

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

**M<sup>me</sup> EL HAOUARI K-AILINE épouse RAIS**

pour l'obtention du diplôme de Master II

en Électronique option Micro-opto-électronique

---

Thème

---

# CARACTERISATIONS D'UNE CELLULE SOLAIRE

---

Proposé par : M<sup>r</sup>Aissat Abdelkader

&M<sup>r</sup> Messaoud Abdelghani (CRTSE)

Année Universitaire 2012-2013

## Remerciements

---

*Je remercie Dieu le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.*

*J'exprime mon grand respect et mes sincères remerciements à monsieur le président de jury, ainsi que les membres de jury pour avoir accepté de juger ce travail, je les remercie pour leurs remarques et leurs conseils judicieux.*

*J'exprime mes sincères remerciements à mon promoteur **Mr AISSAT Abdelkader**, professeur habilité à diriger la recherche, à l'université SAAD DAHLEB de BLIDA, faculté de technologie, département d'Electronique, pour son aide, son soutien constant et toutes ces qualités ainsi que son savoir dans les domaines scientifiques.*

*Ce mémoire a été effectué au Centre de Recherche des Technologies des Semi-conducteurs pour l'Energétique (CRITSE) à ALGER.*

*Je remercie vivement mon co promoteur **Mr MESSAOUD Abdelghani**, ingénieur de recherche pour avoir dirigé ce travail ainsi que pour son aide précieuse, son soutien constant, sa disponibilité constante, sa patience, et ses encouragements.*

*J'exprime toute ma gratitude à **Mr. MOUSSI Abedrahmane**, directeur du centre pour m'avoir accueilli et permis de mener à terme ce présent mémoire, je remercie également **Mr. HADJERSI Toufik**, chef de division des cellules et modules photovoltaïque ainsi que **Mr. BOUMAOUR Messaoud**, chef d'équipe pour m'avoir fait confiance et intégrée dans son équipe de recherche.*

*Je remercie également **Mr GUENDA Abdelkader** pour son aide et collaboration concernant les calculs, **Mr AMROUCHE Hakim** pour les mesures sous simulateurs du I-V, **Mr MAHMOUDI Brahim** pour les mesures de la réponse spectrale des cellules et pour son aide concernant la caractérisation des paramètres des cellules par le programme élaboré au*

sein du CRISE, *Mr KHELIFATI Nabil* pour les mesures Sun-Vco , *Mr DAHMANI Abdelwahab* pour ses orientations pour la mesure I-V ainsi que toute l'équipe du centre CRISE.

*Je tiens à remercier tout les enseignants intervenants de la section master II, option micro-opto- électronique pour leur savoir et leur dévouement.*

*Je remercie également les responsables et tout le personnel du département électronique de la faculté de technologie de l'université de Blida.*

*Je tiens également à remercier très vivement mon mari pour sa confiance et ses encouragements, ma fille pour sa patience avec moi, mes parents et ma belle mère pour leurs soutiens morale, ainsi que mon directeur des études de mon lieu de travail à l'institut de l'enseignement et formation professionnelle *Mr ANINE Kamel* pour ses encouragements et sa compréhension ainsi que *Mr OUCHENE Omar*, chef de service de scolarité pour son soutien morale.*

*Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.*

*Je dédie ce travail à :*

*Mon mari chéri*

*Ma fille adorée*

*Mes chers parents*

*Ma chère belle mère*

*Toute ma famille et ma belle famille*

*Toutes les personnes qui m'ont encouragée*

---

ملخص:

الهدف من هذه الدراسة هو توصيف الخلايا الكهروضوئية على أساس البلورية السيليكون متعدد البلورات مصنوعة بـ CRTSE و هذا لاستخلاص مختلف الظواهر والتفاعلات التي هي المسؤولة عن تدهور هذه الخلايا وتطبيق الحلول و التكنولوجيا المختلفة لتحسين أدائها

الخلايا الشمسية، السيليكون متعدد البلورات، وتوصيف، محاكاة الشمسية : كلمات المفتاح:

---

### Résumé :

L'objectif de notre travail est de caractériser des cellules PV à base de silicium multi cristallin réalisées au CRTSE dans le but d'extraire avec précision les paramètres réels influençant leurs comportements électriques. Cette extraction de paramètres électriques permet d'identifier les divers phénomènes et interactions qui sont responsables de la dégradation des performances.

Après avoir identifié les causes de la dégradation de ces cellules, nous avons appliqués les différentes solutions technologiques pour améliorer leurs performances.

**Mots clés :** cellules solaires, silicium, multi cristallin, caractérisation, simulateur solaire

---

### Abstract :

The principle goal of this study is the characterization of mc based silicon solar cells fabricated at CRTSE, in the aim of extracting exact and precise parameters influencing the electrical behavior. Accurate parameters extraction leads us to identify different phenomena's and interactions responsible in performances degradation. We applied different technological solutions permitting to oppose performances degradation.

**Keywords :** Solar cells, mc silicon, characterization, solar simulator.

---

## Listes des acronymes et abréviations

Abreviations	Significations
<b>PV</b>	Photovoltaïque
<b>STC</b>	<i>Standard Test Conditions</i> : conditions standards de mesures : spectre AM1,5G ; éclairage 1000W/m <sup>2</sup> et température 25°C
<b>AM</b>	<i>Air Masse</i> : masse atmosphérique
<b>AMO</b>	Hors atmosphère (applications spatiales)
<b>AM1</b>	Le soleil est au zénith du lieu d'observation ( à l'équateur)
<b>AM1,5G</b>	Spectre standard, le soleil est à 45° d'inclinaison ; 1,5 indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1,5 fois supérieur au parcours le plus court (le zénith) et G : indique le rayonnement global
<b>ZCE</b>	Zone de charge d'espace
<b>BSF</b>	<i>Back Surface Field</i> : champ arrière de surface crée par contact arrière Aluminium, permet à la paire e-trou générée dans la base de participer à la conduction
<b>PECVD</b>	<i>Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition</i> , dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma de couches de nitrure ou d'oxyde de silicium sur la surface du silicium pour créer la couche anti reflet et la passivation de la surface avant
<b>HF</b>	Solution d'acide fluorhydrique dilué à 10% pour enlever l'oxyde de fritte par décapage
<b>Etchback</b>	Enlever la couche morte due à la diffusion
<b>Drive in</b>	Redistribution des impuretés et les faire pénétrer en profondeur
<b>Co firing</b>	Recuit rapide simultané de la grille avant et arrière par technique RTP
<b>RTP</b>	<i>Rapid thermal processing</i> : recuit thermique rapide
<b>C</b>	vitesse de la lumière = $3 \cdot 10^8$ m/s
<b>h</b>	constante de Planck $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s
<b>q</b>	charge élémentaire de l'électron = $1,6 \cdot 10^{-19}$ C
<b>h</b>	constante de Planck = $6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s
<b>IQE</b>	<i>Internal quantum efficiency</i> : le rendement quantique interne).
<b>EQE</b>	<i>External quantum efficiency</i> : le rendement quantique externe,
<b>TLM</b>	<i>Transmission line model</i> : mesure de la résistance du contact avant de la cellule
<b>PSG</b>	<i>Phospho-silicate-glass</i> : verre de phosphore
<b>QSSPC</b>	<i>Quasi steady state photo conductance</i> : technique qui mesure la durée de vie des porteurs

## Table des matières

### Introduction générale

### Chapitre 1 : Du rayonnement à la cellule solaire

<b>1.1 Introduction</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Le rayonnement solaire</b>	<b>1</b>
1.2.1 La ressource solaire	1
1.2.2 Spectre solaire	2
<b>1.3 L'effet photovoltaïque (ou photoélectrique)</b>	<b>3</b>
1.3.1 Description de la cellule solaire	3
1.3.2 Structure d'une cellule solaire	4
1.3.2.a. Le transfert de l'énergie du photon à l'électron	5
1.3.2.b. La collecte des porteurs photo générés	6
1.3.3. Principe de fonctionnement de la cellule solaire	8
<b>1.4 Pertes physiques et technologiques</b>	<b>10</b>
1.4.1. Pertes physiques	11
1.4.1. a. Pertes par les photons de grande longueur d'onde	11
1.4.1. b. Pertes dues à l'énergie excédentaire des photons	11
1.4.1.c. Pertes dues à la recombinaison des porteurs générés	11
1.4.1.d. Facteur de tension	11
1.4.1.e. Facteur de forme	12
1.4.2. Pertes technologiques	12
1.4.2.a. Pertes de photons incidents	12
1.4.2.b. Pertes par ombrage de la surface active de la cellule	12
1.4.2.c. Pertes par absorption	12
1.4.2.d. Pertes de collecte	12
<b>1.5 Modélisation d'une cellule photovoltaïque</b>	<b>13</b>
1.5.1. Cellule photovoltaïque idéale	13
1.5.2 Cellule photovoltaïque réelle	14
1.5.3 Paramètres des cellules photovoltaïques	16
1.5.3.a. Courant de court-circuit, $I_{CC}$	16
1.5.3.b. Tension à circuit ouvert, $V_{CO}$	17
1.5.3.c. Puissance débitée	17
1.5.3.d. Facteur de forme, FF	18
1.5.3.e. Le rendement	19
<b>Conclusion</b>	<b>19</b>

## **Chapitre 2 : Technologie et caractérisations associées**

<b>2.1 Introduction</b>	<b>20</b>
<b>2.2 Filières technologiques de fabrication de la cellule PV</b>	<b>20</b>
2.2.1 Cellules photovoltaïques à base de semi-conducteurs	20
2.2.1. a. Filière Silicium	21
2.2.1. b. Autres Semi-conducteurs	25
2.2.2. Cellules photovoltaïques organiques	27
<b>2.3 Méthodes standard de fabrication d'une cellule PV en Silicium multi cristallin</b>	<b>28</b>
2.3.1. Elaboration des lingots de silicium multi cristallin	29
2.3.2 Découpe	29
2.3.3 Traitement de surface et texturisation	29
2.3.4 Formation de la jonction pn	30
2.3.5 Décapage de la jonction parasite	30
2.3.6 Passivation	30
2.3.7 Couche antireflet	31
2.3.8 Métallisation avant	31
2.3.9 Métallisation arrière	31
2.3.10 Co-firing	31
<b>2.4 Réalisation de la cellule solaire au sein du CRTSE</b>	<b>32</b>
<b>2.5. Caractérisations de la cellule PV</b>	<b>34</b>
2.5.1. Caractérisations au cours du process	34
2.5.2. Caractérisations électriques de la cellule	36
2.5.2.a. Simulateur I – V	36
2.5.2.b. Mesure Sun-V <sub>co</sub>	38
2.5.2.c. Réponse spectrale	40
<b>2.6. Les paramètres influant sur la caractéristique I(V)</b>	<b>43</b>
2.6.1. L'influence de l'éclairement	44
2.6.2. L'influence de la température sur le rendement	44
2.6.3. Influence de la résistance série R <sub>s</sub>	46
2.6.4. Influence de la résistance parallèle R <sub>p</sub>	46
2.6.5. Influence de l'angle d'incidence	47
<b>2.7. Limitation des pertes</b>	<b>48</b>
2.7.1 L'émetteur et la base	48
2.7.2 La texturisation de la surface	49
2.7.3 Les contacts face avant et face arrière	49
2.7.4 La passivation	50
2.7.4.a Passivation par neutralisation des défauts d'interface	50
2.7.4.b. Passivation par effet de champ	50
<b>Conclusion</b>	<b>51</b>

## **Chapitre 3 : Caractérisations et extraction des paramètres des cellules PV, et interprétations des résultats obtenus**

<b>3.1 Introduction</b>	<b>52</b>
<b>3.2. Mesures effectuées sur les cellules</b>	<b>54</b>
3.2.1 Mesures effectuées sur les cellules sous éclairements	54
3.2.1.a. Mise en évidence de l'influence de la lumière	54
3.2.1.b Mesures de cellules multi cristalline de process de fabrication différents	59
3.2.2. Mesures sous obscurité	61
3.2.3 Mesure Sun-Vco	62
3.2.4. Mesure de la réponse spectrale	64
<b>3.3. Méthodes utilisées d'extraction des paramètres électriques des cellules</b>	<b>66</b>
3.3.1. Méthodes d'extraction de Rs et Rp sous éclairement	66
3.3.1.a. Méthode d'extraction graphique par la pente	66
3.3.1.b. Méthode de Wolf et Rauschenbach	68
3.3.1.c. Méthode S Bowden	70
3.3.1.d. extraction à partir d'un programme développé au CRTSE	71
3.3.2. Méthodes d'extraction graphique des paramètres de la cellule sous obscurité	71
<b>3.4- Résultats obtenus</b>	<b>75</b>
3.4.1 Résistance série	75
3.4.2. Résistance parallèle Rp	75
3.4.3.-Densités de courants de saturation et facteurs d'idéalité des diodes	76
<b>3.5 . Influence de la résistance série et parallèle sur le facteur forme d'une cellule PV</b>	<b>78</b>
3.5.1. Mise en évidence de la résistance série et parallèle	78
3.5.2. Influence de la résistance série et parallèle sur le facteur forme	78
<b>3.6. Amélioration des performances de la cellule</b>	<b>81</b>
3.6.1. Effet du décapage HF après mesure I(V)	81
3.6.2. Effet de l'isolation des bords de la cellule	82
3.6.3. Effet du drive-in	82
3.6.4. Effet du etch back	84
3.6.5. Effet de la couche antireflet	84
<b>3.7. Conclusion</b>	<b>85</b>

<b>Conclusion générale</b>	<b>86</b>
----------------------------	-----------

**Annexes**

**Bibliographie**

## Liste des figures

### Chapitre 1 : Du rayonnement à la cellule solaire

<b>Figure 1-1</b> : répartition spectrale du soleil	1
<b>Figure.1-2</b> : Représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5. le domaine spectral utile aux cellules en silicium est mis en évidence	2
<b>Figure. 1-3</b> : Vue en coupe d'une cellule photovoltaïque	4
<b>Figure.1-4</b> : Schéma d'une jonction P-N	4
<b>Figure1-5</b> : Coefficient d'absorption du silicium et profondeur de pénétration des photons en fonction de la longueur d'onde	6
<b>Figure. 1-6</b> : Structure (image gauche) et diagramme de bande (image droite) d'une cellule photovoltaïque	7
<b>Figure.1-7</b> :Parcours des électrons dans le photovoltaïque	9
<b>Figure.1.8- (a)</b> : caractéristiques courant-tension de la cellule PV sous éclairement et sous obscurité	9
<b>Figure.1.8 -(b)</b> : représentation conventionnelle de la courbe I(V)	9
<b>Figure.1-9</b> : différentes pertes lors de la conversion PV du rayonnement solaire en énergie électrique	10
<b>Figure.1-10</b> : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale	13
<b>Figure. 1-11</b> : La caractéristique I (V) d'une cellule photovoltaïque idéale	14
<b>Figure.1-12</b> : Schéma équivalent du modèle à deux diodes (deux exponentielles)	15
<b>Figure.1-13</b> : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle (une diode)	16

### Chapitre 2 : Technologie et caractérisations associées

<b>Figure.2-1</b> : Récapitulatif des filières technologiques d'une cellule PV	28
<b>Figure.2-2</b> : Composition d'une cellule solaire	31
<b>Figure. 2-3</b> :Résumé de la réalisation d'une cellule solaire au sein du CRTSE	33
<b>Figure.2-4</b> : Schéma de principe du banc de mesure Suns-Vco.	39
<b>Figure 2-5</b> : schéma électrique approximatif lors d'une mesure sun-vco	40
<b>Figure 2-6</b> : Influence du flux lumineux sur la caractéristique I (V) de la cellule solaire (T=25°)	44
<b>Figure.2.7</b> : Courbe I (V) d'une cellule à diverses températures	45
<b>Figure.2.8</b> Influence de la résistance série	46
<b>Figure.2.9</b> : Effet de la résistance shunt sur la courbe (V)	47
<b>Figure 2.10</b> : Influence de l'angle d'incidence sur la puissance reçue et absorbée de façon utile	48

## **Chapitre 3 : Caractérisations et extraction des paramètres des cellules PV, et interprétations des résultats obtenus**

<b>Figure.3-1-(a)</b> : l'influence de l'éclairement sur I-V pour la cellule Test 1ECL	<b>54</b>
<b>Figure.3-1-(b)</b> : l'influence de l'éclairement sur la puissance pour la cellule Test 1ECL	<b>54</b>
<b>Figure.3-2-(a)</b> : l'influence de l'éclairement sur I-V pour la cellule Test 2ECL	<b>55</b>
<b>Figure.3-2-(b)</b> : l'influence de l'éclairement sur la puissance pour la cellule Test 2ECL	<b>55</b>
<b>Figure.3-3-(a)</b> : l'influence de l'éclairement sur I-V pour la cellule Test 3ECL	<b>56</b>
<b>Figure.3-3-(b)</b> : l'influence de l'éclairement sur la puissance pour la cellule Test 3ECL	<b>56</b>
<b>Figure.3-4-(a)</b> : l'influence de l'éclairement sur I-V pour la cellule Test 4ECL	<b>56</b>
<b>Figure.3-4-(b)</b> l'influence de l'éclairement sur la puissance pour la cellule Test 4ECL	<b>56</b>
<b>Figure.3-5-(a)</b> l'influence de l'éclairement sur I-V pour la cellule Test 5ECL	<b>57</b>
<b>Figure.3-5-(b)</b> l'influence de l'éclairement sur la puissance pour la cellule Test 5ECL	<b>57</b>
<b>Figure.3-6-(a)</b> l'influence de l'éclairement sur I-V pour la cellule Test 6ECL	<b>58</b>
<b>Figure.3-6-(b)</b> l'influence de l'éclairement sur la puissance pour la cellule Test 6ECL	<b>58</b>
<b>Figure.3.8.</b> Variation du courant $I_{cc}$ et $I_m$ en fonction de l'éclairement de la cellule 1ECL	<b>58</b>
<b>Figure.3.9.</b> Variation de $V_{co}$ et de $V_m$ en fonction de l'éclairement de la cellule 1ECL	<b>58</b>
<b>Figure.3-10</b> : Mesure sous obscurité de la caractéristique J-V de la cellule Test 1ECL	<b>61</b>
<b>Figure 3-11</b> : Mesure sous obscurité de la caractéristique J-V de la cellule Test 2ECL	<b>61</b>
<b>Figure.3-12</b> : Mesure sous obscurité de la caractéristique J-V de la cellule Test 3ECL	<b>61</b>
<b>Figure.3-13</b> : Mesure sous obscurité de la caractéristique J-V de la cellule Test 4ECL	<b>61</b>
<b>Figure.3-14</b> : Mesure sous obscurité de la caractéristique J-V de la cellule Test 5ECL	<b>62</b>
<b>Figure 3-15</b> : Mesure sous obscurité de la caractéristique J-V de la cellule Test 6ECL	<b>62</b>
<b>Figure.3-16-(a)</b> : rendement quantique en fonction de la longueur d'onde	<b>64</b>
<b>Figure.3-16-(b)</b> : réponse spectrale en fonction de la longueur d'onde	<b>64</b>
<b>Figure 3-17</b> : Détermination graphique de la résistance parallèle	<b>66</b>
<b>Figure.3-18</b> : Mesure de $R_s$ de la cellule Test 1ECL par la méthode Wolf et Rauschenbach	<b>69</b>
<b>Figure.3-19</b> : Mesure de $R_s$ de la cellule Test 1ECL par la méthode Bowden	<b>71</b>
<b>Figure.3-20</b> : Extraction graphique sous obscurité : courbe $\log(I)$ en fonction de $V$	<b>72</b>
<b>Figure.3.21</b> .Mise en évidence de la résistance série et parallèle	<b>78</b>
<b>Figure 3-22-(a)</b> :caractéristique électrique et courbe de puissance de la cellule Test3ECL pour un éclairement de 1000W	<b>79</b>
<b>Figure 3-22-(b)</b> :Caractéristique électrique et courbe de puissance de la cellule Test5ECL pour un éclairement de 1000W	<b>79</b>
<b>Figure.3-23-(a)</b> Caractéristiques I-V pour la cellule Test 6ECL	<b>81</b>
<b>Figure.3-23-(b)</b> Courbes puissances pour la cellule Test 6ECL	<b>81</b>
<b>Figure.3-24-(a)</b> Caractéristiques I-V pour la cellule Test 9ECL	<b>82</b>
<b>Figure.3-24-(b)</b> courbes de puissance pour la cellule Test 9ECL	<b>82</b>
<b>Figure. 3-25-(a)</b> Caractéristiques I-V pour les cellules Test 4 et 9ECL	<b>83</b>
<b>Figure. 3-25-(b)</b> Courbes de puissance pour les cellules Test 4 et 9ECL	<b>83</b>
<b>Figure.3-26-(a)</b> : Caractéristiques I-V pour les cellules Test 5 et 6ECL Effet du Etchback	<b>84</b>
<b>Figure.3-26-(b)</b> : Caractéristiques de puissance pour les cellules Test 5 et 6ECL effet du Etchback	<b>84</b>
<b>Figure.3-27-(a)</b> Caractéristiques I-V pour les cellules Test 1 et 2ECL	<b>85</b>
<b>Figure.3-27-(b)</b> Courbes de puissance pour les cellules Test 1 et 2ECL	<b>85</b>

## Liste des tableaux

<b>Tableau 3.1</b> Présentation des cellules utilisées	<b>53</b>
<b>Tableau 3.2</b> Paramètres électriques de la cellule Test 1ECL sous éclairnement	<b>54</b>
<b>Tableau 3.3</b> Paramètres électriques de la cellule Test 2ECL sous éclairnement	<b>55</b>
<b>Tableau 3.4</b> Paramètres électriques de la cellule Test 3ECL sous éclairnement	<b>55</b>
<b>Tableau 3.5.</b> Paramètres électriques de la cellule Test 4ECL sous éclairnement	<b>56</b>
<b>Tableau 3.6</b> Paramètres électriques de la cellule Test 5ECL sous éclairnement	<b>57</b>
<b>Tableau 3.7.</b> Paramètres électriques de la cellule Test 6ECL sous éclairnement	<b>57</b>
<b>Tableau 3.8</b> Paramètres électriques de la cellule Test 6ECL avant et après HF	<b>59</b>
<b>Tableau 3.9</b> :Paramètres électriques de la cellule Test 7ECL avant et après HF	<b>60</b>
<b>Tableau 3.10</b> :Paramètres électriques de la cellule Test 6ECL avant et après HF	<b>60</b>
<b>Tableau 3.11</b> :Paramètres électriques de la cellule Test 9ECL après isolation	<b>60</b>
<b>Tableau 3.12</b> Tableau comparatif des mesures par I-V et Sun-Vco	<b>63</b>
<b>Tableau 3.13</b> Caractéristiques Sun Vco de quelques cellules	<b>63</b>
<b>Tableau.3.14</b> Tableau récapitulatif des longueurs de diffusion extraites des cellules Test6,7,8ECL	<b>65</b>
<b>Tableau 3.15</b> Tableau comparatif des mesures de Rs par les 3 méthodes	<b>75</b>
<b>Tableau 3.16</b> Tableau comparatif des mesures de Rp par les 3 méthodes	<b>76</b>
<b>Tableau 3.17</b> Tableau de mesures des densités de courants de saturation et facteurs d'idéalités par les 3 méthodes	<b>77</b>
<b>Tableau 3-18</b> : Résumé des calculs pour les cellules Test3 et 5ECL	<b>80</b>

## Liste des photos

<b>Photo 2-1</b> : Une cellule photovoltaïque à base de silicium monocristallin	<b>22</b>
<b>Photo 2-2</b> : Cellule photovoltaïque en silicium poly cristallin	<b>22</b>
<b>Photo 2-3</b> : Une cellule photovoltaïque à base de silicium multi cristallin	<b>23</b>
<b>Photo 2-4</b> : Une cellule photovoltaïque à base de silicium amorphe	<b>24</b>
<b>Photo 2.5</b> Simulateur solaire classe A Oriel	<b>37</b>
<b>Photo 2.6</b> Simulateur sun-voc	<b>38</b>

# **Introduction générale**

# Introduction générale

---

La plus grande partie de l'énergie consommée actuellement provient de l'utilisation des combustibles fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou encore l'énergie nucléaire. Ces ressources deviennent de plus en plus rares, pendant que les demandes énergétiques du monde s'élèvent continuellement. Il est estimé que les réserves mondiales seront épuisées vers 2030 si la consommation n'est pas radicalement modifiée, et au maximum vers 2100 si des efforts sont produits sur la production et la consommation [1].

Il s'avère alors nécessaire de trouver une autre solution pour prendre le relais, à ce sujet, Les énergies renouvelables, comme l'énergie solaire photovoltaïque, éolienne ou hydraulique, apparaissent comme des énergies inépuisables et facilement exploitables. [2].

Les cellules photovoltaïques (PV) ouvrent la possibilité de produire de l'électricité directement à partir du rayonnement solaire. La production mondiale d'énergie solaire photovoltaïque connaît depuis 1992 une croissance annuelle de 10 à 30% et a littéralement explosé depuis 2004 avec une croissance d'environ 40% par an [3].

Le terme photovoltaïque vient du grec "photos " qui désigne la lumière et de " voltaïque ", mot dérivé du physicien italien Alessandro VOLTA, connu pour ses travaux sur l'électricité.[3]L'énergie solaire photovoltaïque fut découverte en 1839 par Antoine César Becquerel physicien Français. L'effet photovoltaïque permet la transformation de l'énergie lumineuse en électricité. Ce principe repose sur la technologie des semi-conducteurs. Il consiste à utiliser les photons pour libérer les électrons et créer une différence de potentiel entre les bornes de la cellule qui génère un courant électrique continu.[4] A la différence des autres énergies renouvelables, l'énergie solaire est disponible partout sur la terre. Il n'y a donc pas de problème de gisement pour cette source. Les premières applications ont lieu dès les années 60 avec l'équipement de satellites spatiaux. Puis à partir de 1970, les premières utilisations terrestres ont concerné l'électrification des sites isolés. La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire est apte à

répondre à une demande croissante d'énergie renouvelable. Elle est considérée comme devant prendre une part significative dans l'approvisionnement énergétique mondial. Celle-ci sera d'autant plus grande et d'autant plus rapide que des méthodes permettant de produire de l'électricité solaire à moindre coût seront utilisées.[4]

La puissance des installations est exprimée en Watt crête (Wc). Le Wc est la puissance fournie par un module photovoltaïque pour un ensoleillement normalisé de 1000W par m<sup>2</sup>, à une température de 25°C. Le rendement électrique est le rapport puissance lumineuse incidente sur puissance électrique fournie. Les modules existants permettent des rendements électriques compris entre 5 et 15%.[4]

La recherche est très active dans le domaine du solaire photovoltaïque. Les prix diminuent constamment et les rendements progressent.

En 20 ans, les rendements sont passés de 15% à 36% dans les laboratoires. Ce dernier chiffre serait celui atteint sur Terre par les cellules solaires utilisées par les robots martiens. Les rendements des systèmes disponibles commercialement sont quant à eux passés de 5% à plus de 20%.[3].

Cet accroissement était accompagné par une valorisation des recherches visant l'optimisation de l'énergie fournie par les cellules solaires. La modélisation de ces dernières s'impose comme une étape cruciale et a conduit à une diversification dans les modèles proposés par les différents chercheurs. Leurs différences se situent principalement dans le nombre de diodes, la résistance shunt finie ou infinie, le facteur d'idéalité constant ou non, ainsi que les méthodes numériques utilisées pour la détermination des différents paramètres inconnus [5].

Dans son fonctionnement la cellule photovoltaïque est le siège de phénomènes physiques qui se superposent et sont parfois intimement liés à la technologie de fabrication. Certains de ces phénomènes sont à l'origine du faible rendement de la cellule.

La caractéristique courant-tension de la cellule photovoltaïque reflète l'ensemble de ces phénomènes et son expression analytique fait intervenir des paramètres qui soulignent les différents aspects du problème. [2]

Ces paramètres ne sont pas généralement des quantités mesurables ou incluses dans les données de la fabrication. En conséquence, ils doivent être déterminés à partir des

systèmes des équations I-V à divers points de fonctionnement donnés par le constructeur ou tirés des essais expérimentaux [6].

L'objectif de ce présent mémoire est de mesurer avec précision la caractéristique courant-tension de plusieurs cellules ayant subi un processus de fabrication différent pour en extraire les différents paramètres, et évaluer leurs influences sur le comportement de la cellule photovoltaïque à l'obscurité et sous éclairement puis nous allons déterminer leur réponse spectrale ainsi que leur rendement quantique.

Ce mémoire est organisé comme suit :

Dans le premier chapitre nous faisons appel aux notions générales sur le rayonnement solaire, l'effet photovoltaïque, les Pertes physiques et technologiques, nous parlerons aussi de la Modélisation d'une cellule photovoltaïque idéale et réelle, ainsi que des différents paramètres des cellules photovoltaïques.

Dans le deuxième chapitre, nous citerons les Filières technologiques de fabrication de la cellule PV (à base de semi-conducteurs et organique) , par la suite nous décrirons la méthode standard de fabrication d'une cellule PV en Silicium multi cristallin , puis la réalisation de la cellule solaire au sein du CRTSE, Caractérisations de la cellule PV , ainsi que Les paramètres influant sur la caractéristique I(V) et nous finirons le chapitre par la limitation des pertes.

Le troisième chapitre sera consacré aux différentes mesures et résultats expérimentaux effectuées sur les cellules étudiées (mesure sous éclairement, obscurité ,sun-vco, réponse spectrale), nous décrirons quelques méthodes utilisées d'extraction des paramètres électriques des cellules et les résultats obtenus, puis nous allons interpréter les différents résultats expérimentaux obtenus , ainsi que les différentes influences sur les cellules étudiées , nous terminerons par des propositions d'amélioration des performances des cellules.

Enfin nous terminerons par une **conclusion générale**.

