

**Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf -Mila**  
**Institut des Sciences et de Technologie**  
**Département de Sciences et Technologie**



N°Ref :.....

**Projet de Fin d'Etude préparé En vue de l'obtention du**  
**diplôme de MASTER**  
**Spécialité : Electromécanique**

**Modélisation de la cellule photovoltaïque**  
**bifaciale**

**Réalisé par :**  
**-Yahia Cherif Khaled**

**Soutenu devant le jury :**

**Mme Benenia Meriem**  
**Mme Medjani Farida**  
**Mme Bouchekouf Seloua**

**Président**  
**Examineur**  
**Promoteur**

**Année universitaire : 2019/2020**

"وَمَا أُوتِيتُمْ مِّنَ الْعِلْمِ إِلَّا قَلِيلًا"

الإسراء الآية (85)

# *Remerciements*

*Mes remerciements vont en premier à ALLAH le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a données durant toutes ces longues années d'études.*

*A mon encadreur **Mme. BOUCHEKOUF Seloua**, pour leurs orientations, leurs précieuses aides et leur suivi permanent durant toute la période du projet.*

*je tiens à remercier particulièrement **Mme BENENIA Meriem**, Maître de conférence classe B au centre universitaire BOSSOUF Abdelhafid de Mila, pour l'honneur qu'elle nous fait en présidant le jury de ce Mémoire.*

*Je remercie particulièrement **Mme MEDJANI Farida**, Maître de conférence classe A au centre universitaire BOSSOUF Abdelhafid de Mila, pour l'intérêt qu'elle a porté à ce travail et pour avoir accepté d'être examinateur de ce Mémoire.*

*A tous mes enseignants de l'institut des sciences et de la technologie.*

*Ma profonde reconnaissance également a ma famille, pour son soutien indéfectible.*

*Je tiens à remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer mon travail.*

*Je tiens à remercier tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.*

## *Dédicaces*

*Ce travail je le dédie à mes très chers parents  
que Dieu les protège.*

*À mes chers frères « Hichem et Nour-limen ».*

*À tous mes amis sans exception.*

*Egalement à toute ma grande famille  
YAHIA CHERIF.*

# *Sommaire*

Introduction générale

## Chapitre I : NOTIONS DE BASE ET PRESENTATION DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

1. Introduction.....	4
2. Le spectre solaire .....	4
3. La masse d'air .....	5
4. Rayonnement solaire .....	6
4.1. Le rayonnement direct .....	6
4.2. Le rayonnement diffusé .....	6
4.3. Le rayonnement solaire réfléchi .....	7
4.4. Le rayonnement globale .....	7
5. Le principe de L'effet photovoltaïque.....	7
5.1.Histoire de cellules solaires.....	7
5.2.L'effet photovoltaïque .....	7
5.3.Absorption du rayonnement dans le matériau (Propriétés optiques des semi-conducteurs.....	8
6. La structure de la cellule solaire .....	9
6.1.L'émetteur et le base.....	10
6.2. Les contacts.....	10
6.3. La fenêtre .....	10
6.4. Couche anti relet .....	10
7. Amélioration du rendement .....	11
7.1.Effet du confinement optique .....	12
7.2.Effet de passivation.....	12
7.3.Effet d'un champ avant ou arrière .....	12
8. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque .....	13
9. Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque .....	14
9.1.Le courant de court-circuit .....	16
9.2.La tension de circuit ouvert, $V_{CO}$ .....	16
9.3.La réponse spectrale, $SR(\lambda)$ .....	16

9.4. La puissance maximale, $P_m$ .....	16
9.5. Le facteur de forme, FF.....	16
9.6. Le rendement de conversion .....	17
10. Les différentes filières photovoltaïques .....	17
11. Conclusion .....	18

## Chapitre II : MODELISATION DE LA CELLULE SOLAIRE BIFACIALE

1. Introduction .....	22
2. Théorie du BSF.....	22
3. Structure et principe de fonctionnement de la cellule solaire bifaciale BSF.....	23
3.1. Structure de la cellule solaire bifaciale BSF .....	23
3.2. Principe de fonction de la cellule solaire bifaciale BSF.....	24
4. Caractéristique électrique de la cellule solaire bifaciale BSF .....	25
4.1. Le courant de court-circuit.....	25
4.2. La tension de circuit ouvert.....	25
4.3. Le facteur de forme FF .....	26
4.4. Le rendement de conversion de l'énergie.....	26
4.5. La puissance délivrée par la cellule bifaciale.....	27
5. La réflexion par Albédo .....	27
6. Modélisation électrique de la cellule solaire bifaciale BSF éclairée par face avant	28
6.1. Eclairement, puissance incidente et flux solaire au sol .....	28
6.2. Le coefficient d'absorption $\alpha$ .....	29
6.3. Génération.....	30
6.4. Calcul de la densité de photo courant, $J_{ph}(\lambda)$ .....	30
6.4.1. Le photo courant dans la première zone neutre N (l'émetteur).....	31
6.4.2. Le photo courant dans la deuxième zone neutre P (la base) .....	32
6.4.3. Le photo courant dans la région de charge d'espace ZCE .....	35
6.4.4. Le photo courant dans la région fortement dopée $P^+$ .....	35
6.5. La vitesse de recombinaison effective à la face arrière.....	35
7. Conclusion.....	36

**Chapitre III : RESULTATS DE LA MODELISATION ET DISCUSSIONS**

1. Introduction .....	40
2. Aperçu sur la cellule solaire en couche mince Cbs/Cigs .....	40
2.1 Description générale des cellules solaires a base du CIGS .....	41
2.2. La cellule solaire bifaciale a base du CIGS.....	42
3. Simulation de la caractéristique de la cellule Cds/CIGS conventionnelle .....	43
3.1 Présentation des caractéristiques I(V) et P(V).....	48
4. Simulation des caractéristiques de la cellule CdS/CIGS bifaciale.....	50
4.1 Présentation du photo-courant.....	50
4.2 Présentation des caractéristiques I(V) et P(V).....	51
5. Etude comparative entre la cellule solaire CdS/CIGS conventionnelle et bifaciale.....	52
6. Influence des différents paramètres sur les caractéristiques de la cellule solaire bifaciale.....	53
6.1 Influence des paramètres de l'émetteur.....	53
6.1.1 L'influence de $X_j$ (l'épaisseur de l'émetteur).....	53
6.1.2 L'influence de $N_d$ (dopage de l'épaisseur de l'émetteur) .....	54
6.2 L'Influence de l'épaisseur de la base.....	55
6.3 Conclusion de cette étape.....	55
7. Conclusion .....	56

Conclusion générale

Bibliographie

Annexe

Résumé en Trois langues

## Liste des figures :

<b>Figure (I-1):</b> La répartition du spectre des ondes électromagnétiques.....	4
<b>Figure (I-2):</b> Spectre AM0, AM1 ET AM1, 5.....	6
<b>Figure. (I.3):</b> Composante du rayonnement global sur un plan horizontal.....	7
<b>Figure (I -4):</b> Création du courant électrique sous l'effet de la lumière .....	8
<b>Figure (I-5):</b> Profondeur de pénétration et coefficient d'absorption de quelques semi-conducteurs à 300 K en fonction de la longueur d'onde .....	9
<b>Figure (I-6) :</b> La structure fondamentale d'une cellule solaire.....	12
<b>Figure (I-7) :</b> Structure d'une cellule photovoltaïque.....	13
<b>Figure (I.8) :</b> principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	14
<b>Figure (I.9) :</b> circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	17
<b>Figure (I.10) :</b> La courbe type de la caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque.....	18
<b>Figure (I.11) :</b> Les différents types des cellules solaires.....	19
<b>Figure (II -1) :</b> Cellule solaire a champ BSF.....	22
<b>Figure (II -2) :</b> Diagramme de bandes d'une cellule solaire à BSF.....	23
<b>Figure (II -3) :</b> Représentation schématique de la structure d'une cellule solaire BSF.....	24
<b>Figure (II -4) :</b> le circuit électrique équivalent de la cellule solaire bifaciale.....	25
<b>Figure (II -5) :</b> Représentation schématique du principe de la réflexion par albédo.....	29
<b>Figure (II -6) :</b> Représentation schématique du modèle à une dimension de la cellule solaire bifaciale BSF.....	29
<b>Figure (II -7) :</b> Approximation de l'éclairement solaire au sol.....	30
<b>Figure (III -1) :</b> Structure de la cellule solaire à base CIGS .....	41
<b>Figure (III -2) :</b> Cellule solaire (a) semi-transparente et (b) bifaciale à base de CIGS ...	42

## Liste des tableaux

<b>Tableau (I-1) : Longueur d'onde de quelques semi-conducteurs utilisés en fonction de la couleur de la lumière.....</b>	<b>5</b>
<b>Tableau (I-2) : L'indice de réfraction de quelques matériaux.....</b>	<b>12</b>
<b>Tableau (III.1) : Les paramètres de la cellule CdS/CIGS utilisées durant la simulation .....</b>	<b>43</b>
<b>Tableau (III.2).Caractéristiques de sortie de notre simulation de la cellule PV a base Du CIGS.....</b>	<b>49</b>
<b>Tableau (III.3) Résultats des caractéristiques de sortie publier par NREL(National Renewable Energy Laboratory From The USA Department Of Energy) .....</b>	<b>50</b>
<b>Tableau (III.4).Caractéristiques de sortie de la cellule CdS/CIGS bifaciale.....</b>	<b>52</b>
<b>Tableau (III.5) : Résultats de comparaisons entre la cellule conventionnelle et cellule bifaciale .....</b>	<b>53</b>
<b>Tableau (III.6): Résultats de l'influence de l'épaisseur de l'émetteur (<math>X_j</math>) sur les caractéristiques de la cellule solaire bifaciale.....</b>	<b>54</b>
<b>Tableau (III.7): Résultats de l'influence de dopage de l'émetteur (<math>N_d</math>) sur les caractéristiques de la cellule solaire bifaciale.....</b>	<b>55</b>
<b>Tableau (III.8): Résultats de l'influence de l'épaisseur de la base (<math>W_b</math>) sur les caractéristiques de la cellule solaire bifaciale.....</b>	<b>55</b>

## Nomenclature

- CIGS: Le quaternaire  $\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})\text{Se}_2$
- CdS: Le sulfure de cadmium
- $h$  : La constante de Planck.
- $\lambda$  : La longueur d'onde.
- $c$  : La vitesse de la lumière.
- $n$ : le coefficient d'idéalité de la diode.
- $v_d$ : Tension aux bornes de la jonction (Volt).
- $q$ : Charge élémentaire ( $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ ).
- $k$ : Constante de Boltzmann ( $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{J.K}^{-1}$ ).
- $T$ : La Température (K).
- $I_0$ : Courant de saturation de la diode.
- $I_{cc}$ : Le courant de court-circuit.
- $V_{oc}$ : La tension en circuit ouvert.
- $FF$  : Le facteur de forme.
- $\eta$ : Le rendement de conversion d'énergie.
- $L_n$ : Longueur de diffusion des électrons (m).
- $L_p$ : Longueur de diffusion des trous (m).
- $V_M$ : Tension correspondant à la puissance maximale fournie par la cellule.
- $I_M$  : Courant correspondant à la puissance maximale fournie par la cellule.
- $P_M$ : La puissance maximale fournie par la cellule.
- $P_0$ : La puissance du rayonnement solaire incident.
- $R_s$ : La résistance série (ohm).
- $R_{sh}$ : La résistance parallèle (ohm).
- $J_n$ : Le courant photo-généré dans l'émetteur.
- $J_p$ : Le courant photo-généré dans la base pour la cellule simple.
- $J_d$ : le courant photo-généré dans la zone de charge d'espace.
- BSF : Le champ électrique arrière (de l'anglais Back Surface Field).
- $S_{eff}$ : La vitesse de recombinaison effective (m/s).
- $S_n$ : La vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires à la face arrière (m/s).
- $L_{bsf}$ : La longueur de diffusion des porteurs minoritaires dans la région fortement dopée (du BSF) (m).

