

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF  
FACULTE DES SCIENCES  
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

**MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MAGISTER**

École doctorale « Energies Renouvelables »

Par: **Amer HAMZAOU**

Thème

**Effet de l'illumination sur les paramètres  
caractéristiques des cellules solaires au silicium polycristallin**

Soutenu le: 07/ 03 /2012

Devant le Jury :

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

## **REMERCIEMENTS**

*Tous d'abord, merci pour le grand **DIEU** qui m'a donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.*

*Je remercie également mon promoteur, Mr. **Mohamed CHEGAAR** professeur à l'université de Sétif, pour ses conseils précieux, son suivi et l'aide qu'il m'a apporté tout au long de la réalisation de ce travail.*

*J'exprime mes sincères remerciements à monsieur **K. KASSALI** Professeur à l'Université de Sétif, d'avoir accepté de présider le Jury de ce mémoire.*

*Mes remerciements les plus élogieux à Mr **Z. OUENNOUGHI** Professeur à l'Université de Sétif, à Mr **M. GUELLAL** Maître de conférences à l'Université de Sétif, de m'avoir honoré par leur présence au jury autant qu'examineurs.*

*Je tiens également à présenter ma plus vive sympathie aux collègues: **Mourad ATEK** et **Anis IMAKHLAF**.*

*Je tiens à remercier toute personne ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

## Sommaire

<b>LISTE DES SYMBOLES UTILISES .....</b>	<b>5</b>
<b>PRINCIPALES CONSTANTES .....</b>	<b>7</b>
<b>Introduction générale .....</b>	<b>8</b>
<b>Chapitre I. Caractéristiques des cellules solaires .....</b>	<b>10</b>
1.1. Introduction .....	11
1.2. L'énergie solaire.....	11
1.2.1. Le soleil .....	11
1.2.2. Le mouvement apparent du Soleil.....	11
1.2.3. Le rayonnement solaire .....	12
1.3. La conversion photovoltaïque .....	14
1.3.1. L'effet photovoltaïque .....	14
1.3.2. La cellule photovoltaïque .....	14
1.3.3. Le circuit électrique équivalent .....	15
1.3.4. La caractéristique courant-tension d'une cellule PV .....	16
1.3.4. Les grandeurs caractéristiques d'une cellule PV .....	18
1.3.5. L'influence des différents paramètres sur la caractéristique I (V) .....	19
1.4. Les modules photovoltaïques .....	23
1.4.1. Association en série .....	23
1.4.2. Association en parallèle.....	24
1.4.3. Association en série parallèle .....	25
1.4.4. Déséquilibres dans les groupements de modules .....	25
1.4.5. Protection par diode.....	26

1.5. Les filières technologiques du PV .....	27
1.5.1. La filière silicium.....	27
1.5.2. La filières CIS et CdTe (les chalcogénures).....	30
1.5.3. Les cellules III-V multijonctions.....	31
1.5.4. La filière organique .....	31
1.6. Conclusion.....	31

## **Chapitre II. Effet de l'illumination sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires au silicium polycristallin ..... 32**

2.1. Introduction.....	<b>33</b>
2.2. Étude bibliographique .....	33
2.2.1. Kassis et Saad (2010) .....	33
2.2.2. Bayhan et Bayhan (2011) .....	35
2.2.3. Khan et al (2010) .....	37
2.2.4. Reich et al (2009) .....	39
2.2.5. Priyanka et al (2007).....	41
2.2.6. Yunaz et al (2009) .....	42
2.3. Effet de l'illumination sur la caractéristique I (V) de la cellule solaire au silicium polycristallin.....	43
2.4. Méthode d'extraction des paramètres .....	45
2.5. Description de l'évolution des performances en fonction de l'illumination.....	49
2.5.1. Le courant de court-circuit .....	49
2.5.2. La tension en circuit ouvert .....	50
2.5.3. La puissance au point de fonctionnement maximum et le facteur de forme.....	51
2.6. Conclusion.....	52

---

<b>Chapitre III. Résultats et discussion .....</b>	<b>53</b>
3.1. Introduction .....	54
3.2. Le courant de court-circuit et le photocourant .....	55
3.3. La tension de circuit ouvert.....	56
3.4. La puissance maximale .....	58
3.5. Le facteur de forme .....	59
3.6. Le rendement.....	60
3.7. Le courant de saturation et le facteur d'idéalité.....	61
3.8. La résistance série .....	63
3.9. La résistance shunt .....	63
3.10. Conclusion.....	64
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>66</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>69</b>

## LISTE DES SYMBOLES UTILISES

AM	La masse d'air
E	L'éclairement
$E_s$	L'éclairement sous conditions standards
$E_g$	Energie de la bande interdite
FF	Facteur de forme
$G_{sh}$	Conductance shunt
h	Constante de Planck
I (V)	La caractéristique courant - tension de la photopile
I	Le courant électrique
$I_{cc}$	Courant de court-circuit
$I_d$	Courant directe de la diode
$I_i$	Courant d'une cellule élémentaire dans un panneau photovoltaïque
$I_m$	Courant maximal
$I_{ph}$	Photocourant
$I_s$	Courant de saturation
$I_{sh}$	Courant de la résistance shunt
K	Constante de Boltzmann (J/K)
$K_E$	Une constante qui caractérise la variation relative du courant de

saturation en fonction de l'illumination.

$n$	Facteur d'idéalité
$n_0$	Le facteur d'idéalité à l'obscurité.
$N_{bp}$	Nombres de branches en parallèle
$N_{ms}$	Nombres de modules en série
$N_p$	Nombres de cellules en parallèle
$N_s$	Nombres de cellules en série
$P_i$	La puissance radiative incidente
$P_m$	Puissance maximale
PV	Photovoltaïque
$q$	Charge électrique élémentaire
$R_s$	Résistance série
$R_{sh}$	Résistance shunt
$T$	Température (K°)
$V$	La tension électrique
$V_{co}$	Tension de circuit ouvert
$V_i$	Tension d'une cellule élémentaire dans un panneau photovoltaïque
$V_m$	Tension maximale
$V_{th}$	Le potentiel thermique
ZCE	La zone de charge d'espace
$\gamma$	Le coefficient de variation de $n$ en fonction de l'illumination.

$\eta$	Rendement énergétique
$\nu$	Fréquence du rayonnement

### **PRINCIPALES CONSTANTES**

Charge électrique d'un électron (en valeur absolue)	$q=1.60281 \times 10^{-19}$ (C)
Constante de Boltzmann	$K=1.38066 \times 10^{-23}$ (J/K) = $8.61400 \times 10^{-5}$ (eV/K)
Constante de Planck	$h = 6,626 \times 10^{-34}$ (J.s)

# Introduction générale

Face à l'augmentation des besoins énergétiques mondiaux, à l'épuisement prévisible des ressources d'énergies fossiles et à la dégradation globale de l'environnement, le développement de sources d'énergie respectueuses de l'environnement est nécessaire.

Une des solutions consiste à développer des sources d'énergies renouvelables bon marché. Parmi lesquelles, l'énergie photovoltaïque qui consiste en la conversion directe de l'énergie solaire en énergie électrique. Elle est une des plus prometteuses et fait l'objet d'intenses recherches. Contrairement à d'autres énergies renouvelables (issues du vent, de la biomasse, de l'eau...), l'énergie solaire est disponible partout sur le globe avec plus ou moins d'intensité.

La production d'électricité photovoltaïque a connu ces dernières années un accroissement très rapide, surtout le silicium polycristallin qui constitue la quasi-totalité des cellules photovoltaïques commerciales. Cet accroissement était accompagné par une valorisation des recherches visant l'optimisation de l'énergie fournie par les cellules solaires.

Les performances d'une cellule PV dépend fortement des conditions météorologiques, telles que le rayonnement solaire, la température et la vitesse du vent.

Les performances de la cellule peuvent être améliorées par optimisation des paramètres physiques internes pour assurer à la fois un courant de court-circuit, un facteur de forme et une tension en circuit ouvert élevés.

Pour ce but, on ne peut pas négliger l'effet de l'illumination sur les performances de la cellule solaire, sachant que dans les conditions réel de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, l'intensité d'illumination ne peut être considéré comme invariante.

Dans le présent travail, nous étudions pour une cellule solaire au silicium polycristallin, le comportement en fonction de l'illumination des principaux paramètres; le courant de court-circuit, la tension en circuit ouvert, le facteur de forme, le rendement énergétique de conversion photovoltaïque, la résistance série, la résistance shunte, le facteur d'idéalité et le courant de saturation.

Le présent travail est organisé comme suit :

Dans le premier chapitre, des notions générales sur la conversion photovoltaïque sont présentées. L'influence des conditions de fonctionnement (éclairage, température, résistances parasites ...), sur la réponse de la cellule solaire ainsi que les différentes spécifications électriques du générateur photovoltaïque et les principales filières technologiques sont étudiées.

Dans le deuxième chapitre, nous commençons par un résumé des travaux déjà publiés sur le sujet, en suite, nous présentons l'effet de l'illumination sur les caractéristiques des cellules solaires au silicium polycristallin. Nous déterminons les différents paramètres caractéristiques, puis nous donnons une description de l'évolution de ces paramètres en fonction de l'illumination.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus et à la discussion du comportement des performances et des paramètres caractéristiques de la cellule avec l'illumination.

Finalement, nous terminons ce mémoire par une conclusion générale et quelques perspectives pour des travaux futurs dans ce domaine.

# **Chapitre I**

## **Caractéristiques des cellules solaires**

## 1.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous aborderons en premier lieu quelques notions sur le soleil, et les caractéristiques principales du rayonnement solaire. Ensuite on s'intéresse plus particulièrement au fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs principales caractéristiques, sous différentes conditions, ainsi que les filières technologiques principales.

## 1.2. L'énergie solaire

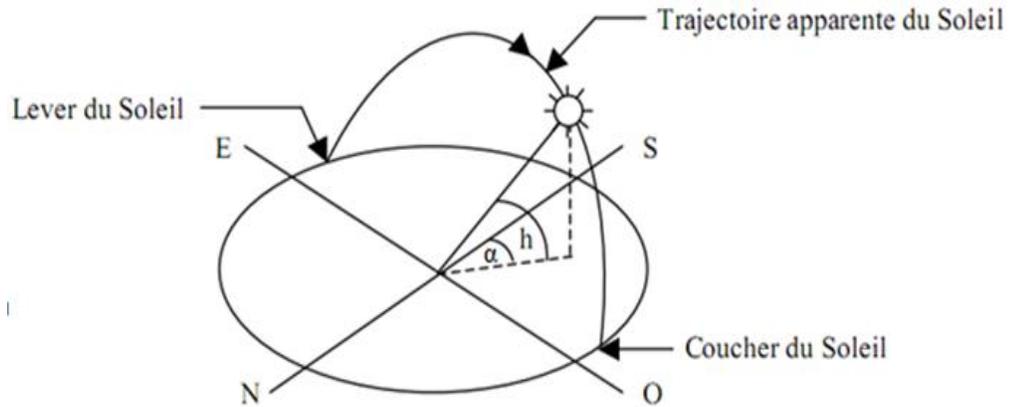
### 1.2.1. Le soleil

Le Soleil est une étoile de 1391960 km (soit environ 109 fois la Terre) de diamètre. Il est la principale source d'énergie, de lumière et de chaleur dans le Système solaire, ce qui a permis la vie sur terre.

L'énergie solaire se crée profondément dans le noyau du Soleil. C'est là où la température est de  $15,57 \cdot 10^6$  °C et la pression (340 milliards de fois la pression atmosphérique au niveau de la mer) est si intense que des réactions thermonucléaires ont lieu. Ces réactions provoquent la fusion de quatre protons (noyaux d'hydrogène) pour former une particule alpha (noyau d'hélium). La masse de la particule alpha est environ 70 % de la masse des quatre protons. La différence de masse est transformée en énergie et transportée vers la surface du Soleil, par un processus de convection, où elle est libérée sous forme de lumière. L'énergie générée dans le noyau met un million d'années pour atteindre la surface. Chaque seconde, 700 millions de tonnes d'hydrogène sont converties en hélium. Dans le processus, cinq millions de tonnes d'énergie pure sont libérées [1].

### 1.2.2. Le mouvement apparent du Soleil

Le mouvement apparent du Soleil vu par un observateur fixe en un point au nord de l'équateur est représenté sur la figure (1.1).



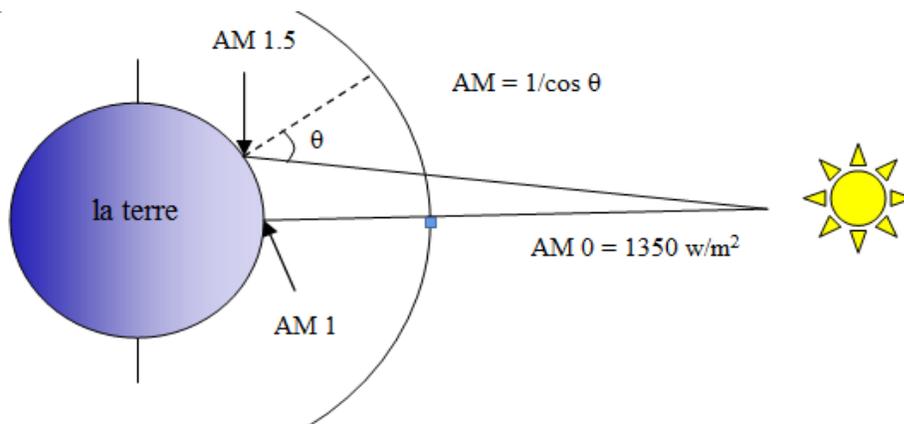
**Figure 1.1. Repérage de la position du Soleil (hauteur et azimuth).**

La position du soleil est définie par deux angles: sa hauteur angulaire  $h$  (l'angle entre la direction du soleil et le plan horizontal du lieu) et son azimuth  $\alpha$  (l'angle entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil).

### 1.2.3. Le rayonnement solaire

#### 1.2.3.1. L'air mass (AM)

La notion d'air mass "masse d'air" a été entrée, afin de comparer et d'unifier les performances des cellules photovoltaïques élaborées dans les différents laboratoires du monde. Elle varie en fonction de l'angle  $\theta$  du soleil par rapport au zénith.



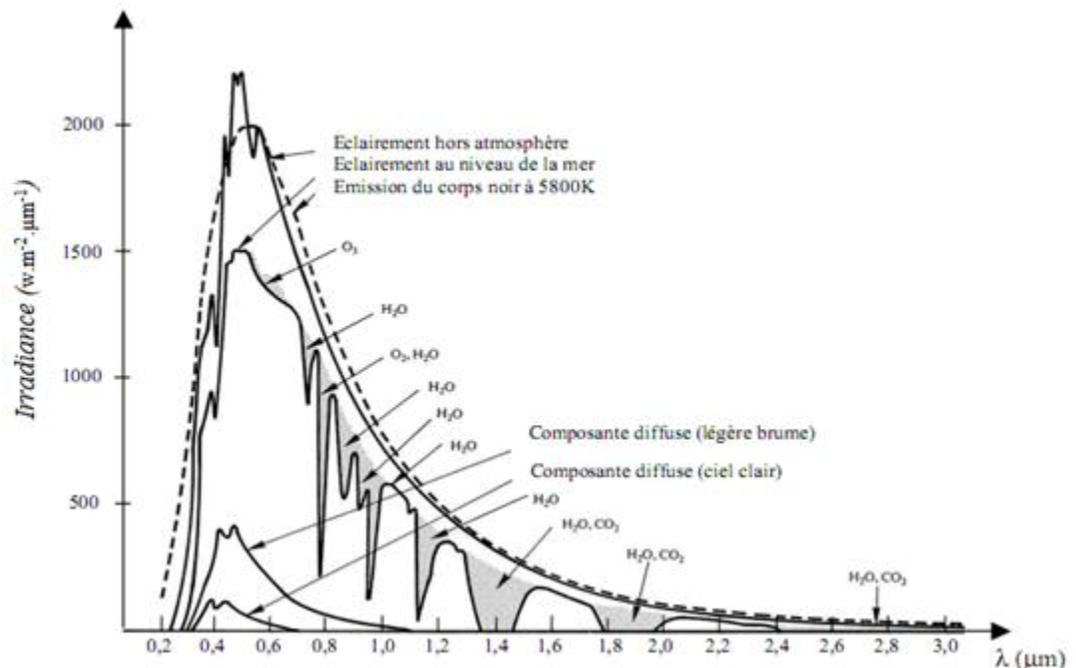
**Figure 1.2: Définition de l'Air Mass.**

L'énergie totale transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de  $1367\text{W/m}^2$  (AM0) hors atmosphère terrestre. Le rayonnement solaire global reçu au niveau du sol pour  $\theta = 48^\circ$  (AM1.5) atteint  $1000\text{W/m}^2$ , avec un petit arrondissement [2].

### 1.2.3.2. Le spectre solaire

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0.2 à 4 microns. La Figure (1.3) représente la variation de l'irradiance en fonction de la longueur d'onde.

Le spectre solaire hors atmosphère est comparable à celui d'un corps noir à une température d'environ 5800 K. À la surface de la Terre, le spectre solaire n'est plus le même, car il est pondéré par l'absorption des molécules présentes dans l'atmosphère ( $\text{O}_3$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , ...) [3].



**Figure 1.3: Influence de l'atmosphère sur le spectre solaire [4].**

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite de phénomènes d'absorption et de diffusion par les

poussières et les aérosols. Ainsi, la couche d'ozone absorbe la majeure partie du rayonnement ultraviolet, tandis que la vapeur d'eau absorbe le rayonnement infrarouge.

### **1.3. La conversion photovoltaïque**

#### **1.3.1. L'effet photovoltaïque**

L'effet photovoltaïque est la transformation directe de la lumière en électricité. Lorsqu'un photon d'énergie supérieure ou égale à l'énergie de gap est absorbé par le matériau semi-conducteur, il passe une partie de son énergie par collision à un électron. L'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction et laisse un trou derrière lui, d'où l'apparition d'une paire électron-trou, c'est la génération des charges libres [5].

#### **1.3.2. La cellule photovoltaïque**

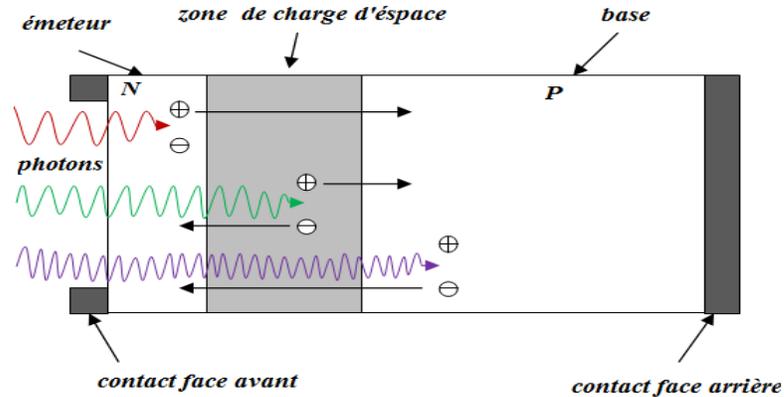
La cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque, qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé et d'autres paramètres.

Une cellule PV est réalisée généralement à partir de deux couches, une dopée P et l'autre dopée N, créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Cette jonction peut être d'un même matériau (homo jonction P-N) ou entre deux matériaux (hétérojonction).

Cette transformation photovoltaïque est basée sur les trois mécanismes suivants :

- absorption des photons d'énergie  $h\nu \geq Eg$  par le matériau constituant le dispositif.
- conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron-trou dans le matériau semi-conducteur.
- collecte des particules générées dans les régions neutres N et P sous l'effet d'un champ électrique interne.

La figure (1.4) montre le principe de fonctionnement d'une cellule PV.



