Ceci conduit, sous rayonnement, à une température de fonctionnement relativement élevée si cette énergie non convertie en électricité n'est pas évacuée.

En particulier, les performances électriques d'une cellule solaire au silicium sont très sensibles à la température. Dans le présent travail, nous étudions pour une cellule solaire au silicium poly-cristallin, le comportement en fonction de la température des principaux paramètres; le courant de court circuit  $I_{cc}$ , la tension en circuit ouvert  $V_{co}$ , le facteur de forme  $FF$  et le rendement de conversion PV<sup>1</sup> ( ). Le présent travail est organisé comme suit :

Dans le premier chapitre nous rappelons des généralités sur la source fondamentale de l'énergie photovoltaïque; le soleil, son pouvoir énergétique et les propriétés de son rayonnement puis nous décrivons l'élément convertisseur; la cellule solaire. Nous abordons sa structure, sa caractéristique électrique, son circuit électrique équivalent, les paramètres photovoltaïques, le mécanisme de la conversion photovoltaïque, l'influence de différents paramètres sur la caractéristique  $I(V)$ , le regroupement des cellules solaires en modules photovoltaïques afin de construire un champ photovoltaïque et les déséquilibres dans les groupements de modules puis nous citons les différents types de cellules solaires.

Le deuxième chapitre traite les effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires. Nous commençons par illustration de l'effet de la température sur la caractéristique  $I(V)$  de la cellule étudiée, en suite nous déterminons les différents paramètres caractéristiques à différentes températures puis nous donnons une description de l'évolution des paramètres caractéristiques en fonction de la température.

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

En fin, une conclusion générale couronne ce mémoire pour récapituler nos analyses, nos résultats et nos commentaires.

---

<sup>1</sup> Abréviation simplificatrice dans ce travail signifie « photovoltaïque ».

# *Chapitre I*

## *L'énergie solaire et la conversion photovoltaïque*

## I.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons des généralités sur la source de l'énergie solaire (le soleil) et des notions fondamentales sur l'élément clé dans la conversion photovoltaïque (la cellule solaire).

## I.2. L'énergie solaire

### I.2.1. Le soleil

Sur le plan cosmogonique le soleil est une étoile quelconque dont ni les propriétés physiques ni la position ne la distinguent des milliards d'autres étoiles formant la Galaxie. Sur le plan humain cette étoile a une importance primordiale puisque sans elle la vie n'existerait pas sur terre. Le tableau suivant montre quelques caractéristiques principales du soleil :

<i>Caractéristique</i>	<i>Valeur</i>
<i>Masse</i>	$1,989 \times 10^{30} \text{ Kg}$
<i>Diamètre</i>	$1,392 \times 10^9 \text{ m}$
<i>Masse volumique moyenne</i>	$1410 \text{ Kg m}^{-3}$
<i>Puissance rayonnée</i>	$3,83 \times 10^{26} \text{ W}$
<i>Température superficielle</i>	$5770 \text{ K}$

**Tableau I.1:** *Caractéristiques principales du soleil* [2].

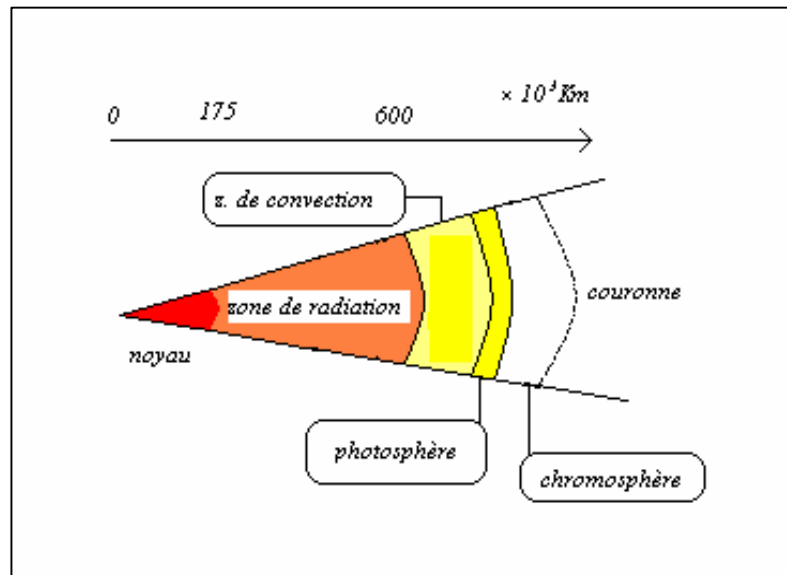
La structure du soleil est schématisée sur la figure (I.1). On distingue quatre zones particulières; le noyau, la photosphère, la chromosphère et la couronne [2]:

❖ Le noyau : c'est le coeur du soleil, sa température est très élevée ( $15 \times 10^6 \text{ K}$ ) ainsi que sa pression ( $2 \times 10^{11} \text{ bars}$ ) et sa densité ( $\sim 10^5 \text{ Kg m}^{-3}$ ), on note que cette dernière diminue avec l'éloignement au centre.

L'énergie produite au sein du noyau se propage par diffusion radiative puis par convection turbulente jusqu'à la photosphère d'où elle s'échappe sous forme de rayonnement électromagnétique vers l'espace.

❖ La photosphère : est une couche d'environ 300 Km d'épaisseur avec une température de 5770 K. Elle donne l'image visible du soleil.

❖ La chromosphère : est l'atmosphère du soleil. Elle a une épaisseur d'environ 8 000 Km et une température de 20 000 K environ.



**Figure I.1 :** Coupe schématique du soleil [2].

❖ La couronne : est le prolongement de la photosphère. Sans limite précise, elle est formée de gaz peu denses et ionisés. Invisible depuis la terre, car son éclat (brillance) se confond avec celui du ciel bleu. Elle ne peut être observée que pendant une éclipse solaire. Sa température est très élevée puisqu'elle dépasse le million de degrés.

Le soleil est composé chimiquement [3] de 70 % d'hydrogène et d'environ 28 % d'hélium et le 2 % restant étant mélange de plus de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connues. La distance terre-soleil est égale en moyenne et approximativement à [2]  $150 \times 10^6$  Km; cette distance est si grande que sa lumière nous parvient [3] 8 minutes après avoir été émise.

### ***1.2.2. Le pouvoir énergétique du soleil***

Le soleil est à l'origine de la vie sur la terre et la perpétue par son apport incessant d'énergie; cette énergie est vraiment considérable (tableau I.1). Elle nous arrive sous forme d'un rayonnement électromagnétique à travers l'espace et qui nous éclaire, nous réchauffe et fait croître les plantes...

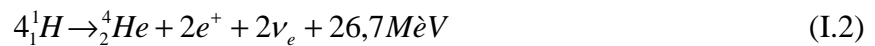
L'énergie solaire est produite par les réactions de fusion thermonucléaire d'hydrogène en hélium au sein du noyau du soleil; ce processus engendre un défaut de masse ( $m$ ) qui se transforme en énergie ( $E$ ) selon la célèbre relation d'Einstein ( $E = m \times C^2$ ) où  $C$  est la vitesse de la lumière dans le vide ( $C = 2.99792 \times 10^8$  m/s). Deux cycles ont été imaginés par les astrophysiciens pour décrire les étapes conduisant à cette fusion [2] :

❖ Le cycle proton-proton : fournit 90 % de l'énergie solaire. Les réactions nucléaires régissant ce cycle sont données, dans 91 % des cas (dans 9 % des cas, les réactions sont plus complexes et font intervenir des noyaux de béryllium 7 et 8, de lithium 7 et de bore 8 [2]), par les équations (I.1) ci-dessous. La notation  ${}^1_1\text{H}$  représente le noyau de l'atome d'hydrogène 1, c'est-à-dire un proton. Il y a émission de positrons  $e^+$  (rayonnement bêta plus «  $\beta^+$  »), de neutrinos  $\nu_e$ <sup>1</sup> et de photons  $\gamma$ <sup>2</sup>.

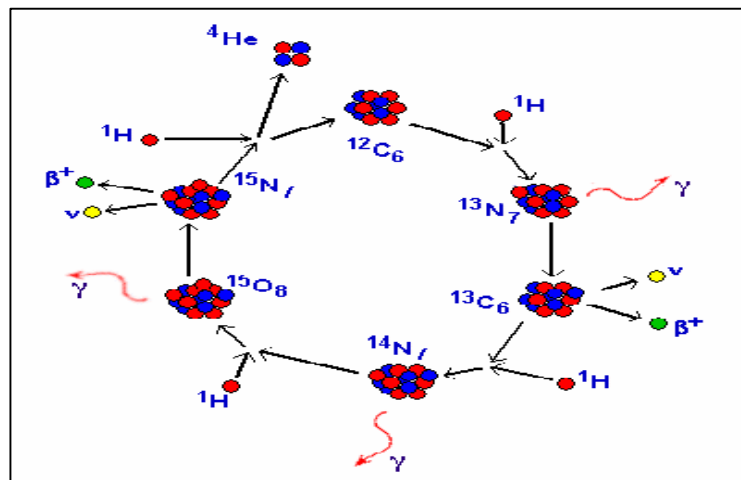


❖ Le cycle du carbone : fournit 10 % restants. Ce cycle peut être schématisé par le diagramme ci-dessous (figure I.2).

↳ On peut résumer ces deux cycles par l'équation globale suivante (en omettant le rayonnement ) :



Quatre protons fusionnent pour donner naissance à un noyau d'hélium avec émission de deux positons  $e^+$ , de deux neutrinos  $\nu_e$  et accompagnés d'une énergie égale à 26,7 MèV.



**Figure I.2 :** Cycle du carbone; globalement, 4 noyaux d'hydrogène se transforment en un noyau d'hélium avec émission de 3 photons  $\gamma$ , de 2 positons  $e^+$  et de 2 neutrinos  $\nu_e$  [4].

<sup>1</sup> Neutrinos électroniques; neutrino correspond au électron, le neutrino; est une particule fondamentale électriquement neutre, de masse non nulle et de spin égal à 1/2 [5].

<sup>2</sup> Rayonnement électromagnétique; issu d'un réarrangement des nucléons (neutrons et protons) à l'intérieur d'un noyau atomique, qui émet alors un photon de longueur d'onde de  $1\text{Å}$  à  $10^{-2}\text{Å}$  [6].



Pratiquement presque toutes les énergies renouvelables sont issues du soleil [7], directement pour l'énergie solaire (photovoltaïque ou photo-thermique) 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. Cependant, l'énergie solaire reçue par la Terre représente par an près de 15 000 fois la totalité de la consommation énergétique mondiale actuelle [8] 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 solaire photovoltaïque).

### ***1.2.2. Le rayonnement solaire***

La répartition spectrale du rayonnement solaire [1] est déterminée par la température de sa surface, à savoir 5900 K. La figure (I.3) donne l'allure de la répartition spectrale du rayonnement solaire réel hors atmosphère (l'éclairement spectral est définie comme une puissance reçue par une surface pour une longueur d'onde donnée; il s'exprime en  $W/m^2.nm$  [9]) comparé à celle du corps noir<sup>1</sup> à 5900 K, on constate que le soleil se comporte approximativement comme un corps noir.

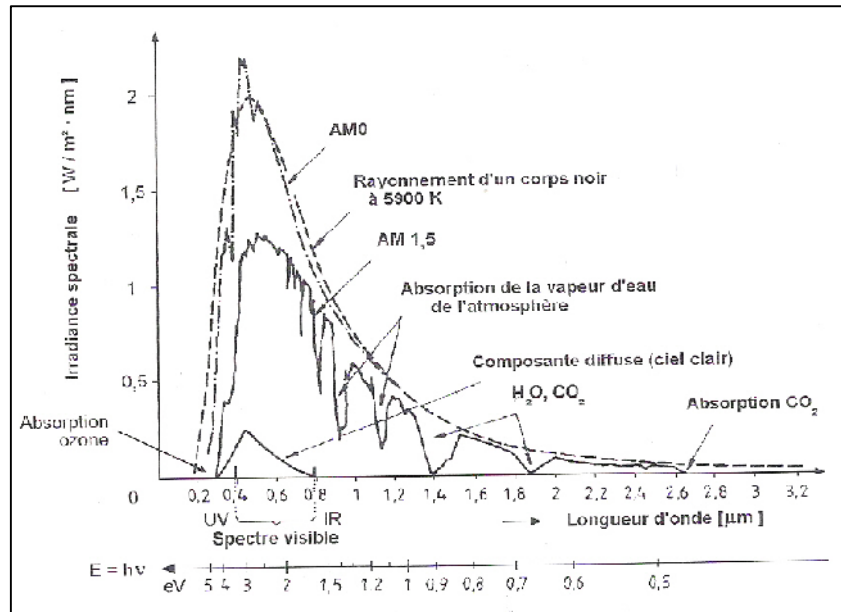
Ces spectres montrent que le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur variant de 0.2  $\mu m$  (ultraviolet) à 10  $\mu m$  (infrarouge). Ce rayonnement solaire se décompose en bandes comme suit [1] :

- ❖ 6.4 % dans la bande ultraviolette (UV) :  $0,2 < \lambda \leq 0,38 \mu m$  .
- ❖ 48,0 % dans la bande visible :  $0,38 < \lambda \leq 0,78 \mu m$  .
- ❖ 45,6 % dans la bande infrarouge (IR) :  $0,78 < \lambda \leq 10 \mu m$  .

La figure (I.3), montre aussi, l'atténuation observée après le passage à travers une épaisseur d'atmosphère correspondant à une masse d'air 1,5 (on la définit ci-dessous), soit l'équivalent d'une hauteur du soleil<sup>2</sup> de  $41.8^\circ$  « $h=41.8^\circ$ » au niveau de la mer (altitude nulle).

<sup>1</sup> Un corps noir est par définition un corps idéal parfaitement absorbant pour la lumière et parfaitement émissif pour le rayonnement thermique [10].

<sup>2</sup> Hauteur – angulaire - h du soleil; est l'angle entre la direction du soleil et le plan horizontal du lieu [1].



**Figure I.3 :** Répartition spectrale du rayonnement solaire : a) Hors atmosphère (AM0). b) A l'incidence  $41.8^\circ$  (AM1,5) [1].

Le rayonnement reçu par l'atmosphère terrestre en incidence normale est constant et voisin de  $1353 \text{ W/m}^2$  [2]. Le rayonnement solaire reçu au sol traversant les différentes couches atmosphériques; l'atmosphère modifie ce spectre énergétique du rayonnement solaire à travers trois mécanismes principaux [10]:

- ❖ l'absorption par les différents molécules gazeuses entrant dans sa composition [10]: 78 % d'azote ( $\text{N}_2$ ), 21 % d'oxygène ( $\text{O}_2$ ), 0.9 % d'argon (Ar), 0.03 % de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et d'autres gaz ainsi que la vapeur d'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ) «très variable de 0 à 4 %» et une couche mince d'ozone ( $\text{O}_3$ ) dont le rôle est si important dans l'absorption des rayons ultraviolets les plus puissants.

- ❖ la diffusion moléculaire de Rayleigh : c'est la diffusion due aux molécules de gaz constituant l'atmosphère et dont la taille est très inférieure à la longueur d'onde de la lumière [10].

- ❖ la diffusion due aux particules qu'elle contient : aérosols<sup>1</sup>, poussière et les nuages.

D'où le flux énergétique solaire optimal reçu au sol se réduit alors à  $1000 \text{ W/m}^2$  avec un spectre décalé vers le rouge par rapport au spectre hors atmosphère [11]. 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 le nombre de masse d'air.

<sup>1</sup> Particules en suspension dans l'atmosphère, ont en général des dimensions semblables à la longueur d'onde de la lumière; ce peuvent être des poussières, des cendres, des microcristaux, des microgouttelettes, des fumées de pollution industrielle dont la taille varie de  $0,5$  à  $10 \mu\text{m}$  [10].

On appelle masse d'air ou Air Mass en anglais [1], le rapport entre l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu (figure I.4). Cela dépend surtout de la hauteur angulaire du soleil  $h$ .