- $D_{bsf}$ : coefficient de diffusion, des porteurs minoritaires dans la région
  - du BSF.
- $W_{bsf}$ : Epaisseur de la région fortement dopée ( $m$ ).
- $\Delta\phi$ : Barrière de potentielle entre la base et la région fortement dopée (volt).
- $N_{bsf}$ : concentration des porteurs dans la région du BSF ( $m^{-3}$ ).
- $N_a$ : concentration de trous dans la base ( $m^{-3}$ ).
- $N_{p+}$ : concentration de trous dans la région du BSF ( $m^{-3}$ ).
- $N_p$ : concentration des porteurs majoritaires dans la base ( $mm^{-3}$ ).
- $n_i$ : concentration intrinsèque dans la base ( $m^{-3}$ ).
- $n_{i+}$ : concentration intrinsèque dans la zone fortement dopée ( $m^{-3}$ ).
- $J_{p,bsf}$ : Le courant photo-généré dans la base pour la cellule BSF.
- $G_n$ : Le taux de génération des paires électron-trou à une distance  $x$  de la surface.
- $\alpha$ : Le coefficient d'absorption de la lumière dans le semiconducteur.
- $R$ : Le coefficient de réflexion sur la surface du semiconducteur.
- $\tau_n$ : Durées de vie d'électrons ( $s$ ).
- $n_p$ : densité des porteurs minoritaires dans la base ( $m^{-3}$ ).
- $n_{p0}$ : densité des porteurs minoritaires dans la base à l'équilibre ( $m^{-3}$ ).
- $E$ : le champ électrique interne.
- $\mu_n$ : Mobilité des électrons ( $m^2/V.s$ ).
- $D_n$ : Coefficient de diffusion des électrons ( $cm^2/s$ ).
- $L_n$ : longueur de diffusion d'électrons ( $m$ ).
- $W$ : la largeur de la zone de déplétion ( $m$ ).
- $W_{bsf}$ : la largeur de la région fortement dopée ( $m$ ).
- $H$ : l'épaisseur totale de la cellule ( $m$ ).
- $x_j$ : l'épaisseur de l'émetteur ( $m$ ).
- $H'$ : La partie neutre de la région de la base ( $m$ ).
- $\mu_p$ : Mobilité des trous ( $m^2/V.s$ ).
- $D_p$ : Coefficient de diffusion des trous ( $cm^2/s$ ).
- $p_{n0}$ : densité des porteurs minoritaires (trous) dans l'émetteur à l'équilibre ( $m^{-3}$ ).
- $p_n$ : densité des porteurs minoritaires dans l'émetteur ( $m^{-3}$ ).
- $\tau_p$ : la durée de vie des trous ( $s$ ).
- $D_p$ : Coefficient de diffusion des trous ( $m^2/V.s$ ).
- $L_p$ : longueur de diffusion des trous ( $m$ ).

- $S_p$ : La vitesse de recombinaison des trous à la face avant ( $m/s$ ).
- $N_a$ : concentration d'accepteurs dans la région P ( $m^{-3}$ ).
- $n_p$ : la concentration d'électrons dans la région P ( $m^{-3}$ ).
- $A$ : la surface photo-active de la cellule solaire ( $m$ ).
- $Z$ : zone de charge d'espace.
- EQE : le rendement quantique externe.
- $n$  : facteur d'idéalité de la diode.
- EQI : le rendement quantique interne.

### Introduction générale

Les cellules photovoltaïques (PV) ouvrent la possibilité de produire de l'électricité directement à partir du rayonnement solaire, sans nécessiter ni pièces mobiles, ni production de chaleur et sans entraîner de pollution atmosphérique, locale ou globale. L'évolution technologique a été importante depuis les premières photopiles qui en raison de leur coût très élevé et de leur faible rendement, étaient principalement destinées à des applications très spécifiques telles que l'alimentation énergétique des satellites.

La diffusion des cellules PV s'étend aujourd'hui au-delà des marchés niches initiaux sur des applications spécifiques, en particulier, les télécommunications dans les pays industrialisés ou l'électrification des populations rurales isolées, dans les pays en développement. Son développement est une réponse nécessaire aux questions énergétiques actuelles. Par contre, elle est limitée par son coût élevé et son rendement relativement faible. Réduire les coûts et augmenter les performances, est l'objectif principal pour rendre le solaire photovoltaïque compétitif.

En 1977, deux groupes de recherche en Mexique et en Espagne ont présenté pour la première fois des travaux, à la première conférence européenne de l'énergie solaire photovoltaïque, sur les piles solaire bifaciales. A cette époque, ces dispositifs expérimentaux présentaient une efficacité de 7%.

Les cellules solaires bifaciales sont classées en trois types selon le nombre de jonctions qui forment ses structures:

- cellule solaire bifaciale à double jonction p/n.
- cellule solaire bifaciale à une seule jonction p/n et une passivation diélectrique.
- cellules solaires bifaciale BSF (back surface Field) à une hétérojonction p/n et une homojonction p /p+ ou n/n+. La première cellule BSF était en réalité une cellule bifaciale qui à été brevetée en Russie en 1970 puis en Allemagne et aux USA en 1975. A cette époque, on a publié les premiers résultats expérimentaux avec l'explication théorique du rôle du BSF.

Dans les années 1980-1984 les cellules BSF étaient utilisées pour des applications spatiales par « SOLAREX » et « AEG-ELEFUNKEN » respectivement.

Actuellement, de nombreuses innovations ont été préconisées par les chercheurs pour trouver la structure optimale de la cellule solaire : c'est-à-dire sous les

conditions climatiques du site, trouver le meilleur rendement avec un pris minimum. Ceci explique et justifie les recherches intenses concernant la mise en œuvre des programmes numériques de conception, de modélisation et de simulation. Notre objectif principal, dans ce travail est de faire la modélisation des cellules solaires. Notre programme (sous MATLAB) est conçu pour prévoir le comportement de deux types de photopiles: la cellule solaire conventionnelle et la cellule solaire BSF(champ électrique arrière, de l'anglais Back Surface Field). Nous avons pris comme exemple d'application la structure en couches minces CdS/CIGS.

Ce manuscrit est constitué de trois chapitres :

**Le premier chapitre** a pour objectif de: présenter les notions de base pour l'énergie solaire, se familiariser avec le système photovoltaïque, rayonnement solaire, principe de l'effet photovoltaïque, la structure de cellule solaire, l'amélioration du rendement, principe de fonctionnement d'une cellule solaire, modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque, les différents filières photovoltaïque.

**Le deuxième chapitre** est consacré pour la modélisation de la cellule solaire, avec le présentation de la théorie BSF, structure et principe de fonctionnement de la cellule solaire BSF, caractéristique électrique de la cellule solaire bifaciale BSF, la réflexion par Albédo, modélisation électrique de la cellule solaire bifaciale BSF éclairé par face avant.

Dans **le troisième chapitre** nous allons présenter les résultats obtenus, par la simulation de notre model physique pour la cellule solaire bifaciale et conventionnelle, appliqué sur la cellule CdS/CIGS.nos résultats sont validés par d'autres résultats expérimentaux.

Et finalement une conclusion générale récapitulera l'essentiel de ce travail.



---

# **PHOTOVOLTAÏQUE**

---

**1.1 Introduction**

La modélisation et la simulation des cellules solaires exigent une étude de différents constituants de base de la cellule telle que les contacts, la couche antireflet, la texturation et le BSF (Back Surface Field). Le principe de l'effet PV et le spectre utilisé est très important pour une bonne modélisation de la cellule. Dans ce chapitre, on va entamer le rôle de chaque constituant dans la création du courant électrique.

**1.2 Le spectre solaire**

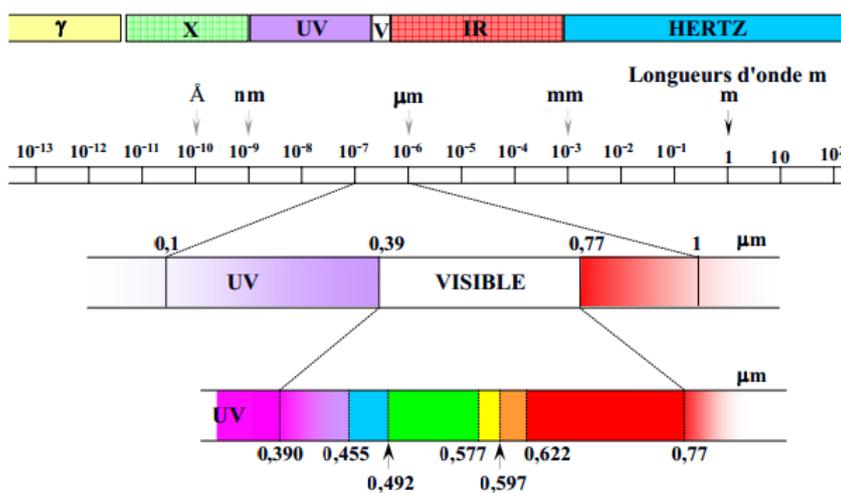
Le soleil est une source principale de la lumière qui représente une onde électromagnétique qui se propage dans le vide avec une vitesse de  $c \approx 3.10^8 \text{ m/s}$ . Ces ondes électromagnétiques sont composées essentiellement de trois parties: le visible, l'infrarouge et l'ultraviolet. Nommée le spectre solaire [1].

Le spectre électromagnétique peut être décrit en utilisant la théorie ondulatoire et la théorie des corpusculaire. La théorie ondulatoire décrit l'énergie en termes de longueur d'onde et de fréquence; par contre, le processus d'effet photoélectrique dans les cellules solaires est utilisé pour décrire l'aspect corpusculaire. L'énergie de photon est donnée par  $E = h \cdot \nu$  [1] :

$\nu$  = fréquence de l'onde électromagnétique (Hz)

$h$  = constante de Planck,  $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ eV.s}$

La figure suivante montre la partie visible du spectre électromagnétique. Les longueurs d'ondes visibles s'étendent de 390 nm (violet) à 780 nm (rouge) [2][3].



**Figure (I-1):** La répartition du spectre des ondes électromagnétiques [4].

Pour que les cellules solaires donnent un rendement idéal, il faut que les matériaux semi-conducteurs doivent absorber une grande partie des longueurs d'ondes du spectre AM1.5.

Le tableau ci-dessous représente l'absorption de certains matériaux semi-conducteurs à 300 K[5].

**Tableau (I-1):** Longueur d'onde de quelques semi-conducteurs utilisés en fonction de la couleur de la lumière.

Zone du spectre électromagnétique	Longueur d'onde (nm)	Semi-conducteur
Infrarouge	$\lambda > 780$	(AlGaAs), (GaAs)
Rouge	$610 < \lambda < 780$	(AlGaAs)
Orange	$590 < \lambda < 610$	(AlGaInP)
Jaune	$570 < \lambda < 590$	(AlGaInP)
Vert	$500 < \lambda < 570$	(InGaN), (AlGaInP)
Bleu	$450 < \lambda < 500$	(InGaN)
Violet	$380 < \lambda < 450$	(InGaN)
Ultraviolet	$\lambda < 380$	(AlGaN)

### 1.3 La massed'air

La puissance de l'énergie reçue par la terre est de 1.4 kW/m<sup>2</sup>.

44% de cette énergie se trouve dans la bande des infrarouges, tandis que 9% est dans la région des ultraviolets et 47% d'énergie se trouve dans la bande de visible. Seulement cette dernière énergie (visible) est transformée en électricité [3] [6][7].

La valeur du spectre dépend principalement des conditions climatiques. Pour mieux étudier et comparer entre la performance des cellules solaires, il faut connaître les différents spectres solaires : la masse atmosphérique (ou la masse d'air).

Il existe trois types de masse d'air [6]:

**AM0** : Hors atmosphère dont la puissance est  $P \approx 1.36 \text{ kW.m}^{-2}$

**AM1** : Le soleil est à la position verticale.

**AM1.5G** : le soleil se trouve à 45°. Dont la puissance  $P \approx 1 \text{ kW.m}^{-2}$

Les différentes masses d'air sont approuvées par l'Organisation Internationale de Standardisation et la Société Américaine de Test et Matériaux sont illustrés ci-dessous:

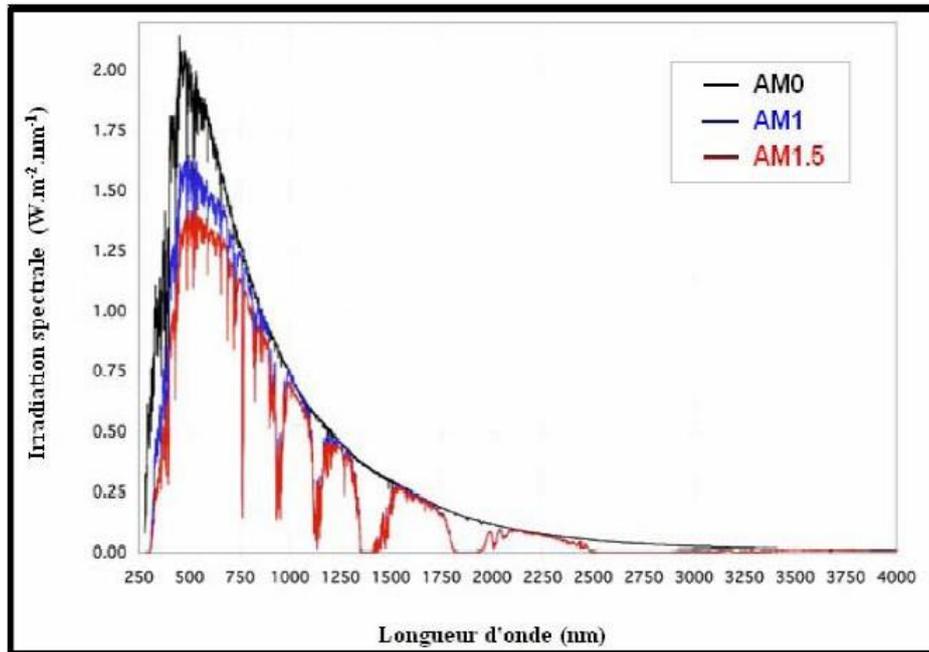


Figure (I-2): Spectre AM0, AM1 ET AM1, 5 [3].