# Chapitre 1 : Du rayonnement à la cellule photovoltaïque

---

## 1.1. Introduction

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante. La quantité d'énergie libérée par le soleil pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an. Une partie de ce rayonnement peut être exploitée pour produire directement de l'électricité : c'est l'énergie solaire photovoltaïque. La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux États-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage". [7]

Dans ce chapitre on présentera très brièvement le rayonnement solaire, puis on décrira l'effet photovoltaïque, la cellule solaire, les pertes physiques et technologiques, et enfin la modélisation d'une cellule solaire.

## 1.2 Le rayonnement solaire

### 1.2.1 La ressource solaire

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0.1 à 10 microns mètre. La Figure 1.1. : représente la variation de la répartition spectrale:

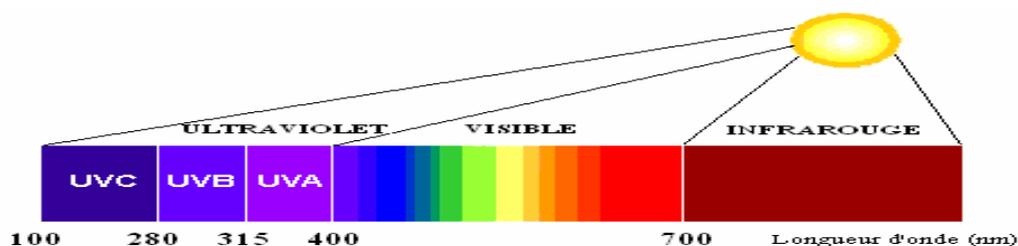


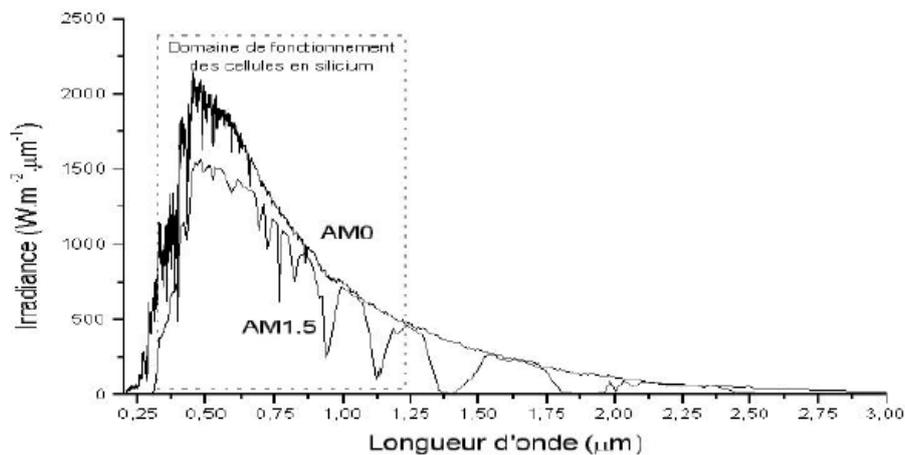
Figure 1.1 : répartition spectrale du soleil[8]

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de 1.37 kilowatt au mètre carré (kW/m<sup>2</sup>) à plus ou moins 3% selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du soleil dans sa rotation autour de celui-ci.

L'atmosphère en absorbe toute fois une partie de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement (1.2 kW/m<sup>2</sup>). La rotation et l'inclinaison de la terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison. [8]

### 1.2.2 Spectre solaire

Le soleil se comporte comme un corps noir dont la surface est à la température d'environ 5800 K. A la traversée de l'atmosphère, la lumière est absorbée et dispersée en particulier par les composants atmosphériques importants tels que le CO<sub>2</sub> et la vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O), de sorte que le spectre atteignant la surface de la terre soit atténué et changé dans la forme [7] , figure .1.2



**Figure.1.2** : Représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5. le domaine spectral utile aux cellules en silicium est mis en évidence [7]

Une mesure pour le spectre solaire est l'air Mass (noté AM). Elle est définie comme suit :

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} \quad (1-1)$$

Où  $\theta$  est l'angle entre le soleil et le zénith.

L'unité AM0 correspond à l'irradiance du soleil hors atmosphère ; AM1 correspond à l'irradiance du soleil quand il est au zénith (distance minimum à parcourir par les photons à travers l'atmosphère), la référence la plus utilisée est AM1,5G, elle correspond à une position à 45 degrés du soleil par rapport au zénith et permet d'obtenir un rayonnement d'environ 1kW/m<sup>2</sup>. le G représente le rayonnement global [7]

Il est clair, d'après ce qui précède, que la partie la plus importante du spectre solaire à la surface de la terre concerne le domaine du visible et de proche infrarouge. Les irradiances définies par le nombre AM ne tiennent toutefois pas compte de la variété des conditions climatiques et de l'altitude du lieu. [7]

### **1.3 L'effet photovoltaïque (ou photoélectrique)**

Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont excités par les photons constituant la lumière; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être "arrachés":

Si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique.

Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons "arrachés" créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique: c'est l'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque constitue donc la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium [9].

#### **1.3.1 Description de la cellule solaire :**

Un cristal semi-conducteur dopé P est recouvert d'une zone très mince dopée N et d'épaisseur égale à quelques millièmes de mm. Entre les deux zones se trouve une jonction J. La zone N est couverte par une grille métallique qui sert de cathode **k** tandis qu'une plaque métallique **a** recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode. L'épaisseur totale du cristal est de l'ordre du mm.(figure 1-3) [10].

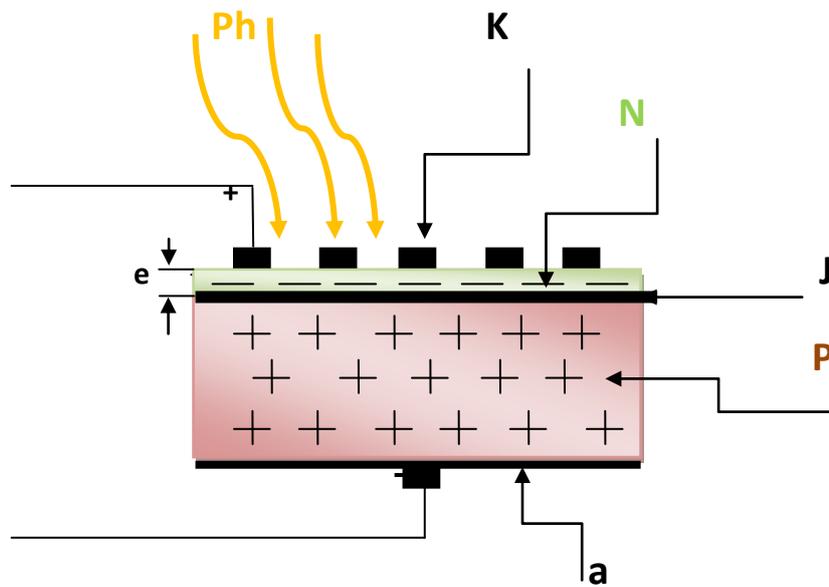


Figure. 1-3. : Vue en coupe d'une cellule photovoltaïque

### 1.3.2 Structure d'une cellule solaire :

Au moment de la création de la jonction P-N, les électrons libres de la région N rentrent dans la couche P et vont se recombinaer avec les trous de la région P. Il existera ainsi, pendant toute la vie de la jonction, une charge positive de la région N au bord de la jonction (parce que les électrons en sont partis) et une charge négative dans la région P au bord de la jonction (parce que les trous en ont disparu) ; l'ensemble forme la Zone de Charge d'Espce (ZCE) et il existe un champ électrique entre les deux, de N vers P.[9], (figure 1-4)

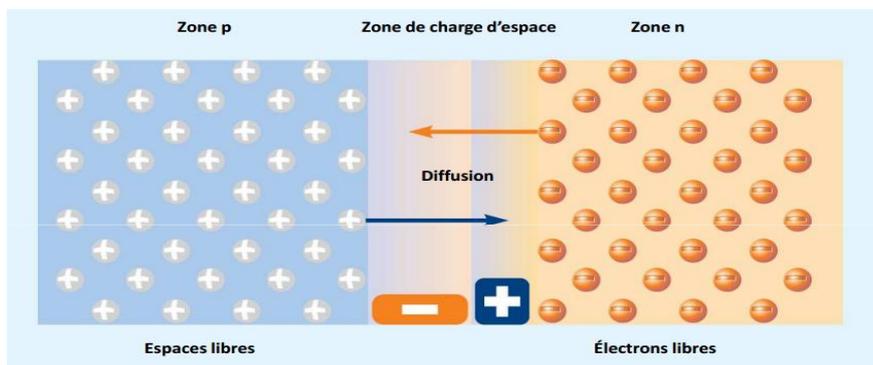


Figure.1-4.Schéma d'une jonction P-N : zone de charge d'espace[11]

### **1.3.2.a. Le transfert de l'énergie du photon à l'électron:**

A chaque photon, on associe une longueur d'onde  $\lambda$  telle que

$$E_{ph} = h \cdot \nu \quad (1-2)$$

où  $\nu$  est la fréquence associée à la longueur d'onde et  $h$  la constante de Planck.

Pour passer de l'énergie du photon  $E_{ph}$  à la longueur d'onde, on utilise la relation suivante la [10]:

$$E_{ph} = \frac{hc}{\lambda} \quad (1-3)$$

Où  $\lambda$  est la longueur d'onde et  $c$  la vitesse de la lumière .

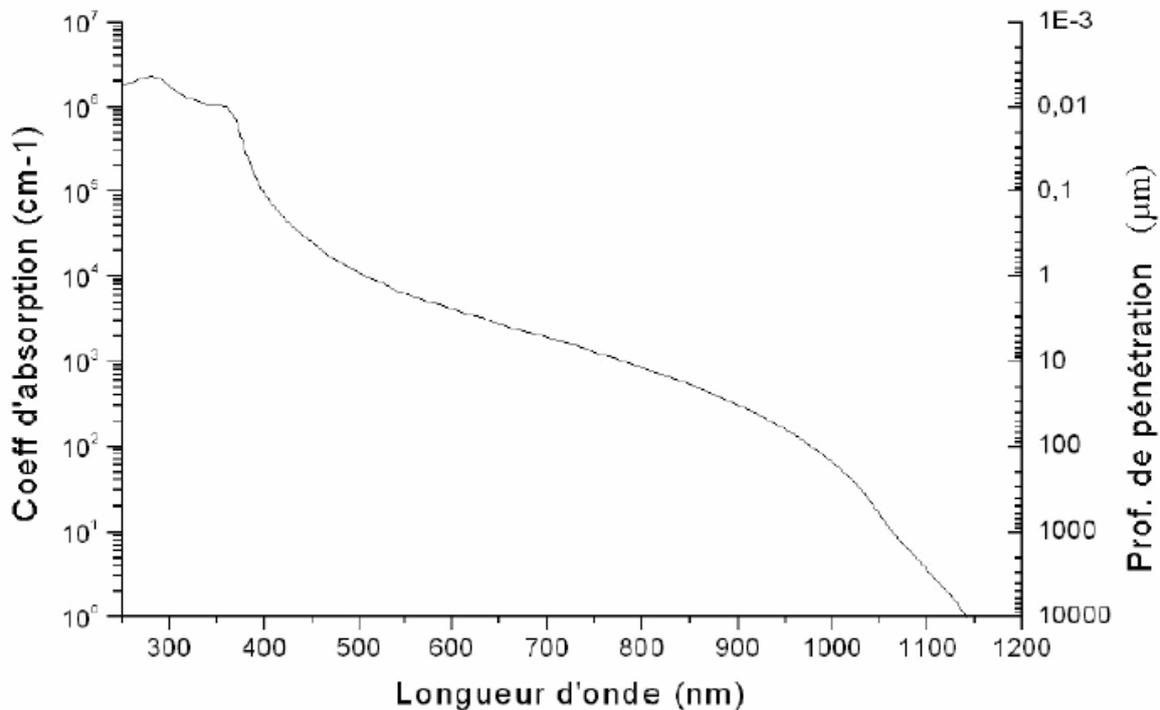
La cellule solaire est sensible seulement dans un domaine des longueurs d'ondes particulier et seul un matériau semi-conducteur dispose de la structure de bande nécessaire à la génération, à partir du rayonnement solaire, de paires électrons -trous utilisables.

En effet, dans un métal, tous les niveaux supérieurs au niveau de Fermi sont autorisés et toutes les longueurs d'onde sont donc susceptibles d'être absorbées. Cependant, les paires électrons-trous générées se recombinent quasi-instantanément, ce qui ne laisse pas la possibilité de les exploiter.

Dans un semi-conducteur, la structure des bandes de conduction et de valence définissent un gap plus faible que dans le cas des isolants : de 0.3 eV à 2 ou 3 eV. La génération de paires électrons-trous est engendrée par absorption d'un photon qui permet à un électron de la bande de valence de passer dans la bande de conduction. Celui-ci laisse une pseudo-charge positive dans la bande de valence : le trou. Cette transition est régie par les lois de la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement. [12]

L'interaction entre les photons et les électrons se traduit pour le Silicium par le coefficient d'absorption. Il correspond au nombre de photons absorbés par unité d'épaisseur de matériau en fonction de la longueur d'onde. Pour le silicium la majorité des photons ayant une énergie supérieure au gap direct de 3,4eV (365nm) est absorbée dans les 10 premiers nanomètres du matériau. Ces transitions directes ne sont plus possibles pour des longueurs d'onde plus importantes (Figure 1-5). Il faut alors qu'un (ou plusieurs) phonon vienne assister l'électron pour que ce dernier passe dans la bande de conduction, réduisant ainsi la probabilité de transition. Le coefficient d'absorption diminue donc pour des longueurs d'onde croissantes. [12]

Lorsque l'énergie du photon devient inférieure à celle du gap du matériau (à l'énergie d'un photon près), la transition n'est plus possible et le photon n'est pas absorbé.



**Figure1-5 :** Coefficient d'absorption du silicium et profondeur de pénétration des photons en fonction de la longueur d'onde. D'après [13]

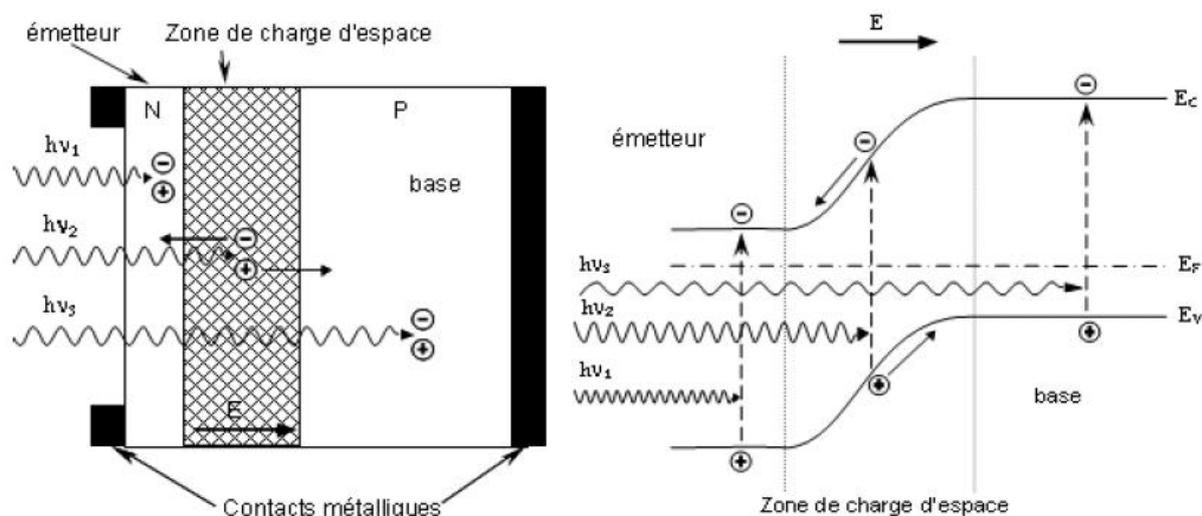
L'interaction photon/électron au sein du semi-conducteur se traduit par la génération d'une paire électron-trou, qui modifie localement la conductivité du matériau. Le dopage du silicium (p ou n) étant en général supérieur au taux de photo génération (régime de basse injection), les porteurs minoritaires (électrons dans un matériau de type p et trous dans un matériau de type n) sont métastables et n'existeront en moyenne que pour un temps égal à la durée de vie  $\tau$ . Elle correspond au temps moyen entre la création d'une paire électron-trou et sa recombinaison. [12]

### **1.3.2.b. La collecte des porteurs photo générés:**

La séparation des paires électrons-trous est en général réalisée dans les cellules photovoltaïques par la création d'une barrière de potentiel dans le semi-conducteur. Les types de barrières les plus communes sont l'homo jonction (jonction p/n dans le même semi conducteur), hétérojonction (jonction p/n entre deux matériaux différents) et barrières

Schottky (métal/ semi conducteur). Dans le cas des cellules photovoltaïques, l'homo jonction par sur-dopage du silicium est la solution la plus utilisée, Figure I-6.

Il faut donc pour créer un courant électrique dissocier les paires électrons-trous photo générées et les collecter dans un circuit électrique extérieur avant qu'elles ne se recombinent librement au sein du matériau. [3]



**Figure. 1-6:** Structure (image gauche) et diagramme de bande (image droite) d'une cellule photovoltaïque. [3]

Les photo-porteurs auront un comportement différent suivant la région où ils sont créés :

- Dans la zone n ou p, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont "envoyés" par le champ électrique dans la zone p (pour les trous) ou dans la zone n (pour les électrons) où ils seront majoritaires. On aura un *photo-courant de diffusion*. [7]
- Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons-trous créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région n, les trous vers la région p. On aura un *photo-courant de génération*. [7]

Ces deux courants s'ajoutent pour donner le photo courant  $I_{ph}$  qui est proportionnel à l'intensité lumineuse. Ce courant s'oppose au courant de diode  $I_{obs}$  qui résulte de la polarisation du composant. Le courant résultant est

$$I(V) = I_{ph} - I_{obs} \quad (1-4)$$

$I_{ph}$  : intensité du photo courant provenant de l'éclairement

$I_{obs}$  : le courant d'obscurité de la diode

### **1.3.3. Principe de fonctionnement de la cellule solaire**

Le fonctionnement de la cellule repose donc entièrement sur les propriétés d'une jonction PN soumise à un éclairement. Sous l'effet de l'énergie incidente des photons, les porteurs minoritaires de la jonction peuvent acquérir l'énergie nécessaire  $E$  pour franchir la bande interdite de largeur  $E_g$ . La condition est alors:  $E > E_g$ .

Tout se passe comme si un générateur de courant supplémentaire prenait naissance, de telle façon que l'expression du courant  $I$  délivré par la jonction PN soumise à la différence de potentiel  $V$  est donnée par l'équation (1-3 )

Pour une cellule PV idéale l'équation peut donc s'écrire comme suite :

$$I(V) = I_{ph} - I_s(\exp(\frac{qV}{kT}) - 1) \quad (1-5)$$

Avec  $I_s$  : courant de saturation idéale,

$q$  : charge élémentaire de l'électron

$k$ : constante de Boltzmann

$T$  : température de la jonction en degré kelvin

Sous éclairement, la caractéristique d'une cellule PV idéale est donc la superposition d'un générateur de courant d'intensité  $I_{ph}$  et de la caractéristique de cette diode sous obscurité.

La cellule produit donc de l'énergie et par convention on inverse l'axe des courants [7] ; voir figure1.8 qui présente la caractéristique  $I = f(V)$  sous éclairement et sous obscurité.

La figure 1-7. montre le parcours des électrons dans une cellule photovoltaïque soumise à un éclairage.

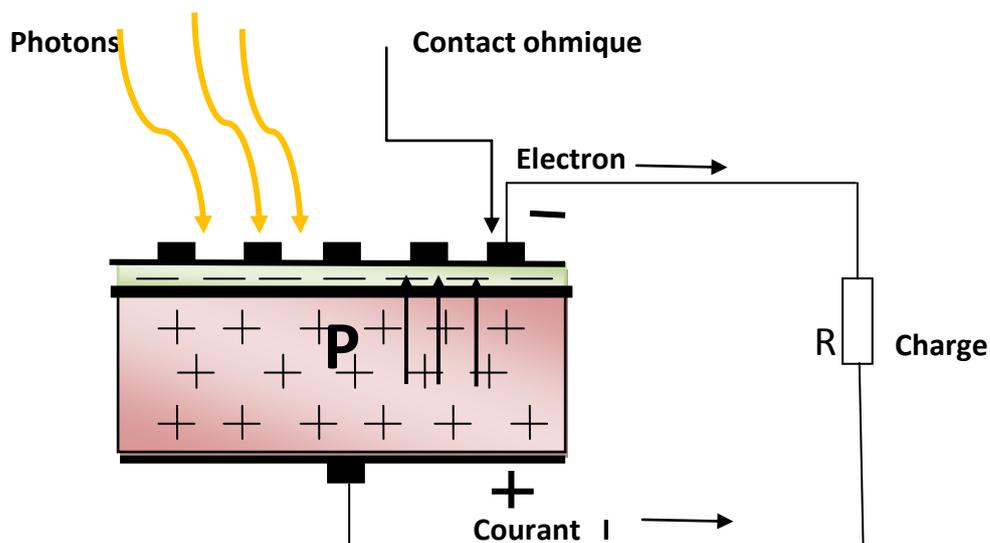


Figure.1-7:Parcours des électrons dans le photovoltaïque

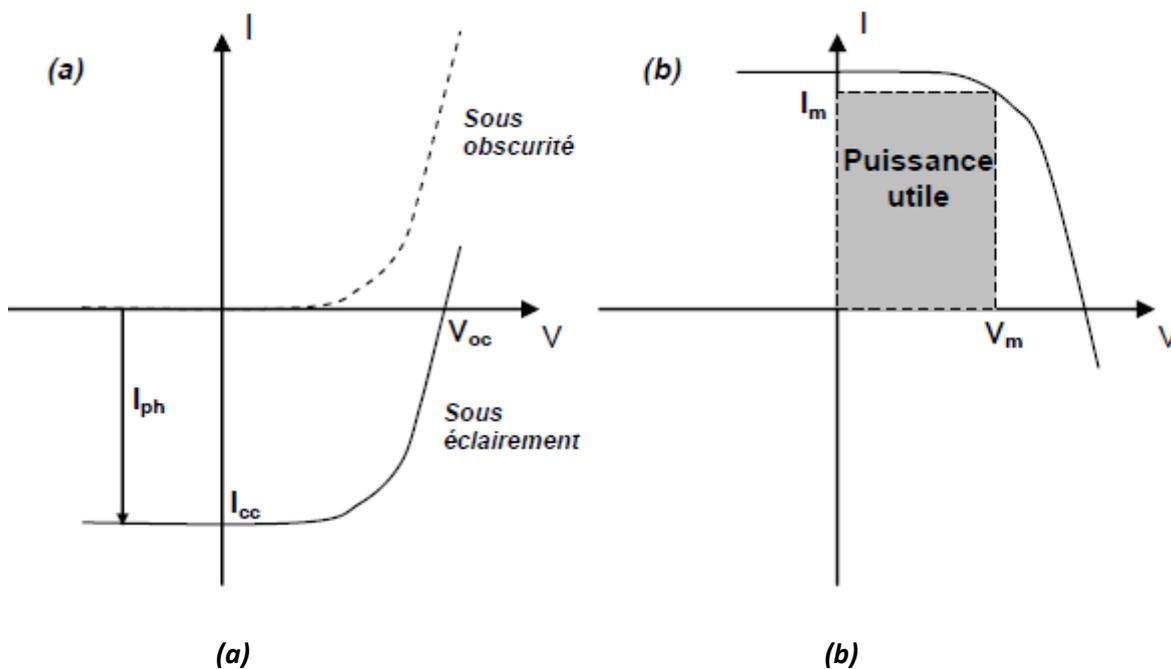


Figure.1-8-(a) : caractéristiques courant-tension de la cellule PV sous éclairement et sous obscurité ,

Figure.1-8-(b) : représentation conventionnelle de la courbe I(V)[7]

A partir de la caractéristique  $I(V)$  de la cellule PV on déduit les paramètres électriques de la cellule tels que :

$I_{cc}$  : courant de court circuit obtenu pour  $V=0$

$V_{co}$  : tension en circuit ouvert obtenu pour  $I=0$

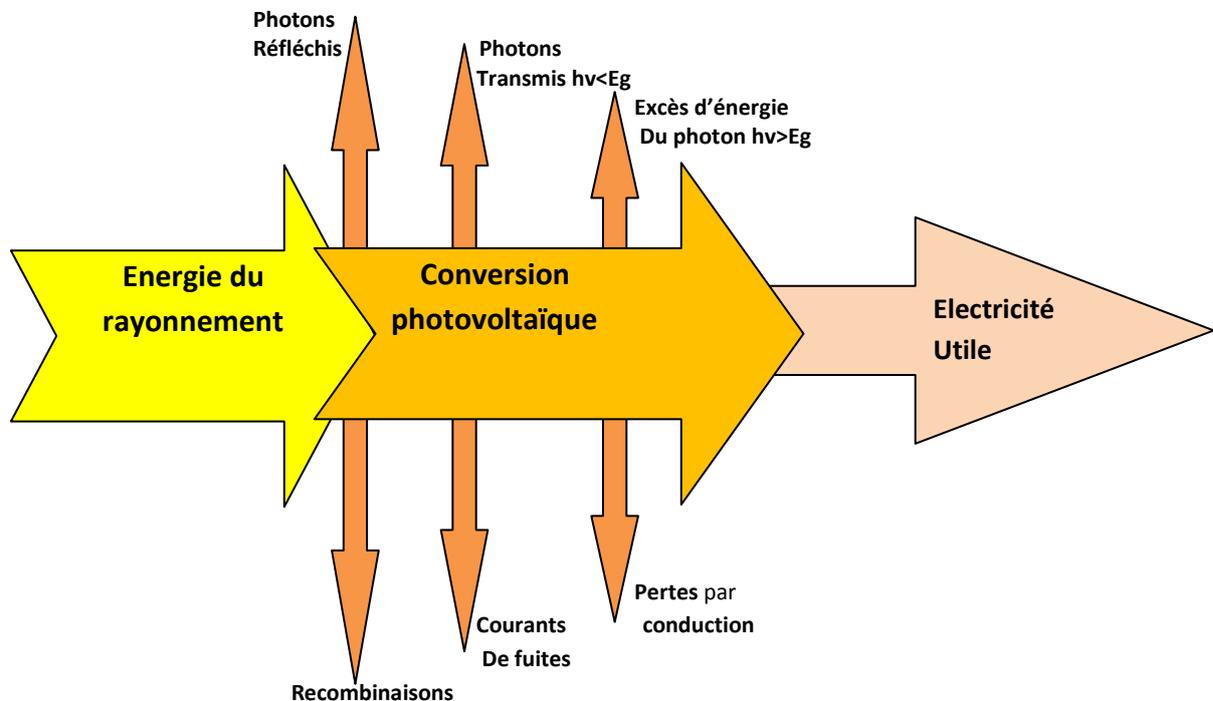
$I_m$  : courant à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule PV

$V_m$  : Tension à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule PV

FF : facteur de forme de la cellule PV.

## **1.4 Pertes physiques et technologiques**

Les pertes dans une cellule solaire peuvent être dues principalement soit aux restrictions purement physiques liées au matériau, soit aux limitations technologiques induites par le processus de fabrication, voir figure.1-9 ci-dessous :



**Figure.1-9** différentes pertes lors de la conversion PV du rayonnement solaire en énergie électrique

### **1.4.1. Pertes physiques**

#### **1.4.1.a Pertes par les photons de grande longueur d'onde :**

Tous les photons possédant une longueur d'onde supérieure à celle associée au gap du semi-conducteur ne peuvent générer de paire électron/trou et sont donc perdus. Sous un éclairage d'AM1.5, ces pertes sont évaluées à 23.5% dans le cas du silicium [9].

#### **1.4.1. b. Pertes dues à l'énergie excédentaire des photons**

Un photon absorbé génère seulement une paire électron/trou. L'excès d'énergie, supérieur à la largeur de la bande interdite, est principalement dissipé sous forme de chaleur. Sous un éclairage de AM1.5, ces pertes sont évaluées à 33% de la puissance totale dans le cas du silicium [9].

#### **1.4.1.c. Pertes dues à la recombinaison des porteurs générés**

On considère deux types de recombinaison, qui ne dépendent que de la qualité du matériau

**1/-** Les recombinaisons de surface : elles sont dues aux défauts cristallographiques présents à la surface, tels que les liaisons pendantes, les zones écrouies induites par le sciage des lingots, ... Elles sont caractérisées par  $S$  : vitesse de recombinaison en surface des porteurs minoritaires, qui peut varier de 100 cm/sec pour des surfaces très bien passivées à  $10^7$  cm/sec pour des surfaces très recombinantes ;

**2/-** Les recombinaisons en volume : elles sont dues aux défauts cristallographiques du substrat, notamment à la présence d'impuretés et de dislocations au sein du matériau. Elles sont caractérisées par la longueur de diffusion des minoritaires et par la durée de vie des porteurs minoritaires, moins il y aura de recombinaisons en volume et plus le rendement de la cellule sera élevé [9].

#### **1.4.1.d. Facteur de tension**

Le facteur de tension est le rapport entre la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) par la tension de gap, la tension d'une cellule ne correspond qu'à une fraction de sa tension de gap notamment à cause des recombinaisons électron-trou ou encore de la température de la cellule [9].

#### **1.4.1. e. Facteur de forme**

Ce facteur est lié à la forme de la caractéristique courant-tension de la cellule régit par les équations de Boltzmann. Du fait du caractère exponentiel de cette dernière, il lui est impossible d'être rectangulaire. Dans le cas d'une cellule idéale, le facteur de forme vaudrait 0.89 [9].