À l'aide des points O, A et M et cet angle  $h$  représentés à la figure (I.4), on écrit la longueur du trajet du Soleil à travers l'atmosphère :

$$\sin h = \frac{OA}{OM} \Leftrightarrow OM = \frac{OA}{\sin h} \quad (\text{I.3})$$

Donc l'Air Mass (AM) est :

$$\frac{OM}{OA} = \frac{1}{\sin h} \quad (\text{I.4})$$

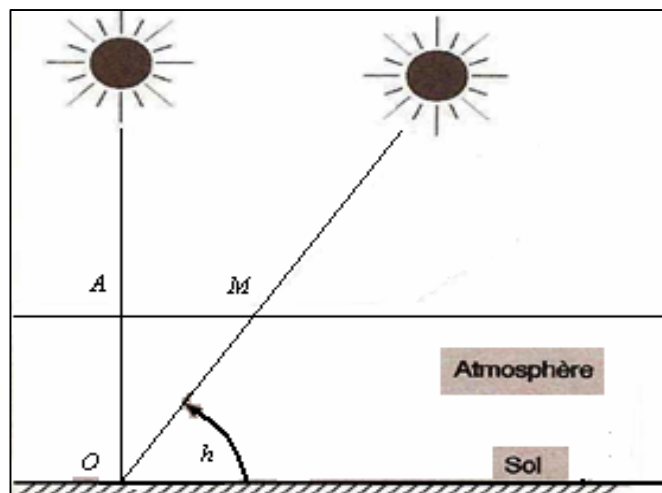
La notation conventionnelle de ce concept est donnée par un nombre sans dimension  $AM_x$ ,  $x$  étant [1]:

$$x = \frac{1}{\sin h} \quad (\text{I.5})$$

Citons, à titre d'exemple :

- ❖ AM1 : position du Soleil au zénith;  $h=90^\circ$ , (au niveau de la mer).
- ❖ AM2 : le Soleil à  $30^\circ$ .
- ❖ AM1,5 : le Soleil à  $41.8^\circ$ .

Et par convention, AM0 désigne le rayonnement solaire hors atmosphère (spectre valable pour les applications spatiales).



**Figure I.4 :** Définition de l'air mass  $AM_x$  [1].

### I.3. La conversion photovoltaïque

#### I.3.1. Définition

La conversion photovoltaïque [12] est la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement) en énergie électrique de type continu directement utilisable. L'élément de base dans cette conversion est la cellule solaire.

#### I.3.2. La cellule solaire

La cellule solaire [13] est un dispositif optoélectronique capable de capter et convertir directement l'énergie des rayons lumineux en électricité. Cette conversion est appelée la conversion photovoltaïque. Sa structure est illustrée dans la figure (I.5) ci-dessous. Elle montre un schéma simplifié d'une cellule solaire typique car l'architecture des dispositifs photovoltaïques modernes se révèle particulièrement complexe.

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

Les contacts métalliques en face avant et en face arrière, constituent la structure de cheminement permettant de récupérer les porteurs photogénérés, pour ça; deux électrodes sont élaborées sur la plaquette du semi-conducteur, l'une qui recouvre la totalité de la face arrière pour assurer le contact avec la zone  $p$ , et l'autre en forme de grille sur la face avant, la géométrie de cette grille étant un compromis entre une faible occultation du rayonnement et un bon contact électrique avec la zone  $n$  [12].

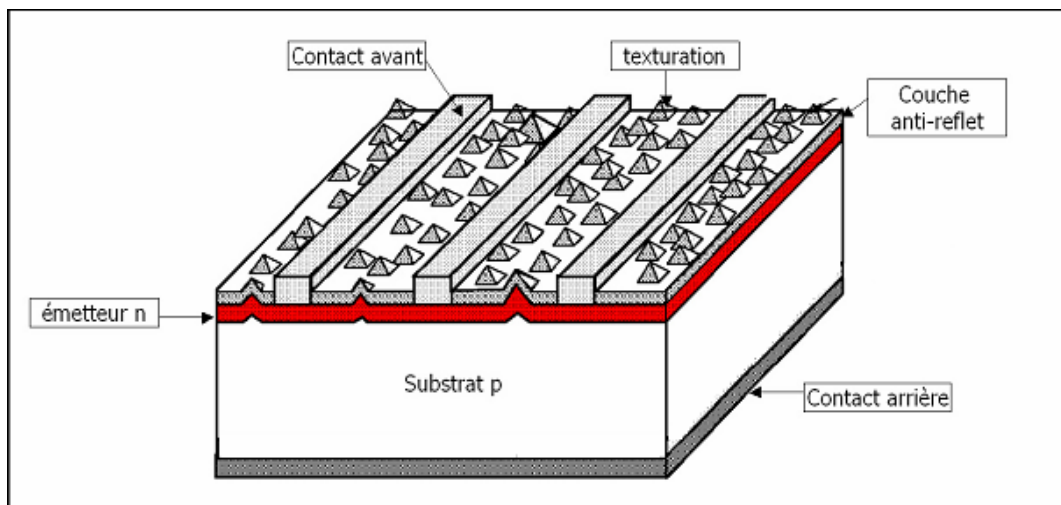


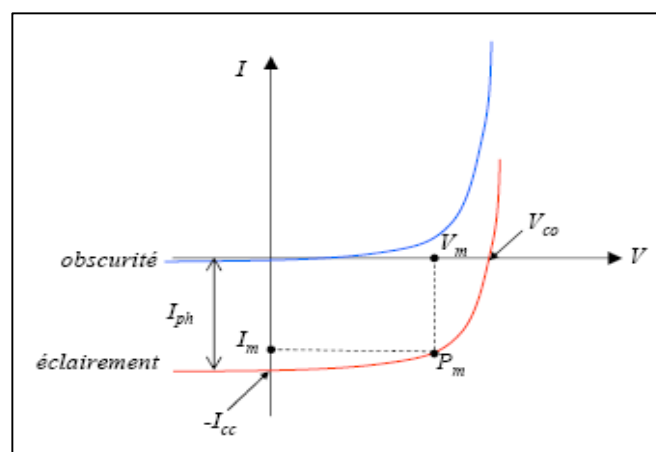
Figure I.5 : Schéma simplifié illustratif d'une cellule solaire [14].

La quantité de photons pénétrant la cellule photovoltaïque dépendant fortement de la réflectivité (elle est définie comme le rapport entre le flux réfléchi et le flux incident [1]) de sa surface. La réflectivité caractérise la quantité de photons réfléchi par la surface, soit une perte de rayonnement incident. Afin de minimiser la réflexion de la lumière en surface, cette dernière est traitée pour forcer le rayonnement à pénétrer dans le semi-conducteur; couramment par une couche anti-réfléchissante (CAR) obtenue par dépôt d'une couche d'oxyde sur le semi-conducteur. L'effet d'interférence obtenu au sein de couche d'oxyde permet de piéger le rayonnement incident [12].

Pour optimiser les pertes dues à la réflexion, il existe une autre préparation de la surface réceptrice du semi-conducteur : la texturation; opération consiste à créer des pyramides de quelques microns de hauteur modifiant la planéité de la surface en introduisant un relief. Ce dernier, tout en augmentant la surface, induit des réflexions multiples sur les facettes le constituant, piégeant ainsi un maximum du rayonnement incident et limiter la réflectivité de la surface [12]. La texturation de surface peut se faire par [15] voie chimique, par voie mécanique, par gravure plasma ou par utilisation de silicium poreux<sup>1</sup>.

### I.3.3. Caractéristique électrique

La variation du courant «  $A$  » (ou densité du courant «  $A/cm^2$  ») en fonction de la tension «  $V$  », à l'obscurité et en particulier sous éclaircissement, permet d'évaluer la performance de la cellule solaire; la figure (I.6) montre deux exemples de caractéristiques  $I - V$  de cellule solaire sans et avec éclaircissement.



**Figure I. 6 :** Caractéristique  $I-V$  d'une cellule solaire; à l'obscurité et sous éclaircissement [13].

<sup>1</sup> Lorsque le silicium monocristallin est soumis à une oxydation anodique en milieu acide fluorhydrique (HF), il conduit à un silicium appelé poreux, découvert dès 1956 [16].

### I.3.4. Circuit électrique équivalent

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

L'expérience montre qu'à l'obscurité; une cellule solaire suit le comportement d'une diode classique, elle commence à conduire lorsque la tension appliquée est supérieure à la tension de seuil  $V_s$ . Dans le cas d'une cellule idéale à l'obscurité, la caractéristique  $I-V$  peut être représenté par la relation suivante [1] :

$$I_{obs} = I_s \left( \exp\left(\frac{V}{nV_{th}}\right) - 1 \right) \quad (I.6)$$

Où

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

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

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

$$V_{th} = \frac{KT}{q} \quad (I.7)$$

Où

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

$T$  : la température absolue en Kelvin (K).

$q$  : la charge absolue d'un électron en coulomb ( $1.60281 \times 10^{-19}$  C).

Sous éclairement, un terme  $I_{ph}$ , tenant compte du photo-courant généré est rajouté, On obtient le circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale sous éclairement qui est représenté par l'équation suivante [1] :

$$I = I_{ph} - I_{obs} = I_{ph} - I_s \left( \exp\left(\frac{V}{nV_{th}}\right) - 1 \right) \quad (I.8)$$

Dans le cas d'une cellule photovoltaïque réelle, d'autres paramètres tenant compte des effets résistifs et des fuites vers les bords; qu'ils doivent être pris en considération et l'équation de la caractéristique  $I-V$  devient alors [1] :

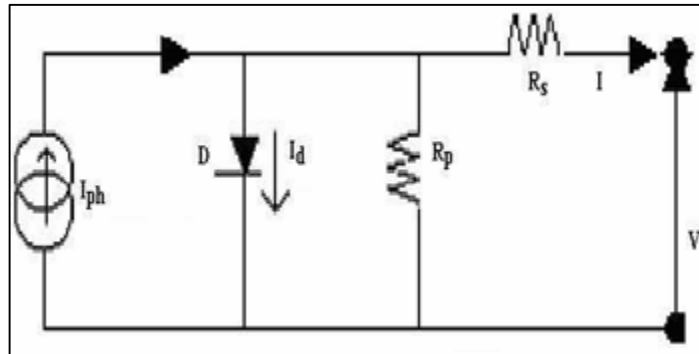
$$I = I_{ph} - I_s \left( \exp\left(\frac{V + IR_s}{nV_{th}}\right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (I.9)$$

Certains auteurs utilisent la conductance shunt ( $G_{sh} = \frac{1}{R_{sh}}$ ) pour écrire l'équation (I.9)

sous la forme :

$$I = I_{ph} - I_s \left( \exp\left(\frac{V + IR_s}{nV_{th}}\right) - 1 \right) - G_{sh}(V + IR_s) \quad (\text{I.10})$$

Et par conséquent le schéma équivalent d'une cellule solaire réelle est représenté sur la figure (I.7) par un générateur de courant ( $I_{ph}$ ), une diode et deux résistances parasites ( $R_s$ ) et ( $R_{sh}$ ).



**Figure I.7 :** Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire à jonction P-N [1].

- ❖ Le générateur du courant ( $I_{ph}$ ) : il délivre le courant  $I_{ph}$  correspondant au courant photogénéré.
- ❖ La diode ( $D$ ) : modélise la jonction P-N.
- ❖ La résistance série  $R_s$  : modélise [12] les pertes résistives au sein de la photopile (les métallisations). Elle est liée à l'impédance des électrodes et du matériau; il en résulte que la tension  $V$  aux bornes de la cellule est différente de la tension  $V_j$  aux bornes de la jonction p-n. Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule.
- ❖ La résistance parallèle  $R_p$  (résistance shunt  $R_{sh}$ ) : correspond [12] à une résistance de fuite entre les deux zones  $n$  et  $p$  de la jonction; il en résulte qu'une partie du courant  $I_{ph}$  sera dérivée par cette résistance et ne pourra être délivrée à la charge. Cette résistance devra être la plus élevée possible.

### I.3.5. Les grandeurs caractéristiques d'une cellule solaire

À partir de la caractéristique  $I$ - $V$  sous éclairage illustrée au dessus dans la figure (I.6), on constate que le comportement d'une cellule solaire peut être étudié à travers quatre principales grandeurs [17];  $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ ,  $I_m$  et  $V_m$  :

- ❖ Le courant de court circuit  $I_{cc}$  :

Le courant de court circuit  $I_{cc}$  est la valeur du courant lorsque la tension aux bornes de cellule est nulle ( $V=0$ ). D'où, en annulant la tension  $V$  dans l'équation (I.9), on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_s \left( \exp \left( \frac{I_{cc} R_s}{nV_{th}} \right) - 1 \right) - \frac{I_{cc} R_s}{R_{sh}} \quad (\text{I.11})$$

Pour la plus part des cellules solaires (dont la résistance série est très faible), on peut négliger le terme  $I_s \left( \exp \left( \frac{I_{cc} R_s}{nV_{th}} \right) - 1 \right)$  devant  $I_{ph}$ . L'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} \approx \frac{I_{ph}}{\left( 1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right)} \quad (\text{I.12})$$

Dans le cas idéal [3] ( $R_s \rightarrow 0$  et  $R_{sh} \rightarrow \infty$ ) ou dans le cas approximatif suivant :

$$R_{sh} = \frac{1}{G_{sh}} \gg R_s \Rightarrow \frac{R_s}{R_{sh}} \ll 1 \Rightarrow 1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \approx 1 \quad (\text{I.13})$$

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

$$I_{cc} \approx I_{ph} \quad (\text{I.14})$$

❖ La tension en circuit ouvert  $V_{co}$

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

$$V_{co} = nV_{th} \log \left( 1 + \frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (\text{I.15})$$

❖ Le point du fonctionnement  $P_m (V_m, I_m)$

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

$$P_m = I_m \times V_m \quad (\text{I.16})$$

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



- ❖ Le facteur de forme  $FF$

Le facteur de forme ( $FF$ ) « en anglais : *Fill Factor* » est défini [12] comme le rapport entre la puissance maximale et le produit ( $I_{cc} \times V_{co}$ ); d'où il est donné par la relation :

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} \times V_{co}} = \frac{I_m \times V_m}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (I.17)$$

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

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

On note que ces quatre grandeurs caractéristiques sont sommables dans un seul paramètre, s'appel le rendement  $\eta$  :

↳ Il est défini [12] comme le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule.

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

$$\eta = \frac{P_m}{S \times E} \quad (I.18)$$

Ou d'après (I.17) :  $P_m = FF \times I_{cc} \times V_{co}$

$$\eta = \frac{FF \times I_{cc} \times V_{co}}{S \times E} \quad (I.19)$$

### ***I.3.6. Le mécanisme de la conversion photovoltaïque***

Les différents processus qui entrent en jeu durant cette conversion sont résumés comme suit [18]:

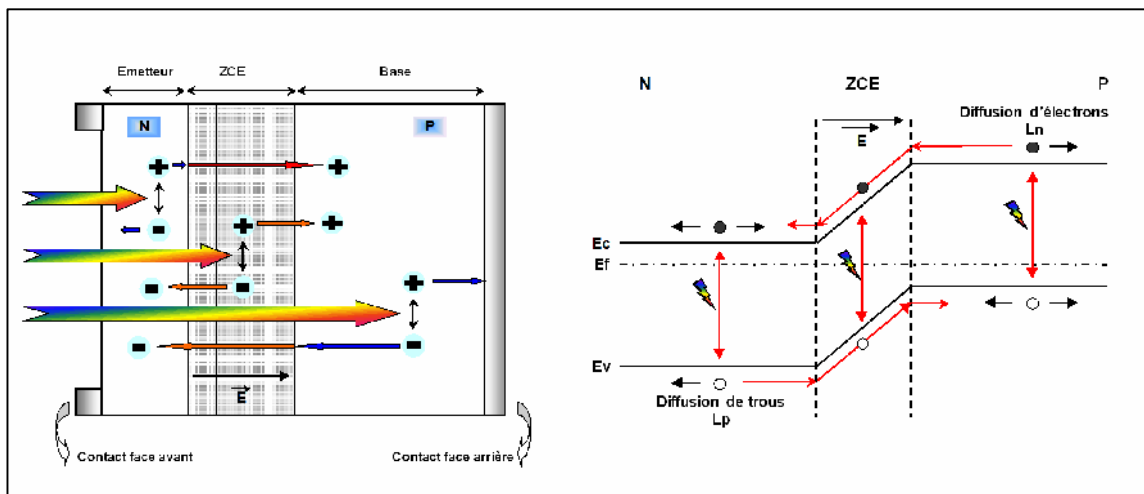
Comme on la définit (I.3.2) une cellule solaire est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- ❖ Absorption des photons incidents (dont l'énergie est supérieur 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 porteurs générés 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 créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction  $p-n$ . D'autres structures, comme les hétérojonctions peuvent également être utilisées.

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure (I.8). Sous éclairage les photons incidents créent des porteurs dans les zones  $N$ ,  $P$  et dans la zone de charge d'espace ( $ZCE$ ). Les paires électrons-trous photogénérés dans cette zone sont instantanément séparées par le champ électrique  $\vec{E}$  régnant (figure I. 8).



**Figure. I. 8:** Structure et diagramme de bande d'une cellule solaire sous éclairage [15].

Les trous, charges positives se voient accélérés vers la zone  $P$ , les électrons, charge négatives, vers la zone  $N$ . Trous et électrons deviennent alors majoritaires : C'est le photo courant de génération, parallèlement, les porteurs minoritaires, trous générés coté  $N$  et électrons générées coté  $P$ , 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 déplétive afin d'atteindre la région où ils deviennent majoritaires : c'est le photo courant de diffusion.