## 1.4 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est la matière première de l'énergie solaire. C'est une propagation d'une onde de longueur qui varie entre 0.2 et  $4.10^{-6}\text{m}$ . Sans la nécessité d'un support physique pour se déplacer, il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité, à cause d'une partie de l'ultraviolet, qui s'absorbe

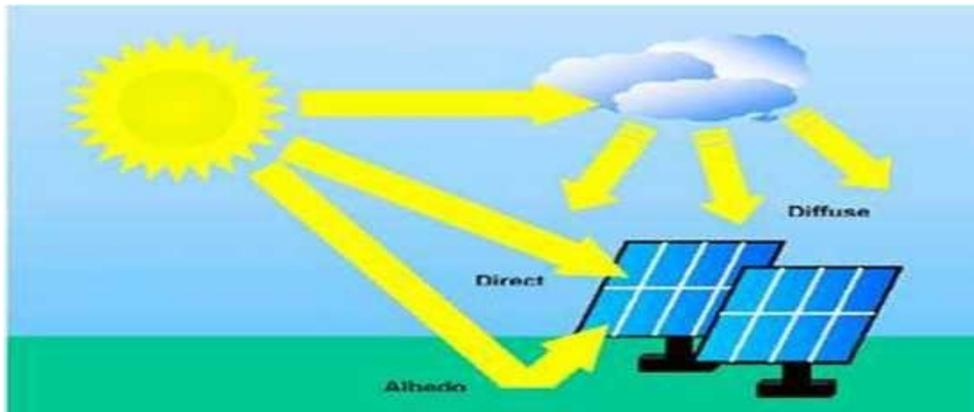
**1.4.1. Le rayonnement direct:** est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs, Il peut être mesuré par un parhéliomètre.

**1.4.2. Le rayonnement diffusé:** est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent ce (éclatement) des rayons du soleil.

Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques.

**1.4.3. Le rayonnement solaire réfléchi:** ou l'albédo du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

**1.4.4. Le rayonnement global:** est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyromètre ou un polarimètre sans écran.



*Figure. (I.3): Composante du rayonnement global sur un plan horizontal [8].*

## 1.5 Le principe de l'effet photovoltaïque

### 1.5.1. Histoire de cellules solaires

Edmund Becquerel a découvert l'effet photovoltaïque en 1839. Il a remarqué que certains matériaux exposés à la lumière ont donné des étincelles. Il a prouvé que ces étincelles sont qu'une conversion de la lumière en un courant électrique [1] [9] [10].

### 1.5.2 L'Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque c'est un processus qui permet de convertir la lumière (photons) en énergie électrique. L'énergie des photons dépend de la longueur d'onde. Quand un matériau comme le silicium absorbe la lumière ; Les photons transfèrent leurs énergie aux électrons qui leur permettent de sauter à un état d'énergie plus élevé. Les électrons excités reviennent à leurs états initiaux en émettant de la lumière.

La production de l'énergie électrique se fait par les processus suivants : absorption, conversion et la collecte [3] [11] [9] [12].

- ✚ Les rayons lumineux frappent la surface de la cellule solaire.
- ✚ Le matériau semi-conducteur absorbe les photons dont l'énergie est supérieure ou égale à l'énergie de gap de matériaux.
- ✚ L'énergie du photon est transférée aux électrons en créant des paires électrons-trous.
- ✚ Les particules sont collectées aux électrodes de la cellule solaire et un courant électrique continu apparaît.

Quand un rayon lumineux frappe la cellule solaire, une partie de ce rayon sera réfléchi et l'autre est absorbé par le réseau cristallin de semi-conducteur et converti directement en courant électrique. Cela est fait par la création des paires électrons-trous [4] [13]

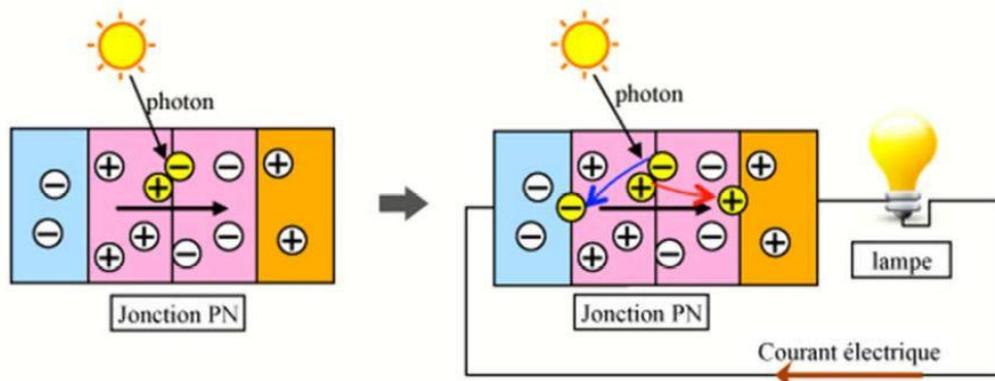


Figure (I-4): Création du courant électrique sous l'effet de la lumière [4] [14].

### 1.5.3 Absorption du rayonnement dans le matériau (Propriétés optiques des semi-conducteurs)

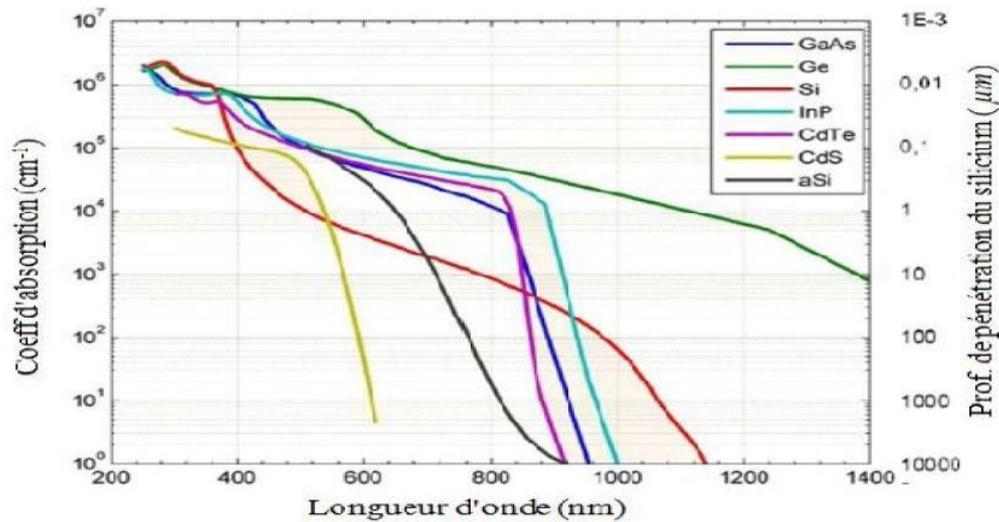
L'absorption et l'interaction des photons avec un semi-conducteur dépendent principalement du coefficient d'absorption. Ce coefficient est le nombre de photons absorbés par unité d'épaisseur du semi-conducteur. Il dépend aussi de la longueur d'onde.

Si une intensité  $I_i(\lambda)$  incident sur une surface de coefficient d'absorption  $\alpha(\lambda)$  et coefficient de réflexion  $R(\lambda)$  est absorbée et devient à une profondeur  $x$  selon la loi de Bouguer-Lambert [15] :

$$I(\lambda, x) = I_i(\lambda)(1 - R(\lambda)\exp(-\alpha(\lambda)x) = I(\lambda, 0)\exp(-\alpha(\lambda)x) \text{ (I-1)}$$

$I_i$ : l'intensité de rayonnement lumineux incident.

Les photons dont la longueur d'onde est faible sont absorbés près de la surface de semi-conducteur et ils sont responsables de la création des paires électrons trous. Tandis que les photons dont la longueur d'onde est plus grande sont un peu loin de la surface. La loi de B er-Lambert est résumée par la figure ci-apr es.



**Figure (I-5):** Profondeur de pénétration et coefficient d'absorption de quelques semi-conducteurs à 300 K en fonction de la longueur d'onde [4].

### 1.6 La structure de la cellule solaire

- La face arrière ne pose aucun problème majeur pour la collecte, une couche conductrice en principe suffit, s'il existe encore une certaine intensité lumineuse à ce niveau, une couche réfléchissante est de plus préférable, cette réflexion contribue à collecter davantage de lumière, les photons restant traversant de nouveau la jonction.

- La face avant doit être suffisamment transparente pour permettre aux photons d'atteindre la jonction, un oxyde transparent conducteur (O.T.C) comme le ZnO de faible épaisseur devra être utilisé pour les couches minces, une grille conductrice pour l'autre filiere en général [16,17].

Nous verrons enfin que d'autres couches minces de différents matériaux, déposées à l'avant ou à l'arrière de la jonction, pourront être utilisées, notamment dans l'hétéro jonction pour augmenter le rendement.

***1.6.1 L'émetteur et la base***

Les couches émetteur et base sont des couches fines à base de semi-conducteur.

La région de type n dans une cellule n-p est nommé émetteur.

La région de type p- est nommée la base”.

Pour minimiser l'absorption dans l'émetteur, Il faut que leur épaisseur doive être très fine par rapport à l'épaisseur de la base pour assurer la collecte des porteurs. [4]

Le dopage de l'émetteur doit être de l'ordre de  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  alors que celui de la base doit être plus faible [4].

Le dopage de la base a un rôle important dans l'augmentation du rendement de la cellule solaire.

Le faible dopage augmente la durée de la vie des porteurs minoritaires, par contre il augmente le courant de l'obscurité et donc diminue la performance de lacellule.

***1.6.2 Les contacts***

Les contacts métalliques sont placés sur la face avant et sur la face arrière de la cellule solaire.

Ils créent une barrière de potentiel « barrière de Schottky » [18]. Le contact supérieur couvre la surface de cellule solaire d'un pourcentage de 2–8%.

Ce contact a un rôle de minimiser l'ombrage et éviter la recombinaison. Alors que le contact inférieur couvre la partie inférieure de la surface de lacellule.

Parmi les métaux utilisés pour les contacts ohmiques des cellules solaires sont : Li, Na, K, Fe, Ni, Al, Cu, Ag, Au, Pt [19].

***1.6.3 La fenêtre***

La couche fenêtre est une couche conductrice. Elle permet aux électrons de circuler vers les contacts électriques sans augmenter la résistance des cellules en série.

Pour que les rayons lumineux peuvent être pénétrer dans les couches de la cellule solaire photovoltaïque, il faut utiliser des matériaux semi-conducteurs dont l'énergie de gap est importante pour être transparent à la lumière [20].

***1.6.4 Couche antireflet***

Pour réduire la réflexion de la lumière à moins de 5% sur la face avant de la surface de la cellule solaire, cette dernière est recouverte d'une couche anti-réfléchissante (Anti- Réflective Cotinga CAR) [3].

Le rôle de la couche anti-réfléchissante est basé sur le principe de l'interférence des faisceaux lumineux dans les couches diélectriques minces [1].

Il est préférable d'utiliser une double couche antireflet (avec deux diélectriques différents) pour les cellules photovoltaïques à haut rendement [12].

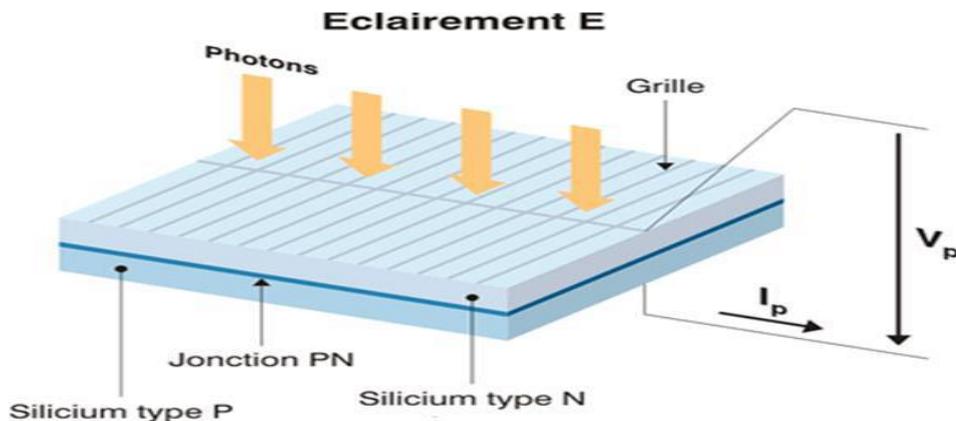
Donc, sans la couche antireflet, la cellule solaire reflète jusqu'à 33 de la lumière incidente arrivant sur la surface de cellule solaire. [3].

Le tableau ci-après montre les matériaux utilisés comme des couches antireflets et leurs indices de réfraction [21].

**Tableau (I-2) :** L'indice de réfraction de quelques matériaux

Matériau	N
MgF <sub>2</sub>	1.38
CeF <sub>3</sub>	1.65
ZrO <sub>2</sub>	2.10
TiO <sub>2</sub>	2.62
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.76
ZnS	2.36

La structure fondamentale de la cellule solaire est schématisée à la (Fig. I-6).



**Figure (I-6) :** La structure fondamentale d'une cellule solaire [22].

### ***1.7 Amélioration du rendement***

Pour améliorer le rendement de la conversion photovoltaïque, on a recours à différentes techniques, citons celles utilisées à la face éclairée de la cellule, la texturisation, le dépôt de couches antireflets et de passivation, ainsi que la création du champ électrique à l'avant et à l'arrière [23].