### **1.4.2. Pertes technologiques**

#### **1.4.2.a. Pertes de photons incidents**

Le silicium est un matériau faiblement absorbant, d'aspect métallique très réfléchissant : l'indice de réfraction du silicium étant environ 3,5 ; le coefficient de réflexion d'une interface air-Silicium est de l'ordre de 39%, ce qui représente les pertes directes de photons par réflexion sur la face avant, et son coefficient d'absorption diminue très vite au voisinage du gap, conduisant à des pertes par transmission dans le proche infrarouge.

Pour diminuer les réflexions face avant, une solution courante est le dépôt d'une couche très fine de SiNx : de quelques dizaines de nanomètres dont l'indice de réfraction (varie entre 1.9 – 2.9) est inférieur à celui du Silicium ou réaliser une double couche antireflet. Pour augmenter l'absorption dans le silicium, il faut augmenter le trajet optique des photons, c'est-à-dire les confiner dans l'épaisseur de la plaque [9].

#### **1.4.2 b. Pertes par ombrage de la surface active de la cellule.**

Le dépôt des contacts métalliques nécessaires pour collecter les charges photo générées entraîne une zone d'ombrage sur la surface exposée de la cellule en face avant qui est « perdue » pour la conversion photovoltaïque, dans le cas des cellules à contacts arrières (ou RCC pour Rear Contact Cell), le taux d'ombrage est nul [9].

#### **1.4.2.c. Pertes par absorption**

L'épaisseur finie des cellules peut limiter l'absorption de certains photons. Dans le cas du silicium, du fait de son gap indirect, les photons infrarouges sont particulièrement exposés à ce problème [9].

#### **1.4.2.d. Pertes de collecte**

Le rendement de collecte correspond au rapport entre le nombre de porteurs de charge effectivement collectés et le nombre total de charges photo génère. Ce terme prend en compte les recombinaisons électrons-trous en volume et en surface de la cellule, aussi il

dépend directement de la durée de vie des porteurs minoritaires et donc de leur longueur de diffusion  $L$ . Pour le silicium multi cristallin,  $L$  est de l'ordre de quelques centaines de  $\mu\text{m}$  [9].

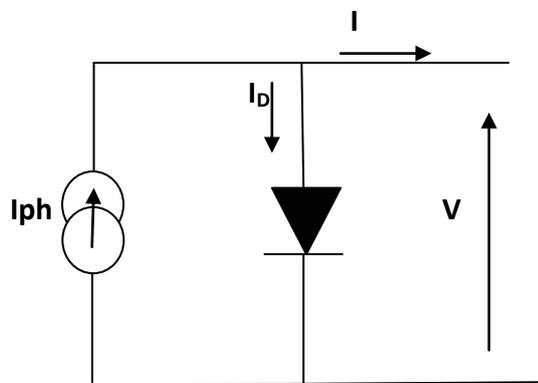
En conclusion les facteurs de pertes sont donc liés d'une part à des limitations propres au matériau et d'autre part à la technologie d'élaboration de la cellule. C'est sur ces derniers que se portent la majorité des optimisations des cellules photovoltaïques.

## 1.5 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

### 1.5.1. Cellule photovoltaïque idéale

La modélisation de cellules photovoltaïque est basée sur leurs caractéristiques électriques (Relation voltage/courant) sous diverses conditions de rayonnement et de température. Le modèle idéal à une diode développé par Rauschenbach en 1980, puis par Riger and Maguin (1982) et Green (1982) est communément accepté par la communauté scientifique. [14]

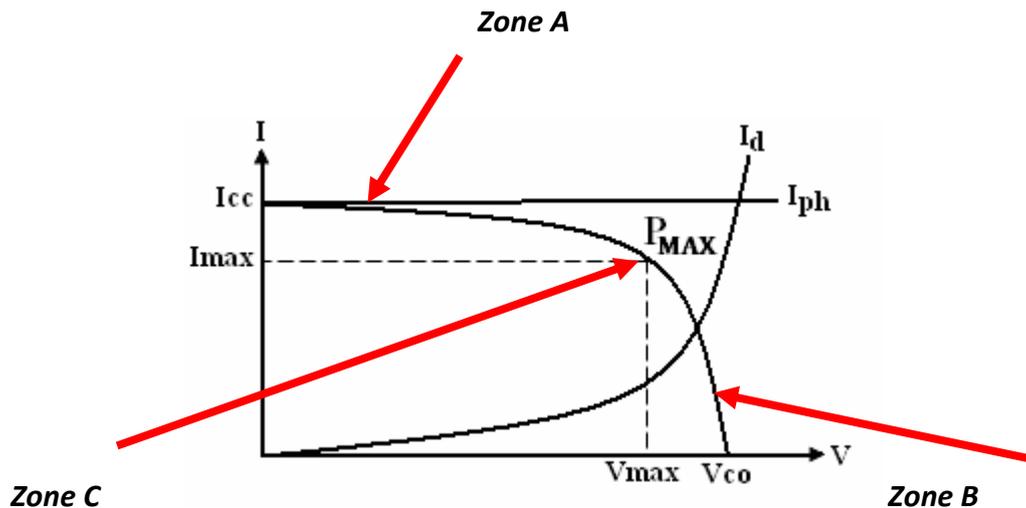
Une cellule photovoltaïque sous éclairement peut donc se représenter dans le cas idéal comme un générateur de courant  $I_{ph}$  en parallèle sur une diode (figure 1-10) :



**Figure.1-10:** Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale

Le courant dans la charge se traduit par l'équation (1-5) citée précédemment

la caractéristique  $I = f(V)$  est généralement représentée par la figure.1-11 .



**Figure. 1-11** : La caractéristique  $I(V)$  d'une cellule photovoltaïque idéale [15]:

La caractéristique comprend 3 parties[15]:

**Zone A** : la cellule est équivalente à un générateur de courant  $I_{cc}$  proportionnel à l'éclairement

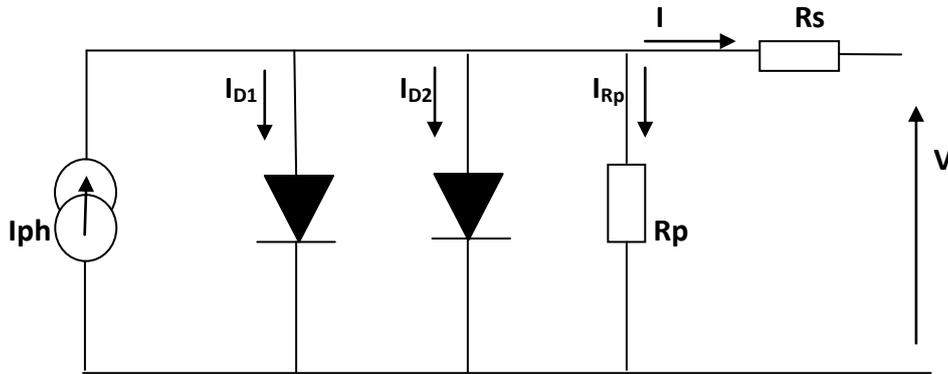
**Zone B** : la cellule se comporte comme un générateur de tension  $V_{co}$

**Zone C** : l'impédance interne du générateur varie rapidement

### **1.5.2 Cellule photovoltaïque réelle :**

La cellule photovoltaïque est représenté par un circuit électrique (Figure.1-12) qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, les pertes sont modélisées par deux résistances, une résistance shunt  $R_{sh}$ , une résistance série  $R_s$ , et deux diodes pour la polarisation de la cellule et le phénomène de la recombinaison des porteurs minoritaires .

**Modèle à deux diodes** ci-dessous Figure.1-12



**Figure.1-12:** Schéma équivalent du modèle à deux diodes (deux exponentielles)[14]

Il comprend:

- un générateur de courant dont le courant  $I_{ph}$  est proportionnel à l'éclairement,
- deux diodes dont la tension directe  $V_D$  est de l'ordre de 0,6 volts,
- une résistance série  $R_s$  représentant les diverses résistances de contact et de connexion,
- une résistance parallèle (shunt)  $R_p$  qui caractérise un courant de fuite au niveau de la jonction.

L'équation caractérisant la courbe de variation courant-tension I-V est donnée par:

$$I = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - \frac{V+I.R_s}{R_p} \quad (1-6)$$

$$I = I_{ph} - I_{01} \left[ \exp\left(\frac{q(V+R_s I)}{n_1 k T}\right) - 1 \right] - I_{02} \left[ \exp\left(\frac{q(V+R_s I)}{n_2 k T}\right) - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_p} \quad (1-7)$$

On pose  $V_t = \frac{k.T}{q}$

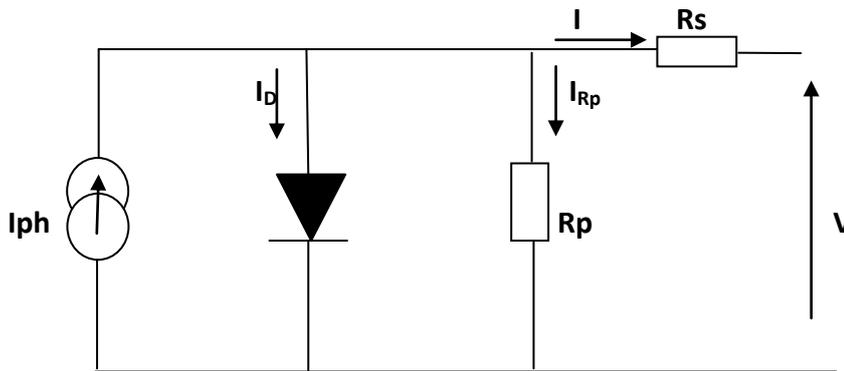
$$I = I_{ph} - I_{01} \left[ \frac{\exp(V+I R_s)}{n_1 V_t} - 1 \right] - I_{02} \left[ \frac{\exp(V+I R_s)}{n_2 V_t} - 1 \right] - \frac{V+I R_s}{R_p} \quad (1-8)$$

Dans l'équation de la cellule réelle, sept paramètres doivent être connus afin de déterminer le courant ; la tension ; et la puissance fournie à la charge.

Ces sept paramètres sont : le courant généré par l'effet photoélectrique  $I_{ph}$ , le courant inverse de saturation des deux diodes  $I_{01}$  et  $I_{02}$ , la résistance série  $R_s$ , la résistance parallèle  $R_p$ , et les facteurs d'idéalité  $n_1$  et  $n_2$ .

Si la résistance parallèle est considérée infinie, le nombre de paramètres à déterminer devient 6. Comme on trouve aussi le modèle à 5 paramètres où la résistance série est aussi non considérée. On peut utiliser ce schéma tant que  $R_s$  et  $R_p$  ne dépendent pas de l'éclairement.

**Modèle à une diode** ci-dessous, figure 1-13 :



**Figure.1-13:** Schéma équivalent du modèle à une exponentielle (une diode) [14]

$$I = I_{ph} - I_{01} \left[ \exp \left( \frac{q(V+R_s I)}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_p} \quad (1-9)$$

### **1.5.3 Paramètres des cellules photovoltaïques**

Les paramètres des cellules photovoltaïques, extraits des caractéristiques courants tensions, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques.

#### **1.5.3.a. Courant de court-circuit, $I_{cc}$ :**

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule. Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température. [16].

On peut écrire :

$$I_{cc}(V=0) = I_{ph} \quad (1-10)$$

### **1.5.3.b. Tension à circuit ouvert, $V_{co}$ :**

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt, et décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse. [16]

On peut écrire, à partir de la figure.1-10 :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{Rp} \quad (1-11)$$

$$I = I_{ph} - I_{Rp} \quad (1-12)$$

Or à circuit ouvert on a :  $I=0$

Et dans le cas idéal :  $R_p$  est infinie donc  $I_{Rp}$  est égal proche de 0

$$I_{ph} = I_D = I_s \left( \exp\left(\frac{eV}{nKT}\right) - 1 \right) \quad (1-13)$$

$$\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 = \exp\left(\frac{eV}{nKT}\right) \quad (1-14)$$

$$\ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) = \frac{eV}{nKT} \quad (1-15)$$

et donc la Tension à circuit ouvert s'écrit (eq.1-16):

$$V_{co} = \frac{nKT}{e} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad (1-16)$$

### **1.5.3.c. Puissance débitée :**

Pour l'éclairement considéré, le point  $P_m$  représente le point où la puissance de la photopile est maximale. Ce point, dit puissance maximale, est associé à une tension maximale  $V_m$  et à une intensité maximale  $I_m$ . Donc la puissance fournie par la cellule est donnée par le produit :

$$P = V * I \quad (1-17)$$

D'après les équations eq. 1-4 et eq. 1-5 on peut écrire :

$$P = V * I = V * (I_{ph} - I_s (\exp(\frac{qV}{nKT}) - 1)) \quad (1-18)$$

Cette puissance est maximum au point  $P_{max}$  Figure. (1-11) définie par

$$P_{max} = V_m * I_m = FF * V_{co} I_{cc} \quad (1-19)$$

Avec FF le facteur de forme

#### **1.5.3.d. Facteur de forme, FF :**

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). [16]

Cette puissance est maximale (notée  $P_{max}$ ) pour un point de fonctionnement  $P_M (I_M, V_M)$  de la courbe courant-tension (courants compris entre 0 et  $I_{cc}$  et tension comprise entre 0 et  $V_{co}$ ), ( figure 1-11 ).

Le nom "facteur de forme" dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage, dérive de la représentation graphique. Il est défini par le rapport de la surface du rectangle  $P_{max}$  défini sur celle du rectangle dont les cotés mesurent  $V_{co}$  et  $I_{cc}$ .

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} I_{cc}} \quad (1-20)$$

Le facteur de forme indique la qualité de la cellule .Il traduit l'influence des pertes provoquées par les résistances série  $R_s$  et résistances parallèles  $R_p$  de la cellule , plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante, pour des cellules performantes , il est de l'ordre de 70%; et diminue avec la température [17].

#### **1.5.3.e. Le rendement :**

Le rendement des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente. [17]

$$\eta = \frac{V_{max}I_{max}}{P_{incidente}} \quad (1-21)$$

Le rendement est généralement évalué dans des conditions de référence : sous un ensoleillement de 1000 W/m<sup>2</sup>, à la température de 25 °C et sous un spectre AM 1,5. Ces conditions normalisées sont dites « STC » pour Standard Test Conditions.

## **1.6 Conclusion**

Dans ce chapitre on a donc définie la cellule solaire, l'effet photovoltaïque, les différentes pertes ainsi que le modélisation électrique des cellules PV , dans le chapitre suivant on parlera des différentes filières technologiques de fabrication de la cellule photovoltaïque et ses caractérisations.

## **Chapitre 2 : Technologie et caractérisations associées de la cellule solaire**

---

### **2.1. Introduction**

Les cellules photovoltaïques industrielles sont réalisées à 95% à partir de silicium. Ce matériau est le second élément le plus abondant sur terre (après l'oxygène), il est non toxique et sa technologie est facilement industrialisable. [3]

Dans ce chapitre nous présenterons les différentes filières technologiques de fabrication de la cellule PV, on décrira par la suite une méthode standard de fabrication d'une cellule PV en Silicium multi cristallin, puis la fabrication au sein du centre de recherche des technologies des semi conducteurs pour l'énergétique (CRTSE), puis on décrira les différentes caractérisations de la cellule PV.

### **2.2 Filières technologiques de fabrication de la cellule PV**

Parmi les technologies de cellules photovoltaïques existantes, deux grandes filières sont à distinguer en fonction du procédé de fabrication utilisé :

#### **2.2.1. Cellules photovoltaïques à base de semi-conducteurs**

Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium et plus rarement d'autres semi-conducteurs.

### **2.2.1.a.Filière Silicium :**

Le silicium est l'élément le plus abondant sur terre après l'oxygène, il apparaît sous forme de dioxyde ( $\text{SiO}_2$ ), appelé plus communément silice.

Le silicium occupe une place prédominante au sein de l'industrie photovoltaïque grâce à ces nombreux avantages : disponibilité, qualités photovoltaïques assurant au final un bon rendement de conversion, non toxique. Enfin, il est facile de modifier les propriétés électriques du silicium en introduisant dans la matrice cristalline des atomes dopants tels que le Bore (induisant un dopage de type P) ou le Phosphore (induisant un dopage de type N).

D'un point de vue photovoltaïque, le seul inconvénient du silicium réside dans sa structure électronique qui présente un gap indirect, gap à 1,12eV ne correspondant donc pas exactement au maximum d'intensité du spectre solaire, en effet pour absorber 90% du spectre solaire, il faudra utiliser une épaisseur de 100µm pour le Silicium alors que 1µm suffisent pour le GaAs. Par conséquent, l'absorption du rayonnement solaire par le silicium sera plus faible que celle d'un semi-conducteur à gap direct comme l'arséniure de gallium GaAs de gap 1,38 eV, ce qui permet d'accéder à des rendements théoriques plus élevés. Le silicium se présente sous différentes formes dont les plus répandues sont le silicium polycristallin, le silicium monocristallin et le silicium amorphe [3]

#### **1. Cellules à base de silicium monocristallin :**

Un contrôle rigoureux de la température de refroidissement du silicium fondu permet d'obtenir un monocristal. Le silicium obtenu est appelé Cz (*méthode Czochralski*) ou FZ (*FloatedZone*). Conditionné en barreaux ou lingots, il est découpé en tranches d'épaisseur souhaitée (wafers), d'où une source de perte importante de matière première car les déchets ne peuvent pas être réutilisés. Son procédé de fabrication est long et énergivore ; plus coûteux, il est cependant plus efficace que le silicium polycristallin. Le rendement moyen des cellules est relativement élevé : entre 12% et 18% (version commerciale) et environ 24,7% pour le meilleur rendement obtenu en laboratoire (UNSW Australie). [9]

Les inconvénients de cette technologie sont les faibles rendements obtenus sous un faible éclairage et surtout le cout prohibitif de production des matériaux.

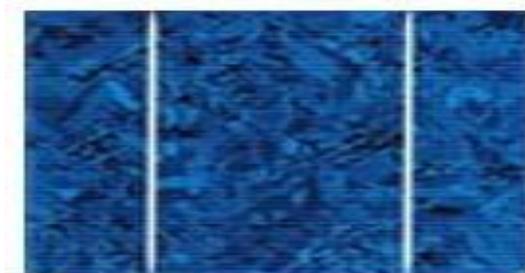


**Photo 2-1** : Une cellule photovoltaïque à base de silicium monocristallin [18]

## **2. Cellules a base de silicium poly cristallin :**

Ce type de cellules est produit a partir d'un bloc de silicium cristallise, refroidi axialement, découpé en plaquettes minces par des scies a fil. Elles ont un rendement de 11% a 15% (version commerciale) et d'environ 18% en laboratoire, mais leur cout de production est moins élevé que les cellules monocristallines.[9]

L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 a 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication.



**Photo 2-2** :cellule photovoltaïque en silicium poly cristallin. [18]

### **3. Cellules a base de silicium multi cristallin :**

Le silicium monocristallin comporte peu de défauts recombinants et permet d'obtenir les meilleurs rendements. Cependant, son élaboration est très couteuse, ce qui constitue un frein a son développement industriel pour les applications photovoltaïques.[6]

Le silicium multi cristallin, moins onéreux que le silicium monocristallin, a été introduit dans l'industrie photovoltaïque a partir des années 1970. Il se présente sous forme de lingots de silicium constitués de grains d'une taille variant entre le millimètre et quelques centimètres. Les techniques de production du silicium multi cristallin sont beaucoup plus simples a mettre en œuvre. Néanmoins, du fait de la méthode d'élaboration, la concentration en impuretés est supérieure a celle du silicium monocristallin et la structure granulaire induit des recombinaisons. En conséquence le rendement de conversion photovoltaïque est limité.[9]



**Photo 2-3 :** Une cellule photovoltaïque à base de silicium multi cristallin [18]

### **4. Cellules a base de silicium amorphe :**

Ce type de cellules, de structure moléculaire non cristalline, nécessite moins d'énergie pour leur production que les cellules cristallines, car il est composé de couches minces. Leur rendement actuel atteint 9% en industrie et environ 11% en laboratoire. Cependant, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grandes surfaces a faible coût en utilisant peu de matière première. La technologie du silicium amorphe permet de fabriquer des cellules semi transparentes qui laissent passer 10% a 20% du rayonnement solaire incident. En effet, la grande densité de défauts du silicium amorphe (liaisons pendantes, états d'interface, structure multi cristalline) limite son rendement de conversion.[9]



**Photo 2-4** : Une cellule photovoltaïque à base de silicium amorphe [18]

- **Cellules tandem :**

L'amélioration du rendement des cellules peut passer par une meilleure utilisation du spectre lumineux, en combinant une couche mince de silicium amorphe à une couche de silicium microcristallin (cellules tandem) . Il s'agit comme pour les multi-jonctions d'empiler deux cellules photovoltaïques qui absorbent des photons de longueurs d'onde différentes.

Les avantages de cette technologie sont multiples : un fort potentiel d'augmentation de rendement, une fabrication à faible budget thermique ( $T < 250^{\circ}\text{C}$ ), une meilleure tenue en température et une application adaptée au substrat mince.[9]

Par ce mécanisme l'ensemble tandem composé de l'association de deux cellules, permet d'absorber un plus large spectre lumineux et ainsi produire plus d'énergie qu'une cellule simple jonction.

La première couche en silicium amorphe absorbe une partie du spectre alors que l'autre partie, qui la traverse, est absorbée par la seconde couche en silicium microcristallin. Les différentes couches qui composent la cellule sont déposées par plasma (PECVD Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) sur un substrat de verre.

- **Cellules à base de silicium en ruban :**

Une troisième technologie utilise directement le tirage de rubans à partir de bains fondus .Un ruban servant de substrat passe à travers un bain de silicium en fusion, une fine couche de silicium se dépose alors sur le substrat. Cette technique permet de réaliser des wafers plus minces ( $120\mu\text{m}$ ) et évite essentiellement les pertes liées au sciage. Malgré la

lenteur de déposition (quelques cm/min), la technologie ruban est un candidat prometteur a la réduction du prix du watt crête photovoltaïque.[6]

- **Cellules a base de silicium en couches minces :**

Un rendement maximal de 21,5% des cellules en couches minces a été obtenu sur cellules de 47Jm d'épaisseur. Ce résultat est proche du rendement de conversion record obtenu avec la même technologie sur des plaques de silicium plus épaisses.

Cependant, la structure d'une cellule photovoltaïque a haut rendement PERL (Passivated Emitterwith Rear Locally diffused) est de 24,7% .Cette structure nécessite un très grand nombre d'étapes technologiques empêchant toute industrialisation. La voie du report de couches minces sur substrats économiques a donc été envisagée et de nombreuses solutions sont aujourd'hui proposées de part le monde. [6]

L'ensemble de la filière du silicium (monocristallin, poly cristallin et amorphe) représente à l'heure actuelle plus de 90% des parts du marche photovoltaïque.

### **2.2.1.b. Autres Semi-conducteurs**

#### **1. Cellules CIS (CuInSe<sub>2</sub> or cuivre-indium-sélénure)**

Matériau poly cristallin a couches minces, qui atteint une efficacité de 10,2% sur un module prototype et 17,7% en laboratoire. La fabrication se réalise dans un long tunnel sous vide où les dépôts de couches et les connexions par laser se réalisent automatiquement. Une tendance est aux multicouches associant deux semi-conducteurs de sensibilité spectrale complémentaire pour augmenter le rendement. La difficulté de cette technologie est liée au procédé de fabrication permettant d'obtenir des couches très uniformes et d'éviter l'apparition de défauts lors de la phase de déposition du di sélénure de cuivre. [6]

#### **2. Cellules CdTe (tellurure de Cadmium)**

Cette filière a été une des premières étudiées en 1960, du fait de ses propriétés optiques optimales, c'est-à-dire une bande interdite directe de l'ordre de 1,5eV et une grande absorption dans tout le spectre solaire. Ce matériau poly cristallin a couche minces (1 a 2Jm), réalise par électrodéposition, brumerisation et évaporation, tient la promesse d'une production a faible cout. L'efficacité de ces modules a été mesurée entre 6% et 8,5% (16,5%

en laboratoire). Les hétérojonctions CdTe/CdS/SnO<sub>2</sub>/verre sont apparues en 1964 et le premier module CdS/CdTe date de 1972. [6]

Malgré les remarquables rendements obtenus et excédant les 16% , des problèmes freinent encore cette filière a savoir :

- la difficulté de réaliser des contacts électriques stables,
- la sensibilité de cette cellule a la vapeur d'eau (problème de moisissure),
- l'agressivité pour l'environnement, du fait de la présence du Cadmium qui est toxique et polluant.

### **3. Cellules CIGS (CuInGaSe<sub>2</sub>)**

La filière CIGS (cuivre indium gallium sélénium), est utilisée sous forme d'une couche mince poly cristalline. A la différence des cellules issues du silicium utilisant le principe de la jonction pn ,la structure du CIGS forme une jonction complexe appelée hétérojonction. Les meilleurs rendements obtenus étaient de 19,9% en laboratoire. Au vu du potentiel d'évolution de cette technologie de grandes entreprises se sont lancées dans la fabrication de ce type de cellules, les procédés de dépôt en couches minces étant particulièrement bien adaptés a la production en grandes séries. [9]

Il faut toutefois noter que le rendement des cellules industrielles atteint 14% dans le meilleur des cas et leur part de marche reste encore très marginal. Autre composé quaternaire envisageable : CuInAlSe<sub>2</sub> qui atteint en laboratoire un rendement de 16,9% [9].

### **4. Cellules GaAs (arséniure de Gallium)**

Ce composé III-V est fait pour des cellules photovoltaïques a très haut rendement 25% a 28%. Elles présentent l'inconvénient de recourir a des procédés et des matériaux fort coûteux se révélant de surcroit très toxiques pour l'environnement. Ces restrictions interdisent actuellement toute production de masse. Ce type de cellule est souvent réservé au domaine spatiale ou pour les systèmes a concentrateurs. Le procédé de multi jonction III-V du GaAs permet de dépasser une efficacité de 30%. [9]

### **2.2.2. Cellules photovoltaïques organiques**

Si le marché des cellules photovoltaïques est aujourd'hui dominé à plus de 90% par le silicium cristallin, les composites organiques, (encore au stade de l'étude de la faisabilité d'introduction sur le marché) tels que les matériaux organiques, moléculaires ou polymériques, à base de carbone, d'hydrogène et d'azote, sont particulièrement intéressants en termes d'abondance, de coût, de poids et de mise en œuvre.

Comme les semi-conducteurs, ces cellules possèdent des niveaux d'énergies susceptibles d'absorber les photons en créant des paires électron-trou utilisables grâce à des transitions entre les niveaux dits HOMO (Highest occupied molecular orbital) et des niveaux dits LUMO (Lowest unoccupied molecular orbital). En l'absence de séparation, les

paires électron-trou peuvent se recombiner en émettant des photons. La séparation des charges reste encore aujourd'hui un des points bloquants pour être effectuée efficacement [19]. Cependant, les cellules photovoltaïques organiques restent des cellules souples et économiques en grandes quantités (films). Parmi ces cellules, on distingue deux types:

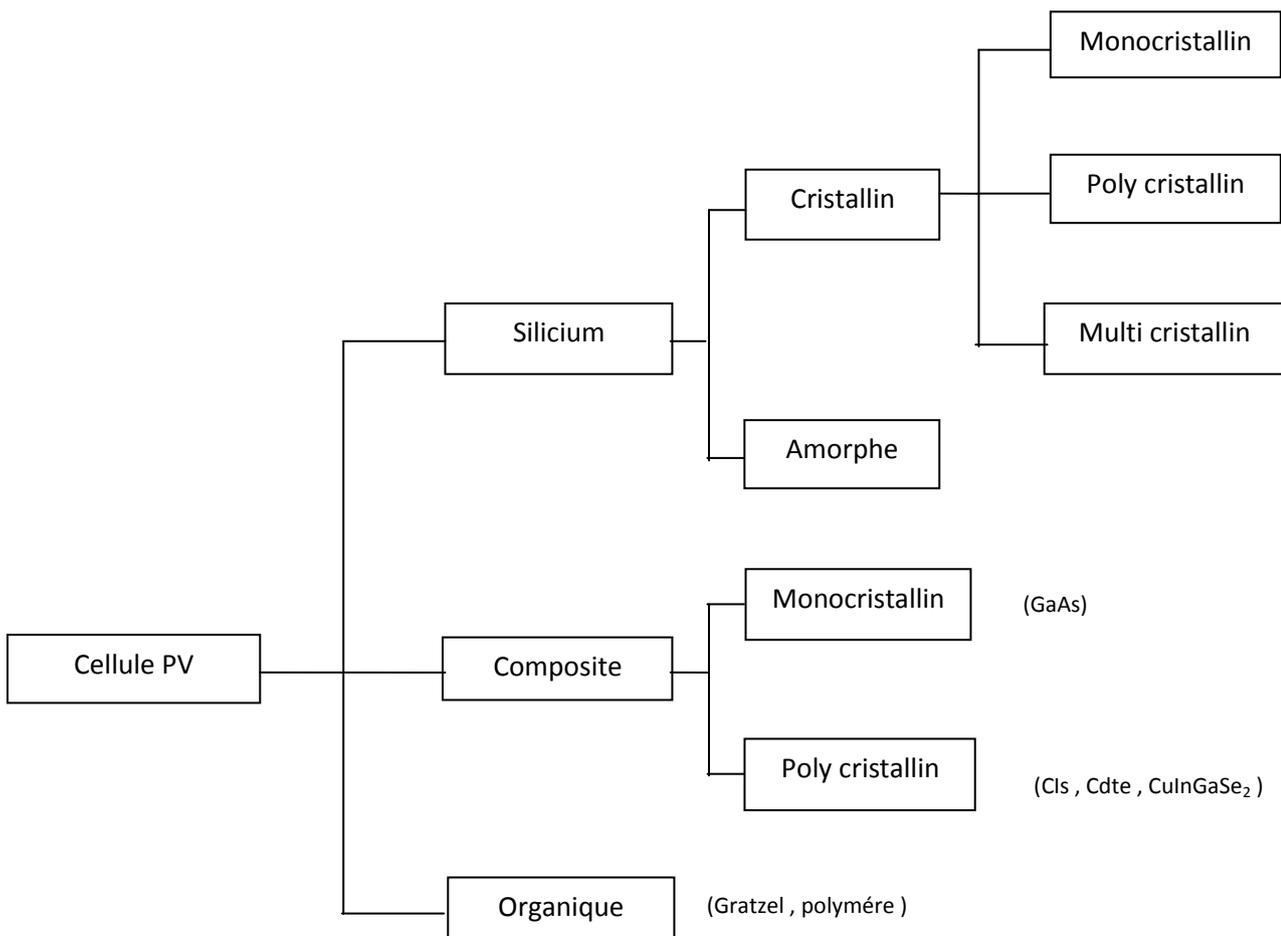
#### **1. Cellules de Gratzel**

Depuis les années 2000, plusieurs laboratoires dans le monde étudient ce type de cellules. Les cellules Gratzel ont un rendement de l'ordre de 10%, cellules encore fragiles par rapport au silicium [19].