La présence de contacts ohmiques assure le bon cheminement des porteurs qui créent un courant photo-généré  $I_{ph}$ ; somme des deux contributions précédentes, et qui participe au courant total.

### I.3.7. Influence des différents paramètres sur la caractéristique $I(V)$

#### I.3.7.1. Influence de l'éclairement et de la température

L'éclairement et la température modifient la caractéristique  $I-V$  de la cellule solaire, pas dans sa forme générale mais pour les valeurs  $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ ,  $I_m$  et  $V_m$  :

##### a. Influence de l'éclairement

La figure (I.9) présente les caractéristiques courant-tension d'une cellule monocristalline typique de  $(10 \times 10)$  cm<sup>2</sup> pour plusieurs intensités du rayonnement solaire. On remarque que le courant du court circuit  $I_{cc}$  est directement proportionnel à l'intensité lumineuse incidente; la variation de  $I_{cc}$  avec l'éclairement est donnée sous la forme suivante [12] :

$$I_{cc} \approx I_{ph} = \alpha(T) \times E \times S \quad (\text{I.20})$$

Où

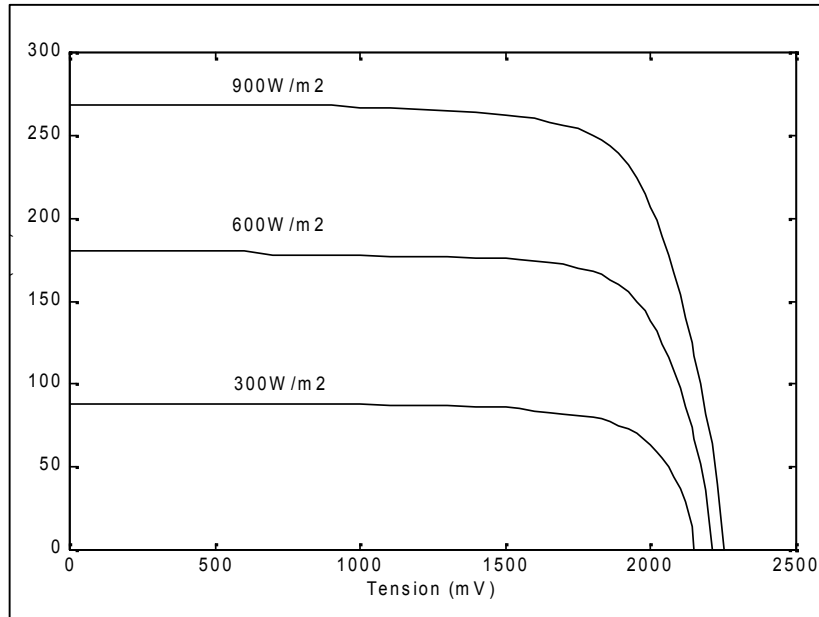
- ❖  $E$  : est l'éclairement en W/m<sup>2</sup>.
- ❖  $S$  : est la surface de la cellule en m<sup>2</sup>.
- ❖  $(T)$  : coefficient dépendant faiblement de la température, il est exprimé en A/W.

D'autre part, l'accroissement de l'éclairement provoque une légère augmentation de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ .

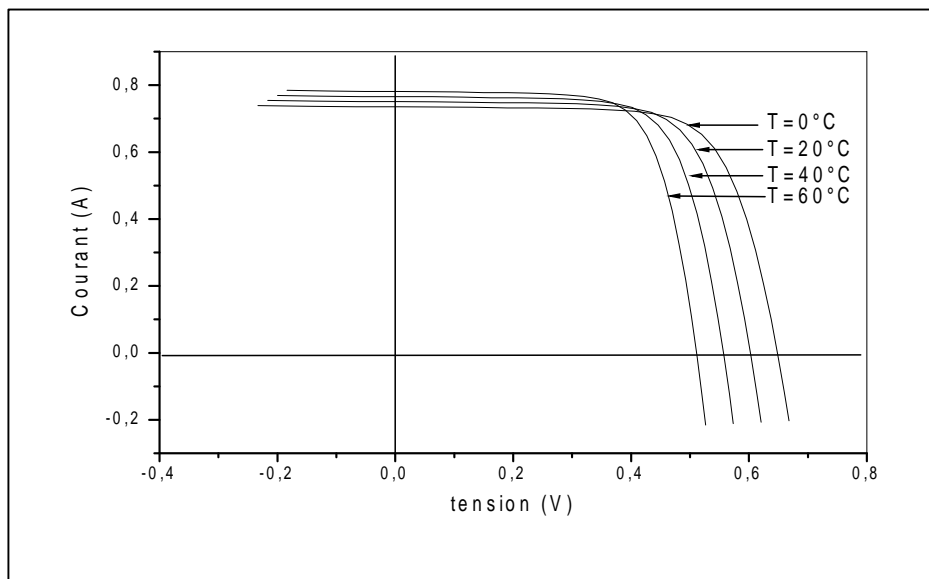
##### b. Influence de la température

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires puisqu'elles sont exposées au rayonnement solaire. La figure (I.10) montre l'influence de la température, sur la caractéristique  $I(V)$  de la cellule solaire lorsque la température varie.

On observe que l'augmentation de la température provoque une augmentation du courant du court circuit ( $I_{cc}$ ), en même temps on assiste à une diminution nette de la tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ). L'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension ( $V_m$ ) et un léger accroissement du courant ( $I_m$ ) et par la suite une baisse relative de la puissance maximale ( $P_m$ ).



**Figure I.9 :** Influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I-V$  d'une cellule solaire [1].



**Figure. I. 10 :** Influence de la température sur la caractéristique  $I-V$  d'une cellule solaire éclairée [12].

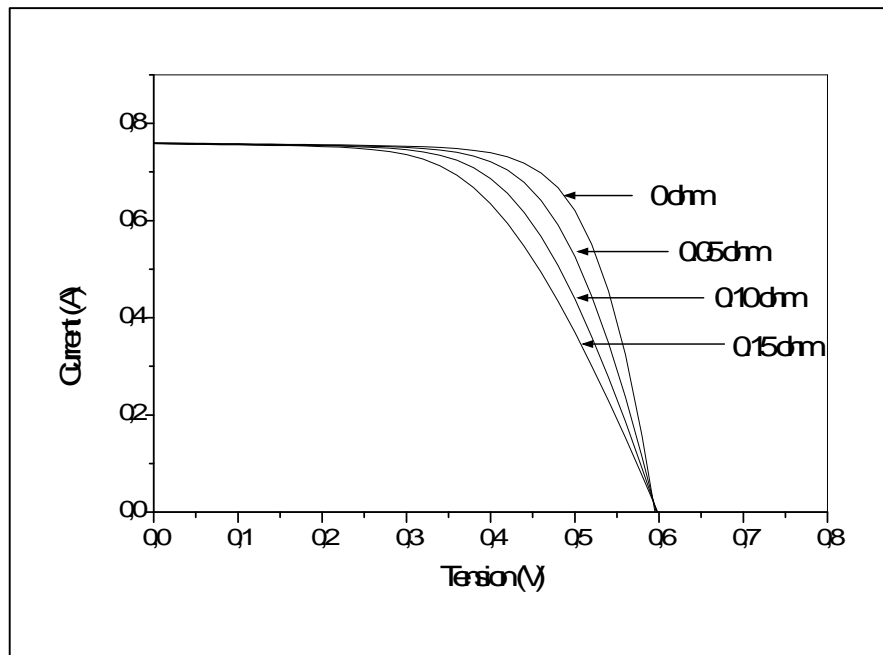
### 1.3.7.2. Influence de la résistance série et la conductance shunt

Les deux résistances parasites  $R_s$  et  $R_{sh}$  vont modifier la caractéristique  $I-V$  de la cellule solaire en particulier sous éclairement :

#### a. Influence de la résistance série

L'effet de la résistance série  $R_s$  sur la caractéristique  $I-V$  de la cellule solaire sous éclairement est illustré sur la figure (I.11) ci-dessous.

On remarque que la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) et le courant du court circuit ( $I_{cc}$ ) ne sont pas modifiés, mais la caractéristique se déforme très rapidement sous l'effet de  $R_s$ . Cette influence se traduit par une diminution de la pente de la caractéristique  $I-V$  dans la zone où la cellule fonctionne comme une source de tension<sup>1</sup> lorsque  $R_s$  augmente. L'augmentation de la résistance série a un effet réductif considérable sur le point de fonctionnement<sup>2</sup> et le facteur de forme ( $FF$ ) de la cellule.



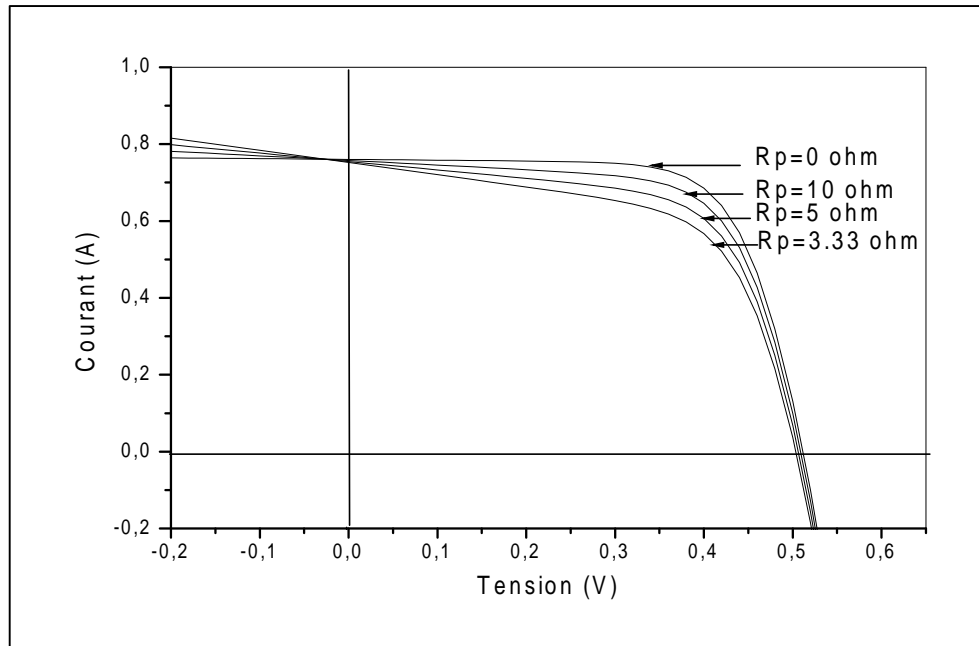
**Figure. I. 11:** influence de la résistance série sur la caractéristique  $I-V$  d'une cellule solaire éclairée [12].

*b. Influence de la conductance shunt (parallèle)*

La figure (I.12) ci-dessous illustre l'effet de la résistance parallèle  $R_p$  sur la caractéristique  $I-V$  de la cellule solaire sous éclairage. On remarque que la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) et le courant du court circuit ( $I_{cc}$ ) ne sont pas modifiés; mais la caractéristique se déforme très rapidement, cette influence se traduit par une augmentation de la pente de la caractéristique  $I-V$  de la cellule dans la zone correspondant à un fonctionnement comme une source de courant (basse tension).

<sup>1</sup> La zone des hautes tensions de la caractéristique  $I-V$ .

<sup>2</sup> Lorsque  $R_s$  est anormalement élevée; elle peut diminuer notablement la puissance extraite aux bornes de la cellule.



**Figure. I. 12:** influence de la résistance shunt sur la caractéristique  $I$ - $V$  d'une cellule solaire éclairée [12].

### 1.3.7.3. Influence du courant de saturation et du facteur d'idéalité

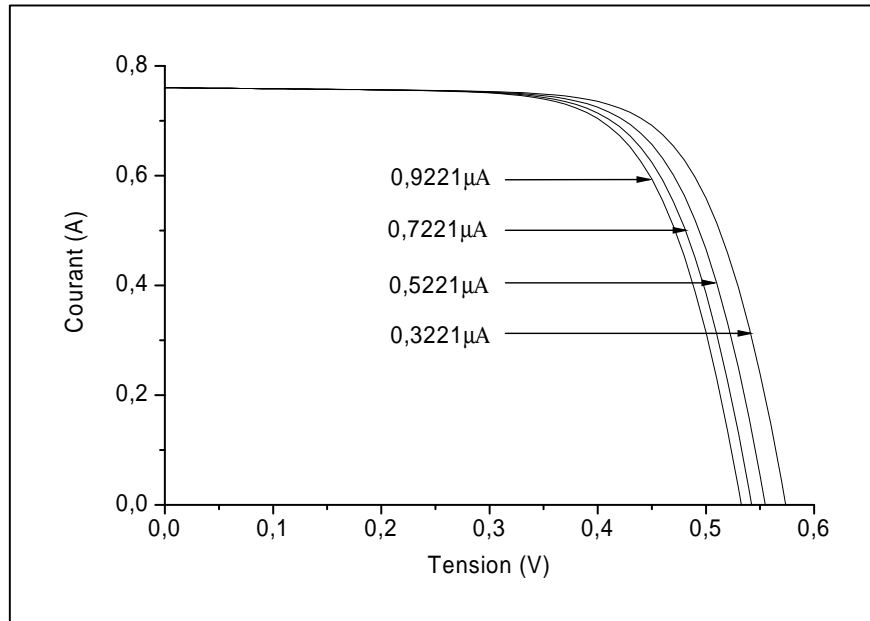
Nous avons porté les courbes de la caractéristique  $I$ - $V$  données par des différentes valeurs du courant de saturation et du facteur d'idéalité:

#### a. Influence du courant de saturation ( $I_s$ )

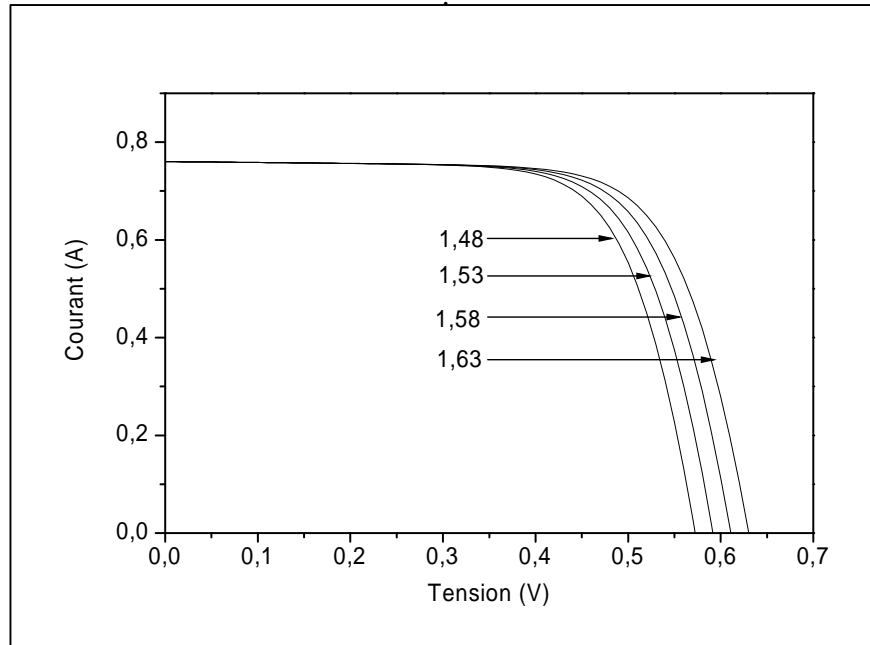
La figure (I.13) ci-dessous illustre l'effet du courant de saturation  $I_s$  sur la caractéristique  $I$ - $V$  de la cellule solaire sous éclairage; On constate que l'augmentation du courant de saturation ( $I_s$ ) de la diode provoque une réduction de la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) par contre le courant de court circuit ( $I_{cc}$ ) reste constant.

#### b. Influence du facteur d'idéalité ( $n$ )

La figure (I.14) ci-dessous illustre l'effet du facteur d'idéalité  $n$  sur la caractéristique  $I$ - $V$  de la cellule solaire sous éclairage; On constate que la diminution du facteur d'idéalité ( $n$ ) provoque une réduction de la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) par contre le courant de court circuit ( $I_{cc}$ ) reste constant.