**1.7.1 Effet du confinement optique**

Le confinement optique tend à réduire les réflexions en face avant et arrière ; les techniques usuelles utilisées sont soit la texturation de la surface avant par création de pyramide (Fig. I-6) permettant une multitude de réflexions de la lumière à la surface soit par l'introduction des couches antireflets [23, 17,24].

**1.7.2 Effet de la passivation**

La passivation des défauts en surface et en volume reste critique pour améliorer le rendement des cellules photovoltaïques, un nombre important de techniques de passivation existe lors du processus de fabrication des cellules. La passivation des liaisons pendantes à la surface par la croissance d'un oxyde thermique.

**1.7.3 Effet d'un champ avant ou arrière (BSF)**

Les recombinaisons à la surface arrière existent à cause des contacts métalliques, pour les combattre et de plus générer et collecter des paires par les radiations de grande longueur d'onde pour lesquelles la cellule est transparente, il a été proposé d'utiliser un champ électrique par variation du dopage ou du gap sur la face arrière, qui permet de passiver la face arrière de la cellule.

Le champ électrique à surface arrière BSF (Back Surface Field) est une couche mince fortement dopée. Elle est dopé (p+ou n+) avec le même type de dopage que le substrat [25]. Dans cette zone les porteurs minoritaires injectés sont repoussés vers la jonction et participent à laphoto courant [16].

La figure suivante résume la composition d'une cellule solaire:

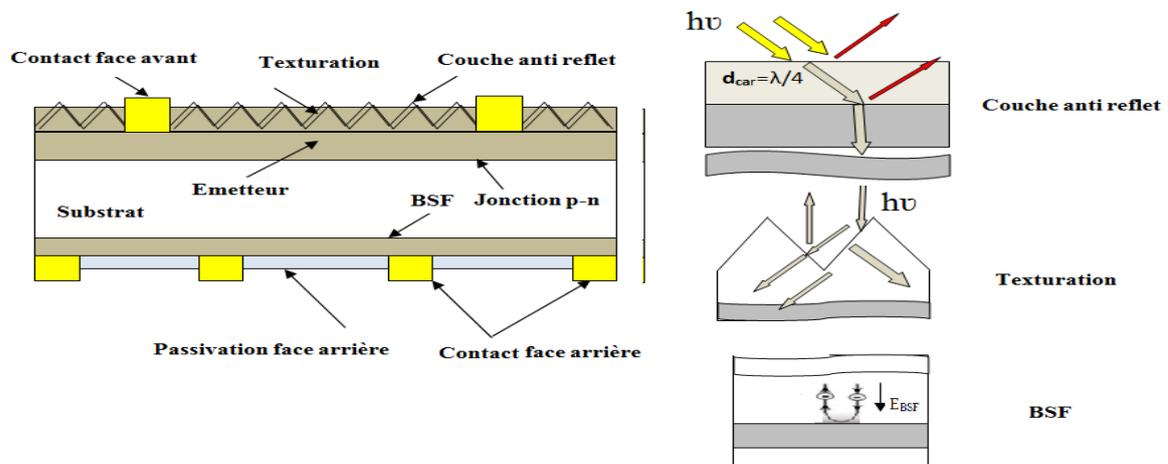
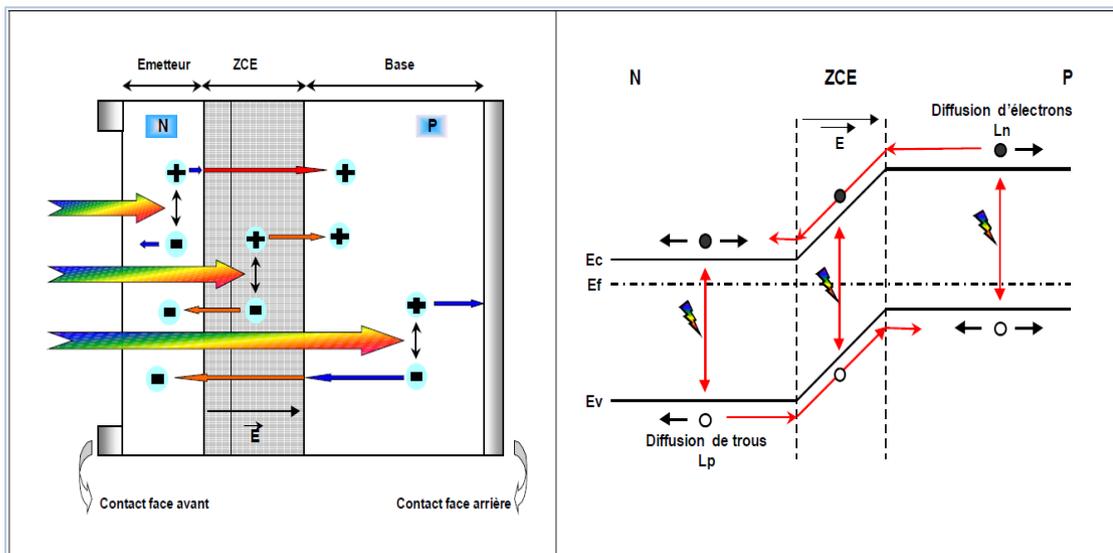


Figure (I-7): Structure d'une cellule photovoltaïque [26].

### I.8 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque



**Figure (I.8) :** principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

[27]

La mise en contact d'un semi-conducteur dopé P et d'un semi-conducteur dopé N fait apparaître un phénomène de diffusion dans la jonction. Les électrons majoritaires dans la couche N diffusent vers le côté P et les trous majoritaires dans la couche P diffusent vers le côté N.

A la jonction, les porteurs de charge (électrons et trous) se recombinent créant une zone dépourvue de porteurs mobiles, appelée zone de charge d'espace (ZCE). Il apparaît alors une différence de potentiel et donc un champ électrique orienté de la région N vers P.

Sous éclairage, les photons incidents vont générer des paires électron-trou dont le comportement va différer selon la zone d'absorption:

-Dans la zone de charge d'espace (ZCE) engendrée par la jonction p-n, les paires électron-trou créées sont dissociées par le champ électrique. Les électrons sont accélérés puis injectés dans la zone n (émetteur) et les trous dans la zone p (base).

Un photo-courant de génération est créé.

-Dans les zones de base et d'émetteur, les porteurs minoritaires générés (trous dans l'émetteur et électrons dans la base) vont diffuser vers la ZCE. S'ils atteignent cette dernière avant de se recombiner, ils sont injectés dans la zone n pour les électrons et

dans la zone p pour les trous et deviennent majoritaires. Un photo-courant de diffusion est créé.

Ces deux contributions s'ajoutent pour donner le photo-courant de porteurs minoritaires résultant  $I_{PH}$ . Il est proportionnel à l'intensité lumineuse.

### ***1.9. Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque***

Lorsqu'une jonction PN réalisée à partir de matériaux sensibles à la lumière et éclairée, elle présente la particularité de pouvoir fonctionner en générateur d'énergie. Ce comportement en statique peut être décrit par l'équation électrique définissant le comportement d'une diode classique.

Il y a génération de courant, de sorte que la photopile est souvent considérée comme un générateur de courant  $I_{PH}$  appelé « courant d'éclairement en court-circuit » ou photo-courant ».

Par équivalent au modèle de Thévenin, on peut aussi concevoir d'une f.é.m., plus précisément « force photo-électromotrice » (f.p.é.m) relativement à la d.d.p d'équilibre  $V_d$  due au contact qui existe déjà.

L'effet photovoltaïque consiste donc en cette apparition d'une f.p.e.m, suite à l'effet photoélectrique interne au voisinage de la surface de contact dans la jonction.

L'effet photoélectrique interne modifie la distribution équilibrée (dans l'obscurité) des porteurs, faisant surgir dans la zone de déplétion des porteurs libres. Sous l'influence de la d.d.p d'équilibre  $V_d$ , ces porteurs se déplacent, ce qui tend à diminuer cette d.d.p et avec le courant de diffusion en plus, ils génèrent dans tout le circuit un courant  $I$  qu'on peut aussi considérer comme provoqué par cette f.p.e.m.

De plus dans la pratique, comme le courant de fuite par les bords, phénomènes qu'on exprime par une résistance de shunt  $R_{sh}$  et un courant  $I_{sh}$ .

Et finalement il reste dans le circuit un courant  $I$  valant

$$I = I_{ph} - I_d(V) - I_{sh} \quad (1.2)$$

Des photons, d'énergie supérieure ou égale  $E_g$  perturbent la jonction, provoquant

un photo-courant  $I_{ph}$  et une tension  $V$  aux bornes du récepteur. Il faut tenir en compte de la résistance interne  $R_S$  de la photopile provoquée surtout par les phénomènes de contact. Le courant de diode provient des phénomènes de diffusion dans les régions quasi-neutres avant et arrière, qu'on peut noter

$$I_d = I_s \left[ \exp \left( \frac{V + R_S I}{U_T} \right) - 1 \right] \quad (I.3)$$

( $U_T = \frac{kT}{q}$  Potentielle thermodynamique  $\approx 26\text{mV}$  à la température ambiante)

Le circuit équivalent d'une cellule solaire est représenté par la figure.I.9où le photo-courant est représenté par un générateur de courant  $I_{ph}$ , il est de sens opposé au courant de polarisation directe de la diode. Il faut tenir compte de la résistance interne  $R_S$  de la photopile provoqué par les contacts métalliques et due essentiellement aux doigts métalliques sur la surface supérieure, le shunt  $R_{sh}$ provoque :

$$I_{sh} = \frac{V + R_S I}{R_{sh}} \quad (I.4)$$

À partir de tout cela l'équation du l'équation du courant devient ;

$$I(V) = I_{ph} - I_s \left[ \exp \left( \frac{V + R_S I}{U_S} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_S I}{R_{sh}} \quad (I.5)$$

Alors le schéma de fonctionnement électrique équivalent est :

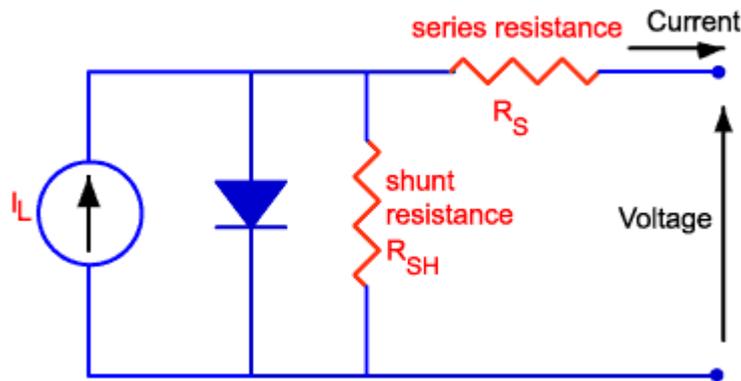


Figure (I.9) :circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque [28].

Pour caractériser cette cellule on doit connaître ;

**1.9.1 Le courant de court-circuit,  $I_{sc}$** 

Le courant de court-circuit est le courant débité par la cellule sous éclairément en court-circuitant la sortie. C'est à dire que  $I_{sc} = I (V=0)$ .

Pour une cellule solaire idéale le courant de court-circuit est égal au courant de photogénération  $I_{PH}$ .

**1.9.2 La tension de circuit ouvert,  $V_{co}$** 

La tension de circuit ouvert est la différence de potentiel mesurée aux bornes de la cellule lorsque la sortie est en circuit ouvert. C'est à dire :  $V_{co} = V (I=0)$ .

Pour une cellule solaire idéale la tension de circuit ouvert est donnée par :

$$V_{co} = U_T \ln \left( \frac{I_{sc}}{I_s} + 1 \right) \quad (\text{I-6})$$

$I_s$  : courant de saturation de la diode.

**1.9.3 La réponse spectrale,  $SR(\lambda)$** 

La réponse spectrale d'une cellule solaire est le rapport du courant total généré par la cellule au courant qui peut être généré pour chaque longueur d'onde du spectre incident. Elle renseigne sur la réaction de la radiation incidente et permet de fixer la gamme d'utilisation de la cellule.