**Figure 1.4: Structure et principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.**

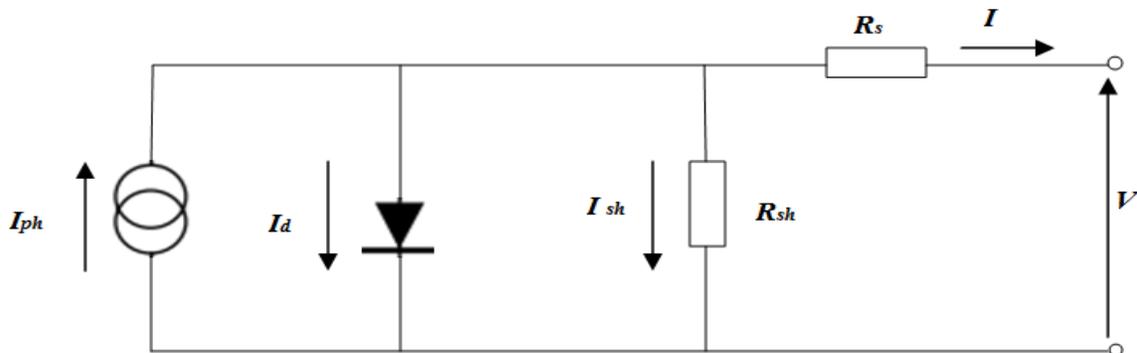
Dans la ZCE (zone de charge d'espace), les paires électron-trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique. Les électrons vont aller vers la région N et les trous vers la région P.

Dans la zone N, les trous qui atteignent la ZCE sont envoyés par le champ électrique dans la zone P, par contre dans la zone P c'est l'inverse. Ces deux procédures sont à l'origine du photocourant  $I_{ph}$ . C'est un courant de porteurs minoritaires.

La collection des porteurs de charges va créer une tension interne; on l'appelle la tension du circuit ouvert  $V_{co}$  [6].

### 1.3.3. Le circuit électrique équivalent

Le circuit électrique équivalent d'une cellule PV est le suivant:



**Figure 1.5: Schéma équivalent d'une cellule PV sous éclairage [7].**

La cellule PV se comporte comme un générateur mixte qui donne un courant et une tension.

Le circuit équivalent contient quatre composantes; un générateur de courant monté en parallèle sur une diode qui a un facteur d'idéalité  $n$  qui varie de 1 jusqu'à 2, et deux résistances de fuite, une montée en série et l'autre en parallèle.

La résistance série  $R_s$  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 aux borne de la jonction PN.

La résistance shunt  $R_{sh}$  correspond à la fuite de courant 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.

Le facteur d'idéalité de la cellule dépend des mécanismes de recombinaison dans la ZCE. Dans le cas idéal, on prend  $n = 1$ .

#### 1.3.4. La caractéristique courant-tension d'une cellule PV

La caractéristique courant-tension réel se met sous la forme mathématique suivante [7]:

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh}$$

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp \frac{q(V + R_s I)}{nKT} - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (1.1)$$

Pour le cas idéal ( $R_s = 0$  et  $R_{sh}$  infini), la caractéristique devient:

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp \frac{qV}{nKT} - 1 \right] \quad (1.2)$$

Avec:

$I_{ph}$  Photocourant (A)

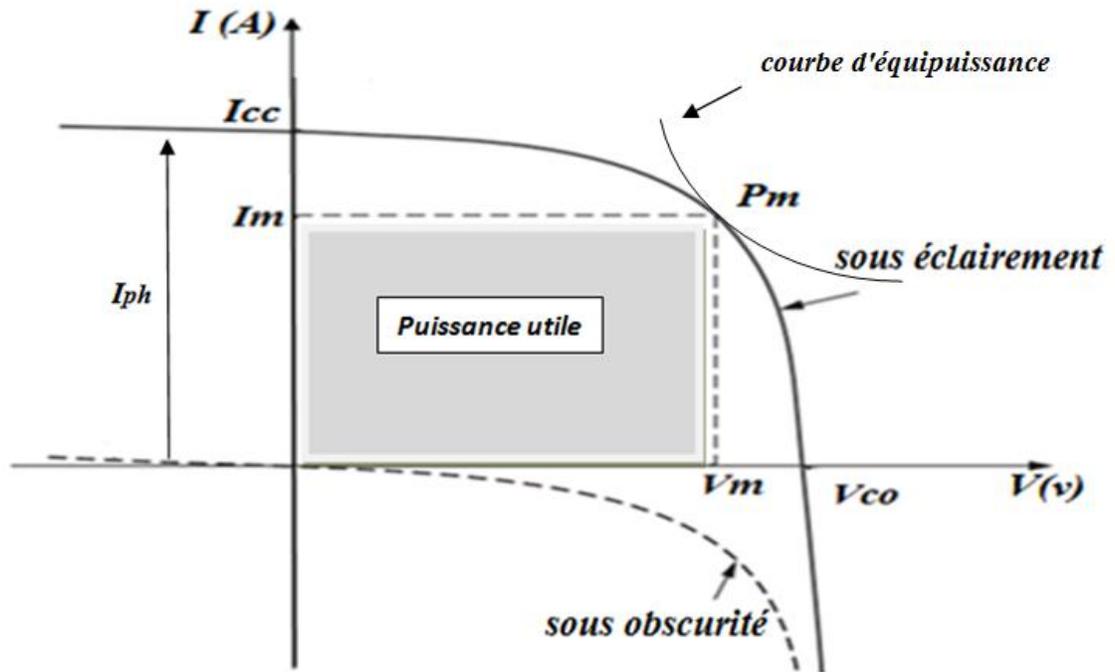
$I_d$  Courant directe (A)

$I_{sh}$  Courant de la résistance shunt (A)

$I_s$  Courant de saturation (A)

$K$	Constante de Boltzmann (J/K)
$n$	Facteur d'idéalité
$q$	Charge élémentaire (C)
$R_s$	Résistance série ( $\Omega$ )
$R_{sh}$	Résistance shunt ( $\Omega$ )
$T$	Température (K)

La représentation graphique de cette caractéristique est schématisée sur la figure (1.6).



**Figure 1.6:** La caractéristique courant-tension de la cellule PV.

Si on place une charge non nulle et non infinie aux bornes de la cellule PV sous éclairage, cette dernière fonctionne dans le cas intermédiaire entre le court-circuit (générateur de courant), et le circuit ouvert (générateur de tension). Le point de fonctionnement optimal de la cellule est celui qui donne une puissance maximale; c'est-à-dire un courant et une tension maximums.

### 1.3.4. Les grandeurs caractéristiques d'une cellule PV

#### 1.3.4.1. Le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )

C'est le courant dans le circuit quand la charge est nulle. Il peut être réalisé en reliant les bornes positives et négatives par le fil de cuivre. En pratique  $I_{cc} = I_{ph}$ . Il varie linéairement en fonction de l'éclairement (figure 1.7) [8].

#### 1.3.4.2. Tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ )

C'est la tension qu'il faudrait appliquer à la diode dans le sens passant pour générer un courant égal au photocourant. Elle est obtenue en plaçant ( $I = 0$ ) dans l'expression du courant (1.2).

$$V_{co} = \frac{nkT}{q} \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (1.3)$$

Donc la variation de  $V_{co}$  est logarithmique en fonction de l'éclairement (figure 1.7) [8].

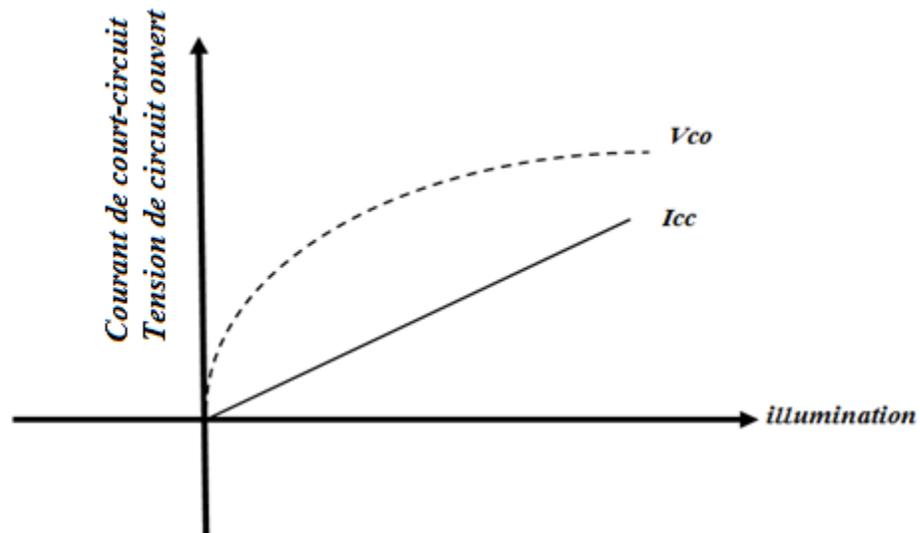


Figure 1.7: Densité de courant de court-circuit et tension de circuit ouvert en fonction de l'illumination.

### 1.3.4.3. Facteur de forme (FF)

Le facteur de forme FF indique le degré d'idéalité de la caractéristique courant-tension, donc c'est le rapport entre la puissance de sortie maximale  $P_m = V_m I_m$  et la puissance idéale  $V_{co} I_{cc}$  [8].

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} I_{cc}} = \frac{V_m I_m}{V_{co} I_{cc}} \quad (1.4)$$

### 1.3.4.4: Le rendement de la conversion PV

Le rendement de la conversion est la propriété la plus importante d'une cellule PV. Il est défini comme rapport entre la puissance générée par la cellule et la puissance radiative incidente sur la surface de cette dernière [8].

$$\eta = \frac{P_m}{P_i} = \frac{FF \cdot V_{co} I_{cc}}{p_i} \quad (1.5)$$

$P_i$  est la puissance radiative incidente.

## 1.3.5. L'influence des différents paramètres sur la caractéristique $I(V)$

### 1.3.5.1. Influence de l'éclairement

L'énergie électrique produite par une cellule dépend fortement de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. La figure (1.8) représente la caractéristique  $I(V)$  d'une cellule en fonction de l'éclairement, à une température constante. Le courant de court-circuit est directement proportionnel au rayonnement, contrairement à la tension de circuit ouvert qui ne varie que très peu en fonction de l'éclairement [4].

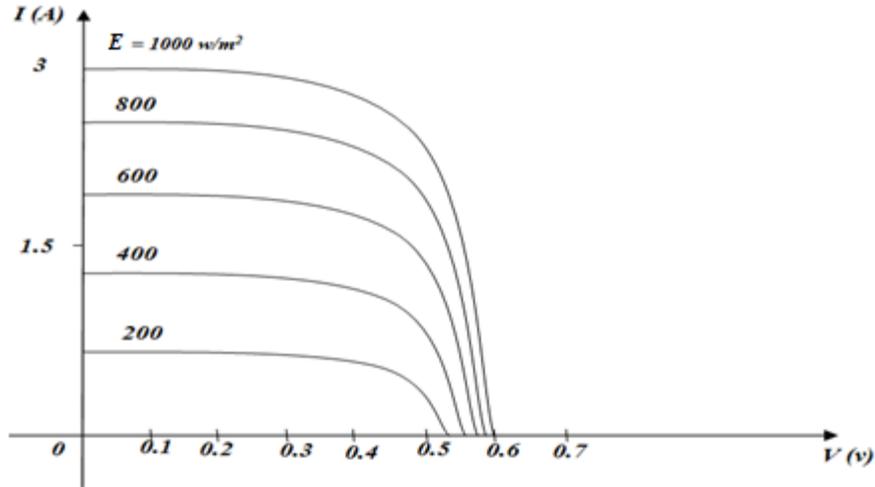


Figure 1.8: La caractéristique  $I(V)$  sous différents éclairagements [12].

### 1.3.5.2. Influence de la température

L'augmentation de la température entraîne une diminution de l'énergie de la bande interdite  $E_g$ , ce qui provoque:

- une augmentation du courant de saturation, ce qui conduit à une augmentation notable du courant direct de diode et à une diminution rapide de la tension de circuit ouvert  $-0.4\%/^{\circ}\text{C}$ .
- une absorption des photons moins énergétiques, ce qui conduit à une très légère augmentation du courant de court-circuit  $+0.1\%/^{\circ}\text{C}$ .

Un fonctionnement à la température la plus basse possible permet l'obtention d'un meilleur rendement de conversion. La perte en rendement est environ  $-0.45\%/^{\circ}\text{C}$  [4].

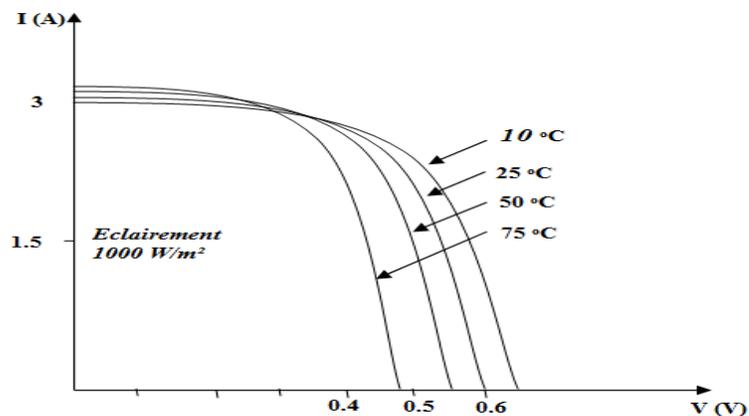


Figure 1.9: La caractéristique  $I(V)$  sous différentes températures [12].

### 1.3.5.3. Influence des résistances série et shunt

La résistance série caractérise les pertes de tension dans le semi-conducteur et à travers les contacts ohmiques de la cellule.

La résistance shunt caractérise les fuites de courant. Elle est provoquée par les défauts du cristal et les impuretés étrangères dans la région de la jonction PN.

L'influence de ces résistances parasites sur la caractéristique  $I(V)$  de la cellule PV sont représentée sur les figures (1.10), (1.11) pour un éclairement  $E=1000 \text{ (W/m}^2\text{)}$  et une température  $T=25 \text{ (}^\circ\text{C)}$ .

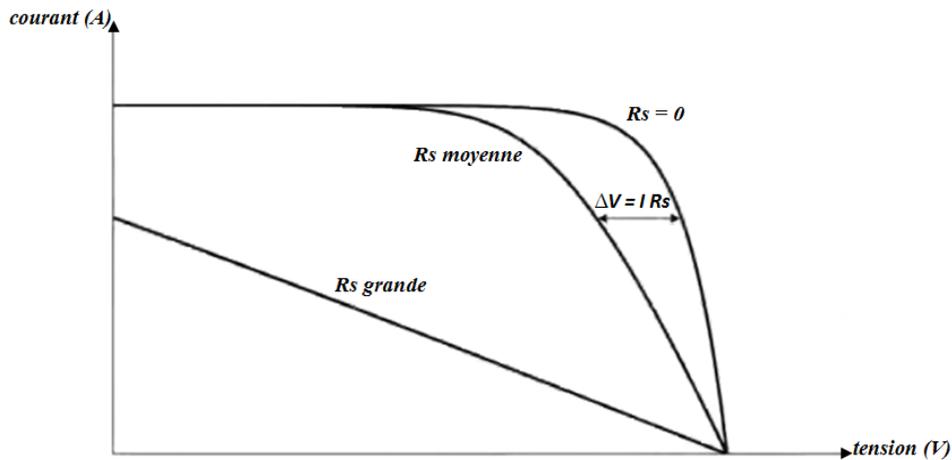


Figure 1.10: L'influence de la résistance série sur la caractéristique  $I(V)$ .

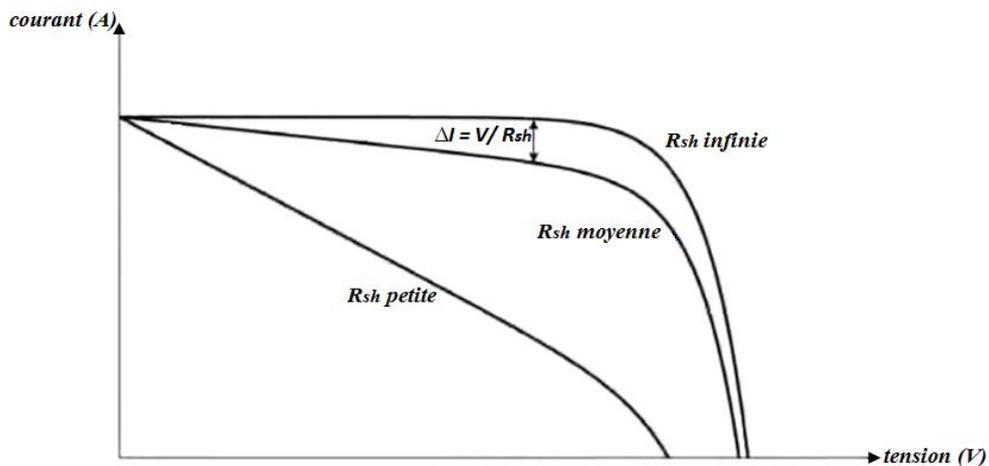


Figure 1.11: L'influence de la résistance shunt sur la caractéristique  $I(V)$ .

L'influence de la résistance série  $R_s$  s'exprime par une variation de la pente  $I(V)$  dans la zone où la cellule PV est assimilable à un générateur de tension. Elle ne modifie pas la tension de circuit ouvert, mais lorsqu'elle est anormalement élevée, elle peut diminuer la valeur du courant de court-circuit. Par contre, l'impact de la résistance shunt  $R_{sh}$  se manifeste surtout au sein de la région où la cellule PV se comporte comme un générateur de courant par une modification de la pente. Une résistance shunt trop faible aura un impact sur la tension de circuit ouvert de la photopile; à cause de cela une photopile dont la résistance shunt est trop faible ne donnera plus de tension sous faible éclairement [9 - 10].

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

Les figures (1.12) et (1.13) représentent la caractéristique  $I(V)$  pour des différentes valeurs de facteur d'idéalité et de courant de saturation respectivement.

Le facteur d'idéalité  $n$  résulte de la recombinaison accrue dans la jonction. On remarque dans la figure (1.12) que l'augmentation de  $n$  provoque une augmentation de la tension de circuit ouvert, par contre le courant de court-circuit reste constant.

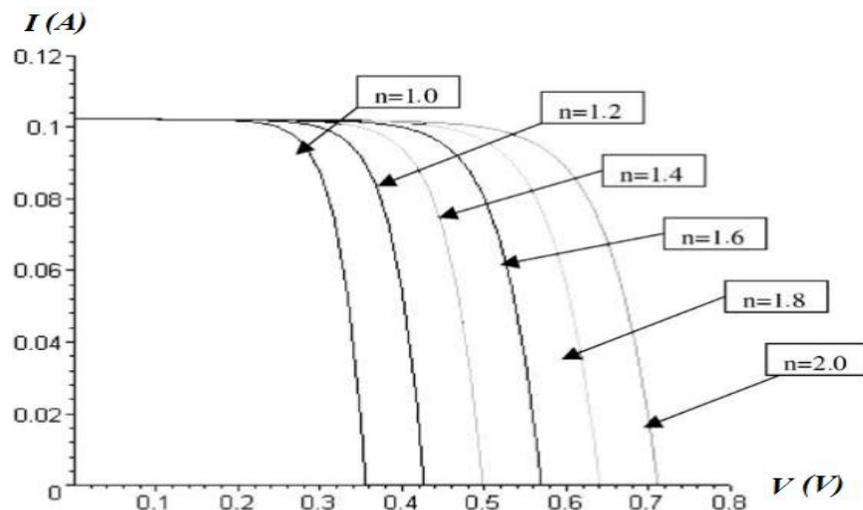


Figure 1.12: L'effet de facteur d'idéalité sur la caractéristique  $I(V)$  [11].

Dans la figure (1.13), l'augmentation du courant de saturation, conduit à une diminution rapide de la tension en circuit ouvert.