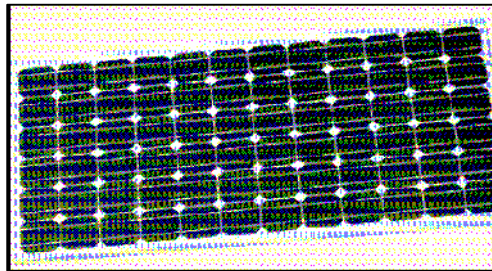
**Figure. I. 13:** influence du courant de saturation sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire éclairée. Caractéristiques constituées par simulation à l'aide des valeurs sélectives suivantes : ( $R_s=0.0364$  ,  $R_{sh}=53.7634$  ,  $I_s=0.3221 \times 10^{-6}:2.0 \times 10^{-7}:0.9221 \times 10^{-6}$  A,  $n=1.4837$ ,  $t=33^\circ\text{C}$ ,  $I_{ph}=0.7608$  A).



**Figure. I. 14:** influence du facteur d'idéalité sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire éclairée. Caractéristiques constituées par simulation à l'aide des valeurs sélectives suivantes : ( $R_s=0.0364$  ,  $R_{sh}=53.7634$  ,  $I_s=0.3223 \times 10^{-6}$ ,  $n=1.48:5.0 \times 10^{-2}:1.63$ ,  $t=33^\circ\text{C}$ ,  $I_{ph}=0.7608$  A).

#### I.4. Les modules photovoltaïques

Le module photovoltaïque [1] est par définition un ensemble de photopiles (cellules solaires) assemblées pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition au rayonnement utile (solaire ou autre). En effet, une photopile élémentaire ne produit qu'une très faible puissance électrique moins de 3 W avec une tension de l'ordre d'un volt (1 V) : entre 0,5 et 1,5 V selon les technologies. Afin de produire plus de puissance, les cellules sont assemblées en série et en parallèle pour former un module photovoltaïque (figure I.15).



**Figure. I.15:** *Module photovoltaïque* [9].

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 [11].

##### *1.4.1. Association en série*

La caractéristique courant-tension d'un groupement quelconque de cellules [10] sera homothétique de la courbe  $I(V)$  d'une cellule de base. Il sera de même pour tout le réseau de caractéristiques. En conséquence, tout ce qui a été dit pour une cellule individuelle restera valable – généralisable – pour un groupement de cellules.

Dans un groupement de  $N_s$  cellules ou de modules identiques en série (figure. I.16.a), [10] le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série. La figure (I.16.b) présente la courbe de puissance du groupement ainsi réalisé.

La caractéristique du groupement (G) [10] 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 (module) de base. Les résistances série s'ajoutent et les résistances parallèles s'ajoutent également aussi.



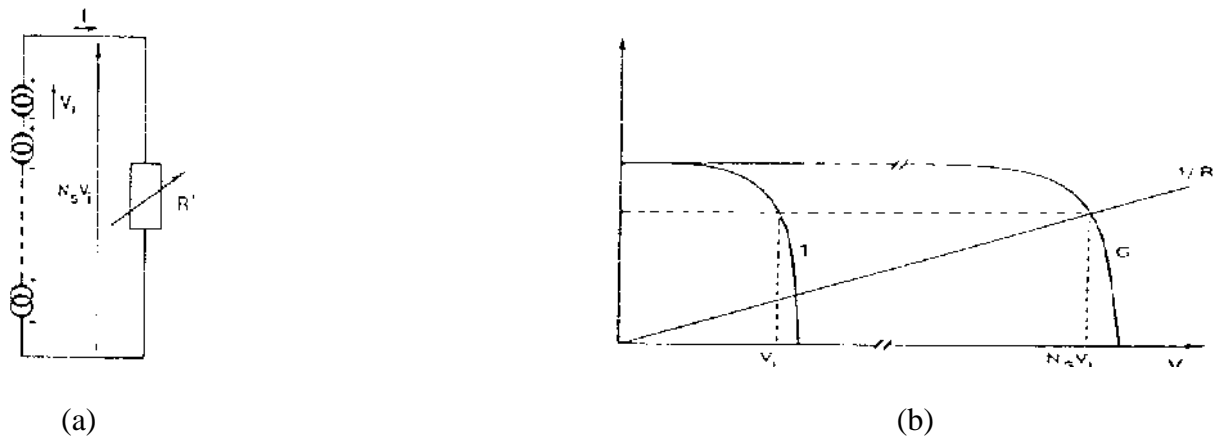


Figure. I.16: Groupement de cellules en série [10].

1.4.2. Association en parallèle

La figure (I.17) présente la courbe de puissance de  $N_p$  cellules (ou de modules) en parallèles. Cette fois-ci, [10] 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 [10] sera  $N_p$  fois plus faible que celle de l'élément de base. Ce sont les inverses des résistances série qui s'ajoutent, ainsi que les conductances shunts.

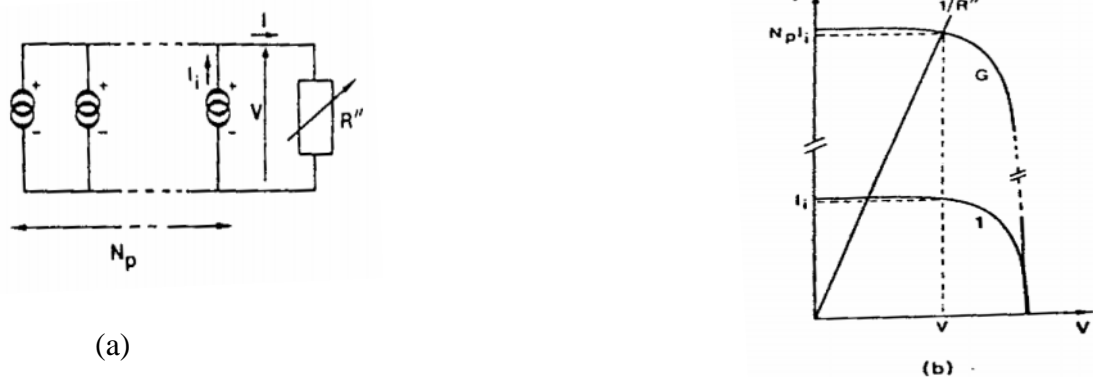


Figure. I.17: Groupement de cellules en parallèle [10].

1.4.3. Association en série parallèle – champ photovoltaïque

La connexion en série de plusieurs cellules forme une branche de cellules où on a une augmentation de tension pour même courant, un assemblage de plusieurs branches de cellules en parallèle forme un module où on a un accroissement du courant et une conservation de tension. Et une association de plusieurs modules dans un même plan s'appelle un panneau et

le montage de plusieurs panneaux en rangées de panneaux série et parallèle forme un champ photovoltaïque ou ce que l'on appelle parfois [10] une sous-station photovoltaïque.

D'où, le champ photovoltaïque est l'ensemble des panneaux photovoltaïques montés en série et en parallèle pour atteindre une tension et un courant plus grands. Une association série-parallèle de panneaux photovoltaïques [10] aura une caractéristique  $I(V)$  théorique en tout point homothétique à celle des modules de base et obtenue en modifiant les échelles sur les deux axes.

La figure (I.18) présente un tel groupement de  $N_{ms}$  module en série dans une branche et  $N_{bp}$  branches en parallèle. Si  $P_m$ ,  $V_m$ ,  $I_m$  et  $R_m$  sont les caractéristiques du module de base; la puissance crête, la tension du fonctionnement – tension maximale -, courant du fonctionnement – courant maximal - et la résistance de charge optimale respectivement, les caractéristiques correspondantes de la sous-station seront [10]:

- ❖ Puissance crête disponible aux bornes de cette sous-station photovoltaïque  $P_{mssp}$

$$P_{mssp} = N_{ms} \times N_{bp} \times P_m \quad (\text{I.21})$$

- ❖ La tension maximale  $V_{mssp}$

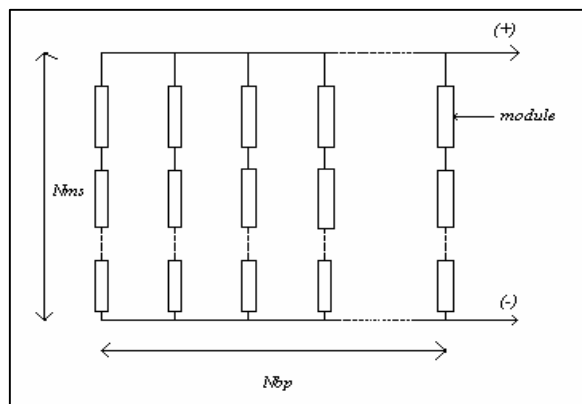
$$V_{mssp} = N_{ms} \times V_m \quad (\text{I.22})$$

- ❖ Le courant maximal  $I_{mssp}$

$$I_{mssp} = N_{bp} \times I_m \quad (\text{I.23})$$

- ❖ La résistance de charge optimale  $R_{mssp}$

$$R_{mssp} = \left( \frac{N_{ms}}{N_{bp}} \right) \times R_m \quad (\text{I.24})$$



**Figure. I.18:** Sous-station photovoltaïque formée d'un groupement de  $N_{ms}$  modules série et de  $N_{bp}$  branches parallèles [10].

## I.5. Déséquilibres dans les groupements de modules

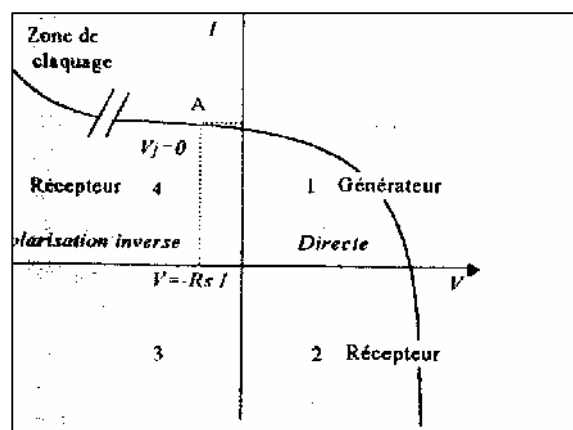
Dans les paragraphes précédents traitant les groupements de cellules, il a été supposé que les caractéristiques  $I$ - $V$  des cellules du module sont parfaitement identiques. Dans la réalité, ces conditions idéales ne sont jamais atteintes malgré un tri soigneux des cellules et des modules, il arrive, d'une part que l'on trouve quelques disparités intrinsèques dans les caractéristiques électriques des modules, d'autre part que les conditions de fonctionnement induisent ces disparités.

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

### 1.5.1. La cellule solaire fonctionnant en récepteur

La figure (I.19) montre la caractéristique électrique d'une cellule solaire sous illumination pour différents domaines de tension.

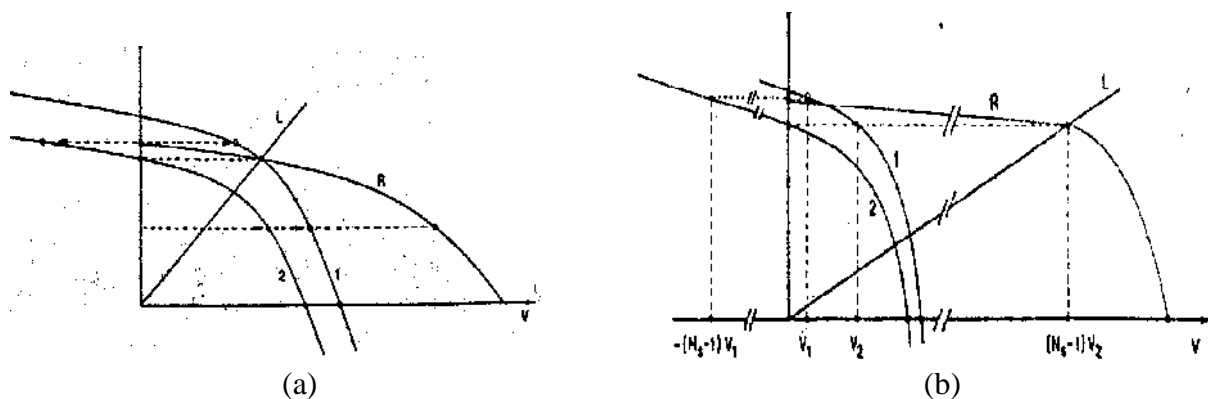
Le quadrant 1 correspond au fonctionnement en générateur avec  $I > 0$  et  $V > 0$ . Si la tension aux bornes de la cellule est en raison du circuit extérieur, amenée à dépasser  $V_{co}$ , la cellule travaille alors en récepteur. Si c'est le courant traversant la cellule qui, en raison du circuit extérieur, est amené à dépasser la valeur du courant de court circuit, la cellule travaille à nouveau en récepteur.



**Figure I.19 :** Caractéristique d'une cellule solaire éclairée et polarisée à l'aide d'un générateur de tension extérieur [10].

### 1.5.2. Déséquilibre dans un groupement série

Considérons le cas de deux cellules en série dont l'une (cellule 2) est moins performante. Pour une charge dont l'impédance correspond à la droite L, la cellule 2 voit sa tension s'annuler : elle ne fonctionne alors ni en générateur ni en récepteur. Pour une charge dont l'impédance est plus faible, la cellule 2 devient réceptrice polarisée en inverse, et pour une charge nulle (court circuit), les tensions aux borne des cellules sont identiques mais de polarités opposées. La cellule 1 fournit alors la puissance à la cellule 2.

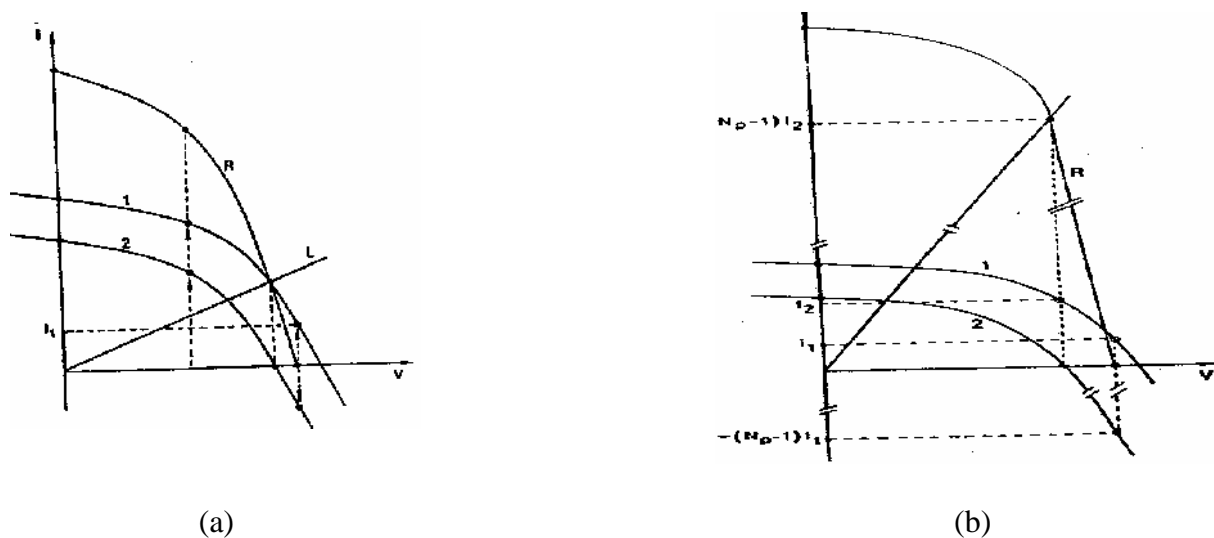


**Figure I.20 :** Groupement en série de cellules non identiques ((a) cas de deux cellules, (b) cas de  $N_s$  Cellules) [10].

Il est facile d'extrapoler ce qui vient d'être dit à un nombre  $N_s$  de cellules. Pour une charge nulle (court circuit), la cellule partiellement occultée supportera une tension en polarisation inverse égale à  $(N_s-1) V$  où  $V$  est la polarisation directe des cellules non occultées. Dans ces conditions on notera que le courant de court circuit de l'ensemble est inférieur au courant de court circuit des cellules non occultées. En conclusion, dans un groupement série les déséquilibres sont d'autant plus critiques que la charge prend des valeurs faibles, le cas le plus critique correspond aux conditions de court circuit.

### 1.5.3. Déséquilibre dans un groupement parallèle

La figure (I.21.a) montre la caractéristique résultante de deux photopiles montées en parallèle. La tension est commune au deux cellules et il faut additionner les courants. Pour une charge correspondant à la droite L, la cellule 2 ne produit aucun courant. Pour une charge d'impédance plus élevée, la cellule 2 passe dans le cadran 2, fonctionnant en récepteur en polarisation direct.



**Figure I.21:** Groupement en parallèle de cellules non identiques ((a) cas de deux cellules, (b) cas de  $N_p$  Cellules) [10].

Il est facile d'extrapoler cette situation au cas de  $N_p$  cellules en parallèle. Au delà d'une certaine valeur de l'impédance de charge, la cellule occultée passe en récepteur. En conditions de circuit ouvert, la cellule occultée doit pouvoir débiter un courant  $(N_p-1)I$  à la tension  $V_{co}$ . Il est à noter que la tension de circuit ouvert de l'ensemble est inférieure à la tension de circuit ouvert des cellules non occultées.