**1.9.4 La puissance maximale,  $P_m$** 

La puissance débitée par une cellule solaire est maximum quand le produit  $(V \cdot I)$  est maximum. Si  $V_M I_m$  sont la tension et le courant pour lesquels on a ce maximum, la puissance maximum est la surface du plus grand rectangle de côtés  $V_M$  et  $I_m$  qu'on peut inscrire sous la courbe  $I(V)$  (Figure.I.10)

$$P_M = I_m V_M = (I V)_{\max} \quad (\text{I.7})$$

**1.9.5 Le facteur de forme,  $FF$** 

On appelle facteur de forme, le rapport de la puissance maximale au produit  $I_{sc} V_{co}$ . Le facteur de forme indique la qualité de la cellule, il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites.  $R_s$  et  $R_{sh}$

$$FF = P_m / I_{sc} V_{co} \quad (\text{I.8})$$

**1.9.6 Le rendement de conversion  $\eta$**

Le rendement de conversion d'une cellule solaire est le rapport de la puissance maximale pouvant être extraite à la puissance du rayonnement incident.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{incidente}} = \frac{V_M I_M}{P_i S} \tag{I.9}$$

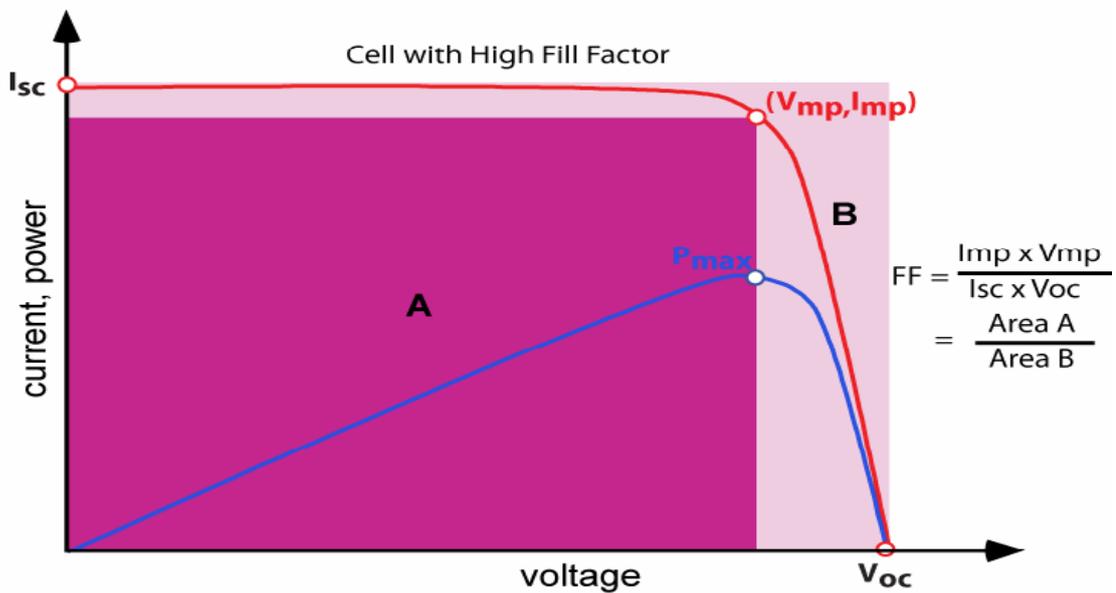
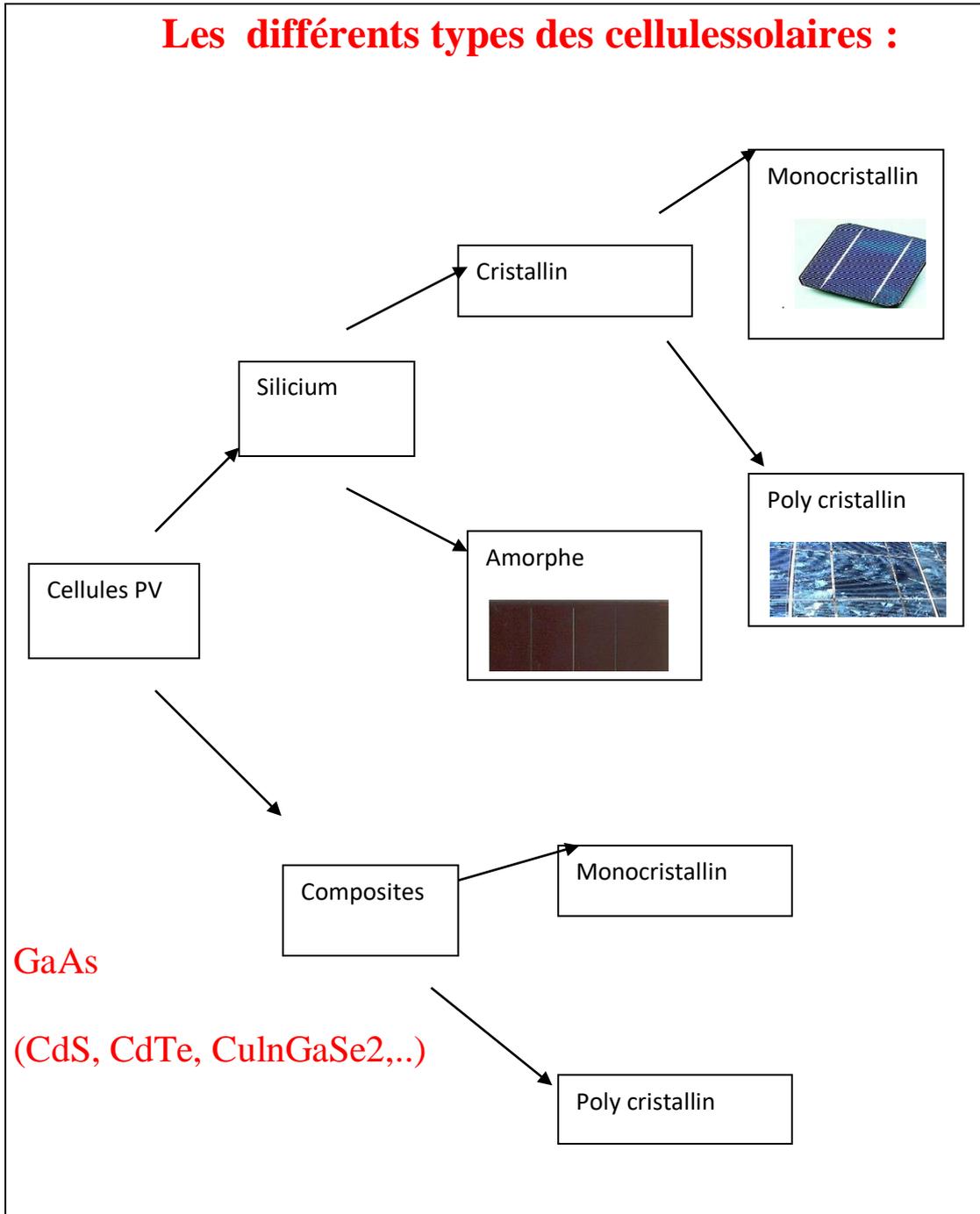


Figure (I.10): La courbe type de la caractéristique  $I(V)$  d'une cellule photovoltaïque [29].

**1.10 Les différentes filières photovoltaïques**

Il existe un grand nombre de technologies mettant en œuvre l'effet photovoltaïque. Beaucoup sont encore en phase de recherche et développement. Les principales technologies industrialisées en quantité à ce jour sont : le silicium mono ou polycristallin (plus de 80% de la production mondiale) et le silicium en couche mince à base de silicium amorphe ou CIS (Cuivre Indium Sélénium).



*Figure (I.11): Les différents types des cellules solaires [30].*

### **11. Conclusion**

En résumé, après avoir présenté dans ce chapitre la notion du rayonnement solaire et l'absorption de ce dernier par un semi-conducteur, nous avons présenté le dispositif qui permet l'absorption du rayonnement et recueillir le plus possible des porteurs générés; la description de ça est donnée la cellule solaire. Elle est constituée aussi des

contacts aux faces avant et arrière, une couche anti reflet, une texturation de surface et un champ de surface arrière(BSF).

Ainsi nous avons présenté le principe de fonctionnement et les concepts permettant d'augmenter le rendement de conversion, nous terminons par une présentation de différentes filières courantes

---

**CHAPITRE II**

**MODELISATION DE LA CELLULE**

**SOLAIRE BIFACIALE**

---

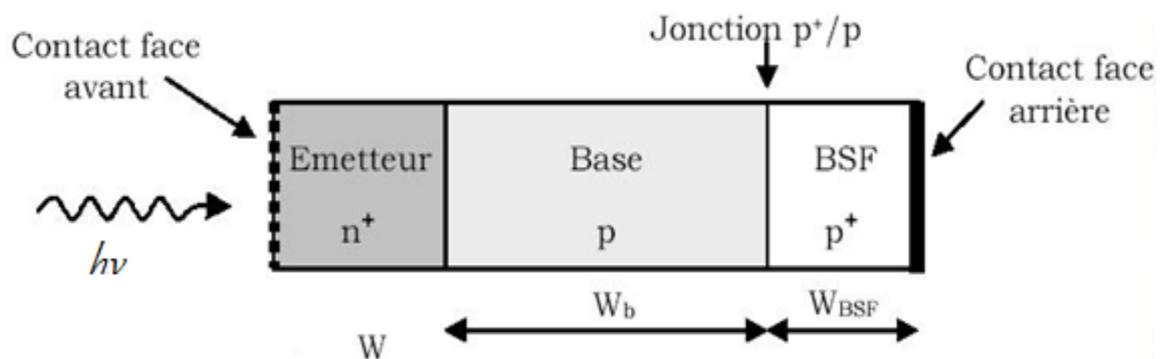
### II.1. Introduction

Quel que soit la structure de la cellule solaire, l'optimisation des performances est nécessaire pour aboutir à un bon rendement avec une réduction du coût de réalisation. Habituellement, les paramètres à optimiser sont : l'épaisseur de la cellule, le niveau et les profils de dopage, la configuration des contacts, le confinement optique et la collection de la lumière [31]. Les valeurs des paramètres optimaux dépendent de la structure de la cellule solaire, de la qualité des matériaux utilisés (les différentes couches et les contacts métalliques) et de la vitesse de recombinaison en surface (face avant et arrière) [31].

Dans ce chapitre nous allons faire la modélisation électrique et mathématique de la cellule solaire bifaciale munie d'un champ de surface arrière BSF qui collecte l'illumination solaire par ses deux faces avant et arrière.

### II.2. Théorie du BSF

Les pertes dues aux défauts et aux contacts ohmiques des deux surfaces de la cellule solaire est modélisé par une recombinaison en surface ayant une vitesse, qui caractérise la qualité des surfaces. Pour résoudre ce problème les recherches ont adopté une structure de cellule solaire qui minimise ces pertes [32], la structure la plus simple de ce type des photopiles est représentée sur la figure (II -1).



**Figure (II -1):** Cellule solaire a champ BSF [32].

La base de cellule solaire est constituée de deux régions, la base proprement dite et une zone fortement dopée au voisinage du contact arrière, une telle constitution entraîne deux conséquences : La création d'une petite barrière supplémentaire d'énergie et le confinement des porteurs minoritaires dans la base. De cette façon, on

recupère les porteurs de charge créés à l'arrière de la base au voisinage du contact ohmique qui sont normalement perdus dans les cellules simples. La figure (II.2) montre la structure énergétique de la cellule solaire BSF avec le confinement des porteurs minoritaires.

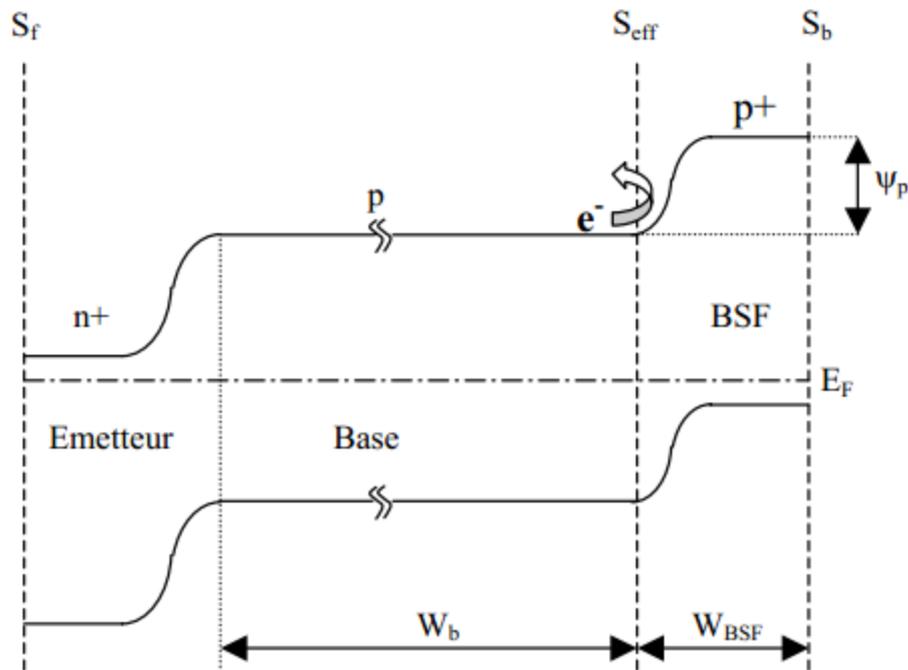


Figure (II -2) : Diagramme de bandes d'une cellule solaire à BSF [32].

### II.3. Structure et principe de fonctionnement de la cellule solaire bifaciale BSF

#### II.3.1. Structure de la cellule solaire bifaciale BSF

La structure de la cellule solaire bifaciale BSF est illustrée par la Figure (II -3). Elle se compose de plusieurs couches, à savoir [33]:

- un contact ohmique sur les deux faces avant et arrière sous forme de grille.
- une couche texturisée à la face avant et à la face arrière généralement de forme pyramidale dont les dimensions sont supérieures à la longueur d'onde de la lumière incidente. Cette couche texturisée est formée par deux sous couches :

a) une couche de passivation pour l'amélioration de la qualité électronique de la surface. Elle est généralement réalisée à base d'oxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ) ou de nitrure de silicium hydrogéné ( $\text{Si}_n\text{x:H}$ ) [33].