#### **2. Cellules polymères**

Les matériaux organiques polymères, faciles à mettre en œuvre, sont en passe de s'imposer à côté du silicium pour la fabrication des cellules solaires, même si des verrous technologiques restent à lever. Les organiques, autrement dit les plastiques, moins onéreux, apparaissent en effet de plus en plus comme une voie d'avenir complémentaire, séduisante et crédible. Ces cellules ont un rendement de l'ordre de 5%, mais leurs durées de vie restent encore limitées [19].

Les cellules solaires organiques avec leurs faibles coûts, leurs faibles besoins énergétiques de production et leurs capacités à être fabriquées à grande échelle sont de sérieux candidats et à fort potentiel pour un développement photovoltaïque à long terme.



**Figure.2-1.** Récapitulatif des filières technologiques d'une cellule PV

### **2.3 Méthodes standard de fabrication d'une cellule PV en Silicium multi cristallin**

Ces cellules standards de type industriel sont principalement produites à partir de silicium multicristallin. Elles présentent en moyenne des rendements de conversion de l'ordre de 15%. La différence de rendement entre les cellules PV industrielles et les cellules PERL « Passivated emitter, rear locally diffused », (élaborée en laboratoire en Australie avec le silicium monocristallin sans concentration et qui détiennent le record de rendement) s'explique par un compromis entre le cout de production et le rendement

En effet certains matériaux et techniques (lithographie, silicium FZ, double couche anti-reflet, texturisation en pyramides inversées) utilisés par la cellule PV record ne peuvent être adaptés par l'industrie car ils sont trop chers.

La structure de la cellule PV industrielle est simplifiée afin de réduire son coût. Par exemple, la texturisation de la face avant est réalisée sous forme de pyramides aléatoires ou texturisation acide, et on dépose ensuite une simple couche anti-reflet.

De même le champ électrique face arrière (BSF) est obtenu par un alliage Al-Si, formé par recuit d'une couche en Al déposé par sérigraphie.

Un dépôt de nitrure de silicium (SiN) est généralement utilisé en couche anti-reflet car en plus de ses qualités optiques il permet d'améliorer la passivation de la cellule.

Le dépôt de SiN entraîne une hydrogénation du substrat qui donne le corps du silicium multicristallin et améliore la longueur de diffusion des porteurs minoritaires.

Les différentes étapes standard de fabrication des cellules photovoltaïques en silicium multi-cristallin, sont résumées dans la Figure 2.3

### **2.3.1. Elaboration des lingots de silicium multi-cristallin:**

Parmi les différents procédés de production du silicium multi-cristallin, nous prenons l'exemple du POLIX développé par PHOTOWATT. Cette technique est basée sur la méthode HEM (Heat Transfer Method). Le lingot est obtenu par cristallisation orientée dans un creuset fixe en graphite soumis à un écoulement de chaleur unidirectionnel [7].

### **2.3.2. Découpe**

Les lingots sont découpés en briques grâce à une scie à ruban, puis en plaques minces (wafers), à l'aide d'une scie à fil. Les substrats obtenus, d'épaisseur 200 à 300 µm et de section 10\*10 ; 12,5\*12,5 ; 15,6\*15,6 cm sont ensuite nettoyés [7].

### **2.3.3. Traitement de surface et Texturisation:**

L'étape de sciage entraîne des dommages en profondeur à la surface des wafers, de l'ordre du rayon du fil de la scie. Un fort décapage à la soude retire la zone perturbée. Puis,

l'étape de texturisation est entreprise sur les faces avant et arrière à l'aide d'une solution acide ou basique [7].

La texturisation du silicium est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule. Elle se fait sur les faces avant et arrière à l'aide d'une solution acide ou basique, pour la formation d'un relief micrométrique, généralement de forme pyramidale qui constituent des pièges pour le rayonnement incident augmentant ainsi l'absorption [3].

### **2.3.4 Formation de la jonction pn**

Dans l'étape suivante, le substrat est placé dans un four de diffusion à environ 850°C pendant 20 minutes dans un mélange gazeux de N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> et de POCl<sub>3</sub>. Un verre de phosphore (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) se forme sur tout le pourtour de la plaque, à partir duquel le phosphore va diffuser sur une profondeur moyenne de 0.5 μm. On obtient donc une structure n<sup>+</sup>/p/n<sup>+</sup>. On procède ensuite à la désoxydation, c'est-à-dire l'élimination du verre conducteur, par acide fluorhydrique (HF à 10%). Les substrats sont ensuite rincés à l'eau désionisée [3].

### **2.3.5 Décapage de la jonction parasite**

Les plaquettes sont superposées les unes sur les autres (≈400 à la fois) et gravées latéralement par plasma. L'émetteur n'est plus en contact avec la face arrière de la cellule [7].

### **2.3.6. passivation**

Dans le but de diminuer la recombinaison des porteurs minoritaires sur la face avant, et à augmenter la tension de circuit ouvert, les deux faces présentent une couche de dioxyde de silicium dite couche de passivation. La passivation consiste donc à améliorer les qualités électroniques de la surface et du volume du matériau en neutralisant les effets des défauts électriquement actifs.

Notons que diverses couches de passivation sont utilisées en photovoltaïque mais les principales sont le dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma (PECVD) de couches de nitrure hydrogéné (S<sub>x</sub>N<sub>x</sub>H), ou d'oxyde de silicium (SiO<sub>2</sub>) sur la surface du silicium poreux [3].

### 2.3.7. Couche antireflet

Afin de réduire les pertes par réflexion, une couche antireflet sur la face avant vient compléter le dispositif. Le principe d'action des couches antireflet est basé sur l'interférence des faisceaux lumineux dans les couches diélectriques minces [3].

### 2.3.8 Métallisation avant

Les contacts avant sont déposés par sérigraphie avec une pâte à l'argent au travers d'une grille. Puis, ils sont séchés dans une étuve à air à 150°C pendant un quart d'heure [34].

### 2.3.9 Métallisation arrière :

Une pâte en aluminium est ensuite déposée sur la quasi totalité de la face arrière. De même, le métal est séché dans une étuve à air à 150°C pendant un quart d'heure [34].

### 2.3.10 Co-firing:

C'est la formation des contacts, passivation du volume et de la face arrière, la cuisson simultanée des contacts « co-firing » permet de combiner la formation des contacts avant (à travers le SiN) et arrière (BSF), ainsi que les effets getter (Al) et passivation par hydrogénation (SiNx:H). Elle se fait par cuisson rapide sous air à environ 800°C pendant quelques secondes. Ci-dessous Figure 2-2 représente la composition d'une cellule solaire en silicium multi cristallin [3].

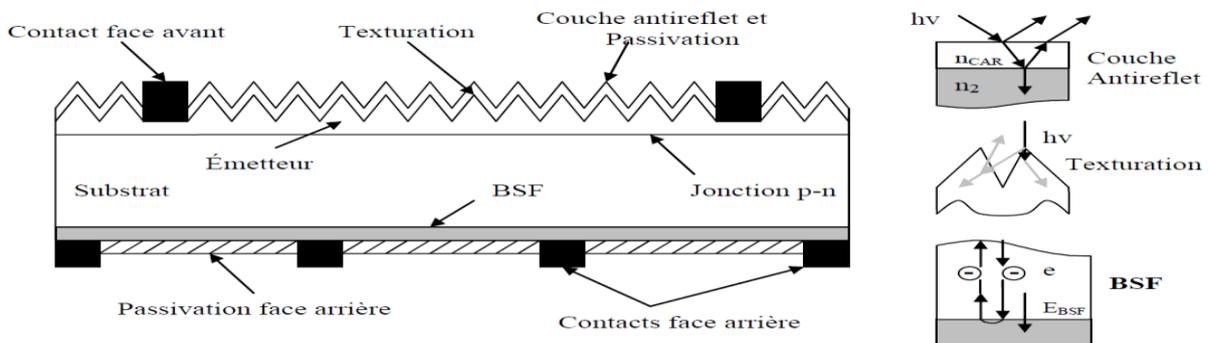
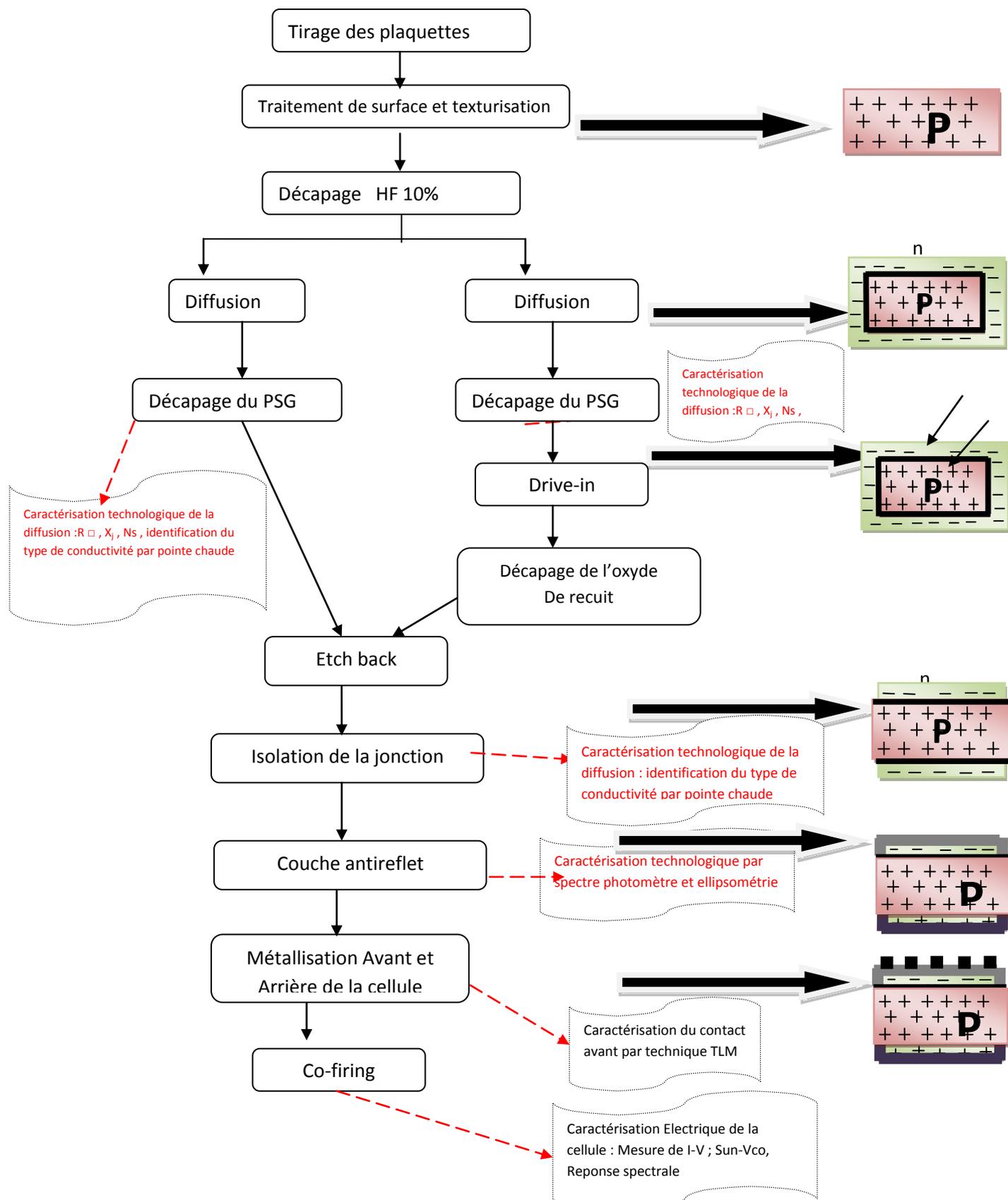


Figure 2-2 : Composition d'une cellule solaire [3]

## **2.4 Réalisation de la cellule solaire au sein du CRTSE**

Nous avons résumé la réalisation ainsi que les différentes étapes de caractérisations des cellules PV au sein du CRTSE dans l'organigramme ( figure.2-3 )

**Figure. 2-3** : Résumé de la réalisation d'une cellule solaire au sein du CRTSE



## **2.5. Caractérisations de la cellule PV :**

### **2.5.1. Caractérisations au cours du process:**

Au cours de la réalisation de la cellule solaire , chaque etape technologique pourra être contrôlée afin de pouvoir dire si celle-ci est optimisée ou pas, car chaque etape influence la suite du process ; afin d'en faire un dispositif fiable et performant en fin de process.

**La première caractérisation** concerne le matériau lui-même, c'est-à-dire la plaquette multicristalline servant à la réalisation de la cellule solaire. La qualité de la plaquette est obtenue en corrigeant les défauts engendrés par le sciage et les impuretés existantes lors de l'élaboration du matériau.

La solution consiste à faire des traitement de surfaces et un piégeage des impuretés indésirable par SIMS, l'observation au microscope electronique permet d'analyser l'amélioration de la qualité du matériau et l'état de la surface.

La durée de vie des porteurs minoritaires pourra etre faite à l'aide du QSSP disponible au CRTSE . Celle-ci nous renseigne sur la qualité du matériau, la connaissance de la résistivité du matériau nous permet d'accéder à la concentration volumique du substrat .

Dans le cas du silicium multicristallin élaboré au CRTSE, la resistivite est de l'ordre de 1 à 2  $\Omega\text{m}$  ce qui correspond à une concentration de l'ordre de  $10^{16}\text{at}/\text{cm}^3$

L'idéale pour avoir une bonne cellule est l'obtention après traitement de surface et gettering (traitement haute température) d'une épaisseur de l'ordre de 200 $\mu\text{m}$  , ceci étant difficile à satisfaire ; la plaquette deviendra très fragile. Pour cela une épaisseur de 280 à 300 $\mu\text{m}$  est satisfaisante pour avoir une bonne cellule.

Les plaquettes sont de type p le type est identifié par la technique des pointes chaudes.

**La deuxième caractérisation** est celle concernant la texturisation de la surface afin de piéger le maximum de photons.

Deux techniques d'analyses sont utilisées : la première est l'observation de la structure obtenue en surface (forme géométrique), celle-ci est spécifique pour chaque grain pour le silicium multicristallin ; la deuxième est la mesure de la réflexion du matériau obtenu après texturisation (celle-ci doit être la plus faible possible) ; la mesure de la réflexion est faite par spectrophotomètre.

**La troisième caractérisation** est celle qui intervient après diffusion (réalisation de l'émetteur ou jonction n<sup>+</sup>p) ; pour cela on utilisera divers techniques :

- La mesure de la résistance carré superficielle par la méthode des quatre pointes, un mapping de surface est ainsi réalisé pour connaître l'uniformité du dopage obtenu
- La mesure de la profondeur de jonction à laquelle le dopant est arrivé dans le substrat, ceci pourra être fait en utilisant une révélation chimique sélective avec observation au microscope
- Un profilage pour connaître l'évolution de la concentration du dopant de la surface à la jonction, peut être effectuée par la technique du SIMS, ce qui permet d'avoir un profil ionique faisant apparaître le phosphore électriquement actifs et non actifs

Le profilage électrique nous permet d'accéder à la zone morte en surface (phosphore non électriquement actif), néfaste pour la cellule solaire. Cette couche pourra être réduite en optimisant le processus de diffusion et en recourant à un etch back.

La mesure du courant de saturation de l'émetteur est aussi importante, elle pourra être effectuée en utilisant la technique QSSPC (Quasi steady state photo conductance),

La résistance par carré est de l'ordre de 40 à 60Ω/□

La profondeur de jonction est de l'ordre de 0,1 à 0,5μm

La concentration de surface doit être supérieur à 10<sup>20</sup>at/cm

**La quatrième caractérisation** concerne l'étape du etch back (réduction de la couche morte par décapage chimique) ; on effectue pour cela une mesure de résistance carré avant et après décapage par la méthode des quatre pointes, ainsi qu'un profilage par SIMS pour connaître l'épaisseur et l'évolution de la concentration en surface.

**La cinquième caractérisation** concerne l'étape éliminant la jonction parasite et ceci en identifiant (à l'aide de la pointe chaude) le type P obtenu après décapage par plasma

**La sixième caractérisation** concerne l'étape du dépôt de la couche anti reflet ; la mesure de la réflectivité pourra être faite à l'aide du spectrophotomètre, la mesure de l'indice de réfraction et l'épaisseur de la couche anti reflet pourra être faite à l'aide d'un ellipso mètre: la réflectivité doit être la plus faible possible ; l'indice de réfraction varie de 1,9 à 2 tandis que l'épaisseur de la couche est de l'ordre de 80nm .

**La septième caractérisation** concerne la métallisation du contact avant de la cellule, ceci en mesurant la résistance de contact  $R_c$  par la technique TLM, cette résistance doit être la plus faible possible .

## **2.5.2. Caractérisations électriques de la cellule**

Outre la caractérisation technologique de la cellule PV pendant le processus de fabrication, on a la caractérisation électrique ainsi que la mesure de la réponse spectrale, on va résumer ces étapes dans les paragraphes ci-dessous :

### **2.5.2.a. Simulateur I – V**

Ci-dessous une photo du simulateur solaire utilisé pour simuler les différents niveaux d'éclairements des cellules PV



**Photo 2.5** Simulateur solaire classe A Oriel

### **a-1. Principe de fonctionnement du simulateur**

Le principe de fonctionnement d'un simulateur solaire se base sur une source lumineuse dont le spectre reproduit fidèlement celui émis vers la terre par le soleil. Pour l'étude des photopiles, nous nous plaçons généralement dans les conditions AM1.5 qui correspondent à un éclairement de  $100 \text{ mW/cm}^2$ .

Le banc de caractérisation ou simulateur solaire comporte une lampe à arc au xénon dont le flux lumineux peut être continu ou pulsé. L'éclairement est réglé de telle sorte à atteindre la valeur du courant de court-circuit de la cellule étalon.

Les mesures de l'intensité (I) et de la différence de potentiel (V) entre les bornes de la photopile sont effectuées à partir d'un montage automatisé, moyennant la précaution de maintenir la température à  $25^\circ\text{C}$

### **a-2. Mesure I (V) sous éclairement**

La caractérisation I(V) sous éclairement doit se faire dans les conditions standards (STC) qui signifient une distribution spectrale de la lumière selon AM 1.5 Global, une irradiation de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $298^\circ\text{K}$  ( $25^\circ\text{C}$ ).

Les conditions « standards » ne sont jamais réunies parce que les cellules s'échauffent très rapidement d'où la nécessité d'avoir un système de refroidissement pour assurer une température constante de  $25^\circ\text{C}$ .

Les cellules solaires sont testées (mesurées) par un système de balayage électronique rapide et une lumière instantanée (flash). De plus, elles sont montées sur un porte échantillon équipé d'un refroidisseur externe qui règle la température par l'intermédiaire de l'eau, et un refroidisseur interne basé sur la technique de l'effet Peltier.

### **a-3. Mesure I(V) sous obscurité**

La courbe I(V) d'une cellule solaire non éclairée (à l'obscurité) est importante pour déterminer les caractéristiques  $R_p$ ,  $R_s$ , les courants d'obscurité ainsi que le facteur d'idéalité déduits du modèle à 2 diodes. La courbe I(V) à l'obscurité est généralement tracée dans une échelle semi logarithmique ( $\log J$ , V).

Il est plus pratique de tracer les densités de courant ( $A/cm^2$ ) plutôt que de tracer des courants et ce pour couvrir la large gamme des courants de  $1^{-9}$  A à  $1^{-10}$  A, Il est important de noter que l'échantillon est maintenu à l'obscurité totale lors de la mesure.

#### **2.5.2.b. Sun-Vco**

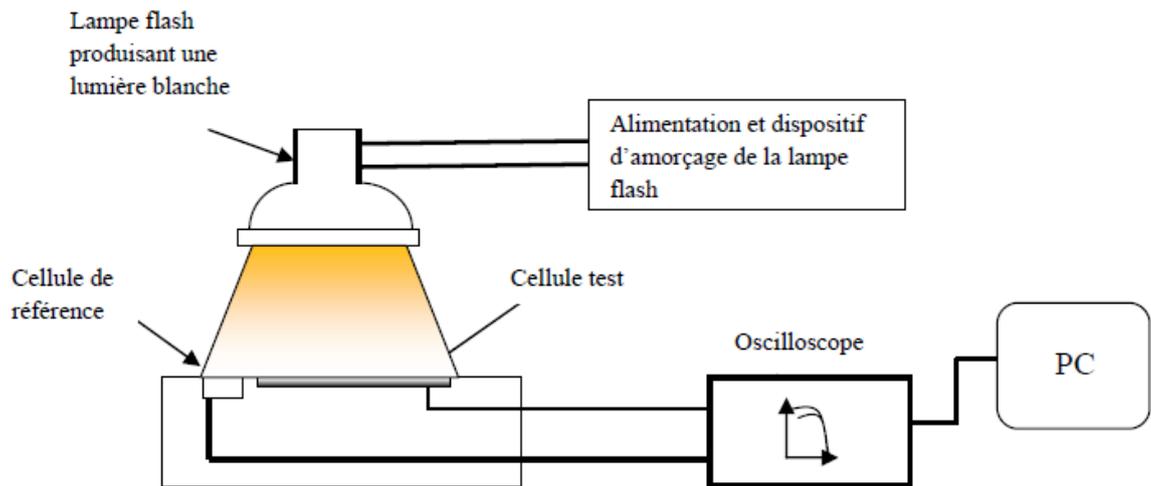
Ci-dessous une photo du simulateur Sun-Vco utilisé :



**Photo 2.6** Simulateur Sun-Vco

La mesure Sun-Vco permet d'obtenir une caractéristique I-V de la cellule par la mesure de la tension à circuit ouvert  $V_{co}$  en fonction de l'intensité lumineuse exprimée en Suns ( $1\text{Sun} = 1\text{kW}/\text{m}^2$ ), [20], sans les effets de la résistance série. Cette caractéristique est réalisée grâce à un système d'acquisition qui enregistre simultanément la variation de l'intensité produite par la lampe Flash (pendant des durées de 1 à 12ms), prise sur la cellule et de la variation de la tension aux bornes de la cellule à étudier (Figure 2-3).

La relation existant entre l'intensité lumineuse et la densité de courant exprimée en  $\text{mA}/\text{cm}^2$  pour chaque valeur de  $V_{co}$ , permet d'aboutir à la caractéristique I-V [19]. Cette donnée peut être exploitée pour avoir des informations sur les performances des cellules, telles que : la durée de vie effective, le pseudo-facteur de forme et le pseudo-rendement. Lors de cette mesure, le courant de court circuit  $I_{cc}$ , n'est pas mesuré mais il est rentré par l'utilisateur en fonction des résultats obtenu par simulation.



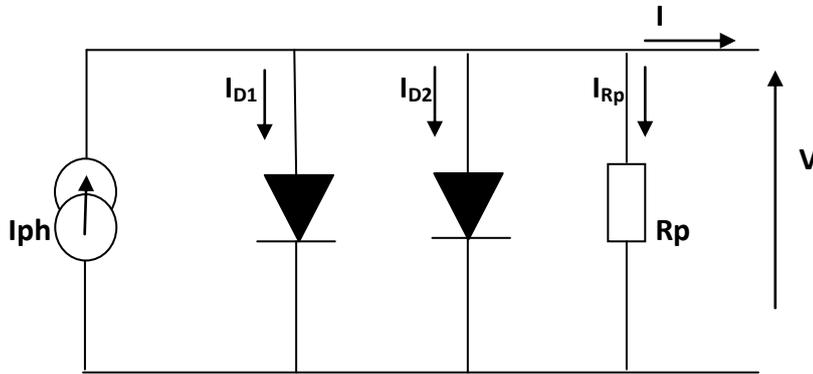
**Figure 2-4 :** Schéma de principe du banc de mesure Suns-Vco.

➤ **Intérêt de la mesure Suns-Vco :**

La mesure Suns-Vco permet d'extraire les courants de saturation de la cellule ( $I_{01}$ ,  $I_{02}$ ), le pseudo facteur de forme de la cellule sans prendre en compte la résistance série ( $R_s$ ). Le pseudo-FF nous renseigne sur la qualité de la résistance shunt et par suite sur les courants de fuite pouvant être causés par un défaut [21].

Un rendement sans l'influence de  $R_s$  (appelé pseudo-rendement), peut aussi être calculé par cette méthode. Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque lors de la mesure Suns-Vco est approximé au niveau électrique par le schéma équivalent (Figure 2-5), ce modèle à deux diodes a pour équation (eq. 2-1) :

$$I = I_{ph} - I_{01} \left[ \exp \left( \frac{e(V)}{n_1 k T} \right) - 1 \right] - I_{02} \left[ \exp \left( \frac{e(V)}{n_2 k T} \right) - 1 \right] - \frac{V}{R_p} \quad (2-1)$$



**Figure 2-5** : schéma électrique approximatif lors d'une mesure sun-vco

$V = V_j$  ; la résistance série est nulle ( $R_s = 0$ )

$V_j$  : Tension au borne des diodes

$I_{ph}$  : courant de photodiode (photo génération)

$I_{D1}$  et  $I_{D2}$  : courants de saturation

$n_1$  et  $n_2$  facteurs d'idéalité des diodes

$R_p$  : résistance parallèle

### **2.5.2.c. La Réponse spectrale**

On appelle réponse spectrale d'une cellule photovoltaïque l'efficacité avec laquelle elle transforme l'énergie d'un rayonnement d'une certaine longueur d'onde en énergie électrique [22].

Les mesures de réponse spectrale sont d'une très grande importance pour le contrôle de la qualité d'une cellule solaire par la détermination de ses paramètres clés pendant sa phase de production. C'est une technique qui est surtout utilisée pour mesurer la longueur de diffusion des porteurs minoritaires [24]. Elle correspond au nombre de porteurs collectés

avec un rayonnement incident monochromatique, et ceci en balayant les longueurs d'onde contenues dans le spectre solaire [23].

La réponse spectrale d'une cellule solaire est proportionnelle à la probabilité pour qu'un photon absorbé par un matériau photoconducteur produise un porteur de charge. Elle mesure ainsi le photo courant produit par la cellule par unité de puissance optique incidente. [24].

Elle est définie comme étant la valeur de la densité de courant de court-circuit  $J_{cc}$  de la cellule par unité de flux monochromatique incident [25].

$$R_s(\lambda) = \frac{J_{cc}(\lambda)}{Q(\lambda)} \quad (2-2)$$

Avec  $R_s(\lambda)$  la réponse spectrale, exprimée en A/W

$Q(\lambda)$  flux monochromatique incident, exprimé en W

$J_{cc}(\lambda)$  la densité de courant de court-circuit, exprimé en A/cm<sup>2</sup>

Le photo-courant collecté à chaque longueur d'onde relative au nombre de photons incidents sur la surface à cette même longueur d'onde détermine la réponse spectrale du dispositif [25].

➤ **Principe de mesure de la réponse spectrale :**

Cette mesure est basée sur le concept d'injection de porteurs dans une région bien définie de la cellule et ensuite de permettre à ces porteurs injectés de diffuser vers des zones où ils seront collectés et détectés. L'injection se fait au moyen d'une excitation lumineuse et la détection intervient à la jonction collectrice où le photo courant est mesurée [24].

Le banc de mesure comprend une lampe tungstène dont la lumière est filtrée par un monochromateur. La sélection des longueurs d'onde est assurée entre 350 et 1100 nm. Un jeu de miroirs permet de régler la taille du spot incident. De cette manière, il est possible de mesurer la réponse spectrale d'un grain particulier ou d'en analyser plusieurs.

Le courant est mesuré aux bornes de la cellule pour chacune des longueurs d'onde sélectionnées (le pas de mesure est de 50 nm). Les mesures sont faites de façon alternée avec une référence. Un logiciel permet la conversion du courant mesuré en pourcentage de porteurs collectés.

➤ **Intérêt de la réponse spectrale**

La réponse spectrale (ou le rendement quantique), aux courtes longueurs d'onde ( $\alpha$  élevé), apporte des informations sur les zones du semi-conducteur proche de la surface éclairée. Les informations concernant le volume peuvent être obtenues à partir de la réponse aux grandes longueurs d'onde. La réponse spectrale est l'une des méthodes de caractérisation utilisée pour la détermination des paramètres du dispositif durant l'étape recherche et développement et durant la production des cellules solaires [24].

➤ **Le rendement quantique, EQE**

Le rendement quantique est le rapport entre le nombre d'électrons dans le circuit externe et le nombre de photons incidents. Les photons de faible longueur d'onde sont absorbés près de la surface (vers la zone d'émetteur) alors que ceux de forte longueur d'onde sont plus en profondeur du dispositif (au niveau de la base). On peut donc accéder au comportement et à l'efficacité de chaque région constitutive de la cellule. Ainsi, ce paramètre est diminué par plusieurs facteurs : les phénomènes de recombinaison en surface et en volume y jouent une part importante. La réflexion sur la face avant et la faible longueur de diffusion des porteurs ont pour conséquence de diminuer le rendement quantique sur toute la gamme de longueurs d'onde [26].