## I.6. Les différents types de cellules solaires

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

### 1.6.1. Les cellules solaires au silicium

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

#### ➤ Les cellules monocristallines

Elles sont considérées comme la première génération de photopile, elles ont un taux de rendement excellent [1] (12 – 16% et jusqu'à 24 % en laboratoire) mais leur méthode de production est laborieuse et délicate, et donc, très chère; il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur.

#### ➤ Les cellules poly-cristallines

Elles ont un coût de production moins élevé et un rendement qui varie entre 11 – 13 % (autour de 18 % en laboratoire) [1].

➤ *Les cellules amorphes*

Leur coût de production bien plus bas, mais malheureusement aussi, ont un rendement plus bas qui varie [1] entre 8 –10 % (autour de 13 % en laboratoire pour une cellule non dégradée).

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

Les panneaux amorphes ont besoin d'environ deux fois plus de surface (comparé aux panneaux cristallin) pour produire la même quantité d'électricité, et semblent se dégrader plus rapidement, mais ils ont l'avantage de mieux réagir à la lumière diffuse et à la lumière fluorescente et d'être plus performants à des températures élevées [1].

### 1.6.2. Les cellules solaires à couche mince

On distingue plusieurs technologies parmi lesquelles :

➤ *Cuivre-indium-diséléniure (CIS) ou cuivre-indium-gallium-séléniure (CIGS)* : leur rendement est égal à 11 % (17.1 % au laboratoire). 99 % d'absorption, dégradation minime, mais fabrication très délicate [1].

➤ *Cadmium-tellure (CdTe)* : rendement 10.5 % (15.8 % en laboratoire). Haute absorption, mais n'oublions pas que le cadmium est très toxique [1].

➤ *Gallium Arsenic (GaAs)*: leur rendement dépasse les 25 % en laboratoire [19]. Ces cellules, dont le prix est très élevé, sont très appréciées dans l'aérospatiale. Leurs principaux avantages sont :

- ✓ une absorption très élevée. Ces cellules ne pas épaisses, ce qui traduit un gain en volume et en masse pour les sondes sur lesquelles le moindre gramme superflu est traqué.
- ✓ leur puissance est, par rapport aux cellules simples au silicium, peu affectée par les augmentations de température que les sondes peuvent rencontrer.

### 1.6.3. Les cellules solaires organiques

Le solaire organique est considéré comme une nouvelle technologie basée sur les colorants et leurs propriétés physiques et en particulier optiques [10].

## I.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions sur le soleil, son pouvoir énergétique et les propriétés de son rayonnement. Nous avons ensuite décrit les convertisseurs photovoltaïques, leur caractéristique  $I-V$ , leur circuit électrique équivalent et leurs principaux grandeurs caractéristiques, le mécanisme de la conversion photovoltaïque ainsi que l'étude de l'influence des divers paramètres (l'éclairement, la température, les résistances parasites série et parallèle, le courant de saturation et le facteur d'idéalité) sur leur caractéristique puis nous avons abordé l'association des cellules en série, en parallèle et en série-parallèle, et les déséquilibres dans les groupements de modules puis nous avons cité les différents types de cellules solaires.

## *Chapitre II*

### *Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires*



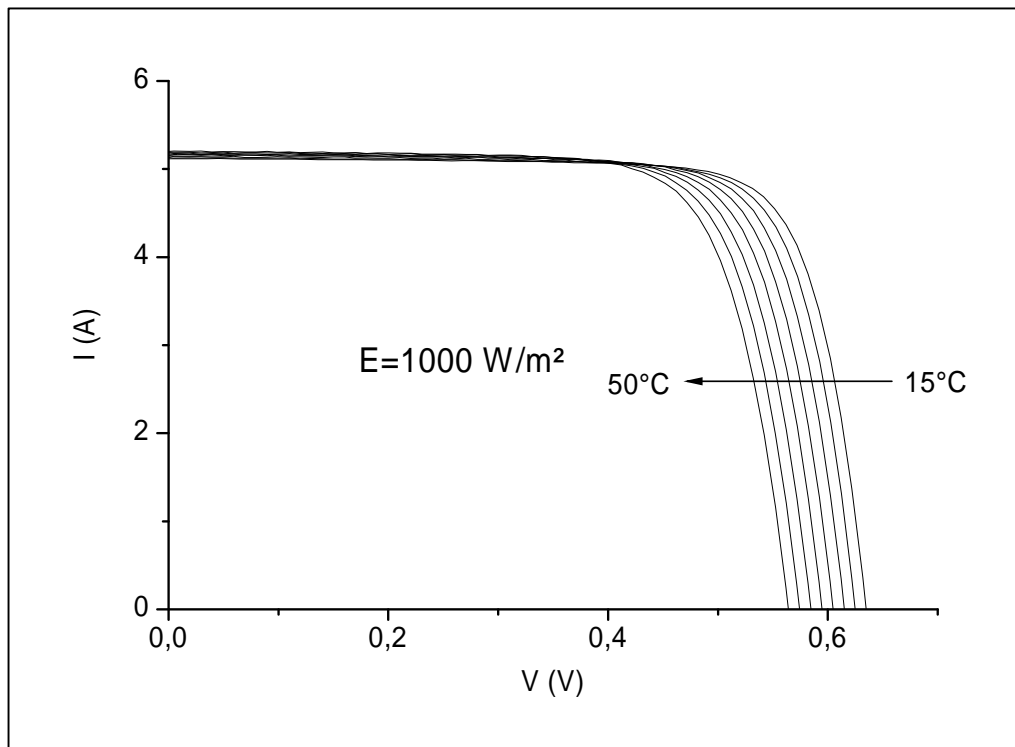
## II.1. Introduction

La conversion photovoltaïque est une application énergétique fortement dépendante de la température. Dans les applications terrestres, les cellules solaires sont généralement exposées aux températures du fonctionnement variant de 10 à 50 °C.

Les paramètres caractéristiques des cellules solaires, à savoir le courant de court circuit ( $I_{cc}$ ), la tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ), le facteur de forme ( $FF$ ) et le rendement de conversion PV ( ) sont influencés par la température. La dépendance de ces paramètres avec la température est étudiée pour une cellule solaire au silicium polycristallin dans la gamme (15-50°C) sous un éclairement constant (1000 W/m<sup>2</sup>).

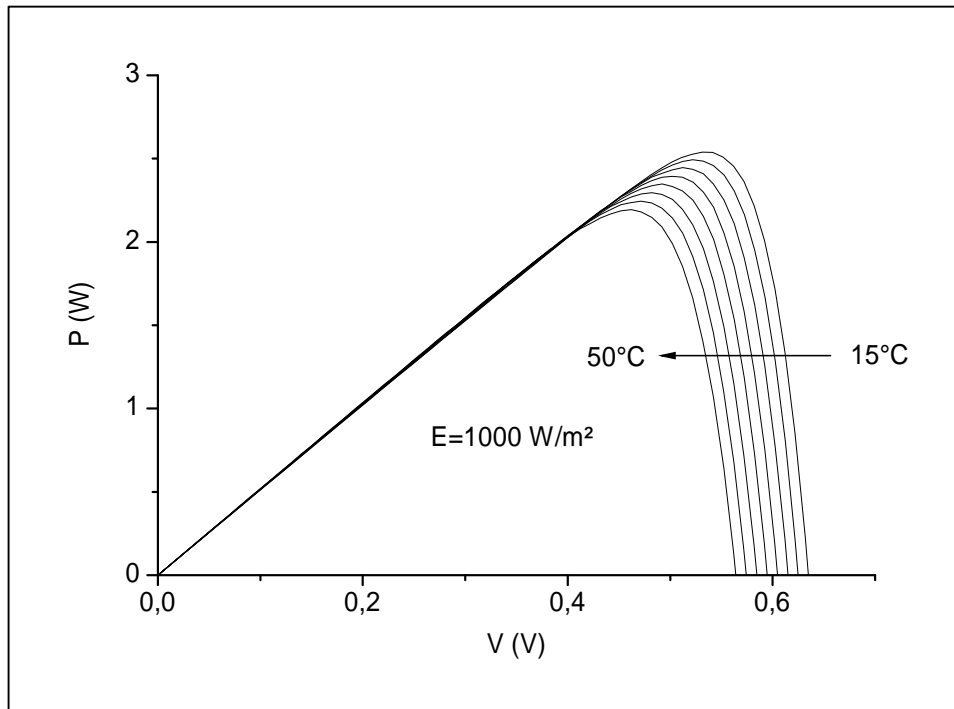
## II.2. Effet de la température sur la caractéristique $I(V)$ d'une cellule solaire éclairée

La figure (II.1) montre des caractéristiques ( $I-V$ ) mesurées à différentes températures sous un éclairement constant (1000 W/m<sup>2</sup>) pour une cellule solaire au silicium poly-cristallin de (12,5×12,5) cm<sup>2</sup> de surface; faites au département de physique «université de Constance» en Allemagne.



**Figure II.1:** Influence de la température sur la caractéristique ( $I-V$ ) d'une cellule solaire au silicium poly-cristallin sous un éclairement de 1000 W/m<sup>2</sup>.

La figure (II.2) montre des courbes ( $P$ - $V$ ) du même dispositif, sous les mêmes conditions.



**Figure II.2:** Influence de la température sur la puissance de sortie pour une cellule solaire au silicium poly cristallin sous un éclairage de  $1000 \text{ W/m}^2$ .

Le tableau (II. 1) montre l'évolution avec la température de la tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ), le courant de court circuit ( $I_{cc}$ ), la puissance maximale extraite de la cellule ( $P_m$ ), le facteur de forme ( $FF$ ) et le rendement de la conversion photovoltaïque ( $\eta$ ).

$T$ (°C)	15	20	25	30	35	40	45	50
$V_{co}$ (V)	0.6380	0.6277	0.6172	0.6065	0.5964	0.5857	0.5751	0.5645
$I_{cc}$ (A)	5.1261	5.1367	5.1470	5.1582	5.1685	5.1791	5.1899	5.1997
$P_m$ (W)	2.5396	2.4929	2.4454	2.3933	2.3483	2.2953	2.2445	2.1942
$FF$	0.778	0.775	0.771	0.765	0.762	0.757	0.752	0.747
(%)	16.25	15.95	15.65	15.32	15.03	14.69	14.36	14.04

**Tableau II. 1:** Evolution avec la température de ( $V_{co}$ ), ( $I_{cc}$ ), ( $P_m$ ), ( $FF$ ) et ( $\eta$ ).

On remarque une diminution de la puissance maximale avec l'augmentation de la température avec une variation relative de  $(-0.39 \% / K)$ .

### II.3. Méthode d'extraction des paramètres

#### II.3.1. Description de la méthode

Il existe plusieurs méthodes d'extraction des paramètres caractéristiques des cellules solaires; sous éclaircissement et à l'obscurité. En se basant sur la caractéristique  $I(V)$  mesurée, différentes méthodes ont été proposées par plusieurs auteurs [20 - 44] pour déterminer les paramètres qui décrivent le modèle électrique non linéaire des cellules solaires. Ces paramètres sont en générale la résistance shunt ou parallèle, la résistance série, le photocourant, le courant de saturation et le facteur d'idéalité.

Certaines de ces méthodes utilisent la caractéristique  $I(V)$  mesurée sous éclaircissement et à l'obscurité [20 – 21], certains utilisent des mesures dynamiques [22 – 23] ou des procédures d'intégrations [24] basées sur le calcul de l'aire limitée par la courbe  $I(V)$ .

Dans ce travail nous avons appliqué la méthode extractive « Bouzidi et al » [45] pour évaluer les paramètres caractéristiques du dispositif photovoltaïque pour différentes températures. On donne ci-dessous une description fonctionnelle de cette méthode extractive.

C'est une méthode basée [11] sur la caractéristique courant-tension sous éclaircissement d'une cellule solaire pour l'évaluation des paramètres caractéristiques en considérant le modèle électrique avec une seule diode.

Cette méthode inclut la présentation  $I=f(V)$  de la fonction standard (I.10) sous forme  $V=f(I)$  et la détermination des facteurs  $C_0$ ,  $C_1$  et  $C_2$  de cette fonction à partir desquels les paramètres de la cellule solaire éclairée sont évalués.

Partant de l'équation (I.10) que l'on peut écrire sous la forme :

$$I = \frac{I_{ph} - I_s \left( \exp \left( \frac{V + IR_s}{nV_{th}} \right) - 1 \right) - G_{sh}V}{1 + G_{sh}R_s} \quad (\text{II.1})$$

L'équation précédente peut être écrite aussi :

$$I = I_{pA} - I_0 \left( \exp \left( \frac{V + IR_s}{nV_{th}} \right) - 1 \right) - G_A V \quad (\text{II.2})$$

Avec :

$$\begin{cases} I_{pA} = \frac{I_{ph}}{1 + G_{sh} R_s} \\ I_0 = \frac{I_s}{1 + G_{sh} R_s} \\ G_A = \frac{G_{sh}}{1 + G_{sh} R_s} \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

❖ Pour les tensions de polarisation basses et négatives où le comportement de la courbe  $I=f(V)$  est linéaire, la partie exponentielle est négligeable et l'équation (II.2) peut être écrite sous la forme :

$$I = I_{pA} - G_A V \quad (\text{II.4})$$

$G_A$  et  $I_{pA}$  sont évalués donc à partir de (II.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 le cellule solaire qui est donné par :

$$I_c = I + G_A V \quad (\text{II.5})$$

❖ Pour des tensions directes assez grandes, où le comportement de la courbe  $I=f(V)$  est exponentiel, le courant à travers la cellule est donné par :

$$I_c = I_{pA} - I_0 \left( \exp \left( \frac{V + IR_s}{nV_{th}} \right) \right) \quad (\text{II.6})$$

Pour évaluer la résistance série  $R_s$ , le facteur d'idéalité  $n$  et le courant de saturation  $I_s$ , on utilise  $I$  au lieu de  $V$  comme une variable indépendante dans l'équation (II.6), et nous obtenons :

$$V = nV_{th} \ln \left( \frac{I_{pA}}{I_0} \right) - IR_s + nV_{th} \ln \left( 1 - \frac{I_c}{I_{pA}} \right) \quad (\text{II.7})$$

↳ L'expression (II.7) peut être présentée sous la forme :

$$F(I) = C_0 + C_1 I + C_2 \ln \left( 1 - \frac{I_c}{I_{pA}} \right) \quad (\text{II.8})$$

Où

$$\begin{cases} C_0 = nV_{th} \ln\left(\frac{I_{pA}}{I_0}\right) \\ C_1 = -R_s \\ C_2 = nV_{th} \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

Les valeurs des facteurs  $C_0$ ,  $C_1$  et  $C_2$  peuvent être obtenues à partir de la caractéristique expérimentale  $I$ - $V$  de la cellule en utilisant la méthode des moindres carrés. Il en résulte un système d'équations suivant :

$$\begin{cases} C_1 \sum_{i=1}^N I_i^2 + C_2 \sum_{i=1}^N I_i \ln\left(1 - \frac{I_{ci}}{I_{pA}}\right) + C_0 \sum_{i=1}^N I_i = \sum_{i=1}^N I_i V_i \\ C_1 \sum_{i=1}^N I_i + C_2 \sum_{i=1}^N \ln\left(1 - \frac{I_{ci}}{I_{pA}}\right) + C_0 N = \sum_{i=1}^N V_i \\ C_1 \sum_{i=1}^N I_i \ln\left(1 - \frac{I_{ci}}{I_{pA}}\right) + C_2 \sum_{i=1}^N \left(\ln\left(1 - \frac{I_{ci}}{I_{pA}}\right)\right)^2 + C_0 \sum_{i=1}^N \ln\left(1 - \frac{I_{ci}}{I_{pA}}\right) = \sum_{i=1}^N V_i \ln\left(1 - \frac{I_{ci}}{I_{pA}}\right) \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

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 ( $i=1, \dots, N$ ) et  $I_{ci}$  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 :

$$\begin{cases} R_s = -C_1 \\ n = \frac{C_2}{V_{th}} \\ I_0 = I_{pA} \exp\left(-\frac{C_0}{C_2}\right) \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

Substituant les valeurs obtenues de  $R_s$  et de  $I_0$  dans (II.3), les valeurs  $G_{sh}$ ,  $I_{ph}$  et  $I_s$  sont extraites à partir de :

$$\begin{cases} G_{sh} = \frac{G_A}{1 - G_A R_s} \\ I_{ph} = \frac{I_{pA}}{1 - G_A R_s} \\ I_s = \frac{I_0}{1 - G_A R_s} \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

Les valeurs des paramètres extraits ( $R_s$ ,  $n$ ,  $G_{sh}$ ,  $I_{ph}$  et  $I_s$ ) par cette méthode permettent de générer des caractéristiques  $I$ - $V$  calculées en très bon accord avec les caractéristiques  $I$ - $V$  mesurées.