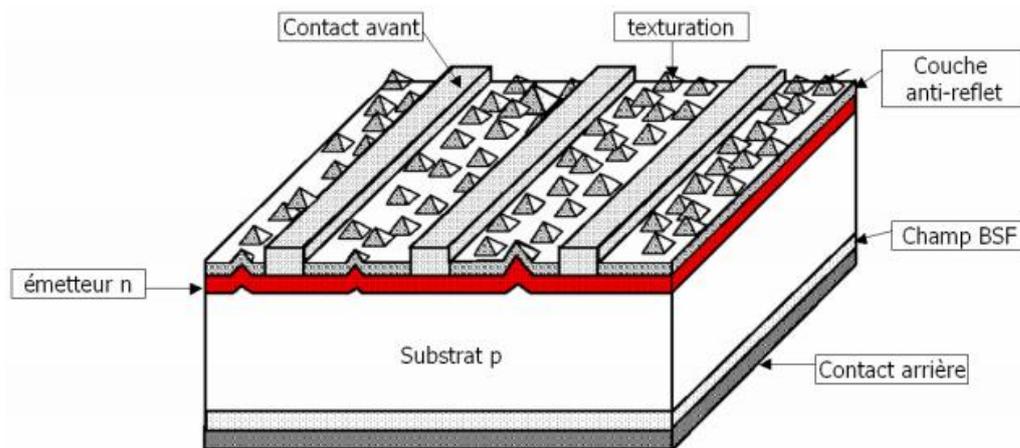
b) une couche antireflet pour minimiser la réflexion de la lumière à la surface texturisée [33].

- l'émetteur de type N formé par la diffusion homogène de phosphore [34].

- une zone de charge d'espace Z.C.E qui se forme entre l'émetteur et la base.

- la base de type P : est formée par la diffusion du bore [34].

- Une couche fortement dopée  $PP+$ , formée par les mêmes procédés que ceux de la jonction  $NN+/p$ , permettant la création d'un champ électrique arrière appelé BSF (Back Surface Field) [33].



**Figure (II -3) :** Représentation schématique de la structure d'une cellule Solaire BSF [35]

### II.3.2. Principe de fonctionnement de la cellule solaire bifaciale BSF

Le principe de fonctionnement de la cellule solaire bifaciale BSF est pareille que celui de la cellule solaire conventionnelle. Cependant, la cellule bifaciale collecte la lumière par ses deux faces avant et arrière. Ainsi, la courante photo générée total est constitué par la somme des deux courantes photos générées, qui sont dus à l'éclairement de la cellule par la face avant (l'émetteur) et par la face arrière (la base) [36].

Le schéma électrique équivalent d'une cellule solaire bifaciale BSF est illustré par la figure suivante :

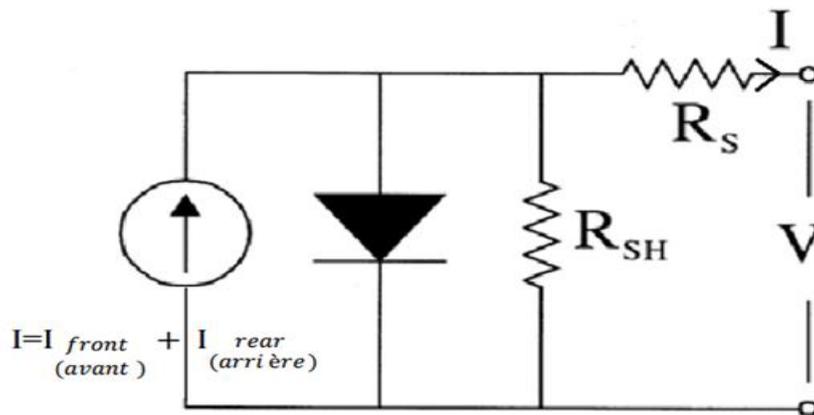


Figure (II -4) : le circuit électrique équivalent de la cellule solaire bifaciale [36].

#### II.4. Caractéristiques électriques de la cellule solaire bifaciale BSF

Les différents paramètres caractéristiques de la cellule solaire bifaciale BSF sont les suivants :

➤ **Le courant de court-circuit  $I_c$**  : C'est le courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule solaire bifaciale. Il est égal à la somme de la courante photo générée dû à l'absorption de la lumière par la face avant et de la courante photo générée dû à l'absorbation de la lumière par la face arrière [36].

Le courant de court-circuit de la cellule solaire bifaciale est donné par la relation suivante:

$$I_{CC} = I_{ph} = I_{ph1} + I_{ph2} \quad (\text{II.1})$$

Ou :

$I_{ph1} = I_{cc.front}$  : Laphoto courant produit par la face avant de la cellule solaire.

$I_{ph2} = I_{cc.rear}$  : La photo courant produit par la face arrière de la cellule solaire.

$I_{ph}$  : La photo courant totale produit par la cellule solaire bifaciale.

➤ **La tension de circuit ouvert :**

C'est la tension pour laquelle la cellule bifaciale ne fournit aucun courant. On peut calculer la tension de circuit ouvert ( $V_{CO.bif}$ ) de la cellule solaire bifaciale à partir de son circuit électrique équivalent **Figure (II -4)**. [36].

$$V_{CO.bif} = \left(\frac{kt}{q}\right) + \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad (\text{II.2})$$

Où  $I_s$ : le courant de saturation de la diode.

➤ **Le facteur de forme FF** : Il définit l'efficacité de la cellule solaire [37]. C'est le rapport entre la puissance maximale débitée et la puissance idéale [38], il est obtenu comme suit:

- Pour l'éclairement de la cellule solaire bifaciale BSF éclairée par la face avant seulement, le facteur de forme est obtenu à partir de l'équation suivante:

$$FF = \frac{I_{M.front} \times V_{M.front}}{I_{CC.front} \times V_{CO.front}} \quad (\text{II.3})$$

Avec:

$I_{M.front} \times V_{M.front}$ : Le courant et la tension respectivement, le produit correspond à la puissance maximale fournie par la cellule solaire bifaciale illuminée par sa face avant.

- Par analogie on peut calculer le facteur de forme pour l'éclairement de la cellule solaire bifaciale BSF par la face arrière seulement, il est obtenu à partir de l'équation suivante:

$$FF = \frac{I_{M.rear} \times V_{M.rear}}{I_{CC.rear} \times V_{CO.rear}} \quad (\text{II.4})$$

$I_{CC.rear}, V_{CO.rear}$  : Le courant et la tension respectivement et dont le produit correspond à la puissance maximale fournie par la cellule solaire bifaciale.

➤ **Le rendement de conversion de l'énergie  $\eta$**  :

→ C'est le rapport entre la puissance maximale générée et la puissance du rayonnement solaire incident sur la surface l'illuminée [38].

- Pour l'illumination de la cellule solaire bifaciale par la face avant, le rendement de conversion  $\eta_{front}$  est calculé par la relation suivante:

$$\eta_{front} = \frac{I_{M.front} \times V_{M.front}}{P_{0front}} \quad (\text{II.5})$$

Avec:

$P_{0front}$ : La puissance du rayonnement solaire incident sur la face avant de la cellule solaire bifaciale.

- Par analogie on peut calculer le rendement de conversion  $\eta_{rear}$  pour l'illumination de la cellule solaire bifaciale par la face arrière, il est calculé par la relation suivante :

$$\eta_{rear} = \frac{I_{M.rear} \times V_{M.rear}}{P_{0.rear}} \quad (\text{II.6})$$

Avec:

$P_{0.rear}$ : La puissance du rayonnement solaire incident sur la face arrière de la cellule solaire bifaciale.

### ➤ *La puissance délivrée par la cellule bifaciale*

→ La puissance totale générée par la cellule solaire bifaciale est égale à la somme des deux puissances produites, c'est-à-dire la puissance délivrée par l'éclairement de la face avant et la puissance délivrée par l'éclairement de la face arrière car. En effet, à partir de la Figure (II -4) et de l'équation (II.1), la cellule solaire bifaciale est considérée comme deux cellules solaires conventionnelles reliées en parallèle. Ainsi, la puissance totale est égale à la somme des deux cellules considérées.

- Pour l'illumination de la cellule solaire bifaciale par sa face avant, la puissance maximale est calculée par la relation suivante:

$$PM_{fornt} = I_{M.fornt} \times V_{M.fornt} \quad (\text{II.7})$$

Avec:

$PM_{fornt}$ : La puissance maximale générée par la cellule bifaciale éclairée par sa face avant.

-Pour la face arrière, la puissance maximale est calculée par la relation suivante :

$$PM_{rear} = I_{M.rear} \times V_{M.rear} \quad (\text{II.8})$$

Avec:

$PM_{rear}$  : La puissance maximale générée par la cellule face arrière. Ainsi, la puissance maximale totale générée par la cellule bifaciale BSF,  $PM_{tot}$  est calculée par l'équation suivante:

$$PM_{tot} = PM_{fornt} + PM_{rear} \quad (\text{II.9})$$

### **II.5. La réflexion par albédo**

On peut augmenter la puissance lumineuse incidente sur la face arrière de la cellule solaire bifaciale jusqu'à 50% [39], lorsqu'on utilise le rayonnement qui est réfléchi sur la surface arrière de la photopile, c'est la réflexion par albédo. Il et dépend de la surface du milieu qui réfléchit le rayonnement solaire incident. Le principe de cette réflexion est représenté sur la Figure (II -5)

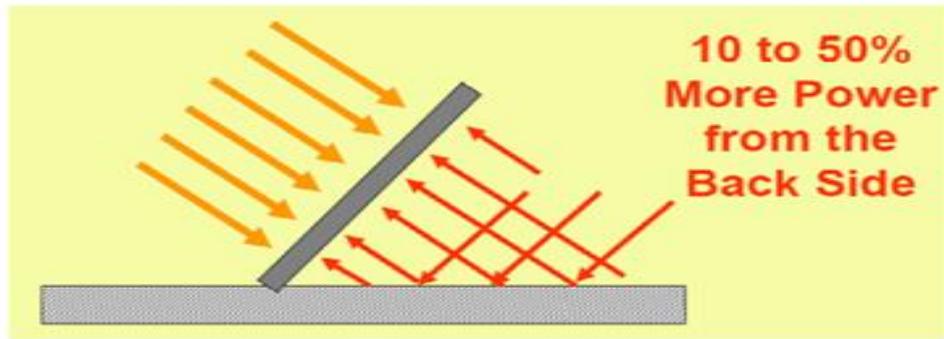


Figure (II -5): Représentation schématique du principe de la réflexion par albédo [39].

### II.6. Modélisation électrique de la cellule solaire bifaciale BSF éclairée par sa face avant

Pour modéliser la cellule solaire bifaciale, on utilise le model à une dimension basé sur quatre régions : la zone N+ (l'émetteur), la zone P (la base), la zone de charge d'espace (ZCE) et la zone fortement dopée (P+) **Figure (II - 6)** [40].

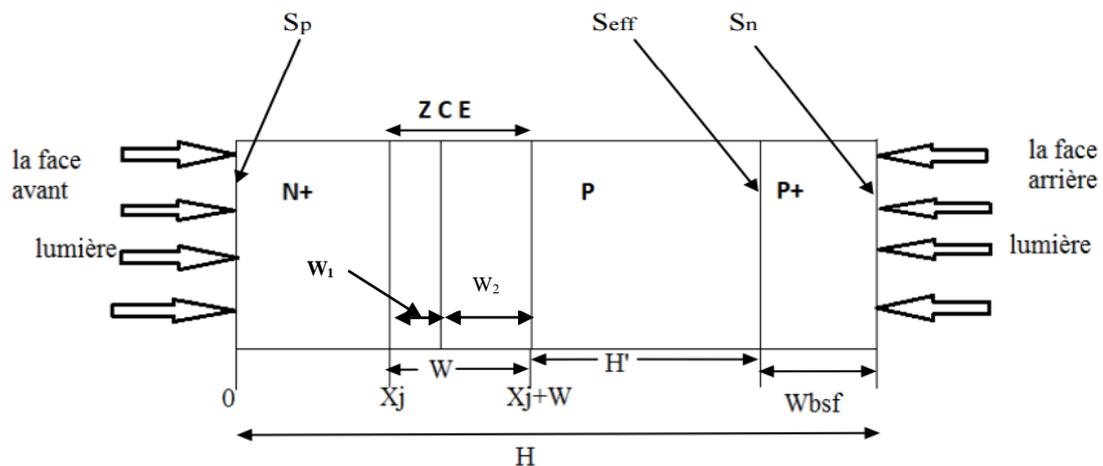


Figure (II -6): Représentation schématique du model à une dimension de la cellule solaire bifaciale BSF [40].