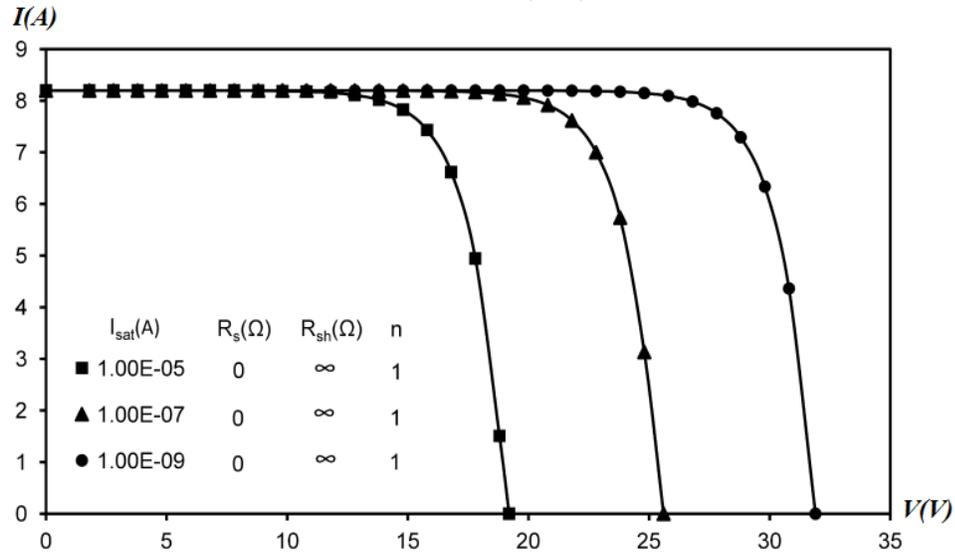


Figure 1.13: L'effet de courant de saturation sur la caractéristique  $I(V)$  [7].

#### 1.4. Les modules photovoltaïques

Le module PV est par définition un ensemble de cellules assemblées pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition à la lumière. La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur électrique de très faible puissance (quelques watts). Les cellules sont généralement mises en série pour générer une tension utilisable. Afin d'obtenir des puissances de quelques KW sous une tension convenable, il faut associer les modules en panneaux.

Pour un module au silicium cristallin utilisé pour une application en 12 V, il faut assembler en série 36 cellules (en 4 rangés de 9), valeur extrêmement courante concernant les panneaux commercialisés [4 - 12].

##### 1.4.1. Association en série

La caractéristique courant-tension d'une cellule reste valable pour un groupement de cellules. Le courant généré par  $N_s$  générateurs en série étant le même dans toute la branche, on prendra soin de ne connecter en série que des cellules identiques ayant même densité de courant. La Figure (1.14) présente la courbe  $I(V)$  du groupement ainsi

réalisé. La caractéristique résultante est obtenue en multipliant point par point et pour un même courant la tension individuelle  $V_i$  par  $N_s$  [4 - 12].

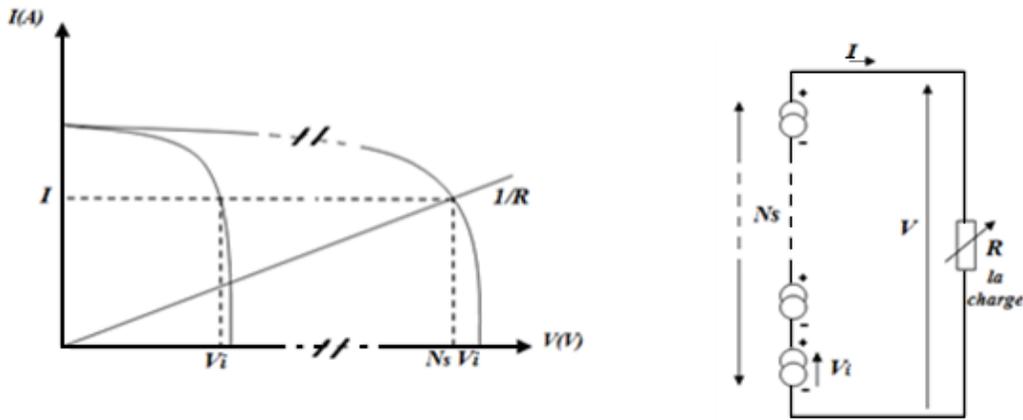


Figure 1.14: Groupement de cellules en série.

#### 1.4.2. Association en parallèle

Pour augmenter le courant fournit à une charge on connecte les cellules en parallèle. La figure (1.15) présente la courbe  $I(V)$  d'un groupement de  $N_p$  cellules en parallèle. On ne monte que des cellules ayons la même tension de fonctionnement, les courants s'ajoutent, la nouvelle courbe est obtenue en multipliant point par point et pour chaque valeur de tension, le courant  $I_i$  de la cellule élémentaire par  $N_p$  [4 - 12].

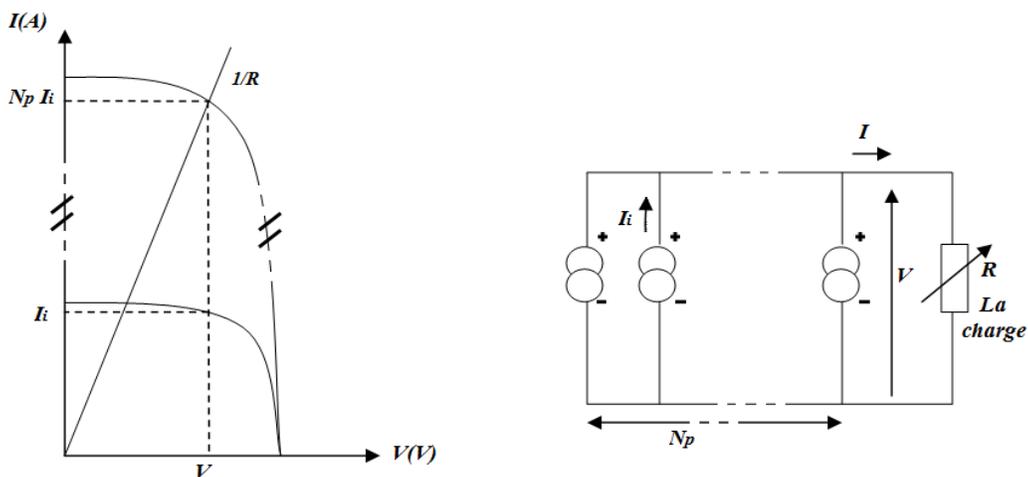
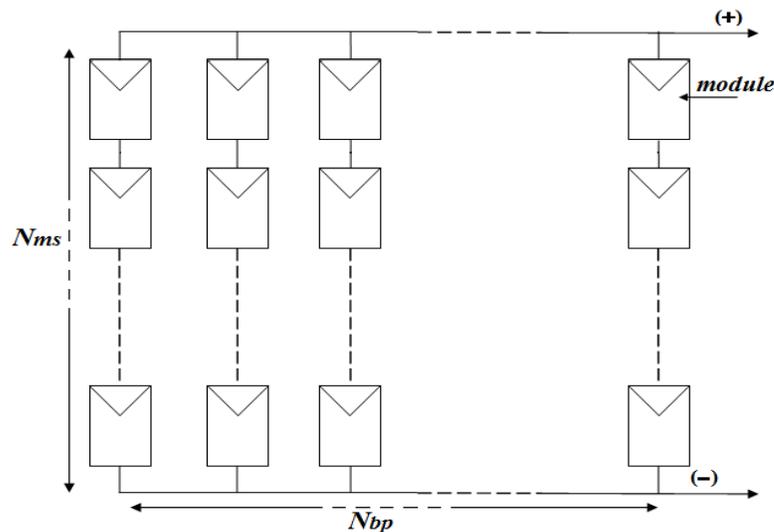


Figure 1.15: Groupement de cellules en parallèle.

### 1.4.3. Association en série parallèle

Pour élever la tension, les cellules sont associées généralement en séries sous forme de modules, ces modules sont ensuite associés en réseau série-parallèle de façon à obtenir la tension et le courant désirés. Cette association doit être réalisée en respectant des critères précis, en raison des déséquilibres apparaissant dans un réseau de modules en fonctionnement. La figure (1.16) présente un tel groupement de  $N_{ms}$  modules en série dans une branche, et  $N_{bp}$  branches en parallèle. Si  $P_m$  est la puissance crête disponible sur un module, la caractéristique électrique globale courant-tension du panneau PV sera  $N_{ms} \cdot N_{bp} \cdot p_m$  dans le cas idéal, où tous les modules ont des caractéristiques électriques identiques. L'influence de l'éclairement et de la température sur le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert reste la même que pour la cellule élémentaire [4 - 12].

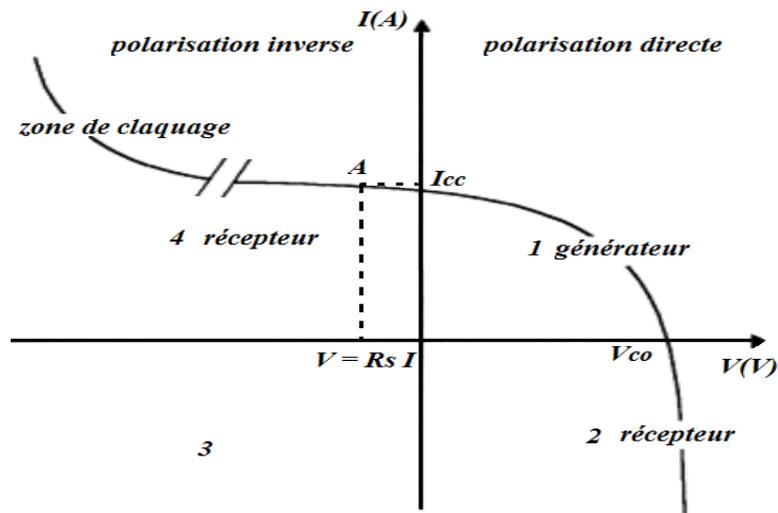


*Figure 1.16: Groupement de modules en série- parallèle.*

### 1.4.4. Déséquilibres dans les groupements de modules

En pratique, sous l'effet d'ombrage, les modules dans un panneau PV sont soumis à des éclairagements et à des températures différents, ceci engendre des caractéristiques électriques des modules qui ne sont pas identiques. Ce qui implique un déséquilibre dans le groupement des modules.

La Figure (1.17) montre la caractéristique complète d'une cellule sous illumination. Le quadrant 1 ( $I > 0, V > 0$ ) correspond au fonctionnement en générateur. Si la tension aux bornes de la cellule est en raison du circuit extérieur, amenée à dépasser  $V_{co}$  (quadrant 2), la cellule travaille alors en récepteur de très faible impédance, comme une diode polarisée en direct. Si c'est le courant qui traverse la cellule qui, en raison du circuit extérieur, est amené à dépasser la valeur du courant de court-circuit, la cellule va à nouveau travailler en récepteur, mais cette fois de très forte impédance, comme une diode polarisée en inverse. On notera dans ce cas, qu'en raison de la résistance série  $R_s$ , la jonction n'est polarisée en inverse qu'à partir du point A pour lequel  $V = -R_s I$ .



**Figure 1.17:** La caractéristique  $I(V)$  d'une cellule PV éclairée et polarisée par une source extérieure.

#### 1.4.5. Protection par diode

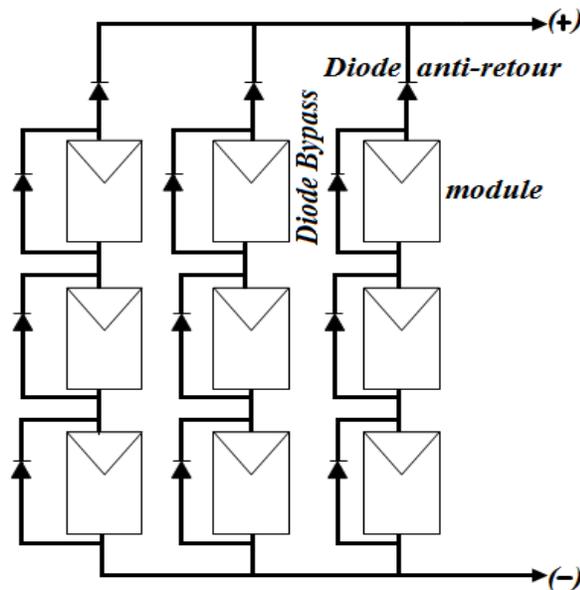
Une cellule occultée dans une branche de  $N_s$  cellules en séries est polarisée en inverse dans le cas de circuit ouvert, par une tension  $V = N_s V_i$  ( $V_i$ : la tension d'une seule cellule) qui peut dépasser la tension de claquage.

Si l'on monte une diode en parallèle tête-bêche (Figure 1.18), sur un module, la cellule occultée ne peut alors être polarisée que par un nombre bien défini de cellules. En cas de déséquilibre, il faut bien sûr que la diode puisse laisser passer le courant des modules qui se trouvent dans la branche. En fonctionnement normal la diode de

protection doit pouvoir être polarisée avec une tension inverse égale à la tension de travail du module. Moyennant ces précautions dans le choix de la diode de "by-pass", on peut être assuré que les modules ainsi protégés ne subiront pas de "hot-spot" (point chaud) à cause d'un déséquilibre d'éclairement ou de réseau.

Pa contre, dans le cas de  $N_p$  branche en parallèles et pour éviter qu'une branche de cellules connectées en série ne reçoive de l'énergie d'autres branches connectées en parallèle, il faut installer dans chacune des branches des diodes anti retour de puissance adéquate en sortie de chaque série de module, comme indiqué dans la Figure (1.18).

En fonctionnement normal, ces diodes séries devront induire une chute de tension dans la branche [4 - 12].



*Figure 1.18: Protection par diodes séries et parallèles dans un groupement de modules.*

## 1.5. Les filières technologiques du PV

### 1.5.1. La filière silicium

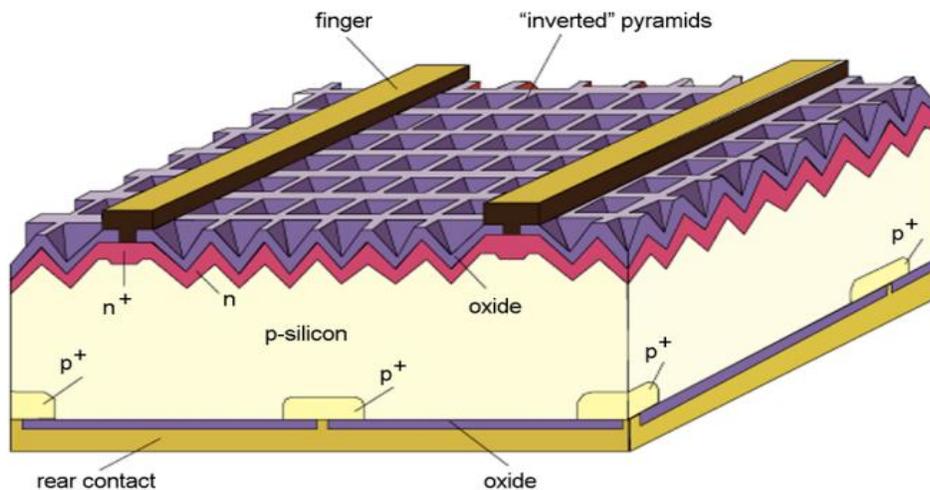
La filière silicium représente actuellement 99% de la production photovoltaïque. Il est l'un des éléments les plus abondants sur Terre, parfaitement stable et non toxique. On trouve plusieurs technologies pour le photovoltaïque silicium ; d'une part les cellules

à base de silicium massif (monocristallin, polycristallin, rubans) dites de « première génération » et qui constituent à l'heure actuelle l'essentiel des modules photovoltaïques commercialisés et d'autre part la technologie à base de silicium en couche mince.

### 1.5.1.1. Silicium monocristallin

Le silicium monocristallin est plus cher que le polycristallin mais permet d'obtenir des rendements de conversion record en laboratoire, de l'ordre de 25 % pour des cellules de 4 cm<sup>2</sup> (Université de New South Wales, Australie) (figure 1.19) [13]. Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie, Il existe deux méthodes par lesquelles il est possible d'obtenir du silicium monocristallin de qualité microélectronique. Les siliciums obtenus sont appelés Cz (méthode Czochralski) et FZ (Floating Zone) [14].

L'inconvénient de cette technologie est le rendement faible obtenu sous un faible éclairage.



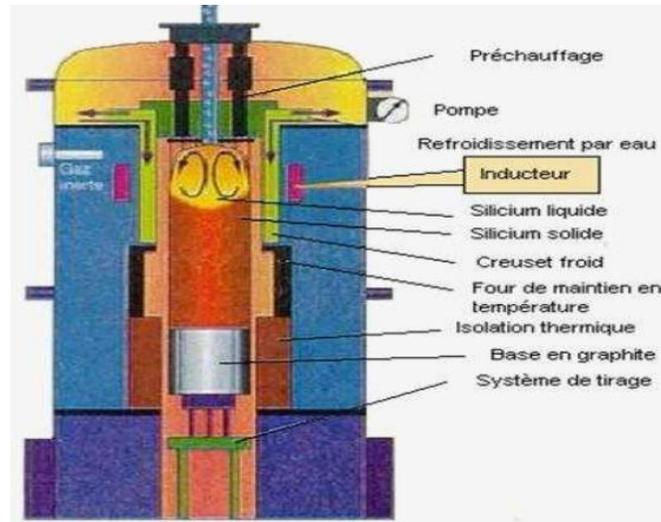
*Figure 1.19: Schéma de la cellule PERC de haut rendement [15].*

### 1.5.1.2. Silicium polycristallin

Le silicium polycristallin est produit par des techniques de croissance qui assurent la formation d'une structure colonnaire avec de gros cristaux afin de limiter les effets néfastes des joints de grains. Cette dernière est en partie constituée par des rebuts de l'industrie de la microélectronique, c'est-à-dire le silicium monocristallin Cz ou FZ. Les joints de grains dans le silicium polycristallin gênent l'écoulement des électrons et

réduisent le rendement de puissance de la cellule. Les rendements de conversion industriels sont actuellement de 16 à 17 % pour des grandes plaquettes de  $1000 \text{ cm}^2$  [16]. Il s'agit de la technologie la plus représentée sur le marché du photovoltaïque car elle allie à la fois des rendements de conversion élevés avec un coût de production faible par rapport à la filière silicium monocristallin.

Le silicium polycristallin est obtenu par coulage en lingotière dans laquelle s'opère un refroidissement lent, de l'ordre de quelques dizaines d'heures; voir figure (1.20). On obtient au final des lingots cubique. Cette forme est recherchée afin d'optimiser l'espace lorsque les plaquettes (obtenues par découpage en lamelles des lingots de silicium) seront placées en série sur un module photovoltaïque.



*Figure 1.20: Four de silicium polycristallin [17]*

### 1.5.1.3. Silicium en couches minces nanocristallin et amorphe

Ce sont les cellules qui équipent les petits dispositifs électroniques (calculatrices, montres, ...). Le silicium amorphe présente plusieurs avantages, en particulier son fonctionnement possible en intérieur sous faible éclairage contrairement au silicium cristallin, son fort coefficient d'absorption, sa faible consommation énergétique durant le cycle de production et son aptitude à être déposé sur des grandes surfaces. Cependant, les cellules photovoltaïques à base de silicium amorphe présentent de faibles rendements

(inférieurs à 10 % au niveau industriel) et une diminution assez rapide de leurs performances au cours du temps. L'avenir des couches de silicium amorphe passera probablement, par un mariage avec le silicium cristallin.

#### 1.5.1.4. Silicium en ruban

Les techniques de production de silicium cristallin en rubans ont été très séduisantes sur le plan technologique. La méthode a été expérimentée pour produire des plaquettes directement à partir du silicium fondu; la plus connue est basée sur l'effet de capillarité entre deux lèvres de carbone. Ces rubans ont connu de nombreux développements au niveau de la recherche. Les meilleurs rendements obtenus sont néanmoins de l'ordre de 15 % [18].