### II.3.2. Application de la méthode

L'application de la méthode sur les caractéristiques expérimentales à différentes températures nous donne les résultats suivants :

$T$ (°C)	15	20	25	30	35	40	45	50
$R_{sh}$ ( )	15.8228	15.0602	14.4928	13.8889	13.0890	12.7226	12.1655	11.7096
$R_s$ ( )	0.00117	0.00124	0.00138	0.00148	0.0016	0.00182	0.00196	0.00214
$n$	1.526	1.516	1.505	1.503	1.478	1.453	1.450	1.445
$I_s$ (μA)	0.345	0.377	0.573	0.946	1.233	1.585	2.103	2.597

**Tableau II.2:** Paramètres extraits par la méthode [45] pour différentes températures.

## II.4. Description de l'évolution des paramètres caractéristiques en fonction de la température:

L'effet principale de la température sur les cellules solaires résulte de la variation de trois principaux paramètres, qui sont habituellement employés pour caractériser les performances de la cellule solaire [46], ceux-ci sont : le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ), la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) qu'est en principe caractérisée par le courant de saturation ( $I_s$ ) et le facteur d'idéalité ( $n$ ) de la diode, et le facteur de forme ( $FF$ ); qui est une fonction de ( $V_{co}$ ).

### II.4.1. Le courant de court circuit ( $I_{cc}$ )

D'après l'équation (I.10) on trouve  $I_{cc}$ ; en prenant ( $V=0$ )

$$I_{cc} = \frac{I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{qR_s I_{cc}}{nKT}\right) - 1 \right]}{1 + G_{sh} R_s} \quad (\text{II.15})$$

La résolution de cette équation n'est pas possible analytiquement, néanmoins du point de vue pratique on accepte une dépendance linéaire du courant de court circuit ( $I_{cc}$ ) en fonction de la température [46].

Pour la majorité des cellules solaires l'approximation suivante est acceptable [47]:

$R_{sh} = \frac{1}{G_{sh}} \gg R_s \Rightarrow \frac{R_s}{R_{sh}} \ll 1 \Rightarrow 1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \approx 1$ . En conséquence, le courant de court-circuit de la cellule devient

$$I_{cc} = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{qR_s I_{cc}}{nKT}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.16})$$

Dans la plupart des cas, il est possible d'appliquer la célèbre approximation suivante [47]

$$I_{ph} \gg I_s \Leftrightarrow I_{cc} \approx I_{ph} \quad (\text{II.17})$$

Selon [48]  $I_{ph}$  dépend de l'irradiance solaire disponible ( $G$ ), la température de la cellule ( $T$ ) et le coefficient de température du courant de court-circuit ( $\mu_{I_{cc}}$ ). Le photo courant  $I_{ph}$  pour toutes les conditions de fonctionnement est lié au photo courant aux conditions de référence par :

$$I_{ph}(T) = \frac{G}{G_{ref}} \left[ I_{ph,ref} + \mu_{I_{cc}} (T - T_{ref}) \right] \quad (\text{II.18})$$

Avec

$\mu_{I_{cc}}$  : est le coefficient de température du courant de court-circuit [A/K].

$G$  et  $T$  : sont les conditions de fonctionnement (irradiance et température respectivement).

$G_{ref}$  et  $T_{ref}$  : sont les conditions de référence (irradiance et température respectivement); elles sont données numériquement [49]:  $G_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$  et  $T_{ref} = 25^\circ \text{C} = 298.15 \text{ K}$ .

Pour notre cas particulière,  $G = G_{ref}$

$$I_{ph}(T) = I_{ph,ref} + \mu_{I_{cc}} (T - T_{ref}) \Leftrightarrow I_{cc}(T) \approx I_{ph}(T) = I_{ph,ref} + \mu_{I_{cc}} (T - T_{ref}) \quad (\text{II.19})$$

**II.4.2. La tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ )**

Elle est obtenue d'après l'équation (I.10) on prend ( $I=0$ ) d'où

$$V_{co} = \frac{nkT}{q} \log \left( 1 + \frac{I_{ph}}{I_s} - \frac{G_{sh} V_{co}}{I_s} \right) \quad (\text{II.20})$$

Si ( $I_{ph} \gg G_{sh} V_{co}$ ) et ( $I_{ph} \gg I_s$ ) [46] la tension  $V_{co}$  devient

$$V_{co} = \frac{nkT}{q} \log \left( \frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (\text{II.21})$$

$I_s$  est fonction des propriétés du matériau et il est également sensible à la température.

En général [50]

$$I_s(T) = I_{s0} \exp \left( -\frac{E_A}{nkT} \right) \quad (\text{II.22})$$

Où  $I_{s0}$  est une constante,  $E_A$  est l'énergie d'activation pour le courant de saturation (le courant de saturation dû aux porteurs minoritaires est activé thermiquement, où  $E_A$  est l'énergie d'activation de ces porteurs minoritaires [51, 52]),  $n$  est le facteur d'idéalité et  $kT$  est l'énergie thermique. En remplaçant  $I_s$  par son expression (II.22) dans l'expression de  $V_{co}$ , on obtient la dépendance de  $V_{co}$  en fonction de la température :

$$V_{co}(T) = \frac{E_A}{q} - \frac{nkT}{q} \ln \left( \frac{I_{s0}}{I_{ph}} \right) \quad (\text{II.23})$$

**II.4.3. Le facteur de forme ( $FF$ )**

Le facteur de forme  $FF$  dépend d'un ensemble de paramètres de la cellule, y compris le courant et la tension au point de fonctionnement maximum, le facteur d'idéalité et les résistances parasites séries et shunt. D'où, il est difficile de trouver une formule pour décrire la sensibilité de ce paramètre avec la température. Le  $FF$  montre habituellement une dépendance inverse avec la température [46].

Nous avons vu que  $I_{cc}$  et  $V_{co}$  montrent habituellement le comportement presque linéaire en fonction de la température. Pour  $R_s$  et  $R_{sh}$  nous discuterons ci-dessous leur comportement en fonction de la température :

Il y a seulement trois types de dépendance thermique des résistances électriques [53] : type conducteur, type à coefficient de température négatif et le type à coefficient de



température positif. Nous discuterons ci-dessous les trois types de sensibilités thermiques pour les résistances électriques :

*a. Type conducteur*

$$R(T) = R_0(1 + \alpha T) \quad (\text{II.24})$$

Où  $\alpha$  est le coefficient de température du conducteur ( $\alpha > 0$ ) et  $R_0$  est la résistance de référence. Nous obtenons

$$\frac{dR}{dT} = \alpha R_0 > 0 \quad (\text{II.25})$$

*b. Type à coefficient de température négatif*

$$R(T) = R_0 \exp\left(-\frac{B}{T}\right) \quad (\text{II.26})$$

Où  $B$  est un coefficient spécifique au matériau du semi-conducteur ( $B > 0$ ) et  $R_0$  est une résistance référentielle. Nous obtenons

$$\frac{dR}{dT} = -\frac{BR}{T^2} < 0 \quad (\text{II.27})$$

*c. Type à coefficient de température positif*

$$R(T) = R_0 \exp(BT) \quad (\text{II.28})$$

Où  $B$  est un coefficient spécifique au matériau du semi-conducteur ( $B > 0$ ) et  $R_0$  est une résistance référentielle. Nous obtenons

$$\frac{dR}{dT} = BR > 0 \quad (\text{II.29})$$

## II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'effet de la température sur la caractéristique  $I$  ( $V$ ) expérimental d'une cellule solaire au silicium éclairée et de type poly-cristalline. En suite nous avons extrait les différents paramètres caractéristiques à différentes températures et analyser le comportement de ces paramètres avec la température.

# *Chapitre III*

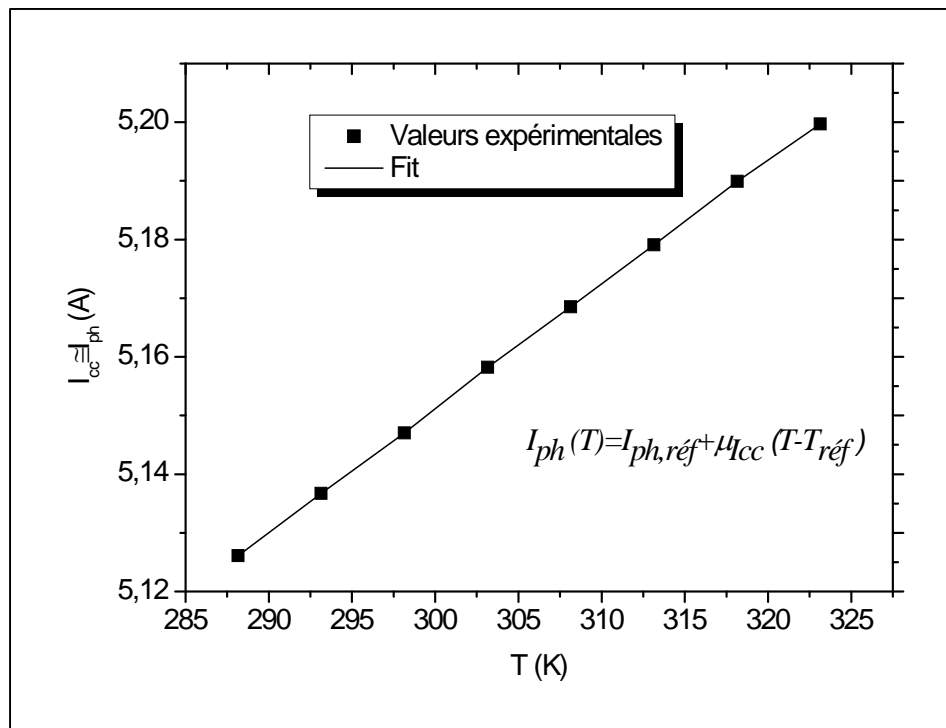
## *Résultats et discussion*

### III.1. Introduction

Ce troisième chapitre est consacré à la présentation et à la discussion des résultats obtenus, en appliquant les relations obtenues dans le chapitre précédent à des caractéristiques mesurées courant-tension du même dispositif photovoltaïque à différentes températures sous un éclairage constant afin d'explorer les effets de la température sur les paramètres électriques du dispositif photovoltaïque étudié.

### III.2. Le courant de court circuit ( $I_{cc}$ )

Sur la Fig. II.1, des courbes  $I$ - $V$  mesurées à différentes températures sous un éclairage de  $100 \text{ mW/cm}^2$  pour une cellule au silicium pc ont été présentées. D'après le tableau II.1, on peut voir que l'augmentation de la température mène à une augmentation du courant de court circuit  $I_{cc}$ . Le comportement thermique de ce dernier est montré dans la Fig. III.1. Nous avons également observé une augmentation linéaire de  $I_{cc}$  avec la température dans la gamme  $288\text{-}323 \text{ K}$ . Nous indiquons que le coefficient de température du courant de court-circuit calculé ( $\mu_{I_{cc}} = 0.0021 \text{ A/K}$ ) est en bon accord avec celui obtenu par *De Soto et al* [49] ( $0.00238 \text{ A/K}$ ) pour la même technologie sous les mêmes conditions de fonctionnement.



**Figure III.1:** L'évolution du courant de court circuit ( $I_{cc}$   $I_{ph}$ ) en fonction de température. Un «fit» des points mesurés est effectué en utilisant l'équation (II.19).  $T_{réf} = 25^\circ\text{C} = 298.15\text{K}$ ,

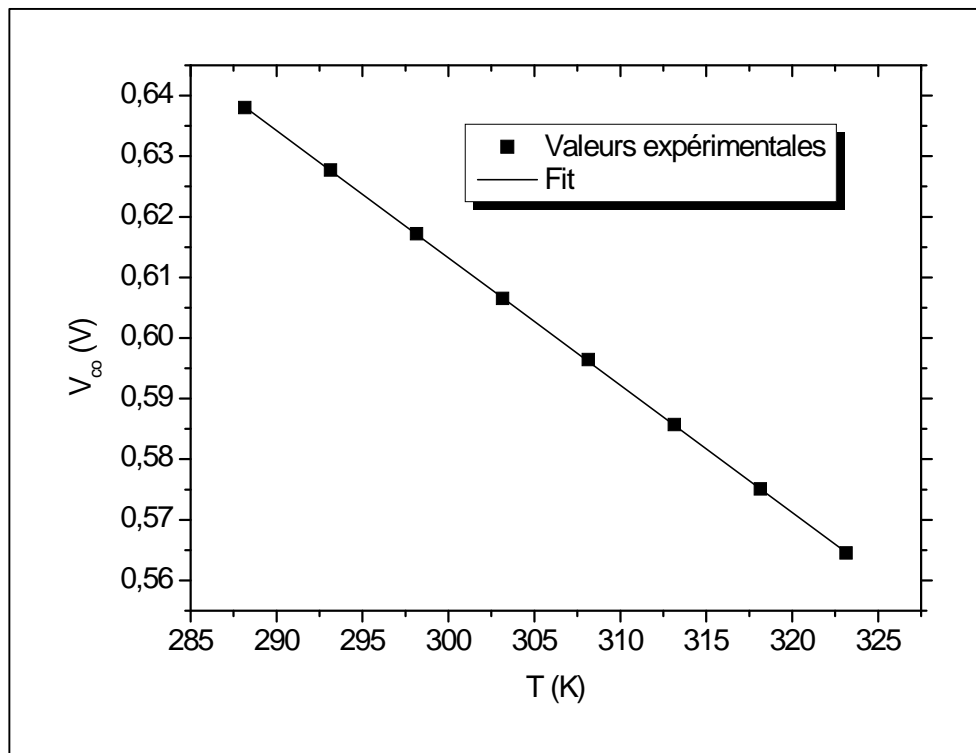
$$\mu_{I_{cc}} = 0.0021 \text{ A/K}, I_{ph, réf} = 5.1473 \text{ A}.$$

Le photocourant ( $I_{ph}$ ) d'une cellule solaire augmente généralement légèrement avec l'augmentation de la température. Cette augmentation est due à la décroissance de la largeur de la bande interdite ( $E_g$ ) du matériau semi-conducteur; ce qui permet d'utiliser un peu plus de photons de basse énergie. En conséquence, le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) de la cellule augmente [46].

Sous un éclairage constant la variation de ( $I_{cc}$ ) en fonction de la température dans une gamme thermique étroite pour les cellules solaires au silicium poly cristallin est très petite et peut être insignifiante. Dans notre cas on trouve une variation relative de ( $0.04\%/K$ ).

### III.3. La tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ )

Dans le même diagramme représenté sur la Fig. II.1, on peut voir que l'augmentation de la température mène à une diminution de  $V_{co}$ . Le comportement thermique de  $V_{co}$  sous un éclairage constant est montré dans la Fig. III.2. Sous une irradiance de  $100 \text{ mW/cm}^2$  la tension en circuit ouvert  $V_{co}$  diminue avec la croissance de la température par un ordre de grandeur de  $2.1 \text{ mV/K}$ ; ce qui est en bon accord avec l'évaluation de *Singh et al* [54]; pour les cellules solaires au silicium où  $dV_{co}/dT$  est dans l'intervalle  $[-2.17, -2.07] \text{ mV/K}$ .

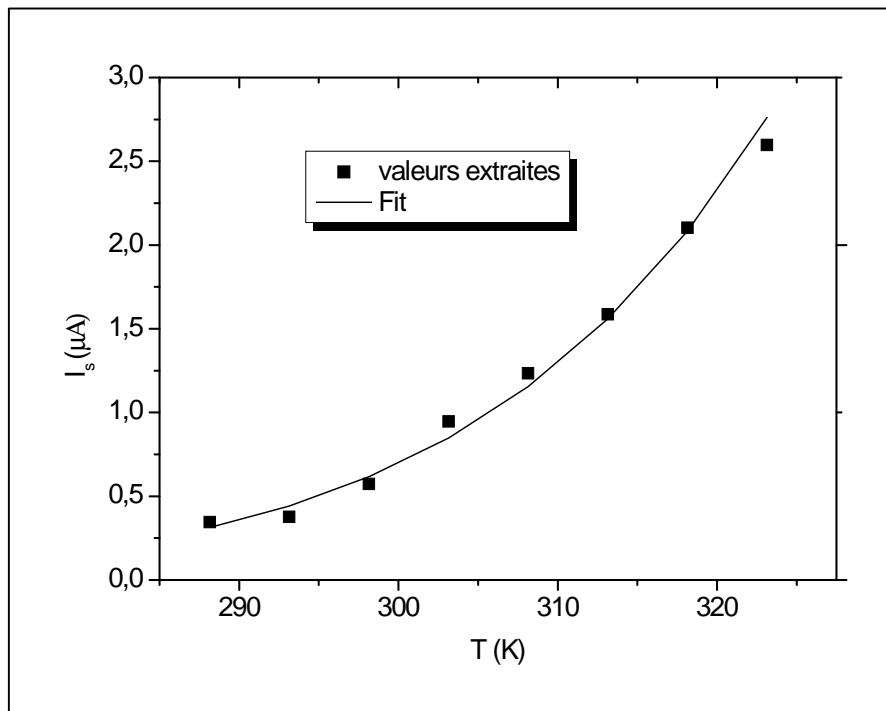


**Figure III.2 :** La tension en circuit ouvert  $V_{co}$  d'une cellule solaire au silicium poly cristallin en fonction de la température. La ligne droite est le «fit» linéaire de l'Eq. (II.23).