#### II.6.1. Eclairément, puissance incidente et flux solaire au sol

D'après [38], l'éclairément solaire au sol est approximé par une fonction non linéaire donnée par :

$$E_{cl}(\lambda) = 0.06977 + 7.0625 \left| 1 - e^{\frac{-(\lambda - 0.26053)}{0.15994}} \right| 2.28411 e^{\frac{-(\lambda - 0.26053)}{0.22285}} \quad [\text{KW m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}] \quad (\text{II.9})$$

D'où le flux solaire au sol :

$$F(\lambda) = \frac{E_{cl}(\lambda)}{h\nu} [\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \mu\text{m}^{-1}] \quad (\text{II.10})$$

Et la puissance incidente au sol

$$P_i = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} E_{cl}(\lambda) d\lambda [\text{Wcm}^{-2}] \quad (\text{II.11})$$

Pour  $\lambda_{\min}=0.3 (U_m)$  et  $\lambda_{\max}=2 (U_m)$ , on trouve que :  $P_i=7.24528 (\text{mW cm}^{-2})$ .

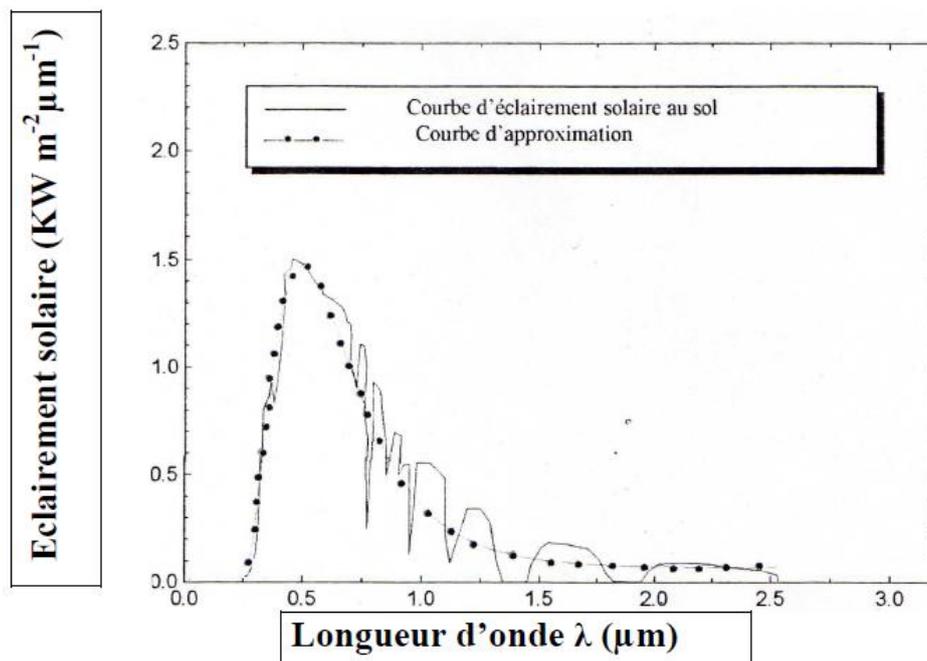


Figure (II -7) : Approximation de l'éclairement solaire au sol [41].

### II.6.2. Le coefficient d'absorption $\alpha$

Le processus de la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique est initialisé par le phénomène d'absorption. Le matériau semi-conducteur utiliser doit donc bien absorber dans la gamme de longueurs d'onde émise par le soleil, et celle-ci est l'une des caractéristiques communes entre les deux matériaux qui forment la cellule solaire. On considère les coefficients d'absorptions,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  pour les deux matériaux l'émetteur et la base.

Il a été démontré que le coefficient d'absorption  $\alpha$ , en fonction de l'énergie du photon  $h\nu$ , suit la relation suivante [42]:

$$\alpha = A_a (h\nu - E_g)^{1/2} \quad (\text{II.12})$$

Où

$E_g$  Est l'énergie de la bande interdite

$A_d$  est une constante

### II.6.3. Génération

Après l'absorption des photons par matériau semi-conducteur il y aura le phénomène de génération des paires électron-trous, l'intensité de ce phénomène varie d'un semi-conducteur à un autre et on l'exprime par l'équation du taux de génération  $G(x, \lambda)$  qu'elle a comme variable : La profondeur  $x$  de la surface du matériau et le  $\lambda$  qui est la longueur d'onde du photon incident

$$G(x, \lambda) = \alpha(\lambda)F_i(\lambda)(1 - R(\lambda))\exp(-\alpha(\lambda)x) \quad (\text{II.13})$$

Où :

$\alpha(\lambda)$  : est le coefficient d'absorption

$F_i(\lambda)$  : Le flux des photons incidents par  $\text{cm}^{-2}$  par  $\text{s}^{-1}$  par unité de longueur d'onde.

$R$  : coefficient de réflexion.

### II.6.4. Calcul de la densité de photo-courant, $J_{ph}(\lambda)$

Lorsqu'une lumière monochromatique de longueur d'onde  $\lambda$  est incidente normalement par rapport à la surface d'un semi-conducteur, on admet que le dopage est uniforme. Le champ électronique devient nul le long des régions neutre (hors la zone de charge d'espace) et un photo courant se produit dans chaque zone de la cellule bifaciale. La densité totale du photo-courant produit par la cellule bifaciale  $J_{ph}$  est égale à la somme des photos courantes générées dans chaque région de la cellule:

$$J_{ph} = J_n + J_p + J_{dr} + J_{bsf} \quad (\text{II.14})$$

Avec :

$J_n$ : Le photo-courant généré dans la base (la région p).

$J_p$ : Le photo-courant généré dans l'émetteur (la région N+).

$J_{dr}$ : Le photo-courant généré dans la zone ZCE.

$J_{bsf}$ : Le photo-courant généré dans la région de BSF (P+).

#### II.6.4.1. Le photo courant dans la première zone neutre N (l'émetteur)

Les minoritaires sont des trous pour le semi-conducteur de type N.

1) L'équation de continuité s'écrit dans cette région comme : [35].

$$G_p - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} - \frac{1}{q} \frac{dj_p}{dx} = 0 \quad (\text{II.15})$$

$G_p = \alpha_1 F(1 - R)\exp(-\alpha_1 x)$  Désigne le taux de génération des paires électrons/trous.

2) L'équation de densité de courant est alors :

$$J_p = -q\mu_p p_n E - qD_p \frac{dp_n}{dx} \quad (\text{II.16})$$

Avec:

$\alpha_1$ : Le coefficient d'absorption de la lumière dans le semi-conducteur.

F : Le flux des photons sur la surface du semi-conducteur.

R: Le coefficient de réflexion sur la surface du semi-conducteur.

$\mu_p$ : Mobilité des trous

$\tau_p$ ; La durée de vie des porteurs minoritaires de la région n (les trous)

$\Delta p = p_n - p_{n0}$ , C'est la densité des trous générés,  $p_{n0}$ : la densité à l'équilibre

$D_p$ : Coefficient de diffusion des trous

E : le champ électrique interne.

Dans cette région : E=0, donc :

$$J_p = -qD_p \frac{dp_n}{dx} \quad (\text{II.17})$$

On remplace  $J_p$  et  $G_p$  dans l'équation de continuité, on obtient :

$$D_p \frac{d^2 p_n}{dx^2} + \alpha_1 F(1 - R) \exp(-\alpha_1 x) - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} = 0 \quad (\text{II.18})$$

La solution de cette équation est donnée par :

$$p_n - p_{n0} = A_1 \cosh\left(\frac{x}{L_p}\right) + B_1 \sinh\left(\frac{x}{L_p}\right) - \frac{\alpha_1 F(1-R)\tau_p}{\alpha_1^2 L_p^2 - 1} \exp(-\alpha_1 x) \quad (\text{II.19})$$

Où  $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$  est la longueur de diffusion des trous.

En peut trouver les deux constantes A1 et B1 à partir des conditions aux limites :

➤ A la surface, une recombinaison se produit avec une vitesse  $S_p$  la condition est:

$$D_p \frac{d(p_n - p_{n0})}{dx} = S_p (p_n - p_{n0}) \quad \text{À } x=0 \quad (\text{II.20})$$

➤ A la limite de la jonction la densité des porteurs en excès réduite à zéro par le Champ électrique dans la zone de déplétion, ceci est traduit par :

$$p_n - p_{n0} = 0 \quad \text{à } x = x_j$$

Donc:

$$\Delta p =$$

$$\frac{-\alpha_1 F(1-R)\tau_p}{\alpha_1^2 L_1^2 - 1} \left[ \frac{\left(\frac{S_p L_p}{D_p} + \alpha_1 L_p\right) \sinh\left(\frac{x_j - x}{L_p}\right) + \exp(-\alpha_1 x_j) \left(\frac{S_p L_p}{D_p} \sinh\left(\frac{x}{L_p}\right) + \cosh\left(\frac{x}{L_p}\right)\right)}{\frac{S_p L_p}{D_p} \sinh\left(\frac{x_j}{L_p}\right) + \cosh\left(\frac{x_j}{L_p}\right)} \exp(-\alpha_1 x) \right] \quad (\text{II.21})$$

La densité de photo courant dans cette région est :

$$J_p = -q D_p \left(\frac{dp_n}{dx}\right)_{x_j} \quad (\text{II.22})$$

Alors:

$$J_p = \frac{-\alpha_1 F(1-R)\tau_p}{\alpha_1^2 L_1^2 - 1} \left[ \frac{\left(\frac{S_p L_p}{D_p} + \alpha_1 L_p\right) - \exp(-\alpha_1 x_j) \left(\frac{S_p L_p}{D_p} \cosh\left(\frac{x_j}{L_p}\right) + \sinh\left(\frac{x_j}{L_p}\right)\right)}{\frac{S_p L_p}{D_p} \sinh\left(\frac{x_j}{L_p}\right) + \cosh\left(\frac{x_j}{L_p}\right)} - \alpha_1 L_p \exp(-\alpha_1 x_j) \right]$$

**II.6.4.2. Le photo courant dans la deuxième zone neutre P (la base)**

Pour calculer la photo courant généré dans la base de type P, on utilise l'équation de continuité des électrons dans cette région:

$$D_p \frac{\partial^2 \Delta n}{\partial x^2} + G_n - \frac{\Delta n}{\tau_n} = 0 \quad (\text{II.23})$$

Avec:

Le taux de génération de paires e<sup>+</sup>-e<sup>-</sup> à une dimension x de la surface du CIGS lorsqu'on remplace dans l'équation (mettre après la numérotation) est donné par :

$$G_n(x) = \alpha_2(\lambda) F(1 - R) \exp(-\alpha_1(x - x_j + w_1)) \exp(\alpha_2 w_2) \exp(-\alpha_2 x) \quad (\text{II.24})$$

2) L'équation de densité de courant est alors

$$J_n = q\mu_n n_p E + qD_n \frac{dn_p}{dx} \quad (\text{II.25})$$

Dans cette région E=0, donc :

$$J_n = qD_n \frac{dn_p}{dx} \quad (\text{II.26})$$

Avec:

$\tau_n J_n$  : Durées de vie et densités du courant d'électrons dans la base, respectivement.  $n_p$ : densité des porteurs minoritaires dans la base.

$n_{p0}$  : La densité des porteurs minoritaires à l'équilibre, q étant la charge de l'électron.

$\Delta n = n_p - n_{p0}$ : C'est la densité des électrons générés,

$\mu_n, D_n$ : Mobilité et coefficient de diffusion des électrons

Pour trouver la photo courant collectée la base de la cellule, on utilise les conditions aux limites suivantes :

-A la limite de la jonction la densité des porteurs en excès réduite à zéro par le champ électrique dans la zone de déplétion, ceci est traduit par :

$$n_p - n_{p0} = 0 \quad \text{à} \quad x = x_j + W_1 + W_2 \quad (\text{II.27})$$

-Une vitesse de recombinaison  $S_{eff}$  à  $x=H-W_{bsf}$

$$S_{eff} \Delta n = -D_n \frac{\partial \Delta n}{\partial x} \quad | \quad x=H-W_{bsf} \quad (\text{II.28})$$

H : est l'épaisseur de la cellule entière.