Lorsque les photons perdus par réflexion (à la fenêtre de la cellule) et les photons perdus par transmission à travers toute l'épaisseur de la cellule (à cause de l'absorption incomplète) ne sont pas pris en compte, cette grandeur s'appelle alors le rendement quantique interne, IQE (internal quantum efficiency). Dans le cas contraire, ce paramètre s'appelle le rendement quantique externe, EQE (external quantum efficiency). Le rendement quantique externe est défini comme suite (eq. 2-3) [19]:

$$EQE(\lambda) = \frac{J_{cc}(\lambda)}{Q(\lambda)} * \frac{E_{ph}(\lambda)}{e} = \frac{J_{cc}(\lambda)}{Q(\lambda)} * \frac{h_c}{e\lambda} \quad (2-3)$$

où  $Q(\lambda)$  est le flux lumineux incident.

L'IPCE (Incident Photon to Current Efficiency) est une version "monochromatique" de EQE, il détermine le rapport des photons qui génèrent des électrons dans le circuit externe à des photons incidents de la lumière monochromatique. IPCE peut être calculée en fonction de la densité de courant de circuit ( $J_{cc}$ ), sur le flux monochromatique incident ( $Q(\lambda)$ ) eq (2-4), il est plus souvent exprimée en pourcentage [19]:

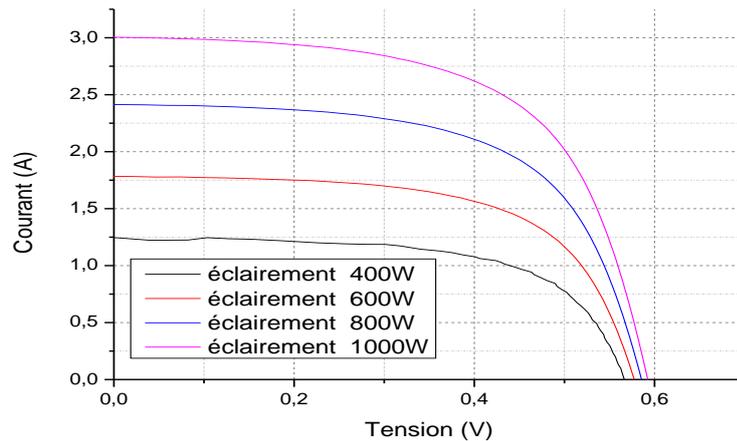
$$IPCE = 1,24 * \frac{J_{cc}}{Q(\lambda)*\lambda} \quad (2-4)$$

## **2.6. Les paramètres influant sur la caractéristique I(V)**

### **2.6.1.L'influence de l'éclairement :**

Le photo courant est proportionnel au flux lumineux et aussi à la surface de la jonction soumise au rayonnement. La tension de circuit ouvert est indépendante de la surface rayonnée et n'est fonction que du matériau et de la qualité de la jonction et elle correspond aux conditions où le courant direct est égal au photo courant. Cette tension va se diminuer légèrement avec le flux lumineux donc avec  $I_{ph}$  comme le montre la Figure 2.6

Il est important de noter que, lorsque l'éclairement est faible (environ 100 W/m<sup>2</sup> et à fortiori à l'intérieur de locaux), la tension de la photopile varie à son tour. Elle baisse avec l'éclairement (variation logarithmique). Seules les photopiles au silicium amorphe permettent un fonctionnement dans ces conditions, grâce à une tension encore assez élevée. C'est pour cette raison que le silicium amorphe peut être utilisé sous éclairage artificiel, contrairement au silicium cristallin.



**Figure 2-6:** Influence du flux lumineux sur la caractéristique I (V) de la cellule solaire (T=25°)

### **2.6.2.L'influence de la température sur le rendement :**

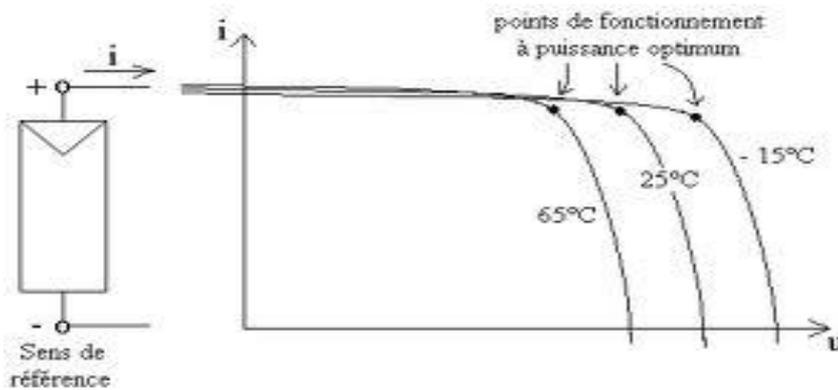
Le deuxième paramètre qui influence le profil de la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque est la température de la cellule. Une cellule photovoltaïque convertit une énergie radiative (rayonnement) en énergie électrique avec un rendement compris en 5 % et 16 % selon la technologie. Le reste du rayonnement non-transformé en électricité est convertit en grande partie sous forme de chaleur, la fraction résiduelle étant réfléchi. Ainsi, une cellule photovoltaïque mal ventilée voit sa température monter très rapidement[27].

A partir de l'équation (1-5) du chapitre (1) :

on peut quantifier la tension de circuit ouvert , (I = 0)

$$V_{co} = \frac{kT}{q} \ln[1 + I_{ph}/I_s] \quad (2-5)$$

On peut remarquer que cette tension augmente avec le logarithme de  $I_p$  et donc avec l'illumination. En revanche, elle décroît avec la température, malgré le terme  $(kT/q)$ , car  $I_s$  varie exponentiellement avec  $T$ , compensant largement ce dernier terme.



**Figure.2.7:** Courbe  $I (V)$  d'une cellule à diverses températures [35]

Sur l'exemple ci-dessus (figure.2-7), lorsque la température de la cellule augmente de  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  (elle passe de  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), on constate que le courant de court-circuit  $I_{cc}$  augmente légèrement et la tension diminue visiblement et par voie de conséquence, la puissance maximale de la cellule photovoltaïque diminue aussi avec la hausse de la température.

On observe alors que la température de la cellule photovoltaïque induit un effet notable sur la tension de celle-ci. Par contre, l'effet de la température sur le courant de la cellule photovoltaïque est négligeable. Il apparaît que plus la température de la cellule augmente, plus la tension à vide de celle-ci diminue. La puissance de la cellule étant égale au produit du courant et de la tension, la même règle s'applique sur la puissance : plus la température de la cellule augmente, plus la puissance de celle-ci diminue [27].

### 2.6.3. Influence de la résistance série $R_s$ :

La résistance série est la résistance interne de la cellule, elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, et de la résistance de contact des grilles. Son effet se traduit par une réduction de la tension autour de  $V_{co}$ . [28]

L'influence de la résistance  $R_s$  se traduit par une diminution de la pente de la courbe de  $I=f(V)$  dans la zone où la cellule se comporte comme un générateur à tension constante, Figure.2-8

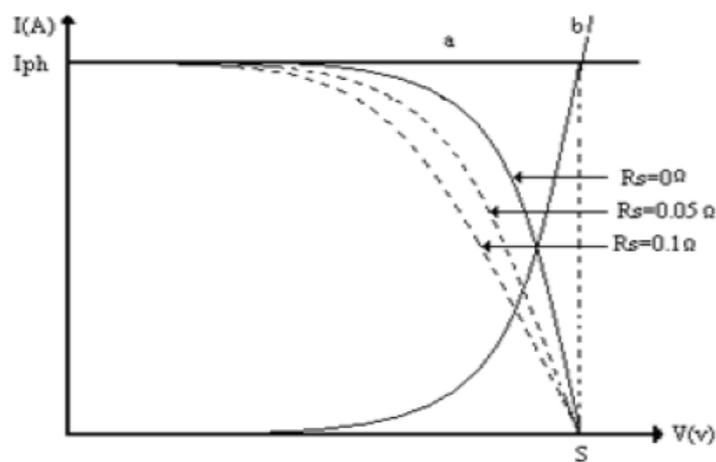
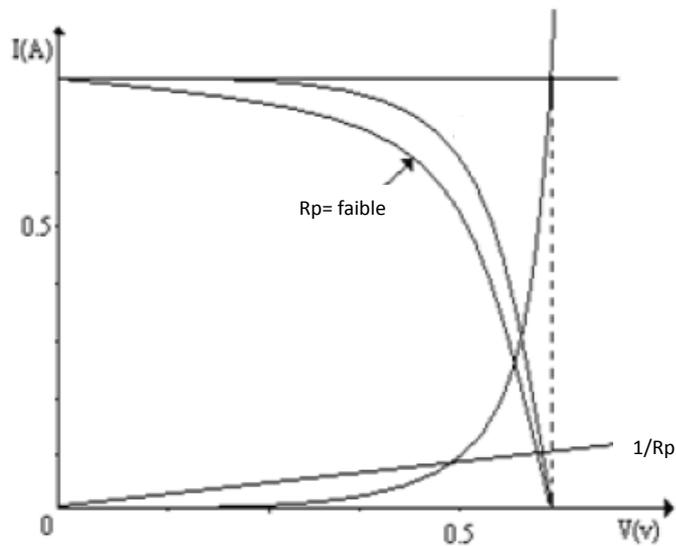


Figure.2.8 : Influence de la résistance série[28]

### 2.6.4. Influence de la résistance parallèle $R_p$ :

Les cellules réelles peuvent aussi faire intervenir une résistance parallèle qui apparaît en parallèle sur la structure. Cette résistance caractérise un courant de fuite entre grille supérieur et contact arrière, elle est généralement très supérieure à  $R_s$  et peut donc être placée indifféremment dans le schéma équivalent. La résistance shunt représente également les pertes à travers la jonction, autour des bords de la cellule, en présence des défauts du cristal et de la précipitation des impuretés étrangères dans la région de la jonction. Ainsi donc, nous pouvons dire que  $R_p$  est liée au processus de fabrication [28].

L'influence de  $R_p$  se traduit par une diminution de la pente de la courbe  $I=f(V)$  dans la zone où la cellule se comporte comme un générateur à courant constant, Figure.2-9.

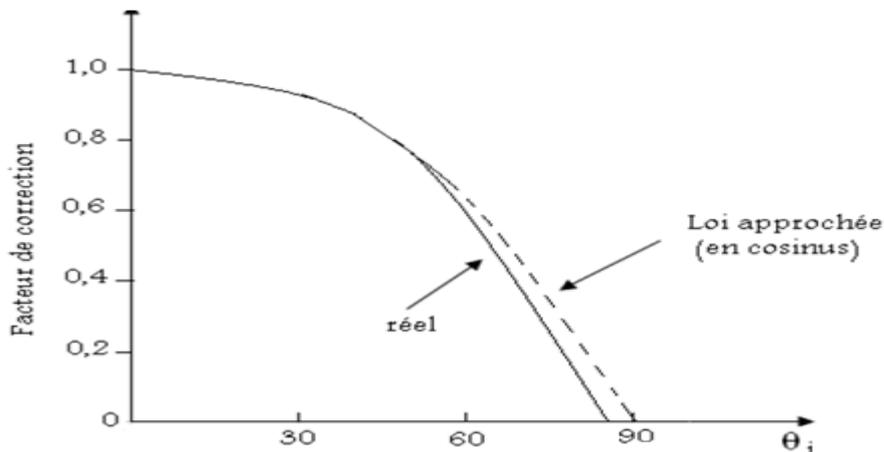


**Figure.2.9** : Effet de la résistance parallèle sur la courbe (V) [28]

### **2.6.5. Influence de l'angle d'incidence :**

Lorsque le rayonnement incident provient d'une direction inclinée par rapport à la normale à la cellule, le rayonnement absorbé de façon utile diminue.

La plus grande partie de cette diminution s'explique de façon purement géométrique : la surface effective "vu par le rayonnement " varie comme le cosinus de l'angle d'incidence. La diminution de la puissance absorbée est encore accentuée par des raisons optiques : les réflexions sur la paroi extérieure, ainsi que sur la surface des cellules, augmente avec l'angle d'incidence. La figure 2.10 donne l'allure de la variation du rayonnement reçu à la surface de la cellule et du rayonnement absorbé de façon utile en fonction de l'angle d'incidence. [28]



**Figure 2.10:** Influence de l'angle d'incidence sur la puissance reçue et absorbée de façon utile [28]

Compte tenu de cette dépendance angulaire, la puissance fournie par une cellule dépend beaucoup de son inclinaison et de son orientation. Il est rare que les modules soient équipés d'un système qui les oriente en permanence dans la direction optimum en tenant compte du mouvement du soleil. L'orientation est en générale fixée, l'inclinaison peut parfois être modifiée manuellement pour tenir compte de la saison.

Le plus souvent, l'orientation et l'inclinaison sont toute deux fixes. Le choix optimum de l'orientation est alors la direction nord-sud, en direction de l'équateur. Le choix optimum de l'inclinaison dépend du critère d'optimisation. Si le but est de maintenir une production intéressante d'énergie même pendant la mauvaise saison, l'inclinaison optimum est supérieure (d'environ 15°) à la latitude du lieu [28].

## **2.7 Limitation des pertes**

La recherche et les techniques actuelles ont permis de réduire, parfois significativement, les pertes de rendement.

### **2.7.1 L'émetteur et la base**

L'émetteur (dopage type N) est réalisé par dopage en surface d'un substrat de silicium de type P. La partie dopée P du substrat (c'est-à-dire la majeure partie de celui-ci

sauf la surface) constitue la base. L'interface de ces deux zones est celle d'une jonction PN qui permet de dissocier les paires électron-trou créées.

L'épaisseur totale de la cellule est actuellement proche de 200  $\mu\text{m}$ . Les trous photo-génères ayant une longueur de diffusion ( $L_p$ ) plus faible que celle des électrons ( $L_n$ ). En pratique, on réalise un émetteur de faible épaisseur (0,2 - 0,3  $\mu\text{m}$ ) mais fortement dope ( $\approx 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ) et une base de plus grande épaisseur faiblement dopée ( $\approx 10^{15}$  à  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ) [10].

Le fort dopage de l'émetteur permet de limiter la résistance du contact métal-semi-conducteur (créé par la connexion entre les contacts métalliques et l'émetteur) et de créer un champ électrique suffisant au niveau de la zone de charge d'espace (ZCE) [16].

### **2.7.2 La texturisation de la surface**

La réflexion est à l'origine de pertes importantes pour la cellule. La texturisation est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule. Cette opération vise à développer en surface un relief micrométrique, généralement de forme pyramidale. Le relief crée permet d'augmenter la surface et induit des réflexions multiples sur les facettes des pyramides [6]. La texturisation assure ainsi le piégeage d'un maximum de lumière réduisant les pertes liées à la réflectivité.

Différents procédés sont utilisés pour réaliser la texturisation : attaques chimiques de la surface (KOH, NaOH, acides), texturisation mécanique, plasma ou laser. Ces méthodes peuvent faire passer la réflectivité effective de 39 % à moins de 10 %.[16]

### **2.7.3 Les contacts face avant et face arrière**

Les contacts constituent la structure de collecte qui récupère et envoie les porteurs photo-génères vers le circuit externe. Pour assurer efficacement cette tâche, les contacts doivent être ohmiques. De mauvais contacts, c'est à dire entraînant une forte résistance série, auront essentiellement une répercussion sur le facteur de forme de la cellule et sur le courant récupère [10].

#### **2.7.4 La passivation**

Sur les surfaces de la cellule, le réseau cristallin s'interrompt brutalement. Certaines liaisons électroniques du silicium sont pendantes et deviennent des centres de recombinaisons pour les porteurs de charges. A ces liaisons s'ajoutent les impuretés présentes dans le réseau cristallin et les défauts du cristal (dislocations. . .).

La passivation consiste à améliorer la qualité électronique en surface et en volume en neutralisant les sites actifs, sources de recombinaisons. Les deux mécanismes de passivation de la surface qui permettent de réduire les recombinaisons sont les suivants [6].

##### **2.7.4.a Passivation par neutralisation des défauts d'interface**

C'est une passivation chimique des défauts de l'interface par un matériau ayant une affinité chimique forte avec le substrat (SiN, SiO<sub>2</sub> thermique,...). Les atomes de ce matériau comblent les liaisons pendantes et induisent une diminution de la valeur de  $D_{it}$  (densité d'états d'interface). [16]

##### **2.7.4.b. Passivation par effet de champ.**

La présence de charges dans certains matériaux déposés (comme dans le nitrure de silicium déposé par plasma) entraîne l'existence d'un potentiel de surface et d'une courbure de bande au sein du silicium (on note  $Q_f$  la densité de charges fixes). Cette courbure réduit la concentration d'un des deux types de porteurs en surface et limite le taux de recombinaison entre eux. La passivation par effet de champ peut également être mise en place à l'aide d'un dopage supplémentaire.

C'est ce qui est fait habituellement sur la face arrière des cellules : la barrière de potentiel induite par la différence de niveau de dopage entre la base et la face arrière tend à confiner les porteurs minoritaires dans la base et à les éloigner du bord du cristal. Ce dopage est généralement réalisé grâce aux contacts arrière à base d'aluminium qui viennent former un alliage avec le silicium lors de leur recuit. Dans ce cas, il se forme une zone dopée P<sup>+</sup> sur l'ensemble de la face arrière de la cellule (on parle de BSF ou champ de surface arrière). Une bonne passivation impose d'avoir de faibles valeurs de  $D_{it}$  et de grandes valeurs de  $Q_f$ . La passivation en volume se fait essentiellement par diffusion d'hydrogène : soit par

hydrogénation du substrat, soit par un recuit haute température d'une couche hydrogénée déposée au préalable ( $\text{SiN}_x:\text{H}$ ). [16]

## **2.8 Conclusion :**

Dans ce chapitre on a vu les différentes filières technologiques de fabrication de la cellule PV ainsi que la méthode standard de fabrication d'une cellule PV en Silicium multi cristallin , par la suite on a décrit la réalisation de la cellule solaire au sein de l'organisme d'accueil ,avec les différentes caractérisations de la cellule PV ainsi que les paramètres influant sur la caractéristique  $I(V)$  tels que l'éclairement, la température ,la résistance série  $R_s$  ,la résistance parallèle  $R_p$  et l'angle d'incidence , puis on a décrits quelque procédés de limitation des pertes, dans le chapitre suivant on va caractériser expérimentalement quelque cellules .

## Chapitre 3 : Caractérisations, et extractions des paramètres des cellules PV et interprétations des résultats obtenus

---

### 3.1 Introduction :

Cette étude a été menée avec comme objectif d'utiliser des cellules PV au silicium multicristallin réalisé au sein du CRTSE, nous avons aussi utiliser, à titre indicatif, des cellules monocristallines achetés de l'étranger (en 1990), le Si est le matériau le plus utilisé dans le domaine PV, et apparaît sous différentes formes selon son mode d'élaboration : monocristallin, multicristallin, amorphe. la différence entre ces matériaux réside dans leurs régularité cristallographique.

Si le silicium monocristallin comporte des tailles de grains parfaitement ordonnés supérieur à 10cm, elles sont comprises entre 1mm et 10cm pour le silicium multicristallin et entre 1 $\mu$ m et 1mm pour le polycristallin, le silicium amorphe est quand à lui complètement désordonné.

Le silicium monocristallin comporte peu de défauts recombinants et permet d'obtenir les meilleurs rendements, cependant son élaboration est très couteuse ce qui constitue un frein à son développement industriel pour les applications PV.

Les techniques de fabrications du silicium multicristallin sont beaucoup plus simples et donc moins onéreuses à mettre en œuvre. Néanmoins la qualité de ce matériau est moins bonne à cause de la présence de joints de grains qui introduisent des zones fortement recombinantes. Ces joints sont constitués par les surfaces adjacentes de grains d'orientations cristallographiques différentes et contiennent beaucoup de liaisons pendantes.

Ils ont un effet de réduire la durée de vie globale des porteurs, en outre , ces joints de grains bloquent le flux de porteurs et sont une voie éventuelle d'un courant de fuite à travers la jonction.

On peut différencier deux types de défauts dans le silicium multicristallin : les défauts intra granulaires , similaires à ceux rencontrer dans le silicium monocristallin et les défauts inter granulaires.

Les paramètres de la cellule PV ne sont pas généralement des quantités mesurables ou incluses dans les données de la fabrication , dans ce chapitre on va caractériser puis extraire les paramètres électriques de quelques cellules réalisées au sein du CRTSE.

on commencera donc par faire des mesures sous simulateur solaire à différents éclairément, sous SUN-Vco, puis sous obscurité , ensuite on mesurera la réponse spectrale des cellules ; enfin on calculera les différents paramètres de ces cellules, telles que la résistance série ,résistance parallèle , facteur d'idéalité, le courant de recombinaison et de fuite des deux diodes pour chacune des cellules proposées. Pour notre expérience on a choisi 9 cellules différentes.

<b>Cellule</b>	<b>Processus de fabrication</b>
Test 1ECL	Cellule monocristalline avec couche antireflet
Test 2ECL	Cellule monocristalline sans couche antireflet
Test 3ECL	Cellule multi cristalline, diffusion + Etchback
Test 4ECL	Cellule multi cristalline, diffusion +Drive-in
Test 5ECL	Cellule multi cristalline, diffusion +Drive-in + Etchback
Test 6ECL	Cellule multi cristalline , diffusion + Drive-in
Test 7ECL	Cellule multi cristalline , diffusion + Drive-in
Test 8ECL	Cellule multi cristalline , diffusion + Drive-in
Test 9ECL	Cellule multi cristalline , diffusion

**Tableau 3.1** Présentation des cellules utilisées

## 3.2. Mesures effectuées sur les cellules

### 3.2.1 Mesures effectuées sur les cellules sous éclairements

#### 3.2.1.a. Mise en évidence de l'influence de la lumière :

On mesurera sous simulateur : le courant de court circuit  $I_{cc}$ , la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , le facteur de forme FF ; Puissance Maximale  $P_{max}$ , le courant maximal  $I_{mp}$ ; la tension maximale  $V_{mp}$ ; et le rendement (Efficiency) sous différents éclairements des cellules proposées (Test1,2,3,4,5,6 ECL), et on portera ensuite toutes ces mesures dans les tableaux de mesures (3-2 à 3-6) ci-dessous.

- Paramètres électriques de la cellule Test 1ECL (monocristalline avec couche antireflet) à différents éclairements :

Eclairment ( $W/m^2$ )	Rendement(%)	$I_{cc}$ (A)	$V_{co}$ (V)	$I_{mp}$ (A)	$V_{mp}$ (V)	FF (%)	$P_{max}$ (W)	Surface( $cm^2$ )
400	4,4	1,2446	0,566	1,012	0,436	62,6	0,441	100
600	6,4	1,7844	0,578	1,459	0,441	62,5	0,644	100
800	8,7	2,4135	0,585	1,959	0,443	61,5	0,869	100
1000	10,8	3,0054	0,592	2,422	0,447	60,8	1,08	100

Tableau 3.2 Paramètres électriques de la cellule Test 1ECL sous éclairement

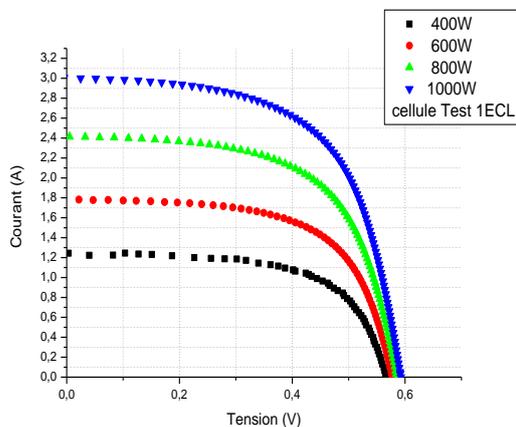


Figure.3-1-(a)  
l'influence de  
l'éclairage sur I-V  
pour la cellule Test 1ECL

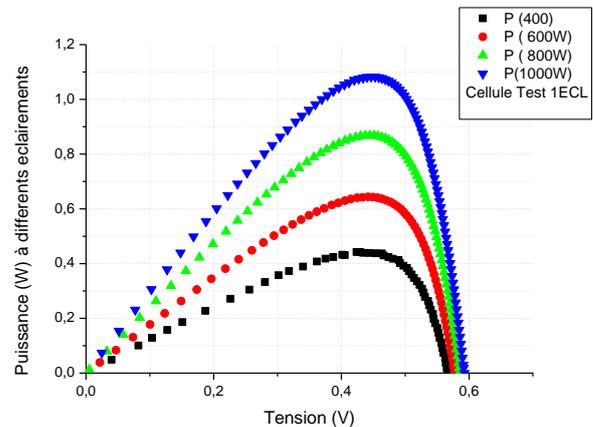
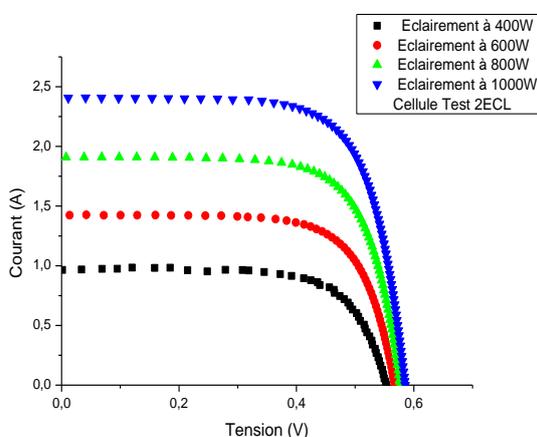


Figure.3-1-(b)  
l'influence de  
l'éclairage sur la  
puissance pour la cellule  
Test 1ECL

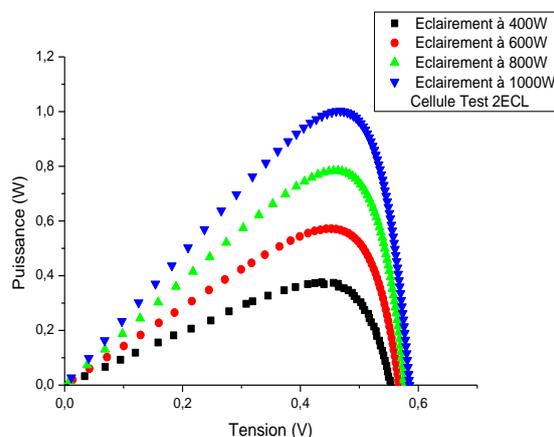
- Paramètres électriques de la cellule Test 2ECL (monocristalline sans couche antireflet) à différents éclairagements :

Eclaircement (W/m <sup>2</sup> )	Rendement (%)	I <sub>cc</sub> (A)	V <sub>co</sub> (V)	I <sub>mp</sub> (A)	V <sub>mp</sub> (V)	FF (%)	P <sub>max</sub> (W)	Surface(cm <sup>2</sup> )
400 (W)	3.7	0.9648	0.555	0.856	0.437	69.9	0.374	100
600(W)	5.7	1.4236	0.567	1.272	0.450	70.9	0.572	100
800(W)	7.8	1.9086	0.577	1.709	0.459	71.2	71.2	100
1000(W)	10	2.4073	0.585	2.153	0.466	71.2	1	100

**Tableau 3.3** Paramètres électriques de la cellule Test 2ECL sous éclairement



**Figure.3-2-(a)** l'influence de l'éclaircement sur I-V pour la cellule Test 2ECL

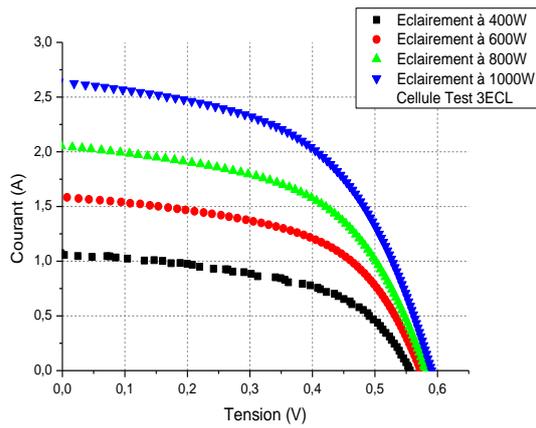


**Figure.3-2-(b)** l'influence de l'éclaircement sur la puissance pour la cellule Test 2ECL

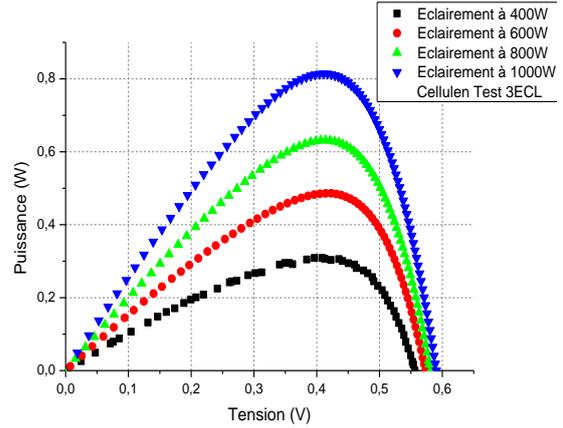
- Paramètres électriques de la cellule Test 3ECL (multi cristalline) à différents éclairagements :

Eclaircement (W/m <sup>2</sup> )	Rendement (%)	I <sub>cc</sub> (A)	V <sub>co</sub> (V)	I <sub>mp</sub> (A)	V <sub>mp</sub> (V)	FF (%)	P <sub>max</sub> (W)	Surface(cm <sup>2</sup> )
400 (W)	3.1	1.0738	0.557	0.747	0.412	51.4	0.307	100
600(W)	4.9	1.5862	0.573	1.169	0.416	53.5	0.486	100
800(W)	6.3	2.0528	0.581	1.530	0.413	52.9	0.632	100
1000(W)	8.1	2.6353	0.591	1.983	0.411	52.3	0.814	100