Sur le graphe  $V_{co}(T)$  (Fig. III.2), le «fit» des valeurs mesurées de l'équation (II.23) est effectué à l'aide d'une valeur moyenne de  $n$  ( $n=1.484$ ). Le résultat obtenu confirme le comportement linéaire de  $V_{co}$  en fonction de la température, d'où et d'après (II.23) la dépendance avec la température de  $I_{s0}$  et  $n$  ont un effet mineur dans la dépendance de  $V_{co}$  avec la température.

Dans notre cas, on trouve une variation relative de  $V_{co}$  ( $- 0.33 \% / K$ ); soit approximativement *huit fois* en valeur absolue la variation relative de  $I_{cc}$  ( $0.04 \% / K$ ). D'où, sous un éclaircissement constant; la variation de température influe beaucoup plus sur  $V_{co}$  que  $I_{cc}$ .

La dépendance de  $I_s$  avec la température est montrée sur la Fig. III. 3; on constate que l'augmentation de la température dans la gamme concernée (288-323 K) mène à une augmentation du courant de saturation d'une manière exponentielle traduit par la relation (II.22). Nous avons effectué un «fit» des points extraits à l'aide de l'équation (II.22) en utilisant une valeur moyenne de  $n$  ( $n=1.484$ ).

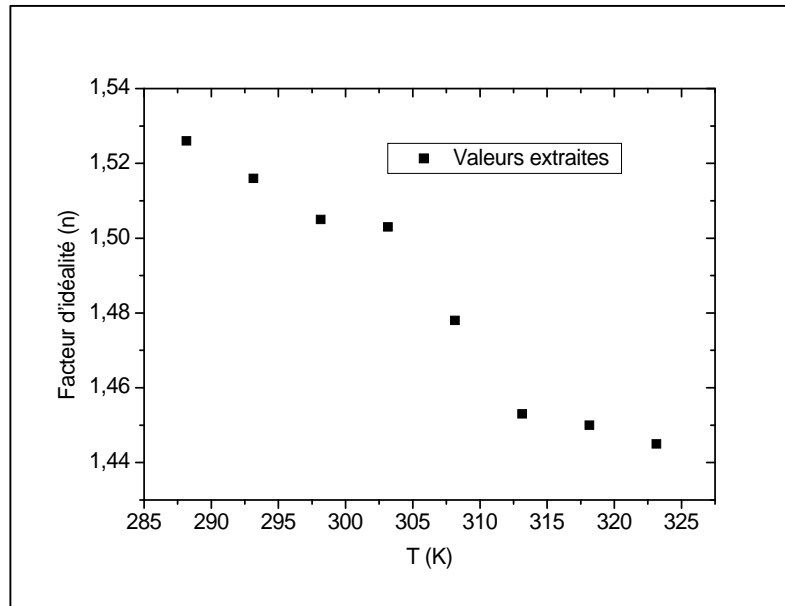


**Figure III. 3:** Evolution du courant de saturation en fonction de la température.

Un «fit» des points calculés est effectué en utilisant l'équation (II.22).

L'allure de  $n$  en fonction de la température est illustrée dans la Fig. III. 4. On peut voir que l'augmentation de la température mène à une diminution de  $n$ ; il diminue de 1.526 à 1.445 dans l'intervalle de température considéré, i.e.  $T=288-323$  K, soit une petite variation relative

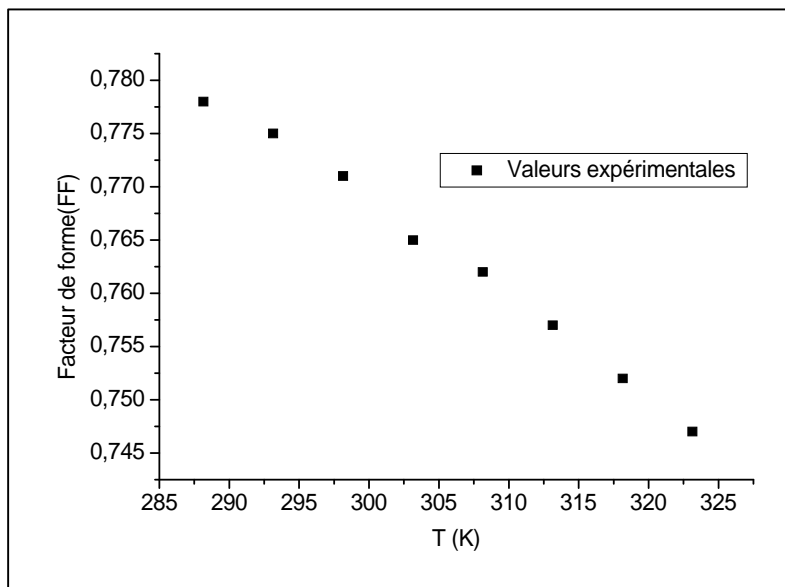
estimée par  $(- 1.5 \times 10^{-3} \% / K)$ . Ce résultat est en bon accord avec ceux obtenus dans la littérature [55, 56, 57].



**Figure III. 4:** Variation du facteur d'idéalité ( $n$ ) en fonction de la température.

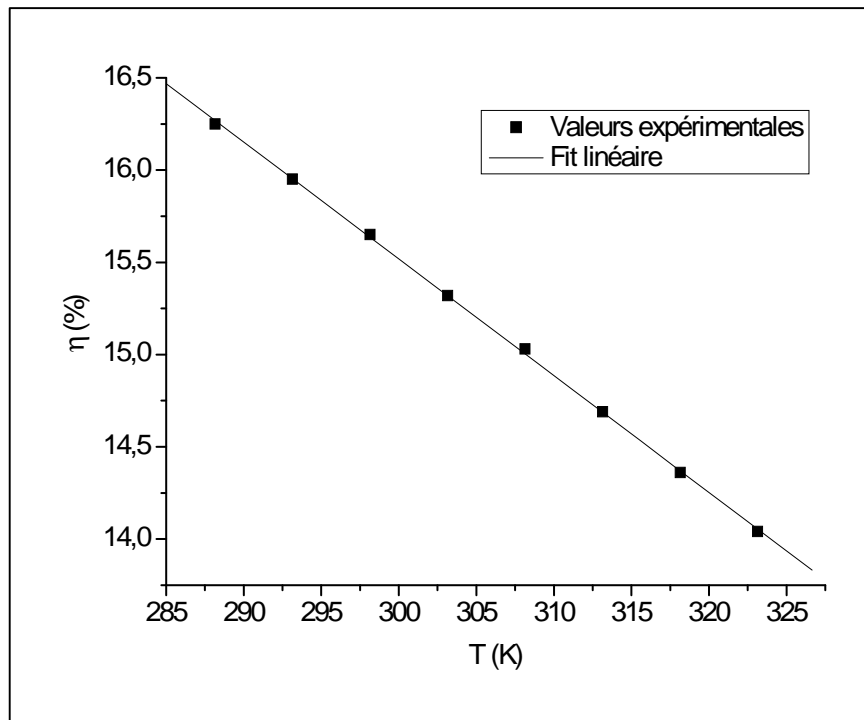
### III. 4. Le facteur de forme ( $FF$ )

La variation de  $FF$  avec la température dans la gamme 288-323 K pour les cellules solaires au silicium poly cristallin est illustrée dans la Fig. III. 5; avec un éclairage de  $100 \text{ mW/cm}^2$ , le  $FF$  diminue avec l'augmentation de la température. Ce ci est vrai pour l'ensemble des cellules solaires [46].



**Figure III. 5:** Variation de  $FF$  avec la température dans la gamme 288-323 K pour la cellule solaire au silicium poly cristallin.

La Fig. III. 6 illustre l'allure du rendement de la conversion PV en fonction de la température, nous constatons que la valeur maximum de  $\eta$  est au-dessous de la température ambiante. Dans notre gamme de température 288-323 K; la diminution du rendement de la conversion PV est presque linéaire avec la température, la pente correspondante ( $d\eta/dT = -0.063 \text{ \%}/K$ ) est en accord avec l'évaluation de Singh et al [54]; pour les cellules solaires au silicium ( $d\eta/dT = -0.042 \text{ \%}/K$ ).



**Figure III. 6:** La dépendance avec la température du rendement de la conversion PV d'une cellule solaire au silicium poly cristallin sous un éclairage de  $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ . Le «fit» linéaire a été utilisé et ces résultats sont présentés comme ligne.

### III. 5. Les deux résistances parasites

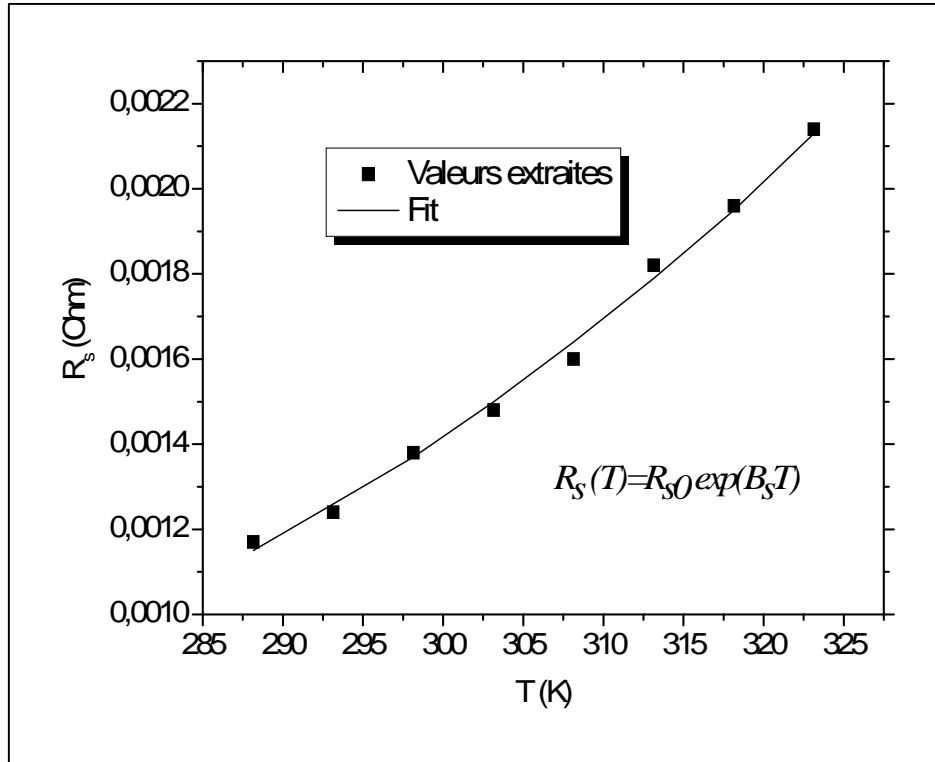
#### III.5.1. La Résistance série ( $R_s$ )

D'après les résultats obtenus (tableau II.2) nous avons  $\frac{dR_s}{dT} > 0$ . Donc  $R_s$  satisfait le premier et le troisième cas de Ding et al [53]. Ces auteurs confirment que la résistance série est du type à coefficient de température positif, donc il est possible de la mettre sous la forme:

$$R_s(T) = R_{s0} \exp(B_s T) \quad (\text{III.1})$$

Où  $B_s$  est un coefficient spécifique au matériau du semi-conducteur ( $B_s > 0$ ) et  $R_{s0}$  est la résistance série de référence.

La Fig. III. 7 montre le comportement de  $R_s$  en fonction de la température. On constate que l'augmentation de la température mène à une augmentation de  $R_s$ ; c'est le résultat obtenu par plusieurs auteurs [53, 54, 58].



**Figure III. 7:** Evolution de  $R_s$  en fonction de la température. Un «fit» des points calculés est effectué en utilisant l'équation (III.1).  $R_{s0}=0.7 \times 10^{-5}$ ,  $B_s = 1.768 \times 10^{-2} K^{-1}$ .

La Fig. III.7 montre aussi le «fit» des points calculés en utilisant la relation (III.1), et nous constatons un bon accord entre le calcul et le «fit» effectué.

### III.5.2. La Résistance shunt ( $R_{sh}$ )

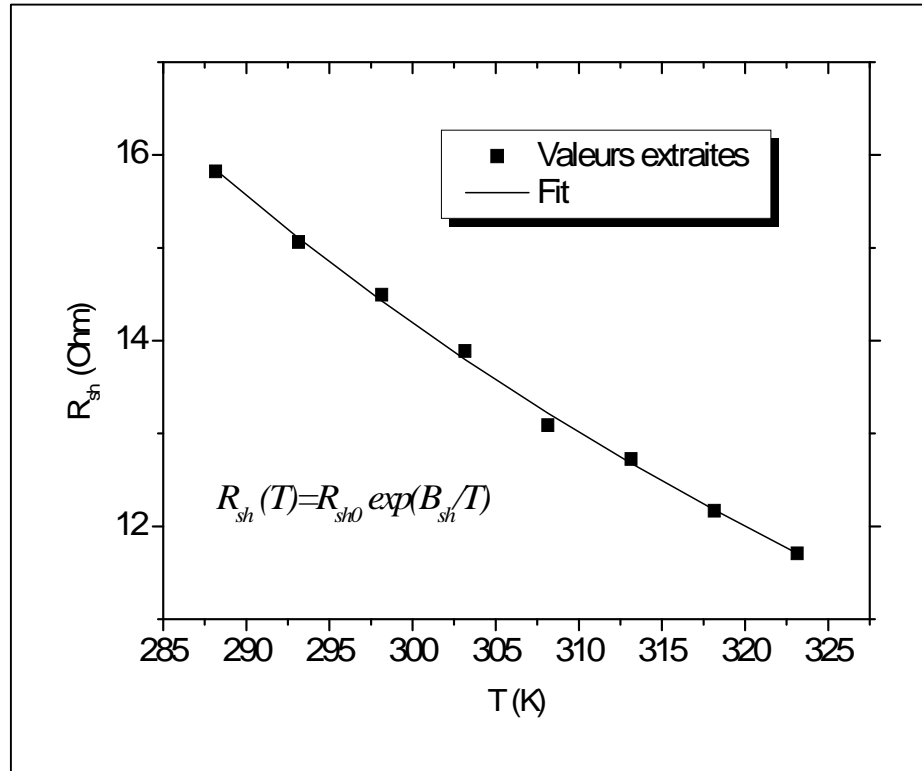
D'après les résultats obtenus (tableau II.2) nous avons  $\frac{dR_{sh}}{dT} < 0$ . Donc  $R_{sh}$  satisfait le deuxième cas de *Ding et al* [53]. Par conséquent, la résistance shunt  $R_{sh}$  peut être mis sous la forme spécifique du type à coefficient de température négatif.

$$R_{sh}(T) = R_{sh0} \exp(B_{sh}/T) \quad (III.2)$$

Où  $B_{sh}$  est un coefficient spécifique au matériau du semi-conducteur ( $B_{sh} > 0$ ) et  $R_{sh0}$  est la résistance shunt de référence.



La Fig. III. 8 montre le comportement de  $R_{sh}$  en fonction de la température. On constate que l'augmentation de la température mène à une diminution de  $R_{sh}$ ; c'est le résultat obtenu par plusieurs auteurs [53, 54].



**Figure III.8:** Evolution de  $R_{sh}$  en fonction de la température. Un «fit» des points calculés est effectué en utilisant l'équation (III.2).  $R_{sh0} = 97.25 \times 10^{-2}$  ,  $B_{sh} = 804.098$  K.

La Fig. III. 8 montre aussi le «fit» des points calculés en utilisant la relation (III.2), et nous constatons un bon accord entre le calcul et le «fit» effectué.