#### 1.5.2. La filières CIS et CdTe (les chalcogénures)

Les recherches se sont aussi portées vers d'autres matériaux que le silicium, mieux adapté à une utilisation en couches minces tout en délivrant de hauts rendements. Deux filières se sont imposées progressivement, l'une base de tellure de cadmium (CdTe), et l'autre sur les alliages  $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$  (Cuivre indium/gallium sélénium noté CIGS) appelée filière CIS.

La valeur de 1,45 eV de la bande d'énergie interdite du CdTe est idéalement adaptée au spectre solaire. En outre, son très grand coefficient d'absorption fait que la quasi-totalité du spectre est absorbé sur une profondeur de 2  $\mu\text{m}$  [19]. Les résultats de rendement de conversion sont près de 11 % sur une surface de 4900  $\text{cm}^2$  par *Solarex* [16]. Cependant, les problèmes d'environnement associés à l'utilisation du Cadmium freinent les tentatives de développement de cette filière.

Les cellules à base de composés chalcopyrites quaternaires de type  $\text{Cu}(\text{Ga}, \text{In})(\text{Se}, \text{S})_2$  ont récemment atteint des rendements de conversion record de 19.4% en laboratoire [16].

### 1.5.3. Les cellules III-V multijonctions

Des améliorations peuvent être apportées en empilant les cellules les unes sur les autres. Il s'agit d'absorber la plus grande partie du spectre solaire tout en limitant les pertes par thermalisation. Ainsi, la filière des dispositifs multijonctions, dite de « troisième génération » permet d'accéder aux rendements records dans le domaine de l'énergie PV, mais se cantonne pour le moment aux applications spatiales. Les rendements les plus élevés ont été obtenus avec des structures basées sur des empilements de composés III-V en épitaxie. Ces dispositifs permettent d'atteindre un rendement de 32 % avec le système triple-jonction GaInP/GaAs/Ge sous un spectre standard, et plus de 40 % sous concentration [16].

### 1.5.4. La filière organique

Cette nouvelle technologie permet la production des cellules solaires organiques légères, fines, flexibles, sur de grandes surfaces, pour des coûts de productions très bas grâce aux techniques d'impression grande-surface bien connues. La société *Konarka Technologies* basée dans le Massachusetts, leader industriel de cette technologie, espère rendre l'utilisation de l'énergie solaire plus accessible et plus simple d'emploi. *Konarka* a déclaré qu'ils avaient obtenu un rendement de 6%, contre 15% à 20% pour les cellules solaires en silicium. Même avec un rendement nettement inférieur, ces premiers produits montrent l'intérêt de la technologie photovoltaïque à base de polymères et la nécessité d'augmenter les efforts de recherche dans ce domaine [20].

## 1.6. Conclusion

Ce chapitre servira de base théorique pour la suite de l'étude. Il nous donne quelques notions sur le rayonnement solaire, et les différents paramètres influant sur les performances de la cellule photovoltaïque, tel que la température, les résistances parasites et l'illumination.

**Chapitre II**  
**Effet de l'illumination sur les paramètres**  
**caractéristiques des cellules solaires au**  
**silicium polycristallin**

## 2.1. Introduction

Les performances d'un dispositif photovoltaïque dépendent fortement des conditions d'illumination et de température.

Ces performances peuvent être améliorées par optimisation des paramètres physiques internes pour assurer à la fois un courant de court-circuit, un facteur de forme et une tension au circuit ouvert élevés.

Pour ce but nous avons étudiée l'effet de l'illumination sur les paramètres caractéristiques, à savoir le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ), la tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ), le facteur de forme (FF) et le rendement ( $\eta$ ).

Dans la partie expérimentale on travaille sur une cellule solaire au silicium polycristallin dans une gamme d'illumination varie de 160 jusqu'à 1000 ( $W/m^2$ ) et sous une température constante ( $25^\circ C$ ).

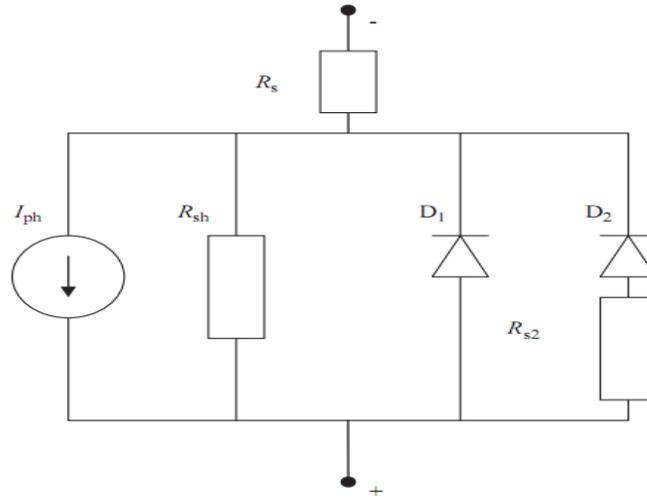
## 2.2. Étude bibliographique

Dans cette partie on résume les travaux les plus importants déjà publiés sur ce sujet.

### 2.2.1. Kassis et Saad (2010) [21]

Des caractéristiques courant-tension d'une cellule solaire au silicium polycristallin mesuré sous plusieurs niveaux d'illumination sont analysées. L'analyse est conduite en considérant un circuit équivalent de deux-diodes modifié (figure 2.1).

L'analyse a été faite sur une cellule au silicium polycristallin d'aire ( $150*150$ )  $mm^2$  et d'épaisseur  $300 \mu m$ .



**Figure 2.1** Circuit équivalent à deux diodes modifiées pour une cellule solaire au silicium polycristallin [21].

Les résultats obtenus sont schématisés sur le tableau suivant :

$E(W/m^2)$	$R_{sh}(\Omega)$	$R_s(\Omega)$	$R_{s2}(\Omega)$	$n_1$	$n_2$	$I_{s1}(nA)$	$I_{s2}(\mu A)$	$I_{ph}(mA)$
200	471.9	0.173	1.386	1.361	3.096	6.473	186.6	39.49
145	510.6	0.170	1.462	1.376	3.065	7.695	180.6	28.59
98.4	481.8	0.168	1.493	1.384	3.034	8.370	171.6	19.42
62	500.5	0.167	1.582	1.395	2.999	9.479	166	12.25
34.7	501.6	0.167	1.603	1.340	2.975	9.879	159.2	6.844
16.6	516.4	0.166	1.626	1.405	2.968	10.49	157.2	3.283
5.8	530.5	0.166	1.643	1.409	2.958	10.90	154	1.144
1	543.5	0.166	1.652	1.410	2.949	11.07	151.2	0.205
0	568.3	0.165	1.643	1.411	2.949	11.17	149.1	0

**Tableau 2.1:** Les paramètres caractéristiques d'une cellule au silicium polycristallin pour différents niveaux d'illumination.

Pour les très basses illuminations, deux mécanismes de transport sont considérés. La recombinaison dans la région cristalline et la recombinaison dans la région des joints de grain, donc l'effet des joints de grain ne peut être pris en considération pour le modèle à une seule diode. Le modèle à deux-diodes modifié a été développé pour nous donner une idée sur l'effet des joints de grain sur les performances de la cellule polycristalline à très basse illumination. Donc ce travail et notre travail sont complémentaires.

### 2.2.2. Bayhan et Bayhan (2011) [22]

Ce travail est scindé en deux parties:

La première partie de ce travail décrit une approche simple pour la détermination du facteur d'idéalité sous illumination.

La deuxième décrit la dépendance du facteur d'idéalité et du courant de saturation avec l'intensité de la lumière pour les différentes illuminations.

L'étude a été faite sur une cellule n-ZnO/n-CdS/p-Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>, dont l'aire est de 0.47cm<sup>2</sup>, sous la température ambiante et une gamme d'illumination variant entre 0.01 et 100 (mW/cm<sup>2</sup>). Elle est modélisée par le circuit à deux diodes.

Les résultats obtenus sont schématisés sur la figure (2.2), avec  $j_0 = j_{01} + j_{02}$  (la somme des courants de saturation des deux diodes) et  $n = n_1 + n_2$  (la somme des facteurs d'idéalité des deux diodes).

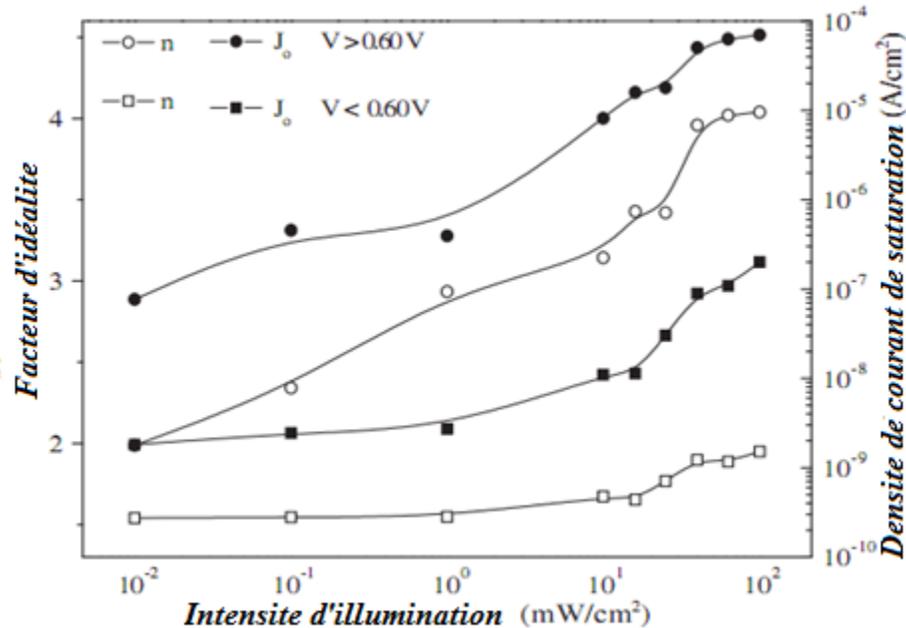


Figure 2.2: La dépendance du facteur d'idéalité et du courant de saturation avec l'illumination [22].

Pour les valeurs de faibles intensités ( $< 1 \text{ mW/cm}^2$ ),  $j_0$  et  $n$  restent presque invariant.

Il est clair que pour  $V > 0.6$  la valeur de  $n$  augmente d'environ 2 jusqu'à 4, quand l'intensité d'illumination augmente de 1 à 1000 ( $\text{W/m}^2$ ). La forte dépendance de  $n$  et de  $J_0$  avec l'intensité d'illumination indique que l'illumination active les états d'interfaces de l'hétérojonction, ce qui provoque une recombinaison très élevée [22].

Dans le tableau suivant, on résume les résultats obtenus pour la tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ), la densité du courant de court-circuit ( $j_{cc}$ ), le facteur de forme (FF) et le rendement ( $\eta$ ) en fonction de l'illumination.

<b>E (<math>\text{mW/cm}^2</math>)</b>	<b><math>V_{co}</math> (V)</b>	<b><math>J_{cc}</math> (<math>\text{mW/cm}^2</math>)</b>	<b>FF</b>	<b><math>\eta</math> (%)</b>
0.01	0.54	2.227	76.917	0.945
0.1	0.56	2.902	74.406	1.236
1.0	0.56	3.795	75.758	1.645
10	0.58	7.968	74.343	3.511
16	0.58	9.768	75.317	4.360
25	0.58	12.536	74.618	5.544
40	0.60	15.963	71.118	6.961
63	0.60	21.468	71.409	9.400
100	0.62	30.042	68.382	13.013

**Tableau 2.2: Les performances d'une cellule solaire (CIGS) en fonction de l'illumination.**

La conclusion principale de ce travail est que le mécanisme principal qui contrôle le transport du courant en ce type de cellule est la recombinaison d'interface.

### 2.2.3. Khan et al. (2010) [23]

L'effet de l'intensité d'illumination sur les paramètres caractéristiques d'une cellule solaire à base de silicium monocristallin a été étudié et basé sur le modèle à une diode. Les variations des pentes de la courbe  $I(V)$  au niveau du point  $I_{cc}$  et  $V_{co}$  ont été appliquées pour déterminer les paramètres de la cellule, à savoir la résistance série  $R_s$ , la résistance shunt  $R_{sh}$ , le facteur d'idéalité  $n$  et le courant de saturation  $I_s$ . La dépendance des paramètres caractéristiques a été étudiée pour une assez large gamme d'illumination 150-1800 ( $W/m^2$ ), avec une masse d'air AM1.5, et une température  $T = 25$  °C. Cette gamme a été divisée en un nombre de gammes de faible intensité pour la mesure des pentes de la courbe  $I-V$  pour les deux cas de court-circuit et de circuit ouvert.

Les mesures de ce travail ont été faites sur une cellule solaire monocristalline de silicium (c-Si) avec  $8\text{ cm}^2$  de surface et  $300\text{ }\mu\text{m}$  d'épaisseur. Les variations des différents paramètres avec l'intensité d'illumination sont schématisées sur les figures (2.3) et (2.4).

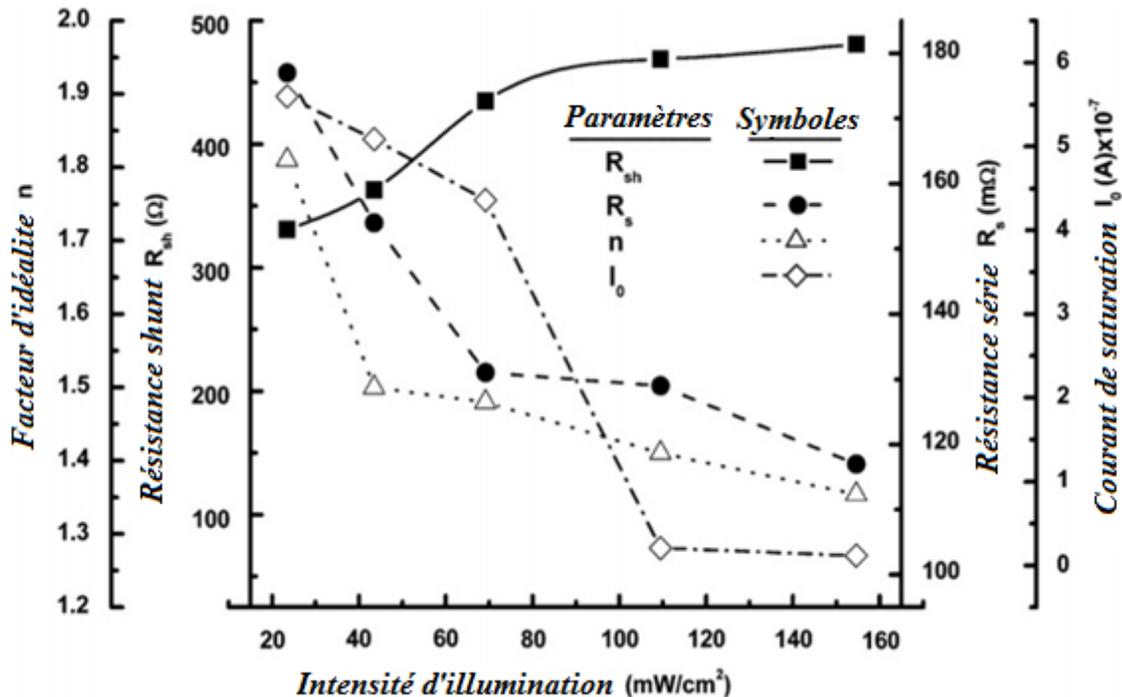


Figure 2.3:  $R_{sh}$ ,  $R_s$ ,  $n$  et  $I_s$  en fonction de l'intensité d'illumination [23].

La résistance shunt  $R_{sh}$  augmente légèrement avec l'intensité  $E$  pour des faibles valeurs ( $E < 900 \text{ W/m}^2$ ), et puis devient constante à des intensités plus élevées de l'illumination. Par contre, la résistance série  $R_s$ , le courant de saturation et le facteur d'idéalité diminuent rapidement avec  $E$ , mais le taux de diminution de chacun de ces paramètres devient plus petit à des valeurs supérieures de  $E$ .

Les valeurs théoriques de la tension en circuit ouvert  $V_{co}$ , le facteur de forme  $FF$  et le rendement  $\eta$  calculés, correspondent bien avec les valeurs expérimentales. Elles sont représentées dans la figure (2.4).

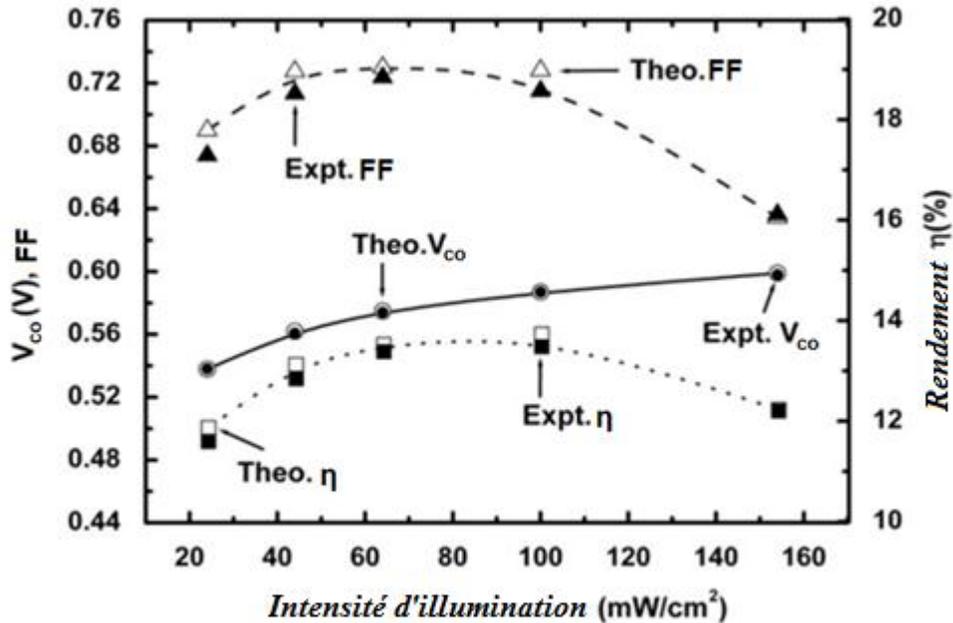
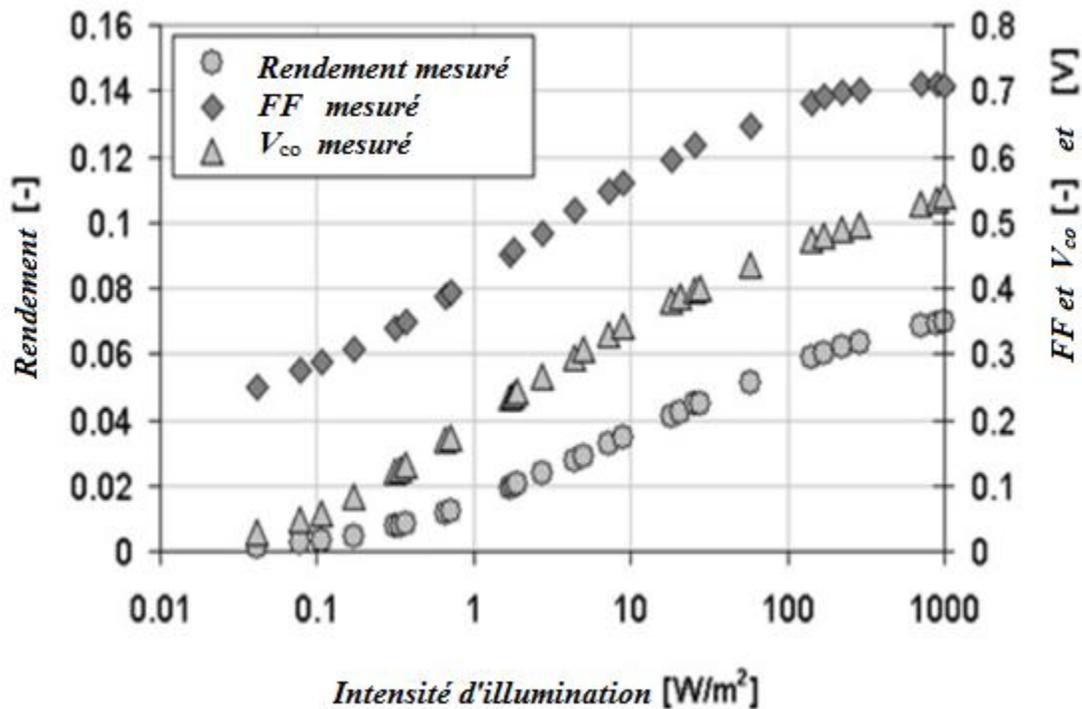


Figure 2.4:  $V_{co}$ ,  $FF$  et  $\eta$  en fonction de l'intensité d'illumination [23].