**Tableau 3.4** Paramètres électriques de la cellule Test 3ECL sous éclairement



**Figure.3-3-(a)** l'influence de l'éclairement sur I-V pour la cellule Test 3ECL

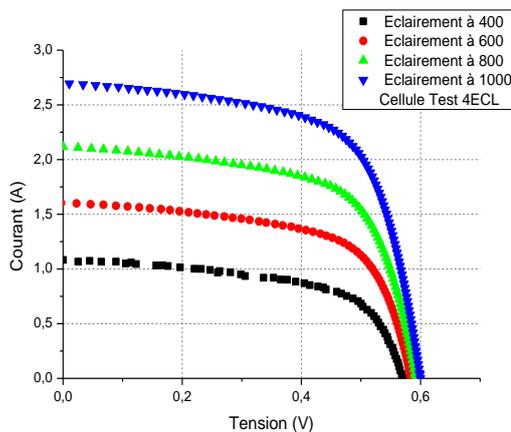


**Figure.3-3-(b)** l'influence de l'éclairement sur la puissance pour la cellule

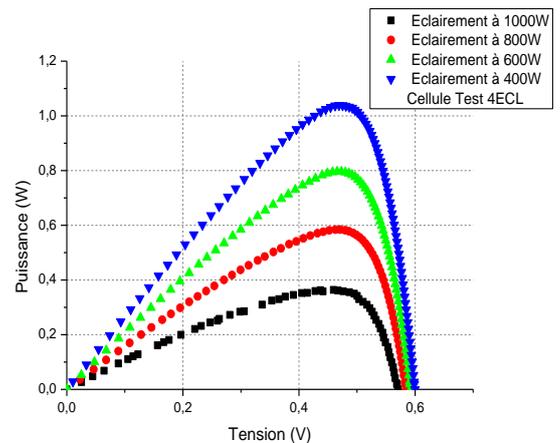
➤ **Paramètres électriques de la cellule Test 4ECL (multi cristalline) à différents éclairagements :**

Eclairement ( $W/m^2$ )	Rendement (%)	I <sub>cc</sub> (A)	V <sub>co</sub> (V)	I <sub>mp</sub> (A)	V <sub>mp</sub> (V)	FF (%)	P <sub>max</sub> (W)	Surface( $cm^2$ )
400 (W)	3.6	1.0824	0.572	0.799	0.454	58.7	0.363	100
600(W)	5.8	1.6023	0.584	1.255	0.466	62.5	0.585	100
800(W)	8.0	2.1158	0.592	1.702	0.468	63.6	0.727	100
1000(W)	10.4	2.6969	0.600	2.204	0.472	64.3	1.04	100

**Tableau 3.5.** Paramètres électriques de la cellule Test 4ECL sous éclairagement



**Figure.3-4-(a)** Influence de l'éclairement sur I-V pour la cellule Test 4ECL

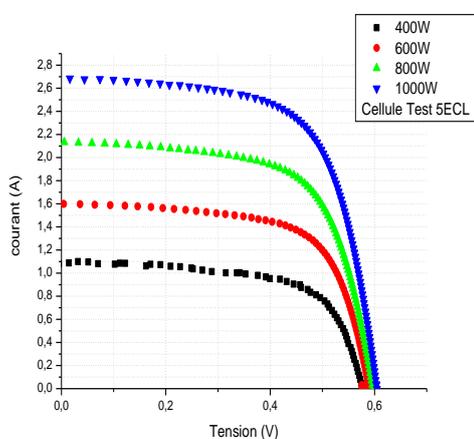


**Figure.3-4-(b)** Influence de l'éclairement sur la puissance pour la cellule Test 4ECL

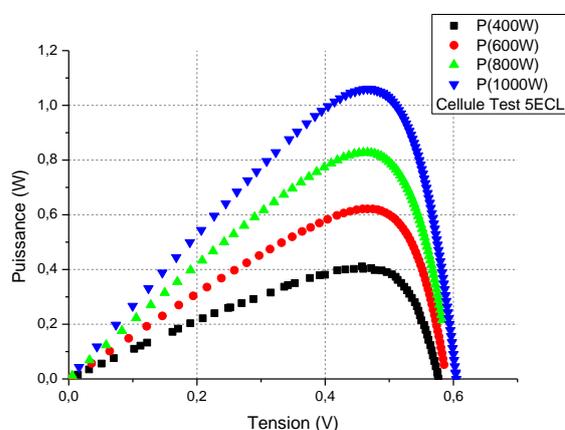
➤ Paramètres électriques de la cellule Test 5ECL (multi cristalline) à différents éclairagements :

Eclaircement (W/m <sup>2</sup> )	Rendement (%)	I <sub>cc</sub> (A)	V <sub>co</sub> (V)	I <sub>mp</sub> (A)	V <sub>mp</sub> (V)	FF (%)	P <sub>max</sub> (W)	Surface(cm <sup>2</sup> )
400 (W)	4.1	1.0818	0.577	0.892	0.455	65.0	0.406	100
600(W)	6.2	1.5992	0.589	1.338	0.465	66.1	0.623	100
800(W)	8.3	2.1936	0.597	1.791	0.462	65.1	0.828	100
1000(W)	10.6	2.6879	0.605	2.273	0.466	65.2	1.06	100

**Tableau 3.6** Paramètres électriques de la cellule Test 5ECL sous éclairement



**Figure.3-5(a)** Influence de l'éclaircement sur I-V pour la cellule Test 5ECL

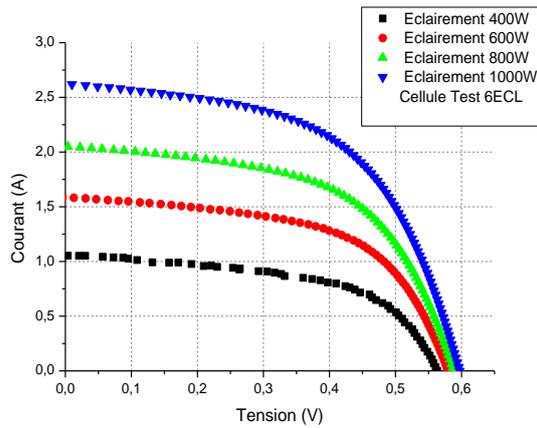


**Figure.3-5(b)** Influence de l'éclaircement sur la puissance pour la cellule Test 5ECL

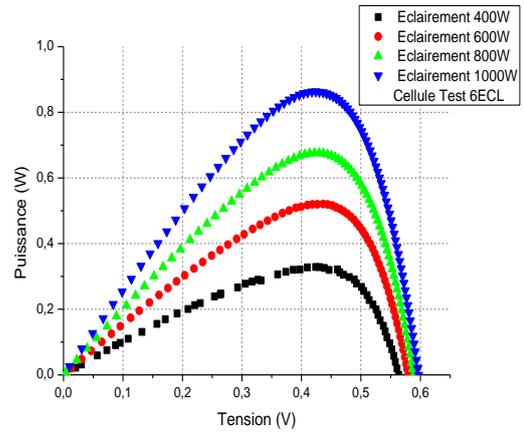
➤ Paramètres électriques de la cellule Test 6ECL (multi cristalline) à différents éclairagements :

Eclaircement (W/m <sup>2</sup> )	Rendement (%)	I <sub>cc</sub> (A)	V <sub>co</sub> (V)	I <sub>mp</sub> (A)	V <sub>mp</sub> (V)	FF (%)	P <sub>max</sub> (W)	Surface(cm <sup>2</sup> )
400 (W)	3.3	1.0537	0.564	0.776	0.423	55.2	0.328	100
600(W)	5.2	1.5869	0.580	1.215	0.429	56.7	0.521	100
800(W)	6.8	2.0511	0.589	1.588	0.426	56	0.676	100
1000(W)	8.6	2.6229	0.598	2.037	0.424	55.1	0.863	100

**Tableau 3.7.** Paramètres électriques de la cellule Test 6ECL sous éclairement



**Figure.3-6-(a)** Influence de l'éclairage sur I-V pour la cellule Test 6ECL

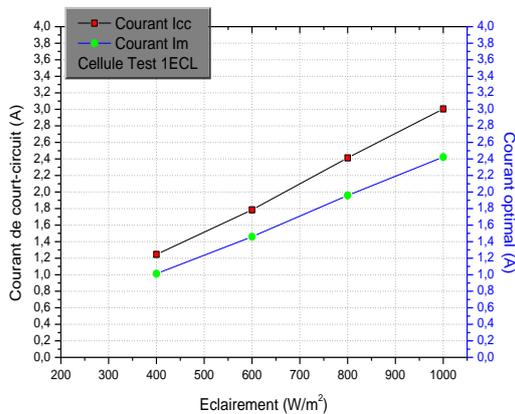


**Figure.3-6-(b)** Influence de l'éclairage sur la puissance pour la cellule Test 6ECL

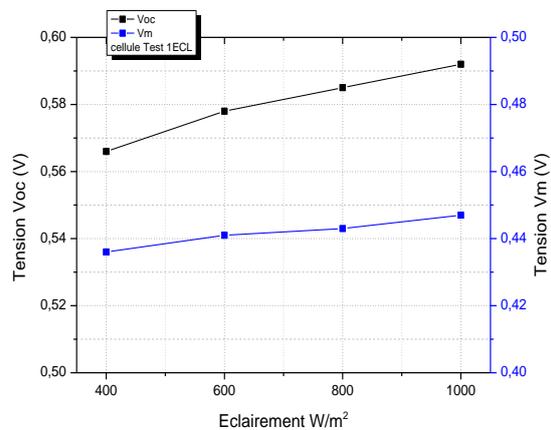
On peut constater à partir de ces courbes (Figures 3-1 à 3-6) que le courant et la puissance de la cellule PV varient en fonction de l'éclairage.

### ➤ Influence de la lumière :

On va déterminer la variation du courants de court-circuit  $I_{cc}$  et du courant optimal  $I_m$  en fonction de l'éclairage (Figure 3-8) ainsi que la Variation de la tension à vide  $V_{co}$  et de la tension optimale  $V_m$  en fonction de l'éclairage pour une cellule , (soit Test1ECL) , ( Figure 3-9 )



**Figure.3.8** Variation du courant  $I_m$  en fonction de l'éclairage de la cellule 1ECL



**Figure.3.9 :** Variation de  $V_{co}$  et de  $V_m$  en fonction de l'éclairage de la cellule 1ECL

Le courant de court-circuit débité est de l'ordre de 3A pour une intensité du rayonnement solaire de  $1000\text{W}/\text{m}^2$  et de l'ordre de 1,24A pour un rayonnement de  $400\text{W}/\text{m}^2$ , soit une différence de 1,76 A, alors que la tension pour un rayonnement de  $1000\text{W}/\text{m}^2$ , est de l'ordre de 0,592V et de l'ordre de 0,566V pour un éclairage de  $400\text{W}/\text{m}^2$ , soit une différence de 0,026 V

On déduit que dans une cellule PV le courant est directement proportionnel à l'éclairement, alors que la tension n'est pas très dégradée lorsque l'intensité du rayonnement diminue.

On peut déduire alors que la cellule PV est un générateur de courant continu à très basse tension qui dépend de l'éclairement pour une température de 25C.

### **3.2.1.b Mesures de cellules multi cristalline de process de fabrication différents :**

Dans cette partie, on mesurera sous simulateur : le courant de court circuit  $I_{cc}$ , la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , le facteur de forme FF ; Puissance Maximale  $P_{max}$ , le courant maximal  $I_{mp}$ ; la tension maximale  $V_{mp}$ ; et le rendement (Efficiency) sous différents éclairagements des cellules (Test6,7,8,9 ECL), de process de fabrication différents puis on portera toute ces mesures dans les tableaux de mesures (3-8 à 3-11) ci-dessous :

- **Paramètres électriques de la cellule Test 6ECL (multi cristalline) : avant HF puis après HF (éclairage à 1000W) :**

Cellule Test 6 ECL	Rendement (%)	$I_{cc}$ (A)	$V_{co}$ (V)	$I_{mp}$ (A)	$V_{mp}$ (V)	FF (%)	$P_{max}$ (W)	Surface( $\text{cm}^2$ )
avant HF	5.7	2.3629	0.592	1.536	0.372	40.8	0.571	100
Après HF	8.6	2.6229	0.598	2.037	0.424	55.1	0.863	100

**Tableau 3.8** Paramètres électriques de la cellule Test 6ECL avant et après HF

- Paramètres électriques de la cellule Test 7ECL (multi cristalline ) avant HF puis après HF (éclairage à 1000W) :

Cellule Test 7 ECL	Rendement (%)	I <sub>cc</sub> (A)	V <sub>co</sub> (V)	I <sub>mp</sub> (A)	V <sub>mp</sub> (V)	FF (%)	P <sub>max</sub> (W)	Surface(cm <sup>2</sup> )
avant HF	5.6	2.3629	0.592	1.536	0.372	40.8	0.571	100
Après HF	8.6	2.6229	0.598	2.037	0.424	55.1	0.863	100

**Tableau 3.9** Paramètres électriques de la cellule Test 7ECL avant et après HF

- Paramètres électriques de la cellule Test 8ECL (multi cristalline) avant HF puis après HF (éclairage à 1000W) :

Cellule Test 8 ECL	Rendement (%)	I <sub>cc</sub> (A)	V <sub>co</sub> (V)	I <sub>mp</sub> (A)	V <sub>mp</sub> (V)	FF (%)	P <sub>max</sub> (W)	Surface(cm <sup>2</sup> )
avant HF	3.6	1.9772	0.589	1.184	0.302	30.7	0.358	100
Après HF	7.6	2.5290	0.595	1.940	0.392	50.5	0.760	100

**Tableau 3.10** Paramètres électriques de la cellule Test 6ECL avant et après HF

- Paramètres électriques de la cellule Test 9ECL (multi cristalline) avant HF , après HF, puis après isolation (éclairage à 1000W) :

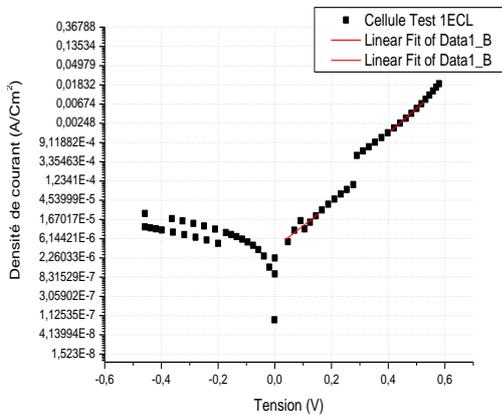
CelluleTest 8ECL	Rendement (%)	I <sub>cc</sub> (A)	V <sub>co</sub> (V)	I <sub>mp</sub> (A)	V <sub>mp</sub> (V)	FF (%)	P <sub>max</sub> (W)	Surface(cm <sup>2</sup> )
avant HF	3.9	2.323	0.546	1.210	0.326	31.1	0.394	100
après HF	6.9	2.529	0.571	0.764	0.392	47.8	0.691	100
après isolation	8.1	2.624	0.584	1.961	0.411	52.6	0.806	100

**Tableau 3.11** Paramètres électriques de la cellule Test 9ECL après isolation

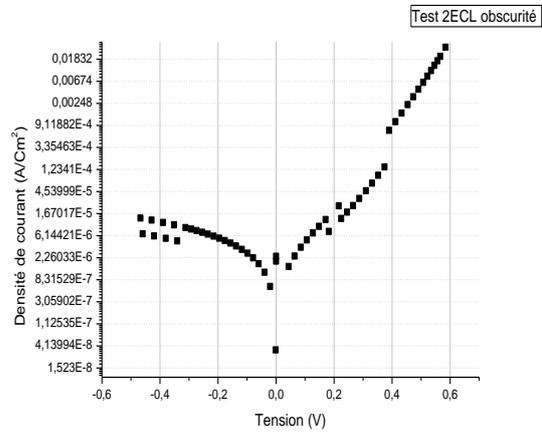
On a choisi des cellules de même technologie Test6,7,8 et 9ECL ayant subies des process différents tels que avant et après décapage HF , avant et après isolation , afin de mettre en évidence l'influence du décapage HF et de l'effet de l'isolation, dans le paragraphe suivant : amélioration des performance des cellules.

### 3.2.2. Mesures sous obscurité :

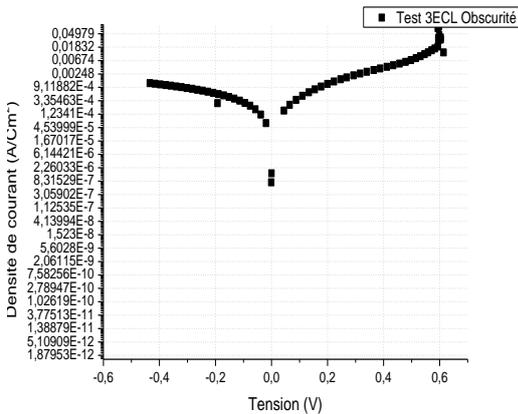
On mesurera sous obscurité la caractéristique de la densité de courant (J) en fonction de la tension (V) des cellules proposées (Test1,2,3,4,5,6 ECL), voir Figure (3-10 à 3-16) ci-dessous



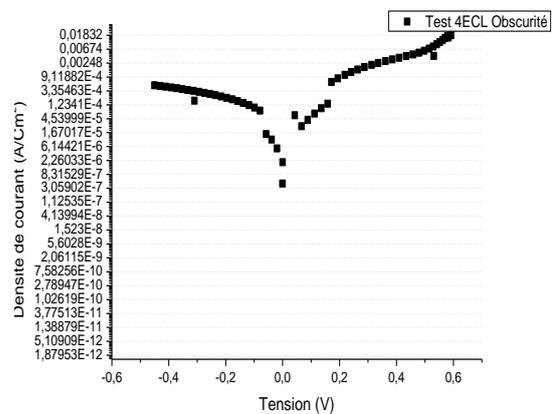
**Figure.3-10** Mesure sous obscurité de la caractéristique J-V de la cellule Test 1ECL



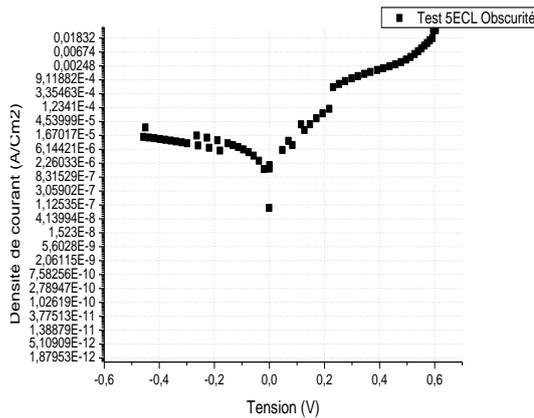
**Figure.3-11** Mesure sous obscurité de la caractéristique J-V de la cellule Test 2ECL



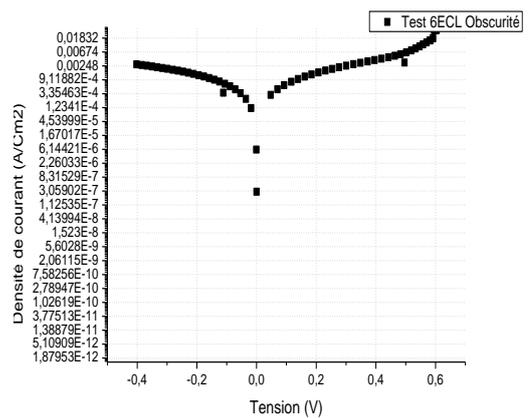
**Figure.3-12** Mesure sous obscurité de la caractéristique J-V de la cellule Test 3ECL



**Figure.3-13** Mesure sous obscurité de la caractéristique J-V de la cellule Test 4ECL



**Figure.3-14** Mesure sous obscurité de la caractéristique J-V de la cellule Test 5ECL



**Figure.3-15** Mesure sous obscurité de la caractéristique J-V de la cellule Test 6ECL

Ces mesures sous obscurité nous permettront par la suite d'extraire les densités de courants (de fuite et de recombinaison), la résistance parallèle ainsi que les facteurs d'idéalités des diodes par la méthode graphique.

### **3.2.3 Mesure Sun-V<sub>co</sub>**

Cette mesure permet d'obtenir les mesures de V<sub>co</sub>, FF, η à courant de court circuit I<sub>cc</sub> fixe de la cellule par la mesure de la tension à circuit ouvert V<sub>co</sub> en fonction de l'intensité lumineuse exprimée en Suns (1Sun= 1kW/m<sup>2</sup>), sans les effets de la résistance série.

Ci-dessous le Tableau (3.12) qui présente les caractéristiques Sun V<sub>co</sub> des cellules Test 1,2,3,4 et 5 ECL et le tableau (3.13) qui présente un comparatif entre les mesures des cellules en I-V et Sun-V<sub>co</sub>

Cellule	Vco(V)	FF (%)	$\eta$ (%)	Icc fixe (A)
Test 1ECL	0,589	76	13,43	3
Test 2ECL	0,581	75,3	10,5	2,4
Test 3ECL	0,587	71,4	11,02	2,6
Test 4ECL	0,599	73,7	11,91	2,7
Test 5ECL	0,605	76,4	12,48	2,7

**Tableau 3.12** Caractéristiques Sun Vco de quelques cellules( Icc fixé par le Sun-Vco )

Cellule	Mesure par I-V	Mesure par Sun-Vco	Mesure par I-V	Mesure par Sun-Vco
	FF%	FF%	$\eta$ %	$\eta$ %
Test 1ECL	60,8	76	10,8	13,43
Test 2ECL	71,2	75,3	10,0	10,5
Test 3ECL	52,3	71,4	8,1	11,02
Test 4ECL	64,3	73,7	10,4	11,91
Test 5ECL	65,2	76,4	10,6	12,48

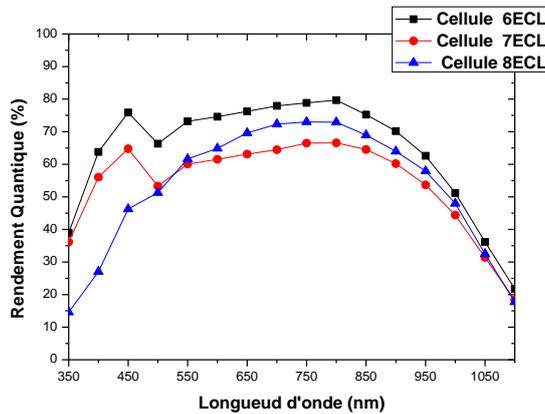
**Tableau 3.13** Tableau comparatif des mesures I-V et Sun-Vco

La mesure Sun-Vco permet d'extraire le pseudo facteur de forme, ainsi que le rendement de la cellule sans prendre en compte la résistance série ( $R_s$ ). Le pseudo-FF nous renseigne sur la qualité de la résistance shunt et par suite sur les courants de fuite pouvant être causés par un défaut. On note bien aux mesures par sun-vco le pseudo facteur de forme et le pseudo rendement est supérieur aux mesures par I-V.

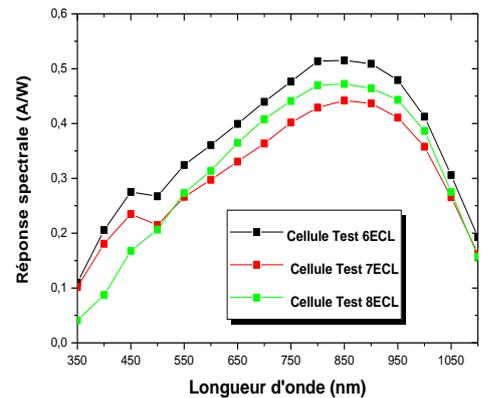
La mesure par sun-vco montre bien l'influence de la résistance série sur le facteur forme ainsi que sur le rendement de la cellule.

### 3.2.4. Mesure de la réponse spectrale :

Cette technique mesure le rendement quantique et la réponse spectrale en fonction de la longueur d'onde, elle est surtout utilisée pour mesurer la longueur de diffusion des porteurs minoritaires ,Figure (3-16-(a) et 3-16-(b))



**Figure.3-16-(a)** Rendement quantique des cellules Test 6ECL, Test 7ECL, Test 8ECL en fonction de la longueur d'onde



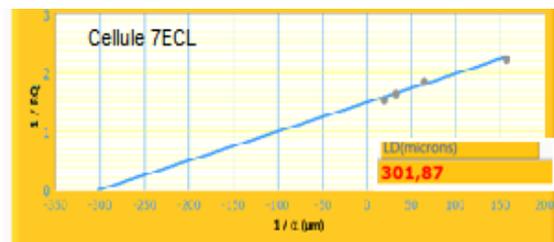
**Figure.3-16-(b)** Réponse spectrale des cellules Test 6ECL, Test 7ECL, Test 8ECL en fonction de la longueur d'onde

A partir de ces mesures on déduit alors la longueur de diffusion des cellules Test 6ECL, Test 7ECL, Test 8ECL par fit , on notera par la suite toute ces valeurs dans le tableau (3-14) ci-dessous .

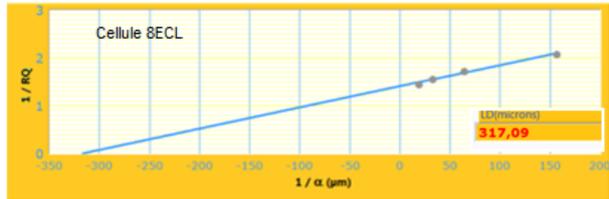
Cellule 6ECL



Cellule 7ECL



## Cellule 8ECL



Ci-dessous le tableau (3-14) qui présente un résumé des longueurs de diffusion extraites

Cellule	Longueur de diffusion $L_D$ ( $\mu m$ )
Test 6ECL	289.5
Test 7ECL	301.87
Test 8ECL	317.09

**Tableau.3.14.** Tableau récapitulatif des longueurs de diffusion extraites des cellules Test6,7,8ECL

La réponse spectrale (ou le rendement quantique) apporte des informations sur les zones du semi-conducteur proche de la surface éclairée.

On constate que Les 3 cellules (6,7, 8 ECL) qui ont subis le même process de fabrication (voir le Tableau 3-1) ont une réponse spectrale et un rendement quantique légèrement différent, (figure 3-16 et 3-17), selon que la valeur de la longueur de diffusion (tableau3-14) de la cellule est petite la réponse spectrale et rendement quantique est meilleur (6ECL) .

On remarque aussi que la réponse spectrale et le rendement quantique chutent puis s'approche du zéro pour la longueur d'onde de  $1,05\mu m$  car la longueur d'onde du silicium est de  $1,2\mu m$ .

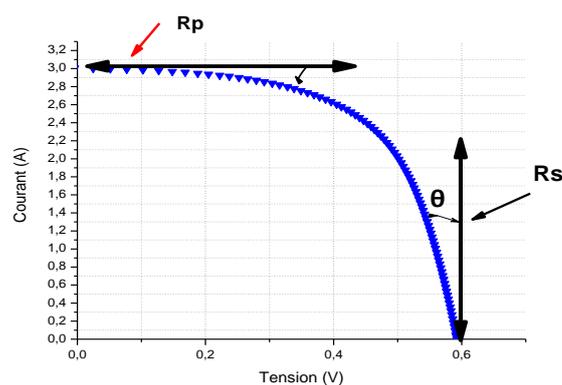
### 3.3. Méthodes utilisées d'extraction des paramètres électriques des cellules

Les méthodes les plus utilisées de caractérisation des cellules solaires à base du Si-cristallin, sont : la méthode explicite simplifiée, la méthode de la pente et la méthode itérative. La première méthode est basée sur une résolution purement mathématique en s'appuyant sur certain simplification, la deuxième méthode est la méthode de la pente qui basée sur un calcul géométrique et enfin la méthode itérative qui basée sur la résolution numérique [33].

On choisira alors la méthode de la pente (géométrique), on va décrire dans ce qui suit, les différentes méthodes utilisées dans notre laboratoire pour déterminer les différents paramètres électriques inconnus de la cellules solaire : la résistance série, la résistance parallèle, les différents courants (de diffusion  $I_{01}$  et de recombinaison  $I_{02}$ ), les facteurs d'idéalités  $n_1$  et  $n_2$  des deux diodes .

#### 3.3.1.méthodes d'extraction de $R_s$ et $R_p$ sous éclairement :

##### 3.3.1.a. Méthode d'extraction graphique par la pente :



**Figure 3-17:** Détermination graphique de la résistance parallèle

C'est la méthode la plus simple , elle consiste, sous éclaircissement, à évaluer  $R_p$ , à partir de la pente de la caractéristique  $I(V)$ , au point de court-circuit  $(0, I_{cc})$  et  $R_s$  dans la zone proche de  $V_{co}$  (tension en circuit ouvert) ,  $(V_{co}, 0)$ . [29]

- **Détermination de  $R_p$  :**

Dans la région de la courbe  $I-V$  où la cellule se comporte comme un générateur à courant constant, figure (3-17), l'équation (1-9) s'écrit alors :

$$I = I_{ph} - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (3-1)$$

$$I = \frac{I_{ph} - V/R_p}{1 + R_s/R_p} \quad (3-2)$$

En différenciant cette équation , on obtient :

$$\frac{dI}{dV} = - \frac{1}{R_s + R_p} \quad (3-3)$$

Généralement  $R_s \ll R_p$  , donc on peut écrire :

$$\frac{dI}{dV} = - \frac{1}{R_p} \quad (3-4)$$

Ainsi

$$R_p = \frac{1}{\tan \alpha} \quad (3-5)$$

La résistance "parallèle" d'une cellule PV , c'est donc l'inverse de la pente de la courbe dans la zone proche de  $I_{cc}$  (courant de court-circuit) qui correspond à la tension de court circuit.