### III.6. Conclusions

Nous avons exploité les paramètres extraits à différentes températures et sous même éclairage pour une cellule solaire au silicium pc. Pour un éclairage de  $100 \text{ mW/cm}^2$  on trouve que  $dI_{cc}/dT = \mu_{I_{cc}} = 0.0021 \text{ A/K}$  et  $dV_{co}/dT = -2.1 \text{ mV/K}$ , la variation relative de  $V_{co}$  est ( $-0.33 \text{ \% / K}$ ) soit approximativement huit fois en valeur absolue celle de  $I_{cc}$  ( $0.04 \text{ \% / K}$ ). Le courant de saturation augmente exponentiellement avec l'augmentation de la température, cependant le facteur d'idéalité diminue légèrement; où on estime une petite variation relative ( $-1.5 \times 10^{-3} \text{ \% / K}$ ). Le  $FF$  diminue avec l'augmentation de la température, pour l'efficacité relative de la pile solaire il diminue linéairement avec la température par une pente de  $0.063 \text{ \% / K}$ . Les résultats obtenus montre que; la résistance série  $R_s$  est du type à coefficient de

température positif cependant la résistance shunt  $R_{sh}$  est du type à coefficient de température négatif.

# *Conclusion générale*

La protection de l'environnement est devenue une préoccupation majeure ces dernières années. De nombreuses voies de recherches se sont donc orientées vers l'utilisation des énergies renouvelables, dont l'énergie solaire. L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie renouvelable car elle utilise une source d'énergie d'origine naturelle qui est le Soleil.

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

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires; car les performances électriques d'une cellule solaire sont très sensibles à celle-ci.

L'objectif de ce travail est l'étude des effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires au silicium poly cristallin.

Nous avons rappelé, en premier lieu des généralités sur la source fondamentale de l'énergie photovoltaïque; le soleil, son pouvoir énergétique et les propriétés de son rayonnement puis en suite, nous avons décrit les convertisseurs photovoltaïques, leur caractéristique  $I$ - $V$ , leur circuit électrique équivalent et leurs principaux grandeurs caractéristiques ainsi que l'étude de l'influence des divers paramètres (l'éclairement, la température, les résistances parasites série et parallèle, le courant de saturation et le facteur d'idéalité) sur leur caractéristique puis nous avons abordé l'association des cellules en série, en parallèle et en série-parallèle, et les déséquilibres dans les groupements de modules et nous avons cité les différents types de cellules solaires.

Après avoir traité les effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires. Nous avons commencé par illustration de l'effet de la température sur la caractéristique  $I$  ( $V$ ) expérimental, en suite nous avons extrait les différents paramètres caractéristiques aux différentes températures et sous même éclairement.

Notre étude nous a conduit à des bons résultats où, nous avons constaté que la dépendance du  $I_{cc}$  et  $V_{co}$  avec la température est quasi linéaire où  $dI_{cc}/dT = \mu_{I_{cc}} = 0.0021 A/K$  et  $dV_{co}/dT = -2.1 mV/K$ , la variation relative de  $V_{co}$  est  $-0.33 \% / K$  soit approximativement huit fois en valeur absolue celle de  $I_{cc}$  ( $0.04 \% / K$ ). Le courant de saturation augmente

exponentiellement avec l'augmentation de la température, cependant le facteur d'idéalité diminue légèrement; où on estime une petite variation relative ( $-1.5 \times 10^{-3} \% / K$ ). Le facteur de forme «*FF*» diminue avec l'augmentation de la température, pour le rendement de conversion photovoltaïque de la pile solaire il diminue linéairement avec la température par une pente de  $0.063 \% / K$ . Une investigation sur le type des résistances parasites montre que; la résistance série  $R_s$  est du type à coefficient de température positif cependant la résistance shunt  $R_{sh}$  est du type à coefficient de température négatif.

On note vers la fin, que les résultats de ce travail sont obtenus pour un cas particulier; les cellules solaires au silicium poly cristallin sous un éclaircissement constant. En effet, le développement d'autres travaux dans le même contexte est envisagé et concernant l'étude de l'influence de l'éclaircissement sur ces différents paramètres. Une étude de même genre pour d'autres types de cellules solaires non organiques et organiques et aussi envisagée.

# *Références bibliographiques*

- [1] A. Labouret, M. Viloz, *Energie solaire photovoltaïque*, 3<sup>ème</sup> édition, DUNOD, Paris, 2006.
- [2] J. Bernard, *Energie solaire calcul et optimisation*, 1<sup>ère</sup> édition, ELLIPES, Paris, 2004.
- [3] B. Brousse, *Réalisation et caractérisation de cellules photovoltaïques organiques obtenues par dépôt physique*, Thèse de doctorat, faculté de sciences et technique, spécialité : électronique des hautes fréquences et optoélectronique, université de Limoges (France), 2004.
- [4] B. Pire, "*Bethe Hans Albrecht*", ENCYCLOPEDIE UNIVERSALIS, version 12.00, logiciel et moteur de recherche OPTI Media, Paris 2007.
- [5] L. Marleau, *Introduction à la physique des particules (lectures notes)*, [En ligne] : [http://feynman.phy.ulaval.ca/marleau/marleau\\_ppnotes.pdf](http://feynman.phy.ulaval.ca/marleau/marleau_ppnotes.pdf) (Page consultée le 03/03/2010).
- [6] C. Aslangul, *Physique quantique I (lectures notes)*, [En ligne] : <http://www.librecours.org/cgi-bin/documents/4/490.pdf> (Page consultée le 03/03/2010).
- [7] H. Lacombe, *Les énergies de la mer*, 1<sup>ère</sup> édition, presse universitaires de France, Paris, 1968.
- [8] CRDP de Basse-Normandie - *thém@doc* - Les énergies renouvelables, c'est quoi? *.Énergie solaire*. [En ligne] : <http://www.crdp.ac-caen.fr/energies/Soleil.htm> (Page consultée le 22/11/2008).
- [9] B. Fleche, D. Delagnes, *Energie solaire photovoltaïque*, [En ligne] : [http://www.iufmrese.cict.fr/catalogue/2006/Toulouse/PV/A\\_-\\_Introduction\\_PV/Energie\\_solaire\\_photovoltaïque.pdf](http://www.iufmrese.cict.fr/catalogue/2006/Toulouse/PV/A_-_Introduction_PV/Energie_solaire_photovoltaïque.pdf) (Page consultée le 03/11/2008).
- [10] A. Ricaud, *Photopiles solaires*, 1<sup>ère</sup> édition, presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1997.
- [11] K. Bouzidi, *Etude comparatives des méthodes d'extraction des paramètres des cellules solaires*, Mémoire de magister, département de physique, faculté des sciences, université de Sétif (Algérie), 2007.
- [12] B. Equer, *Energie solaire photovoltaïque (volume1 : physique et technologie de la conversion photovoltaïque)*, 1<sup>ère</sup> édition, ELLIPES, Paris, 1993.
- [13] S. M. Sze, K. N. Kwok, *Physics of Semiconductor Devices*, 3<sup>rd</sup> edition, WILEY INTERSCIENCE, New Jersey, 2006.
- [14] Y. Veschetti, *Modélisation caractérisation et réalisation de nouvelles structures photovoltaïques sur substrat de silicium mince*, Thèse de doctorat, discipline: physique des semi-conducteurs, université Louis Pasteur (Strasbourg I), 2005.

- [15] S. Quoizola, *Epitaxie en phase vapeur de silicium sur silicium mesoporeux pour report sur substrats économiques et application photovoltaïque bas coût*, Thèse de doctorat, école doctorale : électronique, électrotechnique et automatisme, spécialité : dispositifs de l'électronique intégrée, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, Lyon, 2003.
- [16] J. Dunoguès, M. Pouchard, "Silicium", *ENCYCLOPEDIE UNIVERSALIS*, version 12.00, logiciel et moteur de recherche OPTI Media, Paris 2007.
- [17] Z. Djessas, *Extraction des paramètres physiques d'une cellule solaire à deux exponentiels par la méthode des algorithmes génétiques*, Mémoire de magistère, département de physique, faculté des sciences, université de Sétif (Algérie), 2007.
- [18] B. Thuillier, *Caractérisation structurale des contacts ohmiques réalisés à partir d'encre métalliques sur cellules photovoltaïques en silicium multi cristallin*, Thèse de doctorat, Ecole Doctorale Matériaux de Lyon, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, Lyon, 2001.
- [19] H. Matieu, *Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques*, 1<sup>ère</sup> édition, DUNOD, Paris, 2001.
- [20] M. Wolf, H. Rauschenbach, *Advanced Energy Conversion*, 1963; 3: 455.
- [21] M. S. Imamura, J. I. Portschieller, *Proc. VIII. IEEE Photovoltaic Spec. Conf.*, Seattle 1970; (p.102).
- [22] J. P. Charles, M. Abdelkrim, Y. H. Muoy, P. Mialhe, *Solar Cells*, 1981; 4: 169-178.
- [23] S. K. Agrawal, R. Muralidharam, A. Agrawala, V. K. Tewary, S. C. Jain, *J. Phys. D*, 1981; 14: 1634.
- [24] G. L. Araujo, E. Sanchez, 1982, *IEEE Transactions on Electron Devices Vol ED-29*, 1511-1513.
- [25] J. Cabestany, L. Castaner, *Revue Phys. Appl.* 1983; 18:565-567.
- [26] D. Laplaze, I. Youm, *Solar Cells*, 1985; 14: 167-177.
- [27] D. Laplaze, I. Youm, *Solar Cells*, 1985; 14: 179-186.
- [28] A. Kaminski, J. J. Marchand, A. Laugier, *26th IEEE Photovoltaic Specialist Conference*, 1997.
- [29] A. Kaminski, J. J. Marchand Laugier, *Solid-state Electronics*, 1999; 43: 741-745.
- [30] K. Rajkanan, J. Shewchun, *Solid-St. Electron.*, 1979; 22:193.
- [31] A. G. Aberle, S. R. Wenham, M. A. Green, *In: 23th IEEE Photovoltaic Specialist Conference*, 1993; p.133.



- [32] E. Van Kerschaver, R. Einhaus, J. Szlufcik, J. Nijs, R. Mertens, In: Proc. 14<sup>th</sup> Euro. Com. PV. Sol. En. Conf., 1997; p.2438.
- [33] Z. Ouennoughi, and M. Chegaar, Solid-St. Electron, 1999; 43: 1985-1988.
- [34] M. Chegaar, Z. Ouennoughi, A. Hoffmann, Solid State Electronics, 2001; 45: 293-296
- [35] M. K. El-Adawi, I. A. Al-Nuaim, Vacuum 2002; 64: 33-36.
- [36] P. Miahle, A. Khoury, J. P. Charles, phys. Sta. Sol. (a), 1984 ; 83 :403.
- [37] M. Bashahu, A. Habyarimana, Renewable Energy, 1995; 6: 129.
- [38] D. S. H Chan, J. R. Phillips, J. C. H. Phang, Solid-state Electronics, 1986; 29: 3, 329-337.
- [39] M. Wolf, G. T. Noel, R. J. Strin, IEEE Trans. on Electron devises, 1977; 24: 419.
- [40] J. Cabestany, L. Castaner, J. Phys. D: Appl. Phys. 1983; 16:2547.
- [41] D. Fuchs, H. Sigmund, solid state Electronics 1986; 29:791.
- [42] J. P. Charles, I. Mekkaoui-Allaoui, G. Bordure, Solid-state Electronics 1985; 28(8): 807-820.
- [43] G. S. Chilana, R. S. Gupta. 1989, J. Appl. Phys. 65:7, 2859.
- [44] T. Easwarakhanthan, J. Bottin, I. Bouhouch, C. Boutrit, Int. J. Sol. En., 1986; 4: 1-12.
- [45] K. Bouzidi, M. Chegaar, A. Bouhemadou, Solar Energy Materials and Solar Cells, 91 (2007) 1647–1651.
- [46] J. Krustok, R. Josepson, M. Danilson, D Meissner, Solar Energy (2009), doi:10.1016/j.solener.2009.09.011.
- [47] M. Chegaar, G. Azzouzi, P. Mialhe, Solid-State Electronics 50 (2006) 1234–1237.
- [48] E. Karatepe, M. Boztepe, M. Colak, Energy Conversion and Management 47 (2006) 1159–1178.
- [49] W. De Soto, S.A. Klein, W.A. Beckman, Solar Energy 80 (2006) 78–88.
- [50] U. Malm, J. Malmstrfm, C. Platzer-Bjfrkman, L. Stolt. Thin Solid Films 480–481 (2005) 208–212.
- [51] S. Rachedi, K. Ghaffour, Conférence MajecSTIC 2005 : Manifestation des Jeunes Chercheurs francophones dans les domaines des STIC; 122-126, Rennes (France), 2005.
- [52] M.M. El-Nahass, K.F. Abd-El-Rahman, A.A.M. Farag, A.A.A. Darwish, Organic Electronics 6 (2005) 129–136.
- [53] J. Ding, X. Cheng, T. Fu, Vacuum 77 (2005) 163–167.
- [54] P. Singh, S.N.Singh, M. Lal, M.Husain, Solar Energy Materials & Solar Cells 92 (2008) 1611–1616.
- [55] J. Verschraegen, M. Burgelman, J Penndorf, Thin Solid Films 480–481 (2005) 307–311

[56] U. Rau, H.W. Schock, *Applied Physics A* 69 (1999) 131–147.

[57] R. P. Wu, *Physics of Solar Cells: From Principles to New Concepts*, WILEY, VCH. 2005.

[58] E. Radziemska, *Energy Conversion and Management* 46 (2005) 1485–1494.

## الملخص

في هذه المذكرة، تمت دراسة تأثير الحرارة على الخصائص المميزة لخلية شمسية سليكونية. من أجل إضاءة ثابتة ( $1000 \text{ W/m}^2$ ) نجد أن تيار الدارة المغلقة وكمون الدارة المفتوحة لهما سلوك خطي تقريباً بحيث  $(dI_{cc}/dT = \mu_{I_{cc}} = 0.0021 \text{ A/K})$  و  $(dV_{co}/dT = -2.1 \text{ mV/K})$ . تيار الإشباع ( $I_s$ ) يتزايد أسياً مع الحرارة في حين أن معامل المثالية ( $n$ ) يتناقص قليلاً. معامل الشكل ( $FF$ ) يتناقص مع الحرارة. مردود الخلية الشمسية ( $\eta$ ) يتناقص خطياً مع الحرارة بميل مقداره ( $0.063 \% /K$ ). التناقص المحصل عليها توضع أن المقاومة على التسلسل ( $R_s$ ) من الصنف ذو معامل حرارة موجب في حين أن المقاومة على التفرع ( $R_{sh}$ ) من الصنف ذو معامل حرارة سالب.

**الكلمات المفتاحية:** الخلية الشمسية، درجة الحرارة، الخصائص المميزة.

## Résumé

*Ce travail présente une étude de l'influence de température sur les paramètres caractéristiques d'une cellule solaire au silicium poly-cristallin. Pour un éclairage constant ( $1000 \text{ W/m}^2$ ) on trouve que le courant de court circuit  $I_{cc}$  et la tension en circuit ouvert  $V_{co}$  ont un comportement quasi linéaire où  $dI_{cc}/dT = \mu_{I_{cc}} = 0.0021 \text{ A/K}$  et  $dV_{co}/dT = -2.1 \text{ mV/K}$ . Le courant de saturation  $I_s$  augmente exponentiellement avec l'augmentation de la température cependant le facteur d'idéalité  $n$  diminue légèrement. Le facteur de forme  $FF$  diminue avec la température. Le rendement de conversion de la pile solaire  $\eta$  diminue linéairement avec la température par une pente de  $0.063 \% /K$ . Les résultats obtenus montre que; la résistance série  $R_s$  est du type à coefficient de température positif cependant la résistance shunt  $R_{sh}$  est du type à coefficient de température négatif.*

**Mots clés :** Cellule solaire au silicium, température, paramètres caractéristiques.

## Abstract

*This work presents an investigation of the temperature effects on the poly-silicon solar cell parameters. For a constant illumination ( $1000 \text{ W/m}^2$ ), we have found that; the short circuit current  $I_{sc}$  and the open circuit voltage  $V_{oc}$  have nearly linear behavior with  $T$  where  $dI_{sc}/dT = \mu_{I_{cc}} = 0.0021 \text{ A/K}$  and  $dV_{oc}/dT = -2.1 \text{ mV/K}$ . The saturation current  $I_s$  increases exponentially with  $T$  but the ideality factor  $n$  does not show remarkable temperature dependence and decreases slightly with  $T$ . The curve factor «  $FF$  » decreases with temperature. The conversion efficiency of the solar cell decreases linearly with temperature with a slope of  $0.063 \% /K$ . The obtained results show that; the series resistance  $R_s$  is of a positive temperature coefficient; however the shunt resistance  $R_{sh}$  is of a negative temperature coefficient.*

**Keywords :** Silicon solar cell, temperature, characteristic parameters.