Ce travail est beaucoup plus descriptif, car il n'y a pas des détails sur les phénomènes physiques qui décrivent la variation des paramètres caractéristiques de la cellule en fonction de l'illumination.

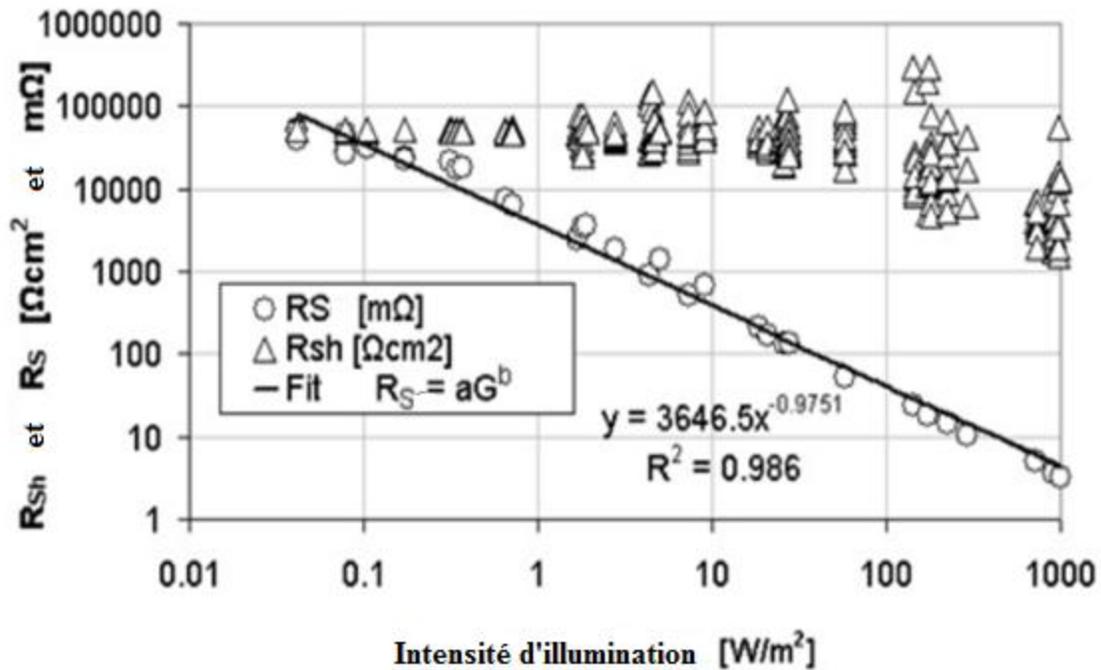
### 2.2.4. Reich et al. (2009) [24]

Dans ce travail, les caractéristiques  $I(V)$  ont été mesurées entre 3 et 1000 ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) à six niveaux d'illumination pour quarante-et-un cellules mono et polycristallin de huit fabricants industriels, et à vingt-neuf niveaux d'illumination pour une cellule au silicium polycristallin de 5 ( $\text{cm}^2$ ) de surface entre 0.04 et 1000 ( $\text{W}/\text{m}^2$ ). Les résultats obtenus pour cette dernière sont schématisés sur les figures (2.5) et (2.6).



*Figure 2.5: Variation de la tension de circuit ouvert, le facteur de forme et le rendement en fonction de l'illumination pour une cellule au silicium polycristallin [24].*

La tension en circuit ouvert et le rendement diminuent logarithmiquement lorsque l'intensité d'illumination diminue. Ils atteignent des valeurs très basses pour des intensités inférieures à 0.1 ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).



**Figure 2.6: Variation de la résistance série et de la résistance shunt en fonction de l'illumination pour une cellule au silicium polycristallin [24].**

La figure (2.6) montre que la résistance série diminue linéairement, par contre l'erreur de mesure de la résistance shunt à partir de la courbe I(V) est importante, pour les valeurs élevées d'illumination.

Sur la base de ces données expérimentales, la précision des expressions empiriques du facteur de forme, de la fonction empirique de la variation du rendement en fonction de l'illumination, du modèle à une diode et du modèle à deux diodes ont été évalués.

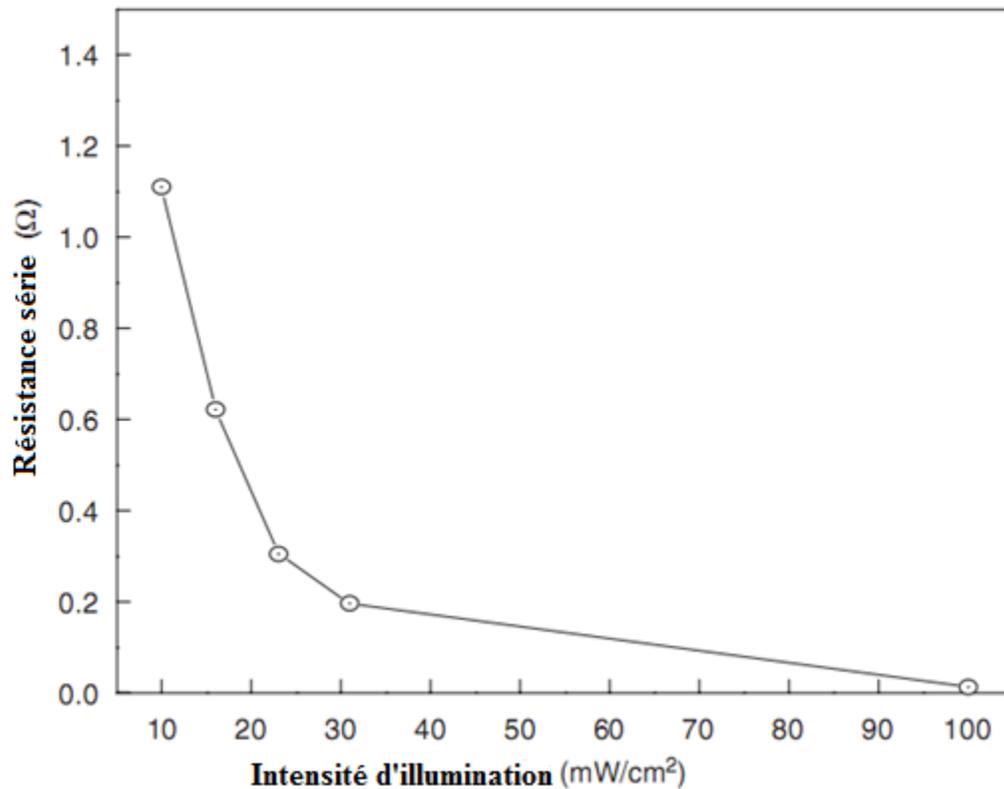
Les résultats obtenus montrent que les modèles à une diode et à deux diodes sont efficaces, et en particulier, le modèle à deux diodes pour des basses illuminations ( $E < 200 \text{ W/m}^2$ ).

Ce travail est d'une importance particulière pour les cellules solaires intégrées aux bâtiments (PIPV) et celles qui sont utilisés principalement à l'intérieur [24].

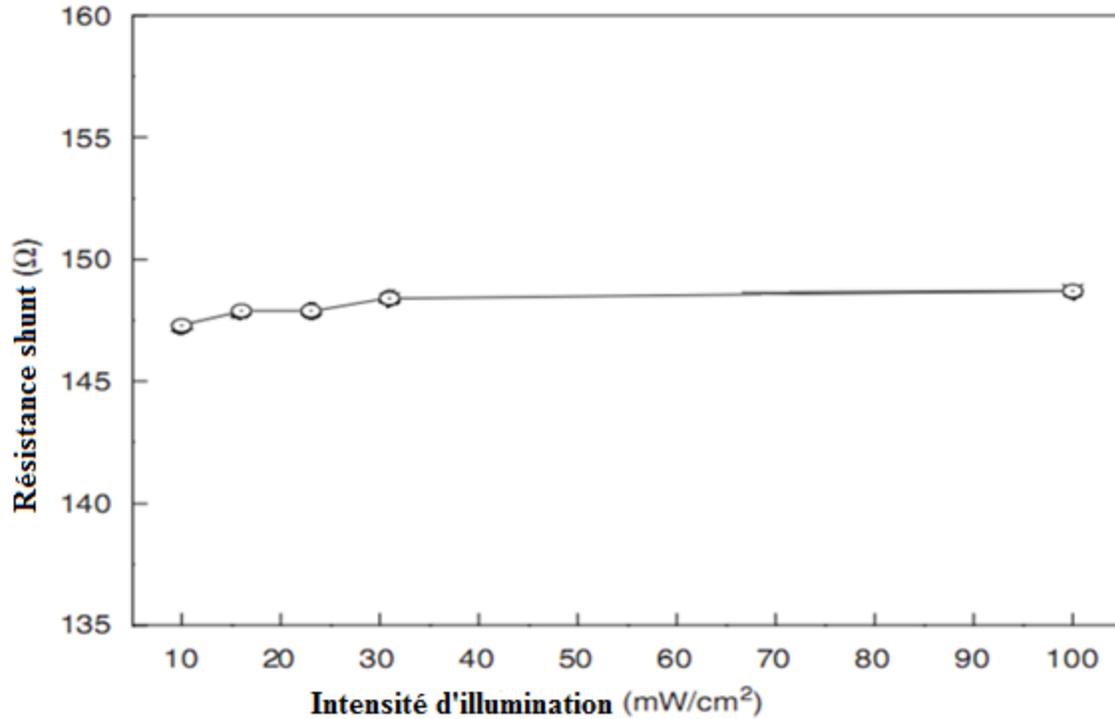
### 2.2.5. Priyanka et al. (2007) [25]

Il s'agit de la présentation d'une nouvelle méthode d'extraction des paramètres des cellules solaires, à savoir la résistance série et la résistance parallèle. La méthode est basée sur le modèle à une seule exponentielle. L'étude a été faite sur une cellule à base de silicium monocristallin, d'aire  $(10 \times 10)$  cm<sup>2</sup> et d'épaisseur 350 μm. Les mesures sont faites dans les conditions standards de température et d'illumination (STC).

Les principaux résultats obtenus sont présentés sur les figures (2.7) et (2.8) [25].



*Figure 2.7: Effet de l'illumination sur la résistance série d'une cellule solaire au silicium monocristallin [25].*



*Figure 2.8: Effet de l'illumination sur la résistance shunt d'une cellule solaire au silicium monocristallin [25].*

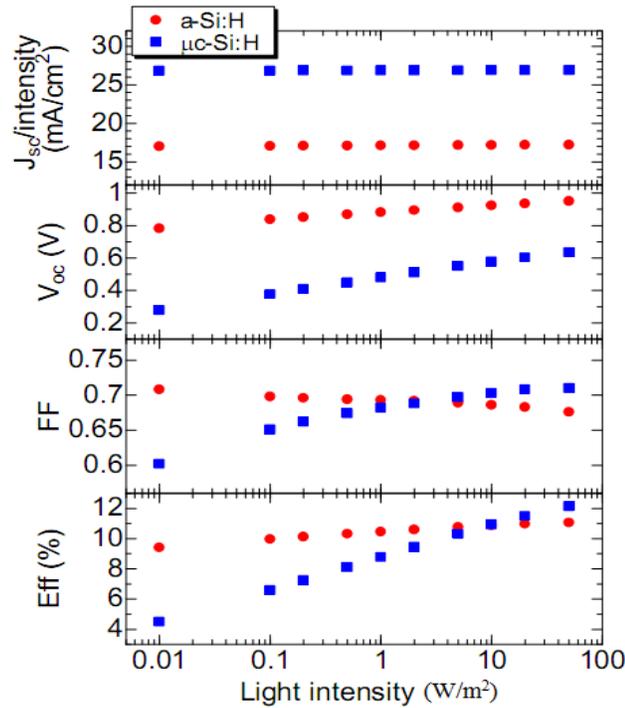
Ces résultats indiquent que  $R_{sh}$  est indépendante de l'intensité d'illumination mais  $R_s$  diminue lorsque l'intensité d'illumination augmente.

#### 2.2.6. Yunaz et al. (2009) [26]

Des études théoriques et expérimentales ont été réalisées pour explorer l'effet de l'intensité d'illumination sur les performances des cellules solaires au silicium à base de couches minces. L'étude théorique a été réalisée par le code AMPS-1D (Analysis of Microelectronic and Photonic Structures), et l'étude expérimentale a été faite sur les cellules solaire suivantes: a-Si:H (1.75 eV, 300 nm) et  $\mu$ c-Si:H (1.1 eV, 1.0  $\mu$ m). Les résultats obtenus sont schématisés sur la figure (2.9) [26].

Ces résultats montrent que la tension en circuit ouvert augmente logarithmiquement avec l'intensité de l'illumination, et le courant de court-circuit augmente légèrement pour les deux cellules. Par contre, le rendement et le facteur de

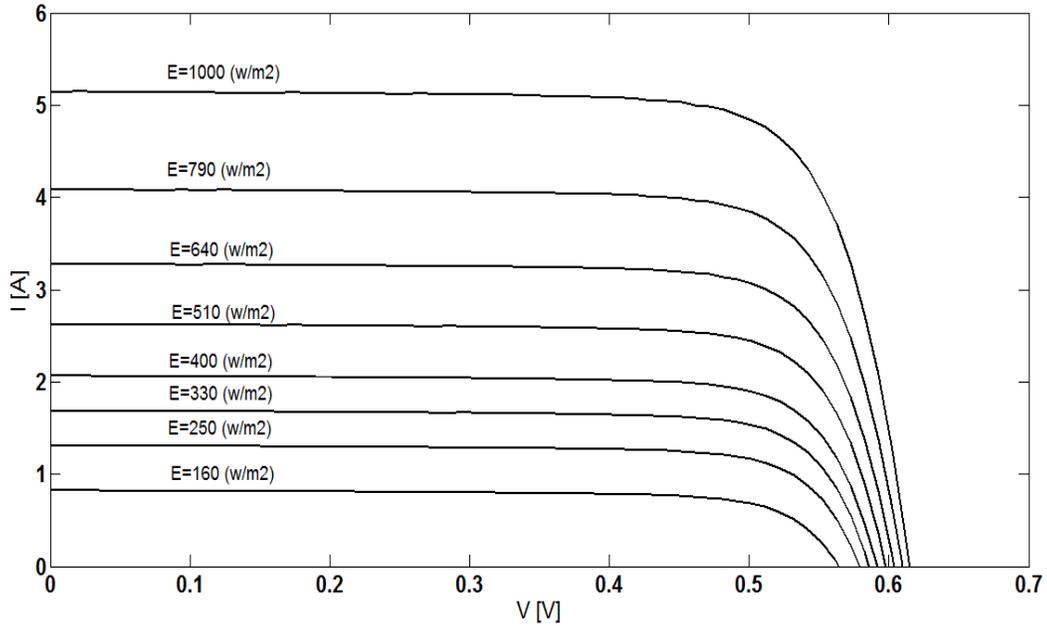
forme diminuent légèrement pour la cellule a-Si:H et augmentent légèrement pour la cellule  $\mu\text{c-Si:H}$ .



*Figure 2.9: Variation des performances de a-Si:H et  $\mu\text{c-Si:H}$  en fonction de l'illumination [26].*

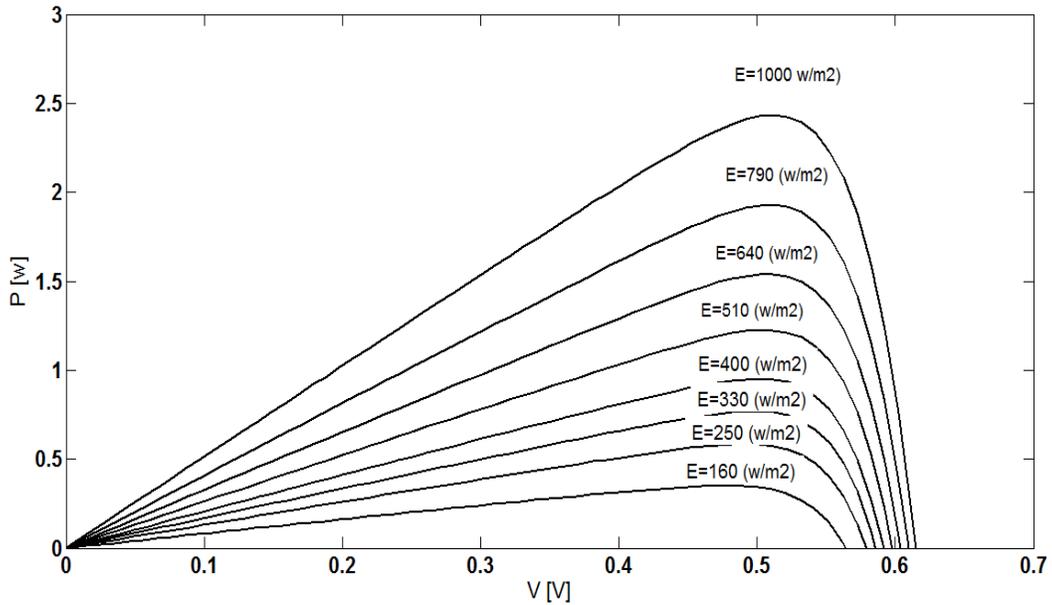
### 2.3. Effet de l'illumination sur la caractéristique I (V) de la cellule solaire au silicium polycristallin

La figure (2.10) montre des caractéristiques I(V) mesurées à différents niveaux d'illuminations sous la température ambiante 25 (C°) pour une cellule solaire au silicium polycristallin de (12,5×12,5) cm<sup>2</sup> de surface; faites au département de physique "université de Constance" en Allemagne.



**Figure 2.10:** Influence de l'illumination sur la caractéristique ( $I-V$ ) d'une cellule solaire au silicium polycristallin sous une température de (25 °C).

La figure (2.11) montre des courbes ( $P-V$ ) de la même cellule et sous les mêmes conditions.



**Figure 2.11:** Influence de l'illumination sur la puissance de sortie pour une cellule solaire au silicium polycristallin sous une température ambiante.

Le tableau (2.3) montre l'évolution des performances de la cellule solaire avec l'illumination, à savoir la tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ), le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ), la puissance maximale ( $P_m$ ), le facteur de forme (FF) et le rendement de la conversion photovoltaïque ( $\eta$ ).

<b>E (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>160</b>	<b>250</b>	<b>330</b>	<b>400</b>	<b>510</b>	<b>640</b>	<b>790</b>	<b>1000</b>
<b>V<sub>co</sub>(V)</b>	0.5650	0.5795	0.5865	0.5920	0.5985	0.6044	0.6102	0.6157
<b>I<sub>cc</sub>(A)</b>	0.8232	1.3099	1.6873	2.0646	2.6249	3.2782	4.0854	5.1465
<b>P<sub>m</sub>(W)</b>	0.3507	0.5875	0.7674	0.9518	1.2272	1.5410	1.9327	2.4362
<b>FF</b>	0.7539	0.7714	0.7754	0.7787	0.7810	0.7776	0.7752	0.7687
<b><math>\eta</math>(%)</b>	14.0272	14.9937	14.8837	15.2292	15.3996	15.4100	15.6571	15.5916

**Tableau 2.3: Evolution des performances de la cellule poly cristalline avec l'illumination.**

On remarque une augmentation de toutes les performances en fonction de l'illumination mais avec des proportions plus ou moins différentes pour chaque paramètre.