- **Détermination de  $R_s$**

La résistance série, c'est l'inverse de la pente de la courbe dans la zone proche de  $V_{co}$  (tension en circuit ouvert)

$$\frac{1}{R_s} = \tan \theta = \Delta I / \Delta V \quad (3-6)$$

$$\frac{dI}{dV} = -I_0 \left[ \exp\left(q \frac{V+IR_s}{n.K.T}\right) - 1 \right] \frac{q}{nKT} (1 + R_s \frac{dI}{dV}) \quad (3-7)$$

Ce qui donne au point (Vco,0) :

$$R_s = - \left. \frac{dV}{dI} \right|_{V_{co}} \quad (3-8)$$

La pente dans la point V<sub>co</sub> est donnée alors par(  $-\left. \frac{dV}{dI} \right|_{I=0}$  ) qui représente la valeur de la résistance série Rs , cette valeur est déduite des résultats expérimentaux.

### **3.3.1.b.Méthode de Wolf et Rauschenbach**

La méthode de Wolf et Rauschenbach [14] consiste à relever la caractéristique courant-tension à deux niveaux d'éclairements (voir fig.3-18)

En choisissant le même écart de courant  $\Delta I$ , on mesure l'écart de tension entre deux points proches du coude de la caractéristique  $\Delta V$ , puis on applique l'équation (3-21).

On peut répéter la mesure à plusieurs niveaux d'éclairement voisins.

à partir de l'équation (1-9) du chapitre (1) :

Le dernier terme est négligé car Rp est assez grand devant Rs . de même qu'on peut faire l'approximation suivante :

$$I_{ph} \approx I_{cc} \quad (3-9)$$

$$I = I_{cc} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V+RsI)}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (3-10)$$

Donc

$$I_1 = I_{cc1} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V_1+RsI_1)}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (3-11)$$

$$I_2 = I_{cc2} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V_2+RsI_2)}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (3-12)$$

Or

$$I_1 - I_{cc1} = -\Delta I \quad (3-13)$$

Et

$$I_2 - I_{cc2} = -\Delta I \quad (3-14)$$

Ce qui fait :

$$I_0 \left[ \exp \left( \frac{q(V_1 + RsI_1)}{nkT} \right) - 1 \right] = I_0 \left[ \exp \left( \frac{q(V_2 + RsI_2)}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (3-15)$$

Soit :

$$\frac{(V_1 + RsI_1)}{nkT} = \frac{(V_2 + RsI_2)}{nkT} \quad (3-16)$$

Donc :

$$V_1 + RsI_1 = V_2 + RsI_2 \quad (3-17)$$

Soit :

$$Rs = \frac{V_2 - V_1}{I_1 - I_2} \quad (3-18)$$

Or :

$$I_1 - I_2 = I_{cc1} - I_{cc2} \quad (3-19)$$

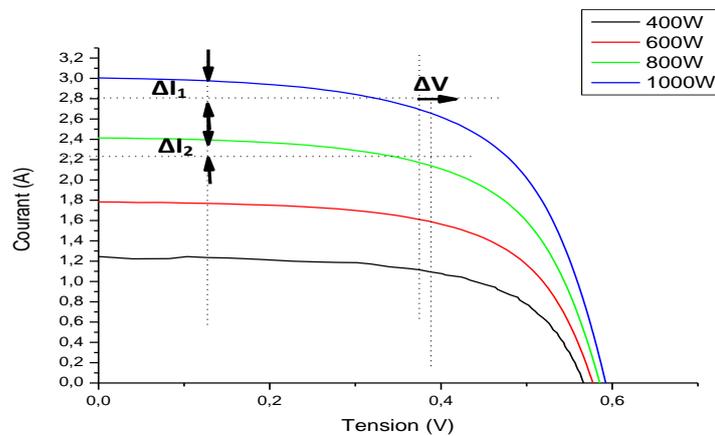
Donc :

$$Rs = \frac{V_2 - V_1}{I_{cc1} - I_{cc2}} \quad (3-20)$$

Et donc finalement :

$$Rs = \frac{\Delta V}{\Delta I_{cc}} \quad (3-21)$$

La figure 3-18 illustre la méthode de mesure de Wolf et Rauschenbach



**Figure.3-18.** Mesure de Rs d'une cellule PV par la méthode Wolf et Rauschenbach

Les résultats des calculs de Rs des cellules Test 1,2,3,4,5, et 6ECL par cette méthode seront portés dans le tableau (3-15)

### 3.3.1.c.Méthode S Bowden

Pour nos calculs de la résistance série on a aussi utilisé la méthode de S.Bowden[30].

La résistance série est tout simplement la différence de tension entre la courbe idéale à éclairement minimum et la courbe réelle divisée par la différence de courant entre le plein éclairement et l'éclairement minimum.

Le niveau d'éclairement minimum ne doit pas être approximatif, il est calculé par la différence entre le courant de court circuit idéal  $I_{cc}$  et le courant de la puissance maximale  $I_{mp}$  sur le courant de court circuit idéal  $I_{cc}$  ;

$$\text{niveau d'éclairement minimum} = \frac{I_{cc} - I_{mp}}{I_{cc}} * 1000 \quad (3-22)$$

Le niveau idéal de l'éclairement minimum est :

$$\Delta I_{cc} = I_{cc} (\text{éclairement maximal}) - I_{cc} (\text{éclairement minimal})$$

de sorte que Rs, est rapportée au point de puissance maximale

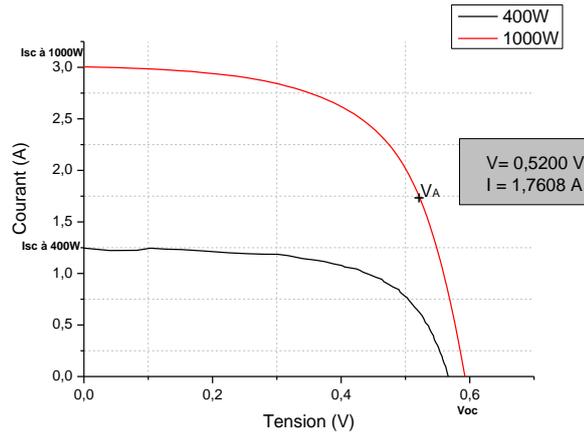
$$R_s = \frac{V_{co} - V_A}{\Delta I_{cc}} \quad (3-23)$$

Avec :  $V_{co}$  : tension à un éclairement minimal

$V_A$  : tension correspondant à la différence de courant  $\Delta I_{cc}$  sur la courbe d'éclairement maximal

$\Delta I_{cc}$  : la différence de courant entre le plein éclairement  $I_{cc}(\text{max})$  et l'éclairement minimum  $I_{cc}(\text{min})$

➤ Application pour la mesure de Rs de la cellule **Test 1ECL**, figure 3-19 ci-dessous :



**Figure.3-19** : Mesure de  $R_s$  de la cellule Test 1ECL par la méthode Bowden

Le niveau d'éclairement minimum idéal est calculé par l'eq (3-22)

$$AN : \text{niveau d'éclairement minimum idéal} = 194 \text{ W/m}^2$$

Donc le niveau d'éclairement minimum idéal est de  $194 \text{ W/m}^2$ , or notre simulateur solaire ne peut simuler un éclairement moins de  $400 \text{ W}$  ; donc pour nos calculs on prendra le niveau d'éclairement minimum =  $400 \text{ W}$

On calcule alors  $R_s$  en utilisant l'équation : eq ( 3-23)

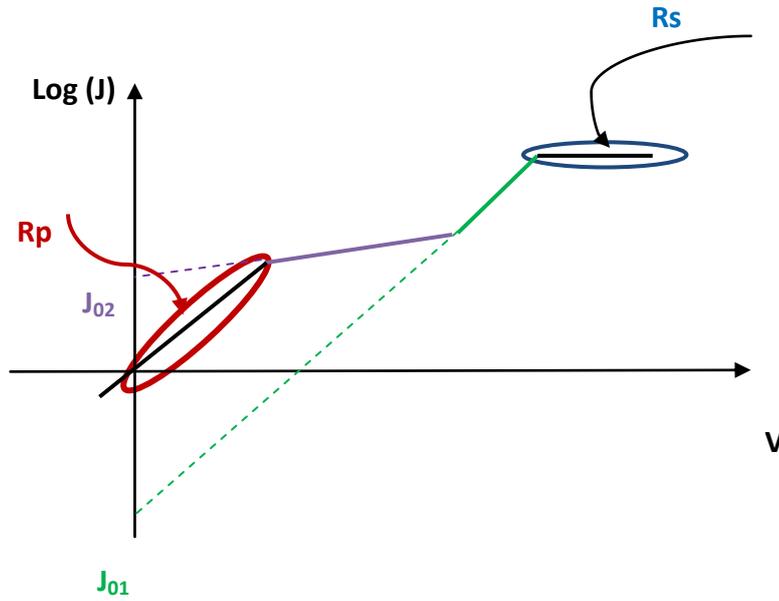
Les résultats des calculs seront portés dans le tableau (3-15)

### **3.3.1.d. extraction à partir d'un programme développé au CRTSE (1 éclairement )**

La technique d'extraction des paramètres de la cellule a été développée sous Visual basic au centre de recherche CRTSE à partir de l'article Saleem [31],

## **3.3.2. Méthodes d'extraction graphique des paramètres de la cellule sous obscurité**

La méthode graphique consiste à tracer les pentes de la caractéristique sous obscurité afin d'extraire les densités de courant  $J_{01}$  et  $J_{02}$ , les facteurs d'idéalités  $n_1$  et  $n_2$  des diodes et les résistances  $R_s$  et  $R_p$ , [32], figure.3-20).



**Figure.3-20:** Extraction graphique sous obscurité : courbe Log (J) en fonction de V

Sous obscurité l'expression du courant  $I(V)$  s'écrit (eq 3-24)

$$I(V) = I_{01} \left( \exp \frac{V-IR_s}{n_1 V_t} - 1 \right) + I_{02} \left( \exp \frac{V-IR_s}{n_2 V_t} - 1 \right) + \frac{V-IR_s}{R_p} \quad (3-24)$$

Pour les très faibles tensions (de 0 à 0,15V), les courants d'obscurités  $I_{obs1} (I_{01} \left( \exp \frac{V-IR_s}{n_1 V_t} - 1 \right))$  et  $I_{obs2} (I_{02} \left( \exp \frac{V-IR_s}{n_2 V_t} - 1 \right))$  sont négligeables, l'eq (3-24) devient alors égale à eq (3-25):

$$I(V) = \frac{V-IR_s}{R_p} \quad (3-25)$$

Ce qui nous permettra d'extraire la résistance parallèle  $R_p$  (puisque  $R_s$  est très faible devant  $R_p$ )

Dans cette région la résistance parallèle influe beaucoup sur la caractéristique de la cellule

Pour les tensions comprises entre 0,2V et 0,4V, le courant d'obscurité  $I_{obs1}$  et le terme  $\frac{V-IR_s}{R_p}$  sont négligeables, et l'eq (3-24) devient alors égale à eq (3-26):

$$I(V) = I_{02} \left( \exp \frac{V-IR_s}{n_2 V_t} - 1 \right) \quad (3-26)$$

Ce qui nous permettra d'extraire le courant  $I_{02}$

Pour les tensions comprises entre 0,4V et 0,6V , le courant d'obscurité  $I_{obs2}$  et le terme  $\frac{V-IR_s}{R_p}$  sont négligeables , et l'éq (3-24) devient alors égale à eq (3-27) :

$$I(V) = I_{01} \left( \exp \frac{V-IR_s}{n_1 V_t} - 1 \right) \quad (3-27)$$

Ce qui nous permettra d'extraire le courant  $I_{01}$  , qui est responsable de la détermination de la tension de circuit ouvert  $V_{CO}$

Dans la région où la tension est égale à 0,6V la résistance série influe beaucoup sur la caractéristique.

Application par fit sous originepro8.6 :

On va extraire les courants de diffusion et de recombinaison ; le facteur d'idéalité  $n_1$  et  $n_2$  ainsi que la résistance parallèle  $R_{sh}$  des différentes cellules étudiées.

Pour déterminer  $I_{01}$  et  $n_1$  , on doit choisir un domaine dans la partie supérieure de la courbe sous obscurité puis fiter avec le logicielpro8.6 en lui introduisant une équation qui sera tangente à ce domaine de la courbe, tels que :

$$I = I_{01} \left( \frac{\exp(V-R_s I)}{n_1 V_t} - 1 \right) \quad (3-27)$$

$$\frac{I+I_{01}}{I_{01}} = \frac{\exp(V-R_s I)}{n_1 V_t} \quad (3-28)$$

Ce qui donne :

$$\ln \left( \frac{I+I_{01}}{I_{01}} \right) = \frac{V-R_s I}{n_1 V_t} \quad (3-29)$$

Si on néglige  $I_{01}$  devant  $I$

$$V - R_s I = n_1 V_t \ln(I) - n_1 V_t \ln(I_{01}) \quad (3-30)$$

$$V = R_s I + n_1 V_t \ln(I) - n_1 V_t \ln(I_{01}) \quad (3-31)$$

Et donc :

$$V = -n_1 V_t \ln(I_{01}) + R_s I + n_1 V_t \ln(I) \quad (3-32)$$

On écrira alors sous le logiciel origine8.6 une équation de la forme ci-dessous (eq(3-33)) ,et on déterminera la tangente à la courbe dans ce domaine de données :

$$y = a + bx + c * \ln (x) \quad (3-33)$$

Avec par analogie :  $a = -n_1V_t \ln(I_{01} )$

$$b = R_s$$

$$c = n_1V_t$$

Pour déterminer  $I_{02}$  et  $n_2$  , on doit choisir le domaine dans la partie inférieure de la courbe ( entre 0,2 et 0,4V) sous obscurité qui répond à l'équation (3-34) puis de la même manière que précédemment fiter avec le logiciel originepro8.6 en lui introduisant l' équation (3-35) qui sera tangente à ce domaine de la courbe.

$$V = -n_2V_t \ln(I_{02}) + R_s I + n_2V_t \ln(I) \quad (3-34)$$

$$y = a + bx + c * \ln (x) \quad (3-35)$$

### 3.4- Résultats obtenus

#### 3.4.1 Résistance série

Le calcul de la résistance série  $R_s$  obtenu par les 3 méthodes de calculs est résumé dans le tableau (3.15) ci-dessous:

Cellules	$R_s(\Omega)$ , [14]	$R_s(\Omega)$ , [30]	$R_s(\Omega)$ , [31]
Test 1ECL	2.5	2.6	1.238
Test 2ECL	2.1	0.38	0.787
Test 3ECL	5.7	5.3	3.069
Test 4ECL	4.1	2.3	0.872
Test 5ECL	1.2	2.43	1.154
Test 6ECL	4.3	4.56	2.711

**Tableau 3.15** Tableau comparatif des mesures de  $R_s$  par les 3 méthodes

#### 3.4.2. Résistance parallèle $R_p$ :

La résistance parallèle  $R_p$  obtenue par calculs avec les 3 méthodes, est résumée dans le tableau 3.16 ci-dessous :

Cellules	$R_p(\Omega)$ , [29]	$R_p(\Omega)$ , [32]	$R_p(\Omega)$ , [31]
Test 1ECL	571	1775	162
Test 2ECL	9970	7466	1557,4
Test 3ECL	144.3	156	101,9
Test 4ECL	268	675	149,5
Test 5ECL	621	2215	263,5
Test 6ECL	184.3	162,4	130,9

**Tableau 3.16.** Tableau comparatif des mesures de  $R_p$  par les 3 méthodes

Comme on peut le constater les résultats de calculs de la résistance série ou parallèle sont un peu différents, chaque méthode donne un résultat différent, (méthode pente à  $V_{co}$  et  $I_{cc}$  ; méthode Bowden , Wolf et Rauschenbach ; Saalem, et sous obscurité) ; ceci reflète toute la difficulté de détermination des résistance série et parallèle des cellules PV .

### **3.4.3.-Densités de courants de saturation et facteurs d'idéalité des diodes :**

Les densités de courants de saturation ( $J_{01}$  courant de diffusion et  $J_{02}$  courant de recombinaison) et les facteurs d'idéalités des diodes sont obtenus par la méthode graphique (tangentes) , puis par fit et par la méthode H.Saleem (1diode), le résultats des calculs est résumé dans le tableau 3.17 ci-dessous :

Cellule	Mesure par [32]		Mesure par fit (obscurité)				Mesure par[31]	
	J <sub>01</sub> (A/cm <sup>2</sup> )	J <sub>02</sub> (A/cm <sup>2</sup> )	J <sub>01</sub> (A/cm <sup>2</sup> )	J <sub>02</sub> (A/cm <sup>2</sup> )	n <sub>1</sub>	n <sub>2</sub>	J <sub>0</sub> (A/cm <sup>2</sup> )	n
Test 1ECL	2,092.10 <sup>-7</sup>	3,05.10 <sup>-5</sup>	3,35.10 <sup>-6</sup>	2,39.10 <sup>-5</sup>	3,82	2,93	2,094.10 <sup>-7</sup>	1,94
Test 2ECL	2,092.10 <sup>-7</sup>	4,27.10 <sup>-7</sup>	4,41.10 <sup>-7</sup>	3,85.10 <sup>-7</sup>	2,53	2,07	2,465.10 <sup>-8</sup>	1,63
Test 3ECL	3,3546.10 <sup>-4</sup>	1,234.10 <sup>-4</sup>	5,34.10 <sup>-5</sup>	2,64.10 <sup>-4</sup>	4,25	4,13	6,011.10 <sup>-7</sup>	2,19
Test 4ECL	3,105.10 <sup>-5</sup>	2,294.10 <sup>-4</sup>	1,52.10 <sup>-5</sup>	4,08.10 <sup>-5</sup>	1,93	3,37	2,965.10 <sup>-8</sup>	1,70
Test 5ECL	1.10 <sup>-6</sup>	8,4.10 <sup>-5</sup>	4,49.10 <sup>-7</sup>	4,5.10 <sup>-6</sup>	4,418	1,38	1,142.10 <sup>-7</sup>	1,89
Test 6ECL	3,105.10 <sup>-5</sup>	2,294.10 <sup>-4</sup>	2,12.10 <sup>-5</sup>	3,25.10 <sup>-4</sup>	3,1	2,5	5,573.10 <sup>-7</sup>	2,19

**Tableau 3.17** Tableau des mesures des densités de courants de saturation et facteurs d'idéalités par les 3 méthodes

Dans le silicium, aux faibles tensions, le courant d'obscurité (J<sub>02</sub>) résultant des recombinaisons dans la zone de charge d'espace est plus grand, Par contre au delà d'une tension de 0,4 V , le courant d'obscurité (J<sub>01</sub>) , due à la diffusion des porteurs minoritaires l'emporte.

D'après le tableau (3-16) et (3-17) qui résumant les valeurs des résistances parallèles calculées on remarque que :

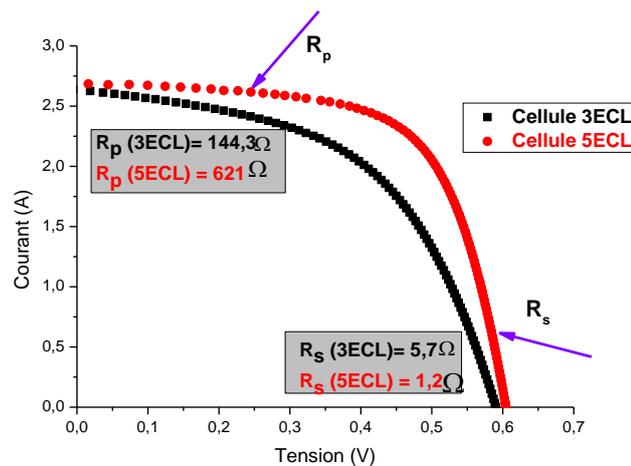
Si la résistance R<sub>p</sub> augmente implique que le courant J<sub>02</sub> (de recombinaison) > J<sub>01</sub>(de diffusion),

Et la résistance R<sub>p</sub> diminue implique que le courant J<sub>02</sub> (de recombinaison) < J<sub>01</sub>(de diffusion).

### 3.5 . Influence de la résistance série et parallèle sur le facteur forme d'une cellule PV :

#### 3.5.1 Mise en évidence de la résistance série et parallèle :

On trace la caractéristique I(V) pour les deux cellules Test3ECL et Test6ECL qui sont de même technologie, (Figure.3.21)



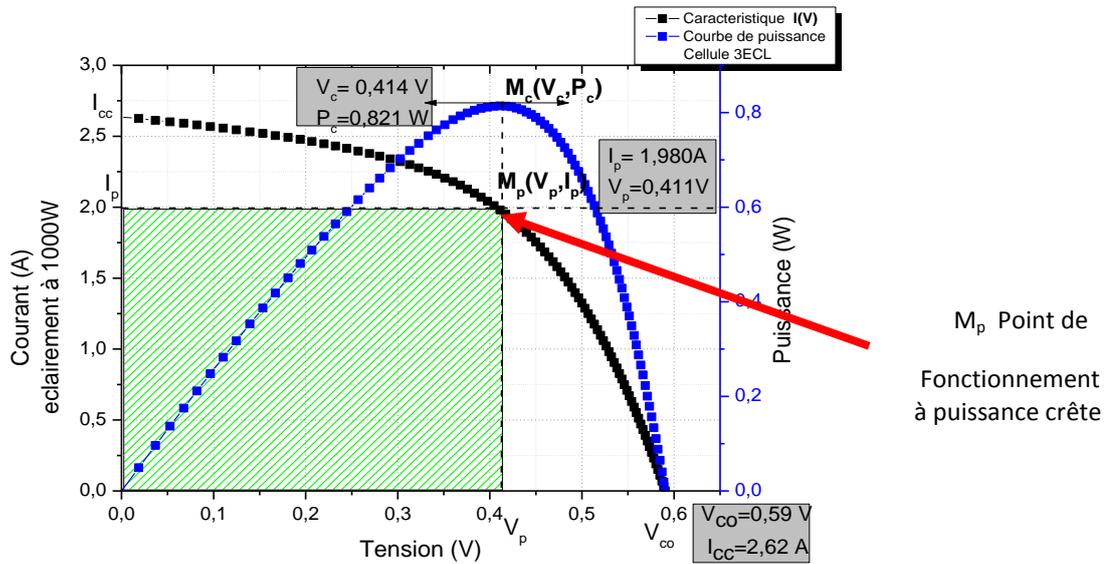
**Figure.3.21** Mise en évidence de la résistance série et parallèle

L'augmentation de la résistance série se traduit par une diminution de la pente de la courbe I(V) et une légère réduction de la tension autour du  $V_{co}$  ;

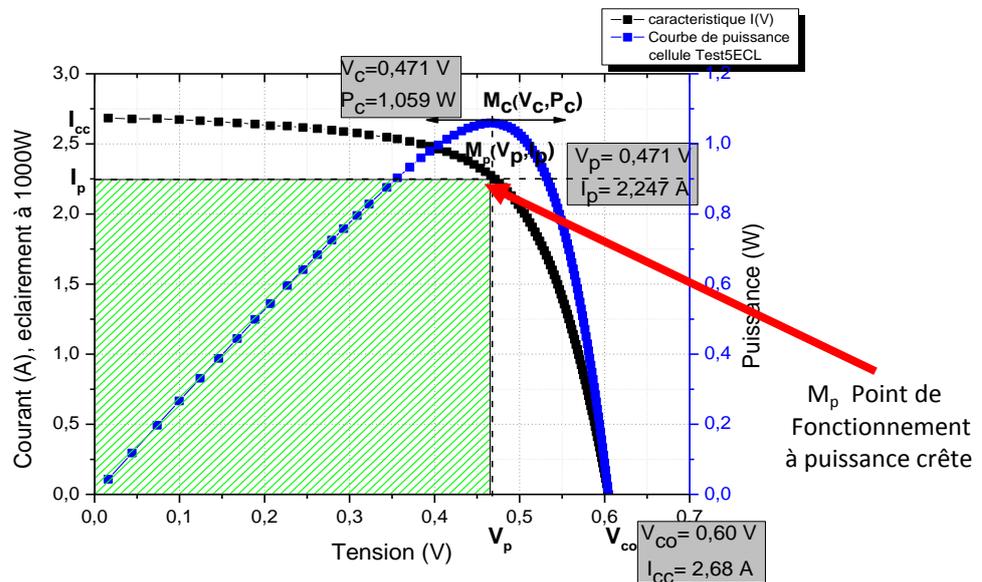
la diminution de la résistance parallèle entraîne une diminution de la pente de la courbe I (v) autour du courant court-circuit.

#### 3.5.2 Influence de la résistance série et parallèle sur le facteur forme

Pour déterminer l'influence de la résistance série et parallèle sur le facteur forme, on doit tracer la caractéristique électrique et la courbe de puissance de la cellule pour un éclairage de 1000W ; puis définir la puissance crête (maximale) au point  $M_c(V_c, P_c)$  ainsi que le point de fonctionnement optimal  $M_p(V_p, I_p)$ , (Figure 3.22 et 3.23).



**Figure 3.22.(a)** Caractéristique électrique et courbe de puissance de la cellule Test3ECL pour un éclairage de 1000W



**Figure 3.22.(b)** Caractéristique électrique et courbe de puissance de la cellule Test5ECL pour un éclairage de 1000W

On calcule la puissance crete (maximale) en utilisant l'eq (1-18)

$$P_m = V_m * I_m = FF * V_{co} I_{cc}$$

A partir de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  et du courant de court circuit  $I_{cc}$ , on définit le facteur de courbe  $F_c$  ou facteur de forme  $FF$  de la caractéristique de la cellule par l'éq (1-19):

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}}$$

le rendement de conversion en puissance est défini calculé par l'eq (1-20)

$$\eta = \frac{V_{max} I_{max}}{P_{incidente}}$$

Application aux cellules considérées Test 3 et 5ECL ; les résultats de calculs sont noter sur le tableau (3-18) ci-dessous :

Cellule	Resistance serie $R_s (\Omega)$	Resistance parallèle $R_p (\Omega)$	Facteur forme FF (%)	Rendement $\eta_c (\%)$
Test3ECL	5,7	144,3	53%	8,21%
Test5ECL	1,2	621	65,8 %	10.58

**Tableau 3.18:** Résumé des calculs pour les cellules Test3ECL et Test5ECL

on remarque que si la résistance  $R_p$  diminue, la tension  $V_{co}$  diminue et le facteur forme  $FF$  diminue aussi , le courant de court circuit n'est pas très influencé par la résistance parallèle,

On remarque aussi que si la résistance série  $R_s$  augmente, le courant de court circuit  $I_{cc}$  diminue alors le facteur forme  $FF$  diminue aussi.

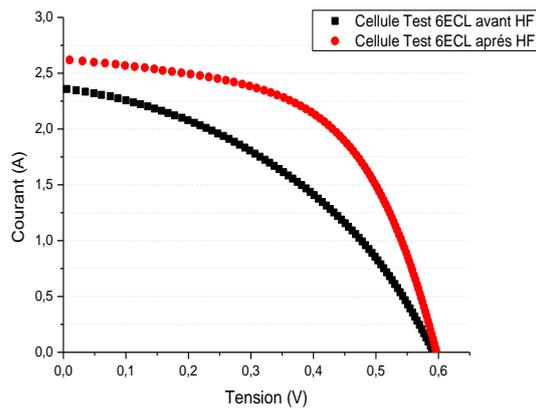
pour avoir un haut rendement de la cellule PV il est impératif que la résistance série soit très faible (inferieure à  $0,5 \Omega$  ) .

On déduit que la résistances série  $R_s$  et parallèles  $R_p$  de la cellule influent directement sur le rendement de conversion , sur le facteur de forme de la cellule ainsi que sur le point de fonctionnement optimal de la cellule.

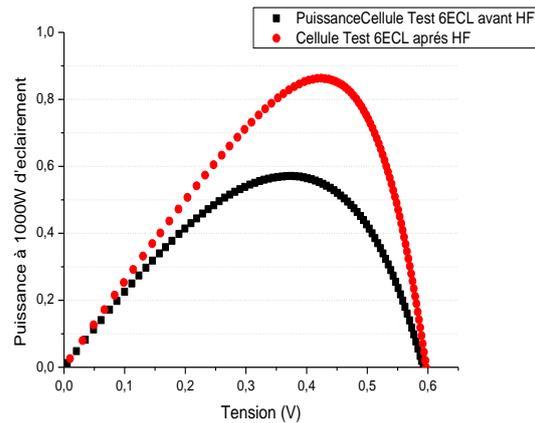
## 3.6. Amélioration des performances de la cellule

### 3.6.1. Effet du décapage HF après mesure I(V)

On considère les mesures de la cellule Test 6ECL (multi cristalline) : avant HF puis après HF (dilué à 5%) pour un éclairement de  $1000\text{W}/\text{m}^2$ , (Figure.3.23 (a) et (b))



**Figure.3.23-(a)**  
caractéristiques I-V pour la  
cellule Test 6ECL



**Figure.3.23-(b)** courbes  
puissances pour la cellule  
Test 6ECL

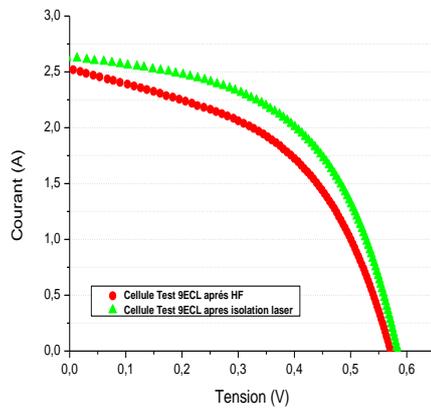
On constate pour la caractéristique I(V), (Figure. 3.23-(a)) une nette amélioration du courant de court-circuit pour la cellule Test 6ECL après décapage HF, On constate aussi pour la courbe de puissance, (Figure3.23-(b)) une nette amélioration de la puissance pour la cellule après décapage HF.

Le décapage HF(5%) permet d'éliminer l'oxyde formé lors de l'étape de co firing (frittage) qui est responsable de la réduction de la collecte des porteurs, son élimination permettra ainsi de corriger cette dégradation

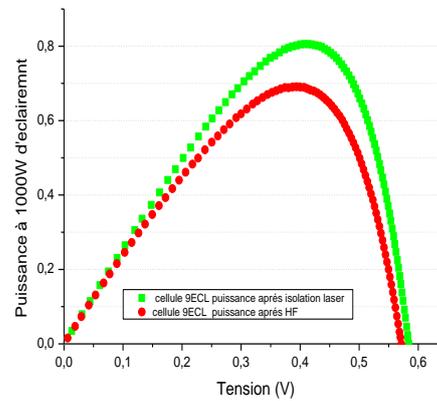
On déduit alors que le décapage HF apporte une nette amélioration du courant de court-circuit et de la puissance de la cellule et par voie de conséquence augmenter le rendement de la cellule

### 3.6.2. Effet de l'isolation des bords de la cellule (réduction des courants de fuite)

On utilisera la cellule Test 9ECL (multi cristalline), après décapage HF, puis après isolation (éclairage à  $1000\text{W}/\text{m}^2$ ) :



**Figure.3.24-(a)**  
Caractéristiques I-V pour la cellule Test 9ECL

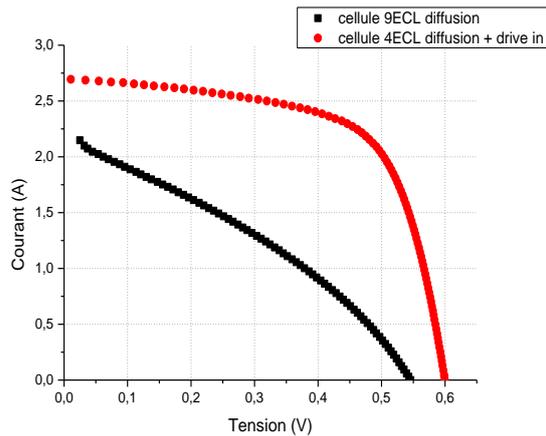


**Figure.2.24-(b)** Courbes de puissance pour la cellule Test 9ECL

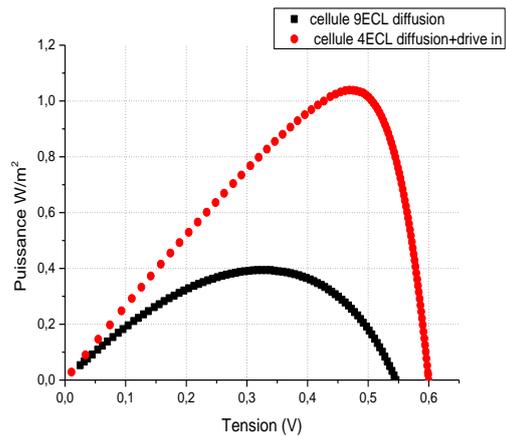
On déduit que l'isolation des bords de la cellule réduit les courants de fuite et apporte une amélioration du courant de court-circuit et de la puissance de la cellule

### 3.6.3. Effet du drive-in

On utilisera la cellule Test 4ECL multi cristalline, diffusion +Drive-in et Test 9ECL Cellule multi cristalline, diffusion (sous un à éclairage à  $1000\text{W}/\text{m}^2$ ) :



**Figure. 3.25-(a) :**  
caractéristiques I-V pour les  
cellules Test 4 et 9ECL



**Figure. 3.25-(b) :** courbes de  
puissance pour les cellules Test 4  
et 9ECL

La diffusion thermique est réalisée dans notre cas sous  $\text{PoCl}_3$ , il y a alors formation d'un verre de phosphore à la surface des substrats et diffusion dans le silicium d'atome de phosphore. L'étape de drive in (redistribution) consiste à oxyder le substrat sous oxygène après avoir préalablement retirer le verre de phosphore (PSG).

L'intérêt du drive in (redistribution) est d'augmenter la profondeur de la jonction et de diminuer la concentration surfacique de dopant, il entraine aussi une diminution de la résistivité de l'émetteur

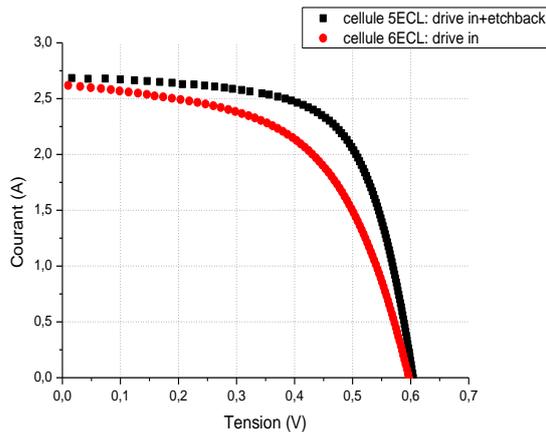
En effet après l'étape de diffusion, la concentration de phosphore en surface est très grande il en résulte que des atomes de dopant restent inactifs électriquement.

L'étape de redistribution ne modifie pas la quantité de dopants mais répartit ces derniers sur une plus grande profondeur. De ce fait, les atomes de phosphore issus des zones de sur concentration diffusent dans ce substrat et deviennent une zone morte électriquement inactifs. L'émetteur ainsi redistribué contient plus de dopant actifs et sa résistivité diminue.

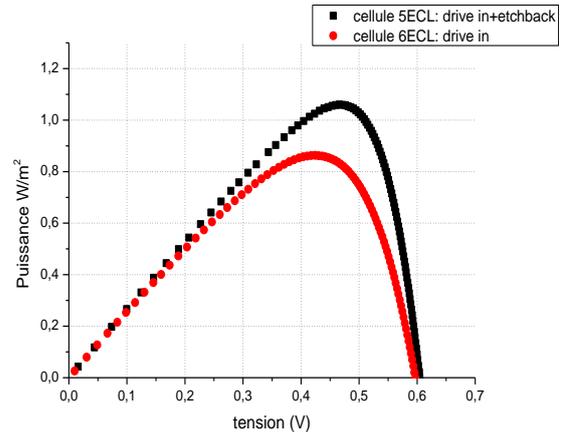
On remarque après drive in , qu'il y a amélioration de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , amélioration du courant de court circuit  $I_{cc}$  , amélioration de la puissance ainsi que du point de fonctionnement optimal de la cellule , Le drive-in contribue donc beaucoup à l'amélioration du rendement pour les cellules PV

### 3.6.4. Effet du etch back

On utilisera la cellule Test 6ECL multi cristalline, diffusion +Drive-in et Test 5ECL diffusion +Drive-in+ etch back (sous un à éclairement à  $1000\text{W}/\text{m}^2$ ) :



**Figure. 3.26-(a) :**  
caractéristiques I-V pour  
les cellules Test 5 et 6ECL  
Effet de l'etch back

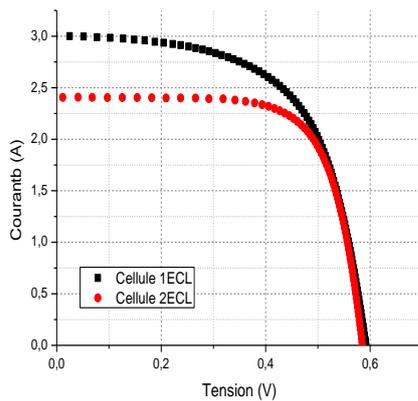


**Figure. 3.26-(b) :** courbes  
de puissance pour les  
cellules Test 5 et 6ECL  
Effet de l'etch back

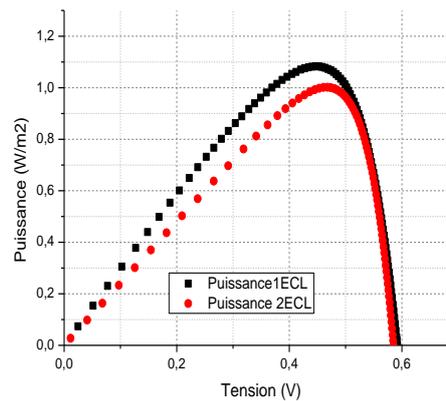
Le etch back qui est l'élimination de la zone morte permet d'améliorer davantage la caractéristique I-V et de puissance et donc le rendement de la cellule .

### 3.6.5. Effet de la couche antireflet

On utilisera la cellule Test 1ECL monocristalline avec couche antireflet et Test 2ECL monocristalline sans couche antireflet (sous un à éclairement à  $1000\text{W}/\text{m}^2$ )



**Figure.3.27-(a)**  
caractéristiques I-V pour  
les cellules Test 1 et 2ECL



**Figure.3.27-(b)** courbes  
de puissance pour les  
cellules Test 1 et 2ECL

La couche antireflet améliore nettement le courant de court-circuit ainsi que la puissance de la cellule et donc le point de fonctionnement optimal de la cellule.

### **3.7. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons caractérisé quelques cellules ; par des mesures sous simulateur solaire à différents éclaircissement, puis sous SUN-Vco , puis on a mesurer la réponse spectrale et le rendement quantique des cellules ; ensuite nous avons calculé les différents paramètres de ces cellules, telles que la résistance série , résistance parallèle , facteur d'idéalité, le courant de recombinaison et de fuite des deux diodes pour chacune des cellules proposées.

Enfin, nous avons discuté les résultats et mesures effectuées, et nous avons mis en évidence l'influence de la lumière et de la résistance série et parallèle sur la caractéristique I-V, et donc son influence sur les performances de la cellule PV, aussi on a amélioré leur rendement en apportant quelques modifications technologiques tels que le décapage HF, l'isolation des bords de la cellule, le etchback et la couche antireflet.

# Conclusion générale

# Conclusion générale

---

Dans notre travail nous avons pu mettre en évidence les différents paramètres influençant, de manière accrue sur les performances de la cellule PV qui sont : la résistance série qui englobe les différentes résistances (matériau de l'émetteur, les interfaces ainsi que les contacts avant et arrière) ; la résistance parallèle qui concerne le matériau ainsi que les bords de la cellule (les courants de fuites) , le rendement et le facteur forme de la cellule PV.

Physiquement le silicium multicristallin possède des imperfections citées dans ce mémoire ; la seule possibilité de le rendre performant est d'optimiser la technologie de la réalisation lors du processus de fabrication.

L'objectif était donc de réduire au maximum la résistance série et d'augmenter la résistance parallèle, afin d'optimiser ces cellules PV, et cela en agissant sur le process technologique sans que le cout de revient ne soit trop élevé (isolation de la jonction, décapage HF, drive in etch back, couche anti reflet).

On a pu augmenter le rendement, le facteur de forme, réduire la résistance série et, augmenter la résistance parallèle, en apportant des améliorations technologiques nécessaires tels que : le drive-in, le décapage HF, couche anti reflet, etchback et isolation des bords de la cellule afin de réduire au maximum les défauts engendrés par l'élaboration du silicium multicristallin, sans que le cout de revient ne soit trop élevé.

Au Final caractériser la cellule PV apporte les informations nécessaires afin de pouvoir agir et apporter les améliorations adéquates pour avoir des cellules PV performantes pouvant être utilisées dans les conditions les moins avantageuses.

Enfin nous espérons que ce travail sera une base de données fructueuse pour d'éventuels travaux avenir.

# Annexes

## Annexe 1 : L'Histoire du Photovoltaïque[36]

Le terme "**photovoltaïque**" a été formé avec les mots "photo" (lumière en Grec) et "Volta", le nom du physicien italien Alessandro Volta, qui inventa la pile électrochimique en 1800.

1817 : Le scientifique Jöns Jakob Berzelius découvre l'existence du *Selenium*.

1839 : L'effet photovoltaïque est découvert par le physicien français Antoine César Becquerel, observant l'apparition d'une tension électrique, produite par la lumière solaire, aux bornes d'une pile constituée par des électrodes cuivre et platine plongées dans une solution électrolytique acide.

1873 : L'ingénieur américain Willoughby Smith découvre les propriétés photo-sensibles du sélénium.

1877 : W.G. Adams et R.E. Day expliquent l'effet photovoltaïque du sélénium.

1883: Charles Fritts construit la première cellule en sélénium et or. Elle atteint un rendement d'environ 1%.  
Alt=Ernst\_Werner\_von\_Siemens

1885 : Ernst Werner von Siemens, ingénieur et industriel allemand, précise que la conductivité du sélénium est proportionnelle à la racine carrée de l'intensité de la lumière et imagine les possibilités de captage de l'énergie solaire.

1887 : Heinrich Rudolf Hertz, physicien allemand, publie les résultats de ses expériences photoélectriques dans un article intitulé "Sur un effet de la lumière ultraviolette sur les décharges électriques".

1902 : Philipp Lenard, physicien allemand, fait une série d'observations sur l'énergie cinétique des électrons et détermine que le seuil de l'effet photoélectrique dépend de la fréquence de la lumière incidente.

1905: Albert Einstein publie "Sur un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière". Cet article lui vaudra le prix Nobel de physique en 1922.

1918 : Le scientifique polonais Jan Czochralski développe un procédé pour créer du **silicium monocristallin**.

1939 : L'ingénieur américain Russel Ohl découvre la jonction P-N et développe la première cellule solaire en silicium.

1954 : Les chercheurs américains Gerald Pearson, Darryl Chapin et Calvin Fuller mettent au point une **cellule photovoltaïque** en silicium pour les laboratoires Bell.

1958 : Première utilisation spatiale de photopiles solaires dans le satellite américain Vanguard et équipement du satellite Sputnik III de cellules photovoltaïques.

1971 : Elliot Berman crée la société Solarpower pour développer des applications terrestres pour les **modules photovoltaïques**.

## Annexe 2 : Le SILICIUM [3]

Aujourd'hui, plus de 99 % des équipements électroniques utilisent le silicium comme matériau de base. Ce dernier se présente sous différentes formes ; les plus répandues étant le silicium monocristallin, et le silicium multi cristallin.

### 1. Extraction du silicium à partir de la silice :

Le silicium est un élément chimique de symbole Si.

Il n'existe pas à l'état pur dans la nature.

Le silicium (Si) est donc extrait de la silice (SiO<sub>2</sub>) grâce à la réaction chimique simplifiée suivante :

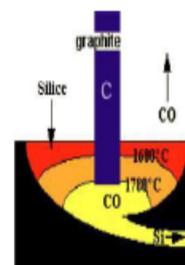


Cette réaction se réalise dans un

four à arc car elle nécessite la fonte de la

silice. La température du four peut atteindre 3 000 °C. La puissance du four peut aller jusqu'à 30 MW, afin d'enclencher les réactions chimiques.

En réalité, la réaction de réduction de la silice en silicium résulte d'un grand nombre de réactions chimiques intermédiaires. La puissance du four peut aller jusqu'à 30 MW, afin d'enclencher les réactions chimiques. Après cette opération, le silicium est obtenu sous forme liquide. Sa pureté est de 98 %.



### 2. Purification du silicium :

Il s'agit, en partant du silicium métallurgique, de faire une purification chimique. De nombreux procédés ont été développés par les différents producteurs mondiaux de silicium. Au final, le procédé de purification aboutit à l'obtention de lingots de silicium purifiés à 99.99%.



### 3. Obtention des lingots de silicium :

Une fois l'étape de purification terminée, vient l'étape de cristallisation du silicium liquide. Le produit issu de cette étape est un lingot de silicium à l'état solide. Il existe deux grandes méthodes de cristallisation. La première permet d'obtenir du silicium polycristallin (composé de plusieurs cristaux). La deuxième permet d'obtenir du silicium monocristallin (composé d'un seul cristal).

### • **Le silicium polycristallin :**

Le silicium liquide est mis dans un creuset en graphite.

La technique est simple et peu énergivore.

Le silicium polycristallin est obtenu par coulage en lingotière dans laquelle s'opère un refroidissement lent, de l'ordre de quelques dizaines d'heures. On obtient au final des lingots cubiques.

Le silicium polycristallin présente une couleur grise. Il est constitué d'une mosaïque de cristaux monocristallins de silicium, d'orientation et de tailles différentes.



### • **Le silicium monocristallin :**

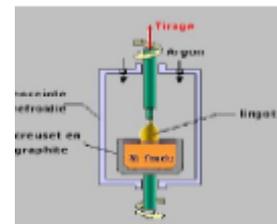
Une des méthodes pour fabriquer du silicium monocristallin est la méthode dite de Czochralski. Le silicium est placé dans un creuset de quartz et maintenu

liquide à l'aide d'éléments chauffants. Lorsque la surface est à la température limite de solidification, on y plonge un germe monocristallin. Le silicium se solidifie sur ce germe selon la même orientation cristallographique. On tire lentement le germe vers le haut, avec un mouvement de rotation, tout en contrôlant minutieusement la température et la vitesse. Le silicium monocristallin ainsi obtenu, sous

forme de lingots circulaires, est constitué d'un seul type de cristal et présente une couleur uniforme grise. Le silicium monocristallin, plus élaboré que le silicium polycristallin, L'équeutage consiste

à éliminer les extrémités du lingot soit mal cristallisées soit riches en impuretés. Les extrémités sont ensuite refondues pour le départ d'un nouveau cycle de production.

Lors du tirage, le diamètre du lingot varie légèrement ce qui constitue des ondulations à sa surface. Pour obtenir des plaquettes de même diamètre un polissage cylindrique est nécessaire. [2]



## **Annexe 3 : Vocabulaire** **des cellules photovoltaïques utilisé dans ce mémoire [37]**

**1. barrière de potentiel d'une cellule, *cell barrier***

Barrière de potentiel électrique très mince formée à l'interface d'une couche de type P et d'une couche de type N d'une cellule photovoltaïque

**NOTE 1** La barrière de potentiel est parfois nommée « zone de déplétion ».

**NOTE 2** Une barrière de potentiel électrique est une région de champ électrique élevé empêchant le passage d'une particule chargée électriquement dans une certaine direction dépendant du signe de cette charge.

**2. Cellule photovoltaïque, *photovoltaic cell***

dispositif photovoltaïque le plus élémentaire qui génère de l'énergie électrique (courant continu) par absorption de rayonnement lumineux

**NOTE** Les cellules sont assemblées mécaniquement et électriquement pour constituer un module photovoltaïque

**3. cellule photovoltaïque à jonction PN, *PN junction photovoltaic cell***

Cellule utilisant une jonction semi-conductrice de type PN

**4. cellule photovoltaïque au silicium, *silicon photovoltaic cell***

Cellule élaborée à partir de silicium comme principal matériau

**5. cellule photovoltaïque de référence, *photovoltaic reference cell***

Cellule spécialement étalonnée pour mesurer l'éclairement ou pour régler les niveaux d'éclairement d'un simulateur solaire par rapport à une répartition de référence de l'éclairement du spectre solaire

**6. conversion photovoltaïque, *photovoltaic conversion***

Transformation de l'énergie lumineuse en énergie électrique

**7. couche antireflet, *anti-reflective coating***

Couche mince de surface permettant de réduire les pertes liées à la réflexion de la lumière

**8. courant d'obscurité, *black current***

Courant rémanent dans un dispositif photovoltaïque, lorsque son éclairement est nul

**9. courant photovoltaïque, *photovoltaic current***

Courant continu généré par un dispositif photovoltaïque

**10. dopant (de cellule photovoltaïque), *dopant (in photovoltaic cells)***

Élément chimique introduit en très petite quantité dans un matériau semi-conducteur en vue d'en modifier les propriétés électroniques

**NOTE** Un dopant N ajoute des électrons à la structure du matériau initial (ex. : le phosphore dans le silicium),  
un dopant P crée des « trous » électroniques dans la structure du matériau initial (ex. : le bore dans le silicium).

**11. effet de champ en face arrière,**

**back-surface field effect**

Phénomène apparaissant lorsque les charges créées près de la face arrière de la cellule sont collectées par le champ électrique interne formé par une zone fortement dopée à proximité de l'électrode arrière

**12. effet de confinement de la lumière,**

**light-confinement effect**

Augmentation du courant de court-circuit dû au piégeage de la lumière incidente à l'intérieur des cellules obtenu par exemple par une texturation de la surface de ces cellules

**13. effet photovoltaïque,**

**photovoltaic effect**

Phénomène physique selon lequel l'absorption de l'énergie lumineuse produit une différence de potentiel électrique entre deux points d'un matériau, la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire est une application de l'effet photovoltaïque

**14. énergie de bande interdite,**

**energy gap**

La plus petite différence d'énergie entre deux bandes autorisées séparées par une bande interdite

**15. grille de collecte,**

**grid line**

Réseau de fines lignes de métallisation destiné à collecter le courant électrique à la surface d'une cellule photovoltaïque

**NOTE** Les conducteurs d'interconnexion sont connectés au collecteur principal par soudure ou brasure.

**16. jonction de cellule,**

**cell junction**

Jonction entre le semi-conducteur de type P et le semi-conducteur de type N de la cellule photovoltaïque

**17. largeur de bande interdite,**

**band gap energy**

Quantité d'énergie nécessaire pour faire passer un électron d'un état de valence à un état d'électron libre

**18. ligne de collecte,**

**bus bar**

Bande de métallisation servant à collecter le courant électrique circulant dans la grille de collecte pour le transmettre aux conducteurs de liaison inter-cellules

**NOTE** Les conducteurs d'interconnexion sont connectés au collecteur principal par soudure ou brasure.

**19. ligne de métallisation,**

**metallization line**

Conducteur déposé en ligne sur la face avant ou arrière d'une cellule photovoltaïque, destiné à collecter le courant électrique produit dans la cellule

**NOTE** La ligne de métallisation peut être obtenue par procédé de sérigraphie, de dépôt en phase vapeur, etc

## **20. procédé de Czochralski,**

## **Czochralski process**

Méthode d'élaboration d'un monocristal de grande taille consistant à faire croître (avec un refroidissement parfaitement contrôlé) un germe de cristal en rotation à partir d'un bain de silicium fondu tournant en sens inverse

*abréviation : procédé CZ*

**NOTE** Le procédé de Czochralski permet d'obtenir un lingot cylindrique qui peut ensuite être débité en plaques de forme circulaire ou carrée à coins arrondis.

## **21. rendement de conversion,**

## **conversion efficiency**

Rapport entre la puissance électrique délivrée aux bornes du dispositif photovoltaïque et la puissance lumineuse incidente mesurée dans les conditions normales d'essais unité sans dimension ; valeur exprimée en %

## **22. silicium monocristallin,**

## **single crystalline silicon**

Silicium caractérisé par un arrangement parfait d'atomes selon une structure atomique ordonnée ne formant qu'un seul cristal

**NOTE** Matériau élaboré le plus couramment par procédé CZ

## **23. silicium multicristallin,**

## **multicrystalline silicon**

Silicium solidifié en formant une juxtaposition de gros cristaux monocristallins (appelés cristallites) de dimensions allant du mm au cm

**NOTE 1** La disposition des cristallites est désordonnée ; dans chaque cristallite, les atomes sont disposés symétriquement.

**NOTE 2** Matériau élaboré le plus couramment par solidification directionnelle d'un lingot ou étirage en ruban

## **24. silicium polycristallin,**

## **polycrystalline silicon**

Silicium déposé en couche sur un substrat sous une épaisseur de l'ordre de 10  $\mu\text{m}$  à 30  $\mu\text{m}$ , avec une taille de grain allant du  $\mu\text{m}$  au mm

**NOTE 1** Le silicium polycristallin est appelé aussi silicium en couche mince pc-Si.

**NOTE 2** « silicium polycristallin » est aussi un terme utilisé pour désigner le matériau déposé au cours du procédé chimique d'élaboration du silicium ultra-pur.

## **25. surface texturée,**

## **textured surface**

irrégularités réalisées sur la face avant ou arrière d'une cellule pour augmenter l'absorption de la lumière en réduisant les pertes par réflexion et provoquant un effet de confinement de la lumière

## **26. zone de diffusion,**

## **diffusion layer**

Partie du matériau semi-conducteur contenant un dopant

# **Bibliographie**

## Bibliographie

---

- [1] K. Kassmi et M. Hamdaoui et F. Olivié, article : « Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique » , université de Maroc , revue des énergies renouvelables
- [2] **A. T.SINGO** « *Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome* » Thèse de doctorats, université Henri Poincaré, Nancy-I,2010
- [3] **P.PAPET**,: « *Nouveaux concepts pour la réalisation de cellules photovoltaïques à contacts interdigital sur substrat minces en silicium cristallin* », mémoire de doctorat , Institut national des sciences appliquées de Lyon, France, 2007
- [4] <http://www.elysun.fr/elysun-histoire-energies.html>
- [5].**Yezid Ali** ; « *Optimisation des cellules solaires conventionnelles à base de silicium de type N* », mémoire magister ,Energies renouvelables ; Tlemcen,2011
- [6] **Julien DUPUIS**. « *Elaboration et caractérisation de couches de SiOxNy :H et SiNx :H réalisées par méthode PECVD : application à la face arrière des cellules photovoltaïques en silicium.* » 2009-ISAL-0085 , thèse de doctorat, 2009.
- [7] Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07
- [8] Jimmy Royer, Tomas Djiako, Eric Schiler, Bacar Sadasy, article, «*Le pompage photovoltaïque*». Université d'Ottawa (1998)
- [9] **W. BENSACI** , « *Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT* », mémoire de Master en Génie électrique ,spécialité : Electrotechnique Industriel, université de Batna, Algérie, 2012
- [10] A. Wagner, 'Peak-Power And Internal Series Resistance Measurement under Natural Ambient Conditions', EuroSun Conference, 2000 Copenhagen, June 19-22, 2000.
- [11] Formation sur les Systèmes Photovoltaïques, FNEBTP / CSNER « *formation 2011 : installation & maintenance des systèmes PV* », Chambre syndicale nationale des énergies renouvelables ,NT CONSULTING

[12] **Nichiporuk Oleksiy** « *Simulation, fabrication et analyse des cellules photovoltaïque à contacts arrières inter digités* », thèse de doctorat, institue nationale des sciences appliquées de Lyon ,France, 2005

[13] Sze.S.M.Semiconductor Devices. New York : John Wiley ,1981,p 867

[14]**W. Rauschenbach** : *Advanced Energy conversion* ,vol3 Pergamon Press,1963 ; source : Marc Orgeret ,*Les piles solaires :le composant et ses applications* ,Toulouse 1984

[15]<http://uuu.enseirb.fr/~dondon/devdurable/TPpilecombustible/TPpileacombustible.htm>

[16] **F.ZOUACHE** « *Etude de la concentration solaire sur les Performances des systèmes Photovoltaïque* » ,Mémoire de magistère en Electronique, Constantine, Algérie,2009

[17] **Techniques de l'ingénieur**, l'expertise technique et scientifique de référence, d3935, Conversion photovoltaïque, du rayonnement solaire à la cellule, France,2008

[18]<http://www.abtarchi.com/maison.php?modele=AGENCE&sub=ENVIRONNEMENT&type=SOLEAIRE%20PHOTOVOLTA%C3%8FQUE>

[19] **R.RADBEH**, « *Réalisation et caractérisation de cellules solaires organiques à couches composites polymères incluant des nanotubes de carbones* »mémoire de doctorat en électronique des Hautes Fréquences et Optoélectronique, Limoges ,France,2008

[20] **L.REMACHE**, « *Silicium poreux passivé par des nitrures et des oxydes de silicium. Application aux revêtements anti réfléchissants* »,mémoire de doctorat, Constantine ,2011

[21] **D. KRAY, S. HOPMAN, A. SPIEGEL, B. RICHERZHAGEN ZHAGEN**, *Energy Mater. Sol. Cells* ,vol. 91, USA, 2007.

[22] Mohammed Bakri , article : Les fiches techniques PRISME, (Programme International de Soutien à la Maîtrise de l'Énergie) ,n3, Rédaction:, Centre de Développement des Énergies Renouvelables, Maroc

[23]**B.THUILLIER**, « *Caractérisation structurale des contacts Ohmiques réalisées a partir d'encre métalliques sur cellules photovoltaïques en silicium multi cristallin* », thèse de doctorat, Lyon ;France,2001

[24] **Bassirou Ba**, « *Contribution a l'étude des phénomènes de recombinaison dans une cellule solaire au silicium poly cristallin par un modèle a trois dimensions* », mémoire de doctorat, université , Dakar,1998

[25] N. Benaouda, R. Aiouaz et M. Abersi , article « *Réponses spectrales et des caractéristiques I - V des cellules solaires au silicium* », Laboratoire de Thermique, Centre de Développement des Energies Renouvelables ,Bouzaréah, Algérie ;2007

[26] C.Honsberg and S.Bowden;article : “*Photovoltaics :Devices,Systems and Applications [CDROM]*” , Sydney,Australia , University of South wales , 1998.

[27]<http://www.photovoltaique.guidenr.fr/cours-photovoltaique-2011>

[28] **Marir-Benabbas M** : « *Etude du problème de « HOT SPOT » dans un module solaire photovoltaique* » Thèse de magistère .Constantine. 1984

[30] S.Bowden and A.Rohatgi , article “*Rapid and Accurate Determination of Series Resistance and Fill Factor Losses in Industrial Silicon Solar Cells*” , School of Electrical and Computer Engineering ,Georgia Institute of Technology, Atlanta GA 30332-0250 USA

[31] H.Saleem and ShreepadKarmalkar : article “*An Analytical Method to Extract the Physical Parameters of a Solar Cell From Four Points on the Illuminated J-V Curve* “ IEEE Electron Device Letters , vol 30,NO.4; 2009

[32]- **Dr. Alan Doolittle**, P-N Junction Diodes Quantitative Analysis (Math, math and more math), Georgia ,Tech ECE 4833

[33] R. Khezzar, M. Zereg et A. Khezzar, article « *Comparaison entre les différents modèles électriques et détermination des paramètres de la caractéristique I-V d'un module photovoltaique* », Université Batna et Canstantine, Algérie , 2010

[34] **Jean-François LELIEVRE**. « *Elaboration de SiNx :H par PECVD : optimisation des propriétés optiques, passivantes et structurales pour applications photovoltaiques*. These de doctorat. INSA de Lyon. 2007.

[35] <https://www.google.dz/search?q=caract%C3%A9ristiques+d'une+cellule+solaire>

[36] <http://www.bati-solar.fr/histoire-du-photovoltaique.html>

[37] Vocabulaire des systèmes de conversion photovoltaique de l'énergie solaire ; Agence de l'environnement et de la maitrise de l'énergie , édition 2 : 2011