#### **2.4. Méthode d'extraction des paramètres**

La cellule solaire est représentée généralement par un circuit équivalent dont les paramètres sont calculés expérimentalement en utilisant la caractéristique courant-tension  $I(V)$ . La détermination précise de ces paramètres reste un challenge pour les chercheurs, ce qui a conduit à une grande diversification dans les modèles et les méthodes numériques dédiées à leurs évaluations.

Il existe plusieurs méthodes d'extraction des paramètres caractéristiques des cellules solaires sous éclairage [27 - 29].

En se basant sur la caractéristique I (V) mesurée pour déterminer les paramètres qui décrivent le modèle électrique non linéaire des cellules solaires. Ces paramètres sont la résistance shunt, la résistance série, le photocourant, le courant de saturation et le facteur d'idéalité.

Dans ce travail nous avons appliqué la méthode extractive de " *Bouzidi et al*" pour évaluer les paramètres caractéristiques de la cellule photovoltaïque pour différents niveaux d'illuminations. On donne ci-dessous une description de cette méthode extractive [29].

Cette méthode est basée sur la caractéristique courant-tension sous éclairage d'une cellule solaire pour l'évaluation de ses paramètres caractéristiques avec le modèle mathématique à une seule diode. Cette méthode inclut la présentation  $I=f(V)$  de la fonction standard (1.1) en tant que  $V=f(I)$  et la détermination des facteurs  $C_0, C_1, C_2$  de cette fonction qui fournissent le calcul des paramètres de la cellule solaire.

Partant de l'équation (1.1) que l'on peut réécrire sous la forme :

$$I = \frac{I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{\beta}{n}(V + IR_s)\right) - 1 \right] - G_{sh}V}{1 + G_{sh}R_s} \quad (2.1)$$

L'équation précédente peut être écrite aussi :

$$I = I_{pA} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{\beta}{n}(V + IR_s)\right) - 1 \right] - G_A V \quad (2.2)$$

Avec :

$$\begin{cases} I_{pA} = \frac{I_{ph}}{1 + G_{sh}R_s} \\ I_0 = \frac{I_s}{1 + G_{sh}R_s} \\ G_A = \frac{G_{sh}}{1 + G_{sh}R_s} \end{cases} \quad (2.3)$$

Pour les basses et négatives tensions de polarisation où le comportement de la courbe  $I = f(V)$  est linéaire, la partie exponentielle est négligeable et l'équation (2.2) peut être écrite sous la forme :

$$I = I_{pA} - G_A V \quad (2.4)$$

$G_A$ ,  $I_{pA}$  sont évalués donc à partir de (2.4) par une simple régression linéaire. La valeur calculée de  $G_A$  donne le produit ( $G_A V$ ) qui peut être ajouté au courant mesuré, on obtient le courant corrigé à travers la cellule solaire qui est donné par:

$$I_c = I + G_A V \quad (2.5)$$

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

$$I_c = I_{pA} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{\beta}{n} (V + IR_s) \right) \right] \quad (2.6)$$

Pour évaluer la résistance de série  $R_s$ , le facteur d'idéalité  $n$  et le courant de saturation  $I_s$ , on utilise ( $I$ ) au lieu de ( $V$ ) comme variable indépendante dans l'équation (2.6), et nous obtenons :

$$V = \frac{n}{\beta} \ln \frac{I_{pA}}{I_0} - R_s I + \frac{n}{\beta} \ln \left( 1 - \frac{I_c}{I_{pA}} \right) \quad (2.7)$$

Cette expression peut être présentée sous la forme :

$$F(I) = C_0 + C_1 I + C_2 \ln \left( 1 - \frac{I_c}{I_{pA}} \right) \quad (2.8)$$

Où:

$$\begin{cases} C_0 = \frac{n}{\beta} \ln \frac{I_{pA}}{I_0} \\ C_1 = -R_s \\ C_2 = \frac{n}{\beta} \end{cases} \quad (2.9)$$

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

$$\begin{cases} C_1 \sum_{i=1}^N I_i^2 + C_2 \sum_{i=1}^N I_i \ln \left( 1 - \frac{I_{ci}}{I_{pA}} \right) + C_0 \sum_{i=1}^N I_i = \sum_{i=1}^N I_i V_i \\ C_1 \sum_{i=1}^N I_i + C_2 \sum_{i=1}^N I_i \ln \left( 1 - \frac{I_{ci}}{I_{pA}} \right) + C_0 N = \sum_{i=1}^N V_i \\ C_1 \sum_{i=1}^N I_i \ln \left( 1 - \frac{I_{ci}}{I_{pA}} \right) + C_2 \sum_{i=1}^N \ln^2 \left( 1 - \frac{I_{ci}}{I_{pA}} \right) + C_0 \sum_{i=1}^N \ln \left( 1 - \frac{I_{ci}}{I_{pA}} \right) = \sum_{i=1}^N V_i \ln \left( 1 - \frac{I_{ci}}{I_{pA}} \right) \end{cases} \quad (2.10)$$

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

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

$$\begin{cases} R_s = -C_1 \\ n = \beta C_2 \\ I_0 = I_{pA} \exp \left( \frac{-C_0}{C_2} \right) \end{cases} \quad (2.11)$$

Substituant les valeurs obtenues de  $R_s$  et de  $I_0$  dans (2.3), les valeurs  $G_{sh}$ ,  $I_{ph}$ , et  $I_s$  sont extraits à partir de:

$$\begin{cases} G_{sh} = \frac{G_A}{1 - G_A R_s} \\ I_{ph} = \frac{I_{pA}}{1 - G_A R_s} \\ I_s = \frac{I_0}{1 - G_A R_s} \end{cases} \quad (2.12)$$

## 2.5. Description de l'évolution des performances en fonction de l'illumination

Les trois principaux paramètres caractérisant les performances d'un dispositif photovoltaïque sont: le courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert et le facteur de forme

### 2.5.1. Le courant de court-circuit

Le courant de court-circuit est le courant de la cellule solaire quand la tension à travers la cellule est zéro. Habituellement écrit comme  $I_{cc}$ , qui est directement proportionnel à l'intensité d'illumination disponible.

D'après l'équation (1.1), pour ( $V=0$ ); on trouve :

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp \frac{q(R_s I_{cc})}{nKT} - 1 \right] - \frac{R_s I_{cc}}{R_{sh}} \quad (2.13)$$

Pratiquement  $I_s \ll I_{ph}$ . Donc on peut négliger le terme  $I_s \left[ \exp \frac{q(R_s I_{cc})}{nKT} - 1 \right]$  devant  $I_{ph}$  [30].

Son expression approchée sera donnée par:

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right)} \quad (2.14)$$

Pour la majorité des cellules solaires l'approximation suivante est acceptable [31].

$$R_s \ll R_{sh} \rightarrow 1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \cong 1$$

Dans ce cas, le courant de court-circuit devient

$$I_{cc} \cong I_{ph} \quad (2.15)$$

A des niveaux d'éclairement usuels, le photocourant est proportionnel à l'irradiation solaire ou au flux lumineux  $E$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ). Donc le courant de court-circuit peut alors simplement s'écrire [32]:

$$I_{cc} = I_{ccs} \frac{E}{E_s} \quad (2.16)$$

Avec:

$I_{ccs}$  est le courant de court-circuit pour les conditions standards.

$E_s = 1000$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

### 2.5.2. La tension en circuit ouvert

La tension en circuit ouvert  $V_{co}$ , est la tension maximum fournie par une pile solaire où le courant est zéro.

À partir de l'équation (1.1) et pour  $I=0$ ; on trouve:

$$0 = I_{ph} - I_s \left[ \exp \frac{qV_{co}}{nKT} - 1 \right] - \frac{V_{co}}{R_{sh}} \quad (2.17)$$

Si on admet que ( $R_{sh} \rightarrow \infty$ ), la formule de  $V_{co}$  devient:

$$V_{co} = \frac{nkT}{q} \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (2.18)$$

D'après l'équation (2.18):  $V_{oc}$  est d'autant plus grand que le courant de saturation  $I_s$  est petit et que le photocourant  $I_{ph}$  est grand.

Si on substitue l'équation (2.16) dans l'équation (2.18), on peut en déduire:

$$V_{co} = \frac{nkT}{q} \ln \left( \frac{1}{I_s} * \frac{I_{ccs} * E}{E_s} + 1 \right) \quad (2.19)$$

$$V_{co} - V_{cos} = \frac{nkT}{q} \left[ \ln \left( \frac{1}{I_s} * \frac{I_{ccs} * E}{E_s} + 1 \right) - \ln \left( \frac{I_{ccs}}{I_s} + 1 \right) \right] \quad (2.20)$$

$$V_{co} - V_{cos} = \frac{nkT}{q} \ln \left[ \frac{I_{ccs}/I_s}{I_{ccs}/I_s + 1} * \frac{E}{E_s} + \left( \frac{1}{I_{ccs}/I_s + 1} \right) \right] \quad (2.21)$$

D'après *Stamenic et al.* [33], l'approximation suivante est acceptable

$$I_{ccs}/I_s \gg 1 \quad (2.22)$$

Ainsi, la tension en circuit ouvert est rapprochée par l'équation suivant:

$$V_{co} \approx V_{cos} + \frac{nkT}{q} \ln \left( \frac{E}{E_s} \right) \quad (2.23)$$

Avec:

$V_{cos}$  est la tension en circuit ouvert sous les conditions standard.

On remarque que la valeur du  $V_{co}$  augmente logarithmiquement avec l'intensité d'illumination.

### 2.5.3. La puissance au point de fonctionnement maximum et le facteur de forme

Le facteur de forme (FF) représente l'efficacité de la cellule et peut également renseigner du vieillissement de la cellule. C'est le rapport entre la puissance maximale débitée et la puissance idéale.

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{cc} V_{co}} \quad (2.24)$$

D'après *Saloux et al* [34], la puissance maximale s'écrit comme suit:

$$V_m = \frac{nkT}{q} \ln \left( \frac{nkT I_{cc}}{q I_s V_{co}} \right) \quad (2.25)$$

$$I_m = I_{ph} + I_s - \frac{nkT}{q} \left( \frac{I_{cc}}{V_{co}} \right) \quad (2.26)$$

$$P_m = \left( I_{ph} + I_s - \frac{nkT I_{cc}}{q V_{co}} \right) \frac{nkT}{q} \ln \left( \frac{nkT I_{cc}}{q I_s V_{co}} \right) \quad (2.27)$$

Le facteur de forme FF dépend d'un ensemble de paramètres de la cellule. Donc, il est difficile de trouver la relation exacte de ce dernier en fonction de l'illumination.

## 2.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une étude bibliographique des différents travaux déjà publiés sur l'effet de l'illumination sur le comportement des cellules solaires, en suite nous avons considéré les caractéristiques I(V) mesurées d'une cellule solaire au silicium polycristallin sous différents niveaux d'illumination. Nous avons résumé la méthode utilisée pour extraire les différents paramètres caractéristiques de cette cellule ( $I_s$ ,  $n$ ,  $R_{sh}$ ,  $R_s$ ,  $I_{ph}$ ) à la fin on a analysé le comportement de  $V_{co}$ ,  $I_{cc}$  et FF avec l'illumination.

# Chapitre III

## Résultats et discussion

### 3.1. Introduction

Ce chapitre est consacré d'une part à étude comparative entre les travaux théoriques et les résultats expérimentaux obtenus qui sont donnés dans les tableaux (2.2) et (3), et d'autre part aux discussions des résultats obtenus, afin d'explorer l'effet de l'illumination sur les paramètres caractéristiques d'une cellule solaire à base de silicium polycristallin dans une gamme d'illumination qui varie de 160 ( $\text{W/m}^2$ ) jusqu' à 1000 ( $\text{W/m}^2$ ) et pour une température ambiante.

#### 2.4.2. Extraction des paramètres caractéristiques

L'application de la méthode sur les caractéristiques expérimentales à différents niveaux d'illuminations nous donne les résultats mentionnés dans le tableau (3.1).

<b>E</b> <b>(W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>160</b>	<b>250</b>	<b>330</b>	<b>400</b>	<b>510</b>	<b>640</b>	<b>790</b>	<b>1000</b>
<b>R<sub>s</sub> (Ω)</b>	0.00167	0.00164	0.00161	0.00168	0.00162	0.00175	0.00185	0.00168
<b>R<sub>sh</sub> (Ω)</b>	17.7524	17.7374	17.3785	17.1222	16.2049	15.4266	14.6721	13.6850
<b>n</b>	1.2410	1.2347	1.2464	1.2647	1.2972	1.3583	1.3832	1.4601
<b>I (μA)</b>	0.0166	0.0153	0.0188	0.0253	0.0417	0.0986	0.1427	0.3832
<b>I<sub>ph</sub> (A)</b>	0.8232	1.3101	1.6875	2.0648	2.6252	3.2785	4.0859	5.1472

**Tableau 3.1: Paramètres extraits par la méthode de "Bouzidi et al" pour différentes intensités d'illumination.**

### 3.2. Le courant de court-circuit et le photocourant

La variation de l'illumination se répercute nettement sur le courant de court-circuit  $I_{cc}$ . Tout changement de l'illumination engendre une variation proportionnelle du courant de court-circuit comme montré dans la figure (3.1).

Nous avons également observé une augmentation linéaire de  $I_{cc}$  avec l'illumination dans la gamme 160 – 1000 ( $W/m^2$ ). En effet l'étendue de variation du courant  $I_{cc}$  en fonction de l'illumination est délimitée par les valeurs 0.8232 (A) à 16% d'illumination (160  $W/m^2$ ) et 5.1465 (A) à 100% d'illumination (1000  $W/m^2$ ).

La relation liant  $I_{cc}$  à l'illumination peut donc s'écrire [35]:

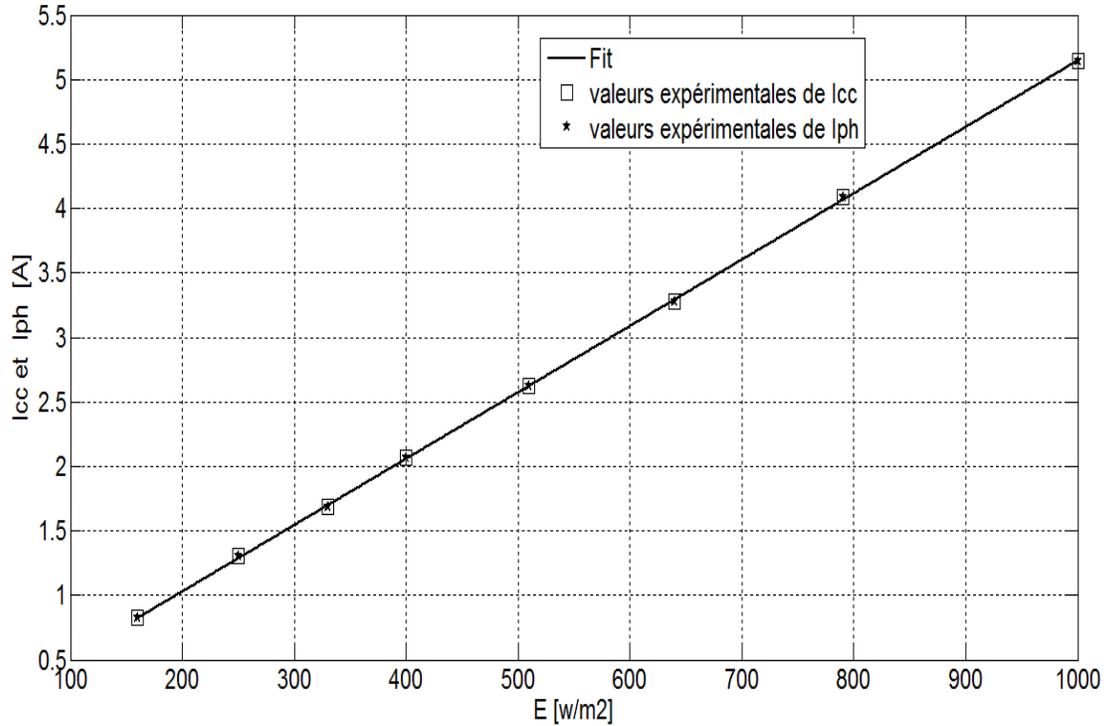
$$I_{cc} = K_E * E$$

Où:

$K_E$  est une constante qui caractérise la variation relative du courant de court-circuit en fonction de l'illumination. Dans notre cas  $K_E = 0.0051$  ( $A.m^2/W$ ).

Nous indiquons que le coefficient  $K_E$  du courant de court-circuit calculé est proche de celui obtenu par (*Stamenic et al*) [33] [ $K_E = 0.0037$  ( $A.m^2/W$ )] pour un panneau de silicium monocristallin sous les mêmes conditions de fonctionnement, et celui obtenu par (*Bayhan et Bayhan*) [ $K_E = 0.0025$  ( $A.m^2/W$ )] pour la technologie CIGS sous les mêmes conditions [22].

D'après la figure (3.1) on remarque une très bonne concordance des résultats expérimentaux avec les résultats théoriques (l'équation 2.16).



**Figure 3.1:** Evolution du courant de court-circuit en fonction de l'illumination pour une température constante  $T = 25^{\circ}\text{C}$ ; la ligne droite est le «fit» linéaire de l'équation (2.16).

Le comportement du photocourant  $I_{ph}$  en fonction d'une variation de l'illumination est presque le même que  $I_{cc}$ .

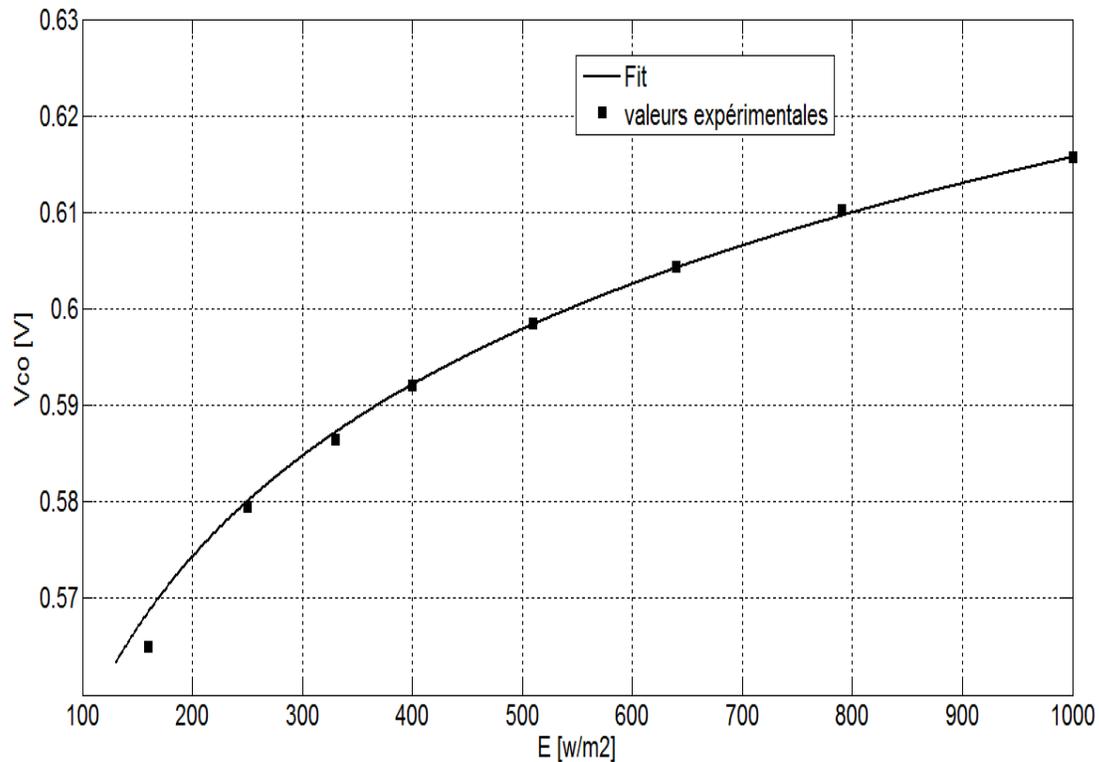
Le photocourant  $I_{ph}$  d'une cellule solaire augmente généralement rapidement avec l'augmentation de l'illumination. Cette augmentation est due à la création des paires électron-trou, c'est-à-dire chaque photon supplémentaire d'énergie supérieure au gap nous donne une paire électron-trou, ce qui explique la variation linéaire du photocourant en fonction de l'illumination observée dans le graphe du dessus [36].

### 3.3. La tension de circuit ouvert

Sur la figure (3.2), nous présentons l'évolution de la tension de circuit ouvert en fonction de l'illumination.

D'après cette figure, nous avons obtenu une très bonne corrélation entre les mesures et le calcul en utilisant l'équation (2.23).

Nous remarquons ainsi que la tension en circuit ouvert augmente en fonction de l'illumination, mais elle est moins sensible à l'éclairement que  $I_{cc}$ , les tensions  $V_{co}$  par exemple à  $E = 510 \text{ (W/m}^2\text{)}$  et à  $E = 1000 \text{ (W/m}^2\text{)}$  se rapprochent. En effet, les valeurs sont  $V_{co} = 0.599 \text{ (V)}$  à  $510 \text{ (W/m}^2\text{)}$  et  $0.616$  à  $1000 \text{ (W/m}^2\text{)}$ . Elle augmente légèrement avec l'éclairement et d'une façon logarithmique.



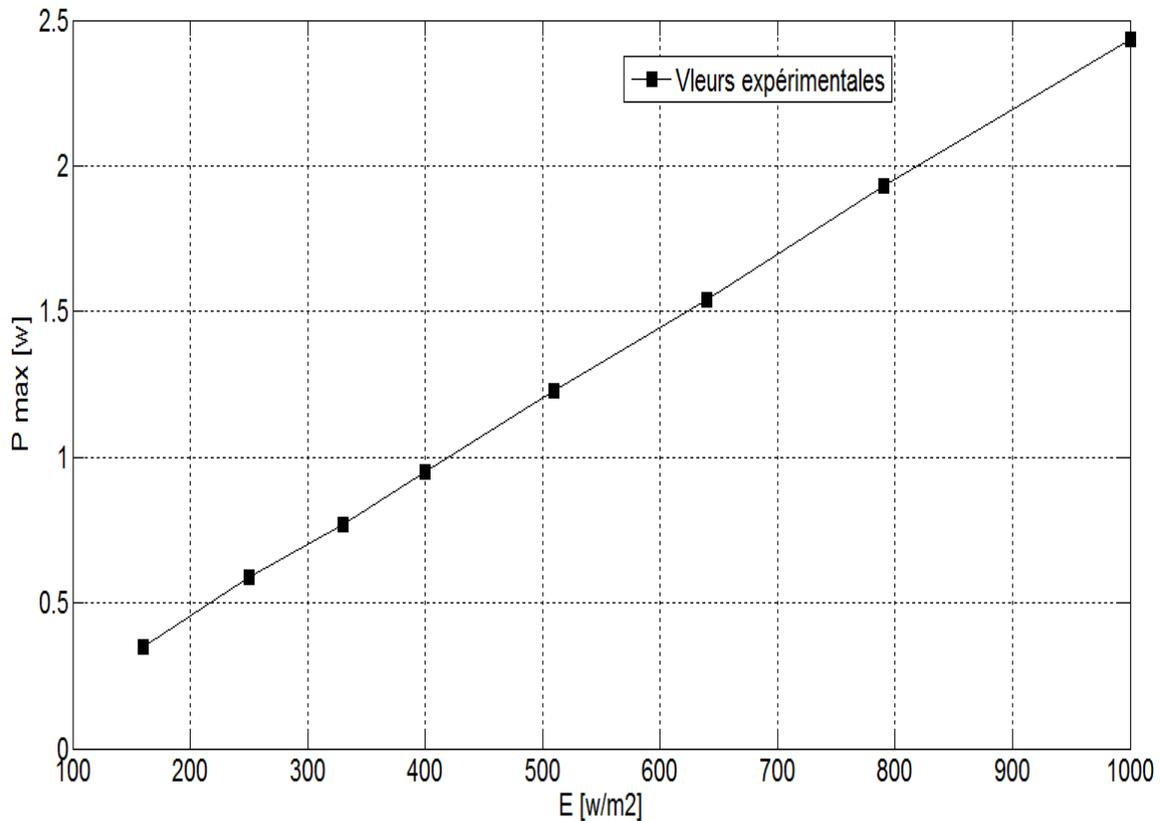
**Figure 3.2:** Evolution de la tension de circuit ouvert en fonction de l'illumination pour une température constante  $T = 25^\circ\text{C}$ ; la ligne continue est le «fit» de l'équation (2.23).

La valeur de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , ne peut pas être considérée comme arbitraire car elle dépend de la structure interne de la photopile, des phénomènes de conduction et de recombinaison [37].

On remarque aussi que la plage d'évolution de  $V_{co}$  est comprise entre 0.565 (V) pour une illumination de 160 ( $W/m^2$ ) et 0.616 (V) pour une illumination de 1000 ( $W/m^2$ )

### 3.4. La puissance maximale

Toute évolution d'illumination se traduit par une évolution de la puissance maximale (figure 3.3). Cette évolution se fait d'une manière linéaire comme montré dans celle-ci. On y observe que la puissance évolue de  $P_m = 0.3507$  (W) à 16% jusqu'à  $P_m = 2.44$  (W) à 100% d'illumination.



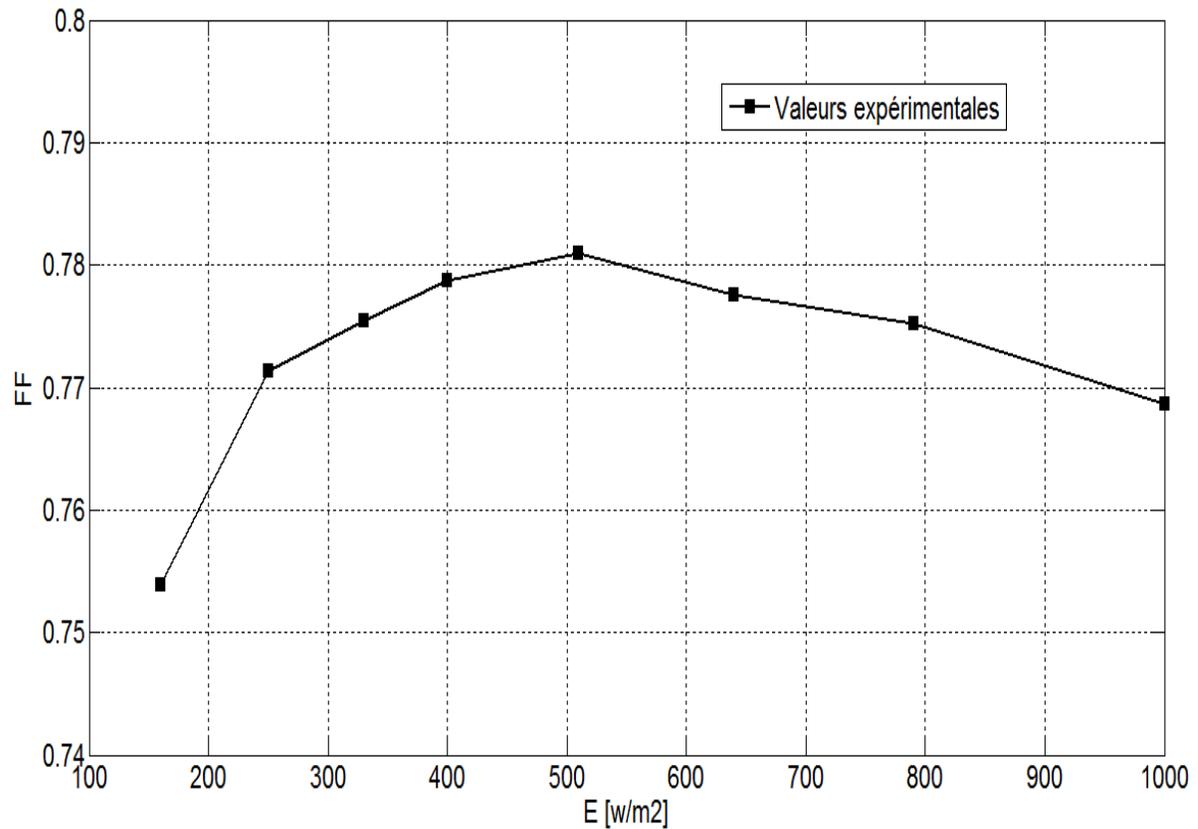
*Figure 3.3: Evolution de la puissance maximale d'une cellule au silicium polycristallin en fonction de l'illumination pour une température constante  $T = 25^{\circ}C$ .*

### 3. 5. Le facteur de forme

La figure (3.4) représente le facteur de forme FF. Il augmente légèrement avec l'intensité d'illumination pour des valeurs basses ( $E < 500 \text{ W/m}^2$ ), et puis, il diminue à des intensités plus hautes de l'illumination ( $E > 500 \text{ W/m}^2$ ).

Le facteur de forme FF diminue pour les valeurs supérieures à 500 ( $\text{W/m}^2$ ) d'illumination à cause de l'influence de la résistance série [34].

De plus, nos résultats sont semblables à ceux obtenus par (*Khan et al*), pour la technologie silicium monocristallin [23].



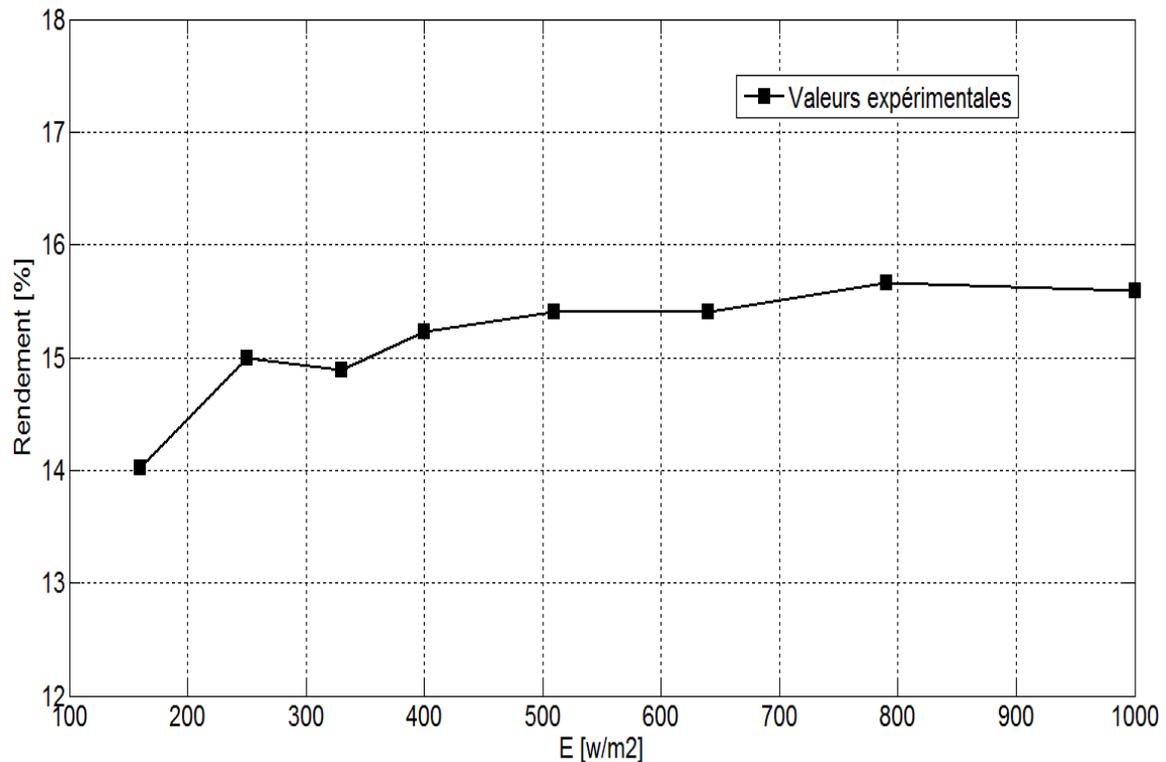
**Figure 3.4: Evolution de FF en fonction de l'illumination pour une température constante  $T = 25^\circ\text{C}$ .**

### 3.6. Le rendement

La figure (3.5) illustre l'allure du rendement de la conversion photovoltaïque  $\eta$  en fonction de l'illumination. On a constaté deux plages de variation,

- lorsque l'éclairement est supérieur à 400 ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), le rendement varie très peu avec l'éclairement et on peut dire qu'il est presque invariable (constant).
- Dans la région où l'éclairement inférieur à 400 ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), le rendement énergétique augmente logarithmiquement, parce que la tension en circuit ouvert dépend logarithmiquement du courant de court-circuit [24].

En général, quand l'éclairement varie de 160 à 1000 ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), le rendement varie de 14.03 % à 15.59 %.



*Figure 3.5: Evolution de  $\eta$  en fonction de l'illumination pour une température constante  $T = 25^\circ\text{C}$ .*

### 3.7. Le courant de saturation et le facteur d'idéalité

Les figures (3.6) et (3.7) représentent les variations du facteur d'idéalité et du courant de saturation respectivement, en fonction de l'intensité d'illumination.

Les valeurs du facteur d'idéalité et de la densité de courant de saturation, augmentent avec l'augmentation de l'intensité de la lumière.

La figure (3.6) indique que le facteur d'idéalité  $n$  varie linéairement en fonction de l'illumination. On peut l'écrire sous la forme  $n = n_0 + (\gamma * E)$  pour une illumination supérieure à  $350 \text{ W/m}^2$  [38].

Avec :

$n_0$  : est le facteur d'idéalité à l'obscurité.

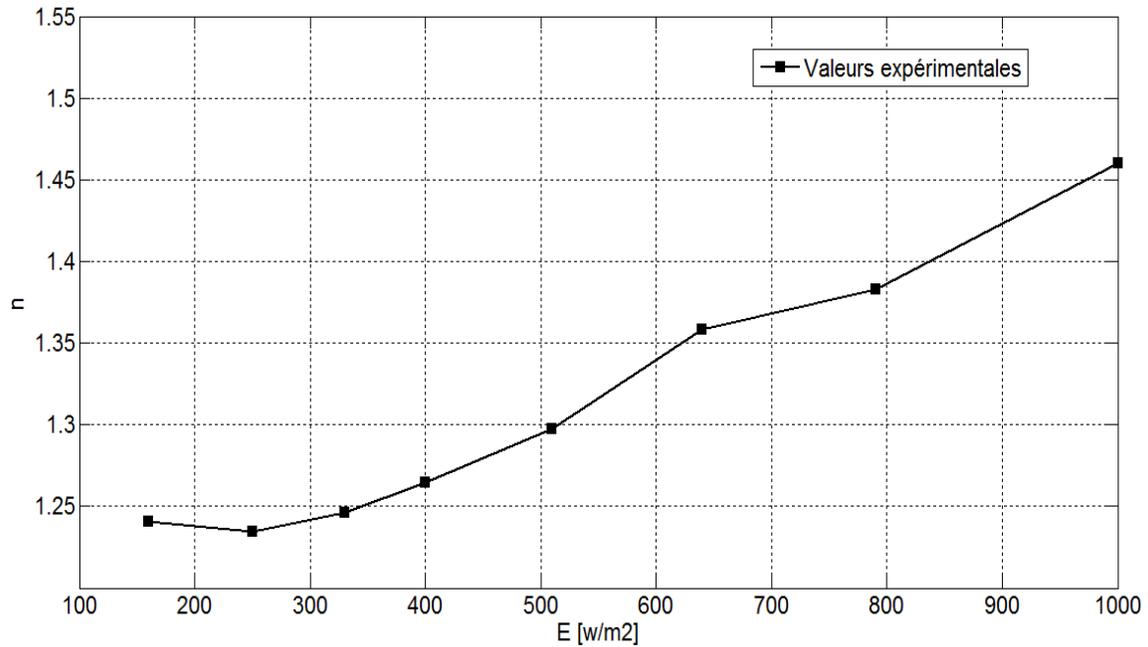
$\gamma$  : est le coefficient de variation de  $n$  en fonction de l'illumination.

D'après la figure (3.7) on constate que l'augmentation de l'illumination dans la gamme concernée ( $160\text{-}1000 \text{ W/m}^2$ ) mène à une augmentation du courant de saturation d'une manière exponentielle traduite par la relation suivant  $I_s = C. \exp(\varepsilon. E)$  [38].

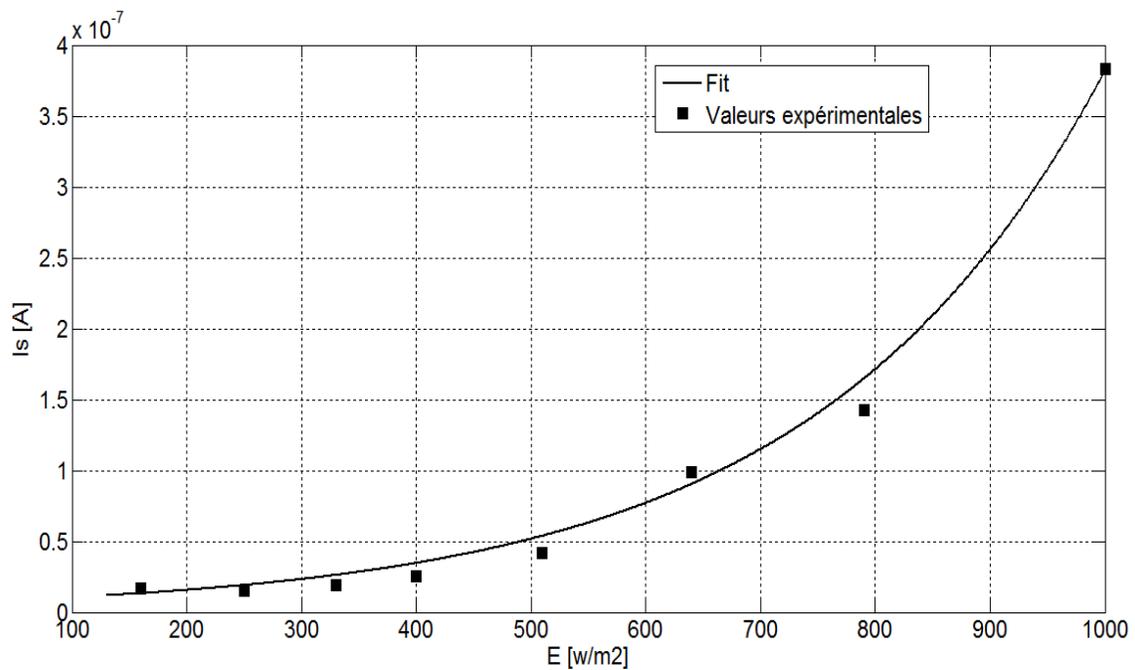
Dans ce cas, nous trouvons  $C = 0.007. 10^{-6} \text{ (A/m}^2\text{)}$  et  $\varepsilon = 0.004$ .

L'augmentation du facteur d'idéalité et du courant de saturation, est causée par l'augmentation du courant de recombinaison. L'augmentation de ce dernier est liée proportionnellement à l'augmentation de la densité des états de défaut dans la bande interdite.

Ces défauts sont provoqués par l'énergie libérée de la recombinaison des paires électrons-trous. Par conséquent, pendant que les électrons et les trous recombinent, les liaisons atomiques faibles sont cassées par l'énergie libérée. Ces liens cassés forment des états de défaut, créant plus d'emplacements de recombinaison. L'augmentation des emplacements de recombinaison, alternativement, augmente la recombinaison des paires électrons-trous [39].



**Figure 3.6: Evolution du facteur d'idéalité en fonction de l'illumination pour une température constante  $T = 25^\circ\text{C}$ . Le « Fit » est la régression linéaire de résultats expérimentaux**

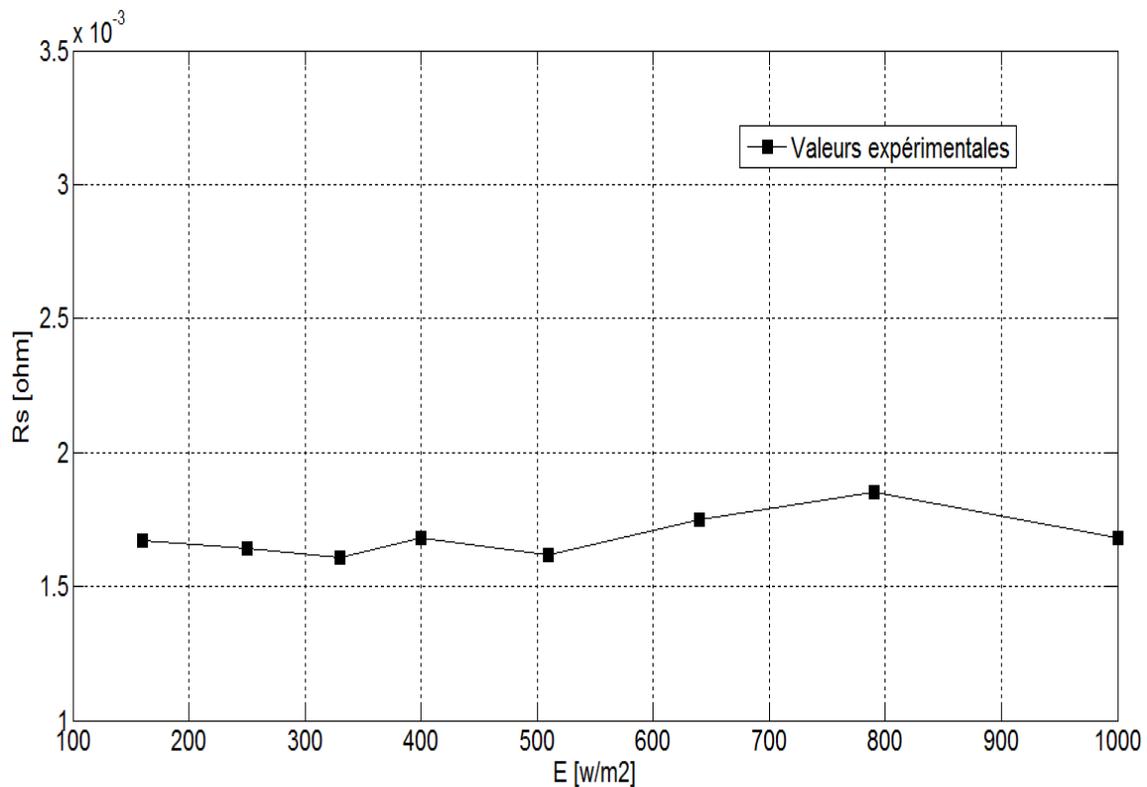


**Figure 3.7: Evolution du courant de saturation en fonction de l'illumination pour une température constante  $T = 25^\circ\text{C}$ .**

### 3.8. La résistance série

Les résultats obtenus montrent une faible variation de la résistance série (figure 3.8), on peut dire qu'elle est invariante par rapport à l'illumination dans la gamme 160 ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) à 1000( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par (*Kassis et Saad*) pour la même technologie et la gamme d'illumination : 0 à 200 ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) [21] et par (*Chan et Phang*) [40].

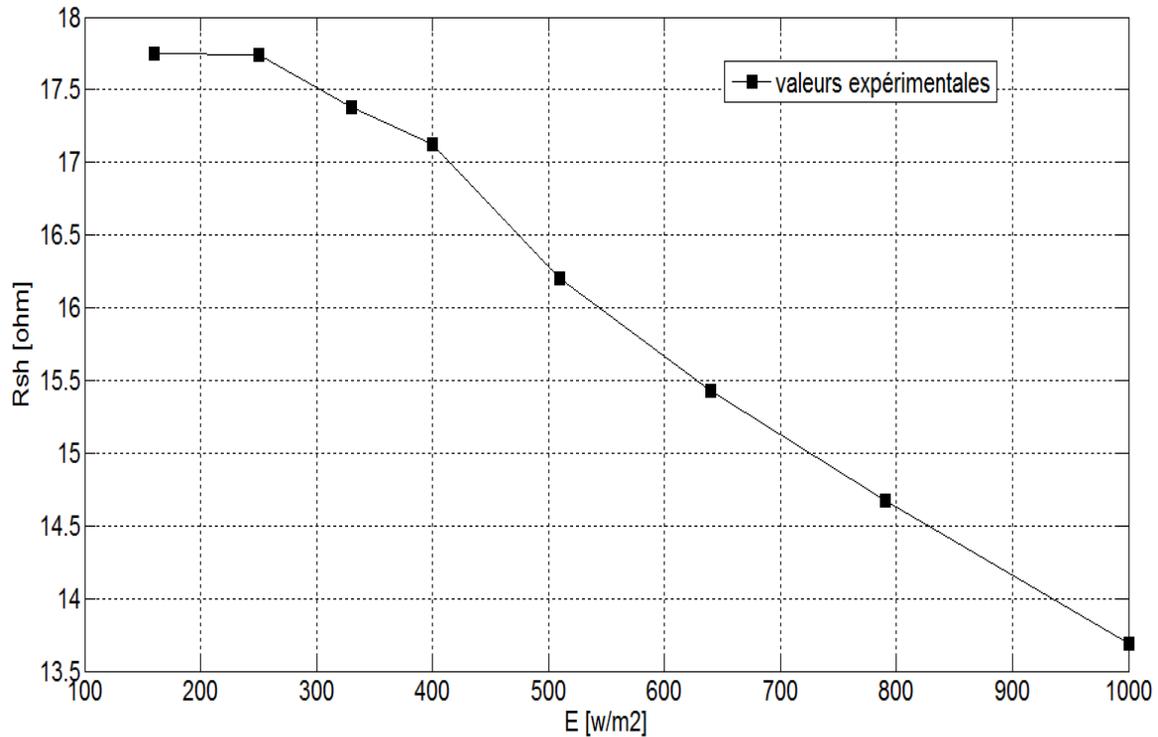


*Figure 3.8: Evolution de la résistance série en fonction de l'illumination pour une température constante  $T = 25^\circ\text{C}$ .*

### 3.9. La résistance shunt

Les résultats montrent que l'évolution de la résistance shunt en fonction de l'illumination entre 0 et 200 ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) est presque constante (figure 3.9), et après cette valeur 200 ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), les valeurs de la résistance shunt commencent à chuter linéairement

en fonction de l'illumination entre 200 et 1000 ( $\text{W}/\text{m}^2$ ). Ces résultats sont en accord ceux trouvés par (*Kassis et M. Saad*) [21] et (*Eikelboom et Reinders*) pour des cellules solaires au silicium polycristallin [41].



*Figure 3.9 : Evolution de la résistance shunt en fonction de l'illumination pour une température constante  $T = 25^\circ\text{C}$ .*

### 3.10. Conclusion

Lorsque l'illumination varie de 160 à 1000 ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), pour une température ambiante, les paramètres caractéristiques de la cellule solaire au silicium polycristallin varient comme suit:

Le courant de court-circuit  $I_{cc}$ , le photocourant  $I_{ph}$ , le facteur d'idéalité et la puissance maximale augmentent linéairement. La tension de circuit ouvert  $V_{co}$  augmente logarithmiquement. Le facteur de forme FF augmente légèrement pour ( $E < 500 \text{ W}/\text{m}^2$ ), et puis, il diminue à des intensités plus hautes de l'illumination ( $E > 500 \text{ W}/\text{m}^2$ ).

Le rendement énergétique augmente logarithmiquement, pour  $E < 400 \text{ (W/m}^2\text{)}$  ; mais lorsque l'éclairement est supérieur à  $400 \text{ (W/m}^2\text{)}$ , ce dernier est presque invariable. Le courant de saturation  $I_s$  augmente exponentiellement. La résistance série  $R_s$  reste invariante par rapport à l'illumination. La résistance shunt est presque constante pour ( $E < 200 \text{ W/m}^2$ ), mais elle commence à chuter linéairement entre la plage 200 à 1000 ( $\text{W/m}^2$ ).

# **Conclusion générale**

La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles de l'énergie telles que l'uranium, le gaz et le pétrole diminuent en raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie ces dernières années. Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches sont conduites vers les énergies renouvelables. Une des énergies renouvelables qui peut accomplir la demande du monde jusqu'à maintenant, est l'énergie solaire photovoltaïque. Elle est libre et abondante dans la plupart des régions du monde, et est avérée une source économique.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque, basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire un courant lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

Les performances d'un générateur PV sont fortement influencées par les conditions climatiques, particulièrement l'irradiation solaire et la température du module PV. Dans cette étude, nous avons utilisé le modèle empirique à une diode pour simuler le fonctionnement des cellules PV pour différentes conditions d'illuminations.

Le travail décrit dans ce mémoire a porté sur l'étude des effets de l'illumination sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires au silicium polycristallin.

L'essentiel des résultats obtenus montrent que :

- Le courant de court-circuit  $I_{cc}$ , le photocourant  $I_{ph}$ , le facteur d'idéalité et la puissance maximale augmentent linéairement avec l'illumination.
- La tension de circuit ouvert  $V_{co}$  augmente légèrement avec l'éclairement, d'une façon logarithmique.
- Le facteur de forme FF augmente légèrement avec l'intensité d'illumination pour des valeurs basses ( $E < 500 \text{ W/m}^2$ ), et puis, il diminue à des intensités plus hautes de l'illumination ( $E > 500 \text{ W/m}^2$ ).
- le rendement énergétique augmente logarithmiquement, Dans la région où l'éclairement inférieur à  $400 \text{ (W/m}^2)$ ; mais lorsque l'éclairement est supérieur à  $400 \text{ (W/m}^2)$ , le rendement est presque invariable.

- L'augmentation de l'illumination mène à une augmentation du courant de saturation  $I_s$  d'une manière exponentiel.
- la résistance série  $R_s$  est invariante par rapport à l'illumination dans la gamme 160 à 1000 ( $\text{W/m}^2$ ).
- la résistance shunt est presque constante pour ( $E < 200 \text{ W/m}^2$ ), mais elle commence à chuter linéairement en fonction de l'illumination entre la plage 200 à 1000 ( $\text{W/m}^2$ ).

# **Références bibliographiques**

- [1] J P. Rivet, Introduction à l'astronomie, CNRS, 2009.
- [2] P. Würfel, Physics of solar cells, Wiley-VCH Deutsche, 2005.
- [3] L. Protin, S. Astier, Convertisseurs photovoltaïques, Techniques de l'Ingénieur D 3 360.
- [4] B. Equer, Energie Solaire Photovoltaïque, Ellipses, Paris, 1993.
- [5] A. Labouret, M. Viloz, Energie solaire photovoltaïque, 3<sup>ème</sup> édition, Dunod Paris, 2006.
- [6] N. Oleksiy, Simulation fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités, Thèse doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 2005.
- [7] W. Kim, W. Choi, A novel parameter extraction method for the one-diode solar cell model, Solar Energy, 2010; 84: 1008–1019.
- [8] G. N. Tiwari, S. Dubey, Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their applications, Cambridge, 2010.
- [9] M. A. Green et al, Applied photovoltaics; 2<sup>ème</sup> édition, ARC Centre for Advanced Silicon Photovoltaics and Photonics, 2007.
- [10] A. Luque, S. Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, John Wiley, England, 2003.
- [11] A. Jain, A. Kapoor, A new method to determine the diode ideality factor of real solar cell using Lambert W-function, Solar Energy Materials & Solar Cells, 2005; 85: 391–396
- [12] A. Ricaud, Photopiles solaires, 1<sup>ère</sup> édition, Presse polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, Suisse, 1997.
- [13] R. Hill, Clean electricity from photovoltaics, Series on Photoconversion of Solar Energy, Vol 1, London, 2001.

- [14] Y. Kawazoe, Crystal Growth of Si for Solar Cells, Tohoku University, Japan, 2009.
- [15] R. Hezel, A. Goetzberger, High-Efficient Low-Cost Photovoltaics, William T Rhodes, Atlanta USA, 2009.
- [16] M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, Solar cell efficiency tables (version36), Prog Photovolt. Res. Appl, 2010; 18: 346–352.
- [17] M. Madani, Réalisation des couches antireflets dans les cellules solaires à couches minces, Thèse de magister, Université de Tlemcen, 2006.
- [18] A. Goetzberger, V U. Hoffmann, Photovoltaic Solar Energy generation, Atlanta, 2005.
- [19] A. Ricaud , Modules photovoltaïques "Filières technologiques". Techniques de l'Ingénieur. D 3 940.
- [20] M T. Dang, Elaboration de cellules solaires photovoltaïques à base de polymères conjugués, Thèse de doctorat, Université bordeaux 1, 2009.
- [21] A. Kassis, M. Saad, Analysis of multi-crystalline silicon solar cells at low illumination levels using a modified two-diode model, Solar Energy Materials & Solar Cells, 2010; 94: 2108–2112.
- [22] H. Bayhan, M. Bayhan, A simple approach to determine the solar cell diode ideality factor under illumination, Solar Energy, 2011; 85: 769-775
- [23] F. Khan, S.N. Singh, M. Husain, Effect of illumination intensity on cell parameters of a silicon solar cell, Solar Energy Materials & Solar Cells, 2010; 94: 1473–1476.
- [24] N.H. Reich, W.G.J.H.M.van Sark, E.A. Alsema, R.W. Lof, R.E.I. Schropp, W.C.Sinke, W.C. Turkenburg, Crystalline silicon cell performance at low light intensities, Solar Energy Materials & Solar Cells, 2009; 93: 1471–1481.
- [25] Priyanka, MohanLal, S.N. Singh, A new method of determination of series and shunt resistances of silicon solar cells, Solar Energy Materials & Solar Cells, 2007; 91: 137–142.

- [26] I.A.Yunaz, S. Kasashima, S. Inthisang, T. Krajangsang, S. Miyajima, A. Yamada, M. Konagai, Effect of light intensity on performance of silicon-based thin film solar cells, IEEE, 2009; pp: 153-157.
- [27] M. Haouari-Merbah, M. Belhamel, I. Tobias, J.M. Ruiz, Extraction and analysis of solar cell parameters from the illuminated current–voltage curve, Solar Energy Materials & Solar Cells, 2005; 87: 225–233.
- [28] M. Chegaar, G. Azzouzi, P. Mialhe, Simple parameter extraction method for illuminated solar cells, Solid State Electronics, 2006; 50: 1234–1237.
- [29] K. Bouzidi, M. Chegaar, A. Bouhemadou, Solar cells parameters evaluation considering the series and shunt resistance, Solar Energy Materials & Solar Cells, 2007; 91: 1647–1651.
- [30] M.Chegaar, N. Nehaoua, A. Bouhemadou, Organic and inorganic solar cells parameters evaluation from single I–V plot, Energy Conversion and Management 2008; 49: 1376–1379.
- [31] M. Chegaar, N. Nehaoua, K. Bouzidi, Comparative Study Of Solar Cells Parameters extraction methods under illumination, 4<sup>th</sup> international conference on computer integrated manufacturing CIP, 2007.
- [32] M.G. Villalva, J.R. Gazoli, E.R. Filho, Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays, IEEE Transactions On Power Electronics, 2009;24:1198–1208.
- [33] L.Stamenic, E. Smiley, K. Karim, low light conditions modeling for building integrated photovoltaic (BIPV) systems, Solar Energy 2004; 77: 37–45.
- [34] E.Saloux, A. Teyssedou, M. Sorin, Explicit model of photovoltaic panels to determine voltages and currents at the maximum power point, Solar Energy, 2011; 85: 713–722.

- [35] F.Z. Zarhouni, Etude de l'influence des différentes agents sur les caractéristiques d'un générateur photovoltaïque, Communication science & technologie COST n°4, janvier 2006.
- [36] Q. Kim, A. Shumka, Effects of excitation intensity on the photocurrent response of thin film silicon solar modules Solar Cells, 1986; 18: 61 - 69.
- [37] F. Pelanchon, P. Mialhe, J.P. Charles, Optimisation du rendement d'une photopile, Revue Physique Appliquée, 1988; 23: 1139-1145.
- [38] K. Triyana, T. S. Sholihun, K. Abraha, M. M. Salleh, on the dependency of equivalent circuit parameters of heterojunction bilayer copper phthalocyanine/perylene photovoltaic device on light intensity based on reverse bias characteristic, ICSE 2008 Proc, Johor Bahru, Malaysia, 2008.
- [39] E.E. van Dyk, E.L. Meyer, Analysis of the effect of parasitic resistances on the performance of photovoltaic modules, Renewable Energy 2004, 29: 333–344.
- [40] D.S.H. Chan, J.C.H. Phang, Analytical methods for the extraction of solar cell single-and double diode model parameters from I–V characteristics, IEEE Trans Electron Dev ED, 1987; 34: 286–293.
- [41] J.A. Eikelboom, A.H.M.E. Reinders, Determination of the irradiation dependent efficiency of multicrystalline si pv modules on basis of iv curve fitting and its influence on the annual performance 14-th European PV Solar Energy Conference, Barcelona, Spain, 1997, pp: 293–296.

## الملخص

في هذه المذكرة تمت دراسة تأثير الإضاءة على الخصائص المميزة لخلية شمسية من السليسيوم متعدد التبلور، تحت تأثير درجة الحرارة النظامية و باستعمال النموذج النظري ذو الأس الواحد. نجد أن كلاً من تيار الدارة القصيرة، التيار الكهروضوئي، معامل المثالية والاستطاعة العظمى يتناقص خطياً. جهد الدارة المفتوحة والمردود يتناقصان لوغاريتمياً. معامل الشكل يتزايد قليلاً من أجل إضاءة دنيا، ثم يتناقص من أجل إضاءة عليا. تيار الإشباع يتزايد أسياً. المقاومة على التسلسل تبقى ثابتة والمقاومة على التفرع تتناقص خطياً.

**الكلمات المفتاحية:** الخلية الشمسية، شدة الإضاءة، سليسيوم، الخصائص المميزة.

## Abstract

This work presents the effect of illumination on the different parameters of a polycrystalline silicon solar cell, under the room temperature, using the single exponential model. The results show that the short circuit current, the photocurrent, the ideality factor and the maximum power increase linearly. The open circuit voltage and efficiency increase logarithmically. The fill factor increases slightly for low intensities, and then it decreases with higher intensities of illumination. The saturation current increases exponentially. The series resistance remains invariant and the shunt resistor decreases linearly.

**Keywords:** solar cell, illumination, silicon, characteristic parameters.

## Résumé

Ce mémoire, présente l'effet de l'illumination sur les paramètres caractéristiques d'une cellule solaire au silicium polycristallin, sous une température constante. L'étude est basée sur le modèle théorique à une seule exponentielle. On trouve que le courant de court-circuit, le photocourant, le facteur d'idéalité et la puissance maximale augmentent linéairement. La tension de circuit ouvert et le rendement augmentent logarithmiquement. Le facteur de forme augmente légèrement pour des intensités basses, et puis, il diminue à des intensités plus hautes de l'illumination. Le courant de saturation augmente exponentiellement. La résistance série reste constante et la résistance shunt décroît linéairement.

**Mots clés:** cellule solaire, illumination, silicium, paramètres caractéristiques.