$S_{eff}$ : est la vitesse de recombinaison effective, elle se calcule via la formule suivante:

$$S_{eff} = \frac{N_a D_{bsf} \frac{S_n L_{bsf} + th\left(\frac{W_{bsf}}{L_{bsf}}\right)}{1 + \frac{S_n L_{bsf}}{D_{bsf}} th\left(\frac{W_{bsf}}{L_{bsf}}\right)}}{N_{bsf} L_{bsf}} \quad (\text{II.29})$$

La densité des électrons dans la région P est calculée par la relation suivante:

$$\begin{aligned} \Delta n &= \frac{\alpha_2 F(1-R)\tau_n \exp(-\alpha_1(x_j + w_1)) \exp(-\alpha_2 w_2)}{(\alpha_2^2 L_n^2 - 1)} \left[ \cosh\left(\frac{x - (x_j + w_1 + w_2)}{L_n}\right) \right. \\ &- \exp(x - (x - (x_j + w_1 + w_2))) \\ &- \frac{\left(\frac{S_{eff} L_n}{D_n}\right) \left(\cosh\left(\frac{x}{L_n}\right) - \exp(-\alpha_2 x)\right) + \sinh\left(\frac{x}{L_n}\right) + \alpha_2 L_n \exp(-\alpha_2 x)}{\left(\frac{S_{eff} D_n}{L_n} \sinh\left(\frac{x}{L_n}\right) + \cosh\left(\frac{x}{L_n}\right)\right)} \sinh\left(\frac{x - (x_j + w_1 + w_2)}{L_n}\right) \end{aligned}$$

Où  $L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$  : est la longueur de diffusion d'électrons

$$x_b = H'$$

Donc avec ces conditions, la distribution des électrons dans la base est donnée par :

$J_n$

$$= \frac{qF(1-R)\exp(-\alpha_1(x_j+w_1))\exp(-\alpha_2w_2)\alpha_2L_n}{(\alpha_2^2L_n^2-1)} \left[ \alpha_2L_n \right. \\ \left. - \frac{\frac{S_{eff}L_n}{D_n} \left( \cosh\left(\frac{xb}{L_n}\right) \exp(-\alpha_2xb) \right) + \sinh\left(\frac{xb}{L_n}\right) + \alpha_2L_n \exp(-\alpha_2xb)}{\frac{S_{eff}L_n}{D_n} \sin\left(\frac{xb}{L_n}\right) + \cosh\left(\frac{xb}{L_n}\right)} \right]$$

#### II.6.4.3. Le photo courant dans la région de charge d'espace ZCE

La génération du photo-courant a lieu également dans la région de charge d'espace. Etant donné que le champ électrique dans cette région soit assez élevé, il se trouve que les porteurs excédentaires générés sont drainés hors de la zone de déplétion avant qu'ils ne puissent se recombiner. Ainsi, on peut dire que la densité de photo courant ne dépend que du nombre de photons absorbés.

La photo courant générée dans la ZCE est exprimé par [38]

$$J_g = qf(1-R)\exp(-\alpha_1x_1)[(1-\exp(-\alpha_1w_1)) + \exp(-\alpha_1w_1)(1-\exp(-\alpha_2w_2))](\text{II-30})$$

#### II.6.4.4. Le photo courant dans la région fortement dopée $P^+$

La photo courant générée dans la région  $PP^+$  est donné par la relation suivante [45].

$$J_{bsf} = -\left(\frac{qD_{bsf}}{L_{bsf}}\right) \left[ \frac{N_a+N_e}{n_{bsf}} - n_p \right] + \cosh\left(\frac{w_{bsf}}{L_{bsf}}\right)(\text{II-31})$$

Avec :

$N_a$ : La concentration d'accepteurs dans la région P.

$n_p$ : La concentration d'électrons dans la région P.

$N_e$ : La concentration d'électrons à  $x=H-W_{bsf}$ .

#### II.6.5. La vitesse de recombinaison effective à la face arrière

La vitesse de recombinaison effective à la face arrière de cellule solaire bifaciale BSF, illuminée par sa face arrière,  $S_{eff}$  est donnée par l'équation suivante [43]:

$$S_{eff} = \frac{N_a}{N_{bsf}} \frac{D_{bsf}}{l_{bsf}} \frac{\frac{s_n L_{bsf}}{D_{bsf}} + th\left(\frac{w_{bsf}}{L_{bsf}}\right)}{1 + \frac{s_n L_{bsf}}{D_{bsf}} th\left(\frac{w_{bsf}}{l_{bsf}}\right)} \quad (\text{II-32})$$

## II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la base théorique d'une cellule solaire bifaciale avec un champ de surface arrière BSF.

Nous avons présenté la structure de la cellule solaire bifaciale BSF ainsi que son principe de fonctionnement. Par la suite, nous avons expliqué la modélisation de cette cellule en explicitant les démarches de calcul des différentes courantes photos générés dans chaque région (l'émetteur, la base, la ZCE et la couche sur dopée p+). Nous avons également expliqué la démarche relative à l'estimation de l'efficacité quantique interne (The infernal quantum efficiency, IQE) et la puissance délivrée avec un éclairage par la face avant.

Les paramètres essentiels de la cellule (la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , le courant de court-circuit  $I_{cc}$ , l'efficacité quantique interne IQE, le facteur de forme FF et le rendement  $\eta$ ) seront calculés dans les prochains chapitres via notre code de calcul.

---

## CHAPITRE III

# **RÉSULTATS DE LA SIMULATION ET DISCUSSIONS**

---

### *III.1. Introduction*

La simulation numérique est couramment utilisée pour l'optimisation des cellules solaires. Pour valider les modèles physiques présentés dans les chapitres précédents pour décrire les cellules solaires: la cellule solaire conventionnelle et la cellule solaire BSF. Nous avons pris comme exemple d'application la structure en couches minces CdS/CIGS.

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats obtenus lors de la simulation des caractéristiques de la cellule CdS/CIGS (conventionnelle et bifaciale), ces résultats ont été obtenus suite à la résolution des équations de continuité et des courants. En effet le calcul de ce photo-courant va nous permettre de déterminer les caractéristiques électriques de sortie de la cellule photovoltaïque qu'elle est caractérisée essentiellement par sa tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , son courant court-circuit  $I_{sc}$  et son facteur de forme et d'essayer d'optimiser leurs performances.

Cependant la non linéarité de l'équation de sortie  $I(V)$  rends inévitable sa résolution numérique, nécessitant de ce fait un intense outil informatique provoqué par le logiciel MATLAB. Nous présenterons également des résultats qui mettent en évidence l'importance de ce type des cellules solaires. Lors de cette simulation nous allons comparer nos résultats par d'autres résultats expérimentaux obtenus par le NREL (USA National Renewable Energy Laboratory).

### *III.2. Aperçu sur la cellule solaire en couches minces CdS/CIGS*

Le di sélénure de cuivre et d'indium  $CuInSe_2$  dans sa structure chalcopyrite est un semi-conducteur prometteur pour les applications photovoltaïques, ce qui dû à ses caractéristiques, notamment son coefficient d'absorption qui est très élevé dans la gamme du spectre solaire et ses propriétés électrique et optique qui sont variables en fonction des conditions de préparation et des techniques d'élaboration. Ceci permet d'utiliser ce semi-conducteur comme matériau de base. En fait, l'introduction du gallium à la place de l'indium dans le composé  $CuInSe_2$  permet d'obtenir le CIGS et d'améliorer l'adaptation du gap à la conversion photovoltaïque.

Les composés  $Cu(In, Ga)Se_2$  sont dotés d'un fort coefficient d'absorption ( $>10^5 cm^{-1}$ ) ce qui réduit l'épaisseur de toute la cellule de 4 à 2  $\mu m$ . En plus, il a été montré que l'écart à la stoechiométrie n'altère pas leurs propriétés d'absorption, ce qui rend possible leurs utilisations sous forme de couches minces poly cristallines en

grandes surfaces et leur obtention à partir de techniques de croissance simples et non sophistiquées contrairement au cas de la croissance cristalline. C'est l'un des critères essentiels du photovoltaïque terrestre.

### III.2.1 Description générale des cellules solaires à base de CIGS

La cellule Cds/CIGS est basée sur un empilement de plusieurs couches minces sur un substrat de verre ou flexible, ne dépassant pas quelques microns d'épaisseur au total. Elle est composée :

- Une électrode métallique arrière en Molybdène déposée sur substrat de verre,
- Une couche absorbante Cu (In, Ga)  $Se_2$  de type p et a un fort coefficient d'absorption (de l'ordre de  $10^5 cm^{-1}$ ) dans le domaine du visible. Le gap est par conséquent direct mais avec une valeur optimale de 1,5 eV. Sa conductivité doit être de l'ordre de  $1$  à  $10^{-2}(\Omega.cm)^{-1}$
- Une couche tampon (Cds, ZnO) d'épaisseur de 10 à 100 nm chacune, assurant respectivement la jonction et l'absence de courts circuits,
- Une fenêtre optique de ZnO dopé aluminium (ZnO:Al) qui doit combiner deux propriétés essentielles, à savoir la conductivité électrique et la transparence optique. la transmission des couches doit être supérieure à 80 % et la conductivité supérieure à  $10^4(\Omega.cm)^{-1}$ .
- Une grille métallique avant 'aluminium-nickel' nécessaire pour la collecte de courant.

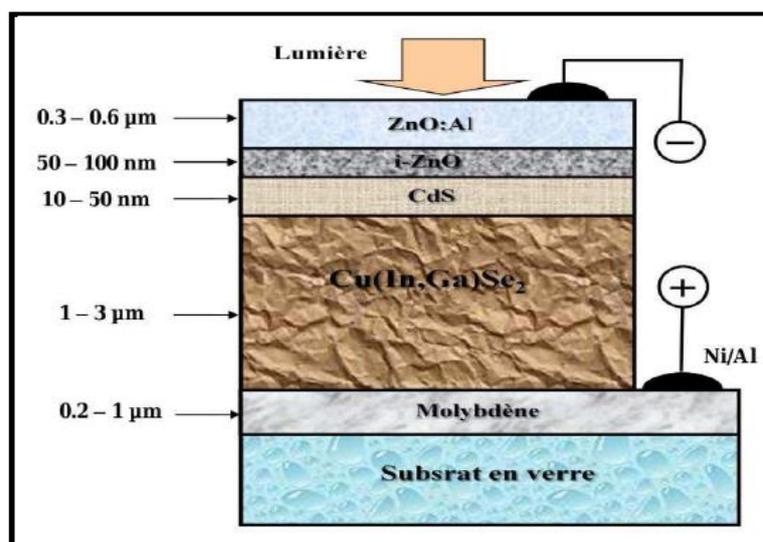


Figure (III.1) : Structure de la cellule solaire à base de CIGS [44].

III.2.2. La cellule solaire bifaciale à base du CIGS

Dans le cas de la cellule bifaciale (Fig. (III.2)), on peut éclairer la cellule des deux faces. Les performances pour un éclairage à partir de la face arrière, sont moins bonnes que celles obtenues en éclairant à travers la face avant.

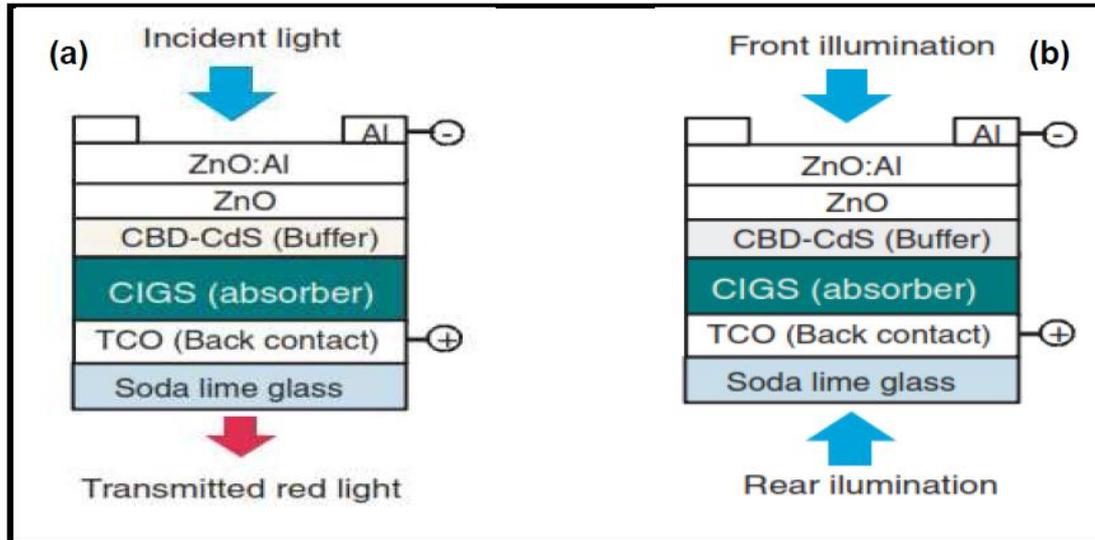


Figure (III.2) : Cellule solaire : (a) semi-transparente et (b) bifaciale  
À base de CIGS [45].

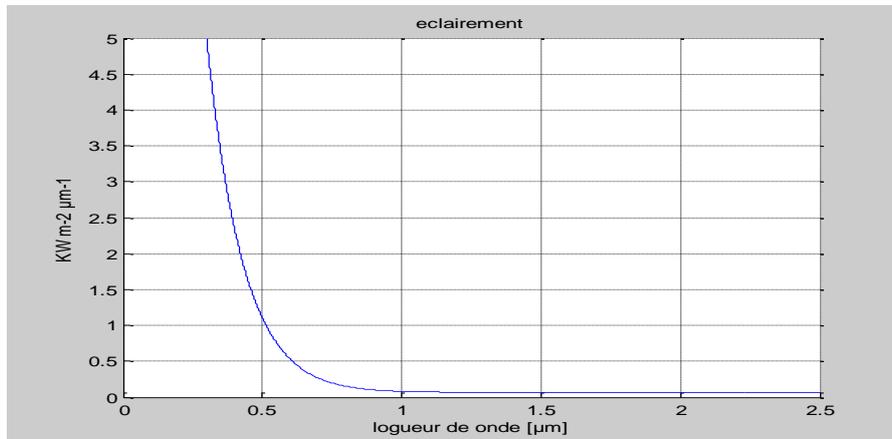
Par la suite le tableau (III.1) montre les performances des cellules photovoltaïques en couches minces à base de matériau CIGS utilisées durant la simulation :

Tableau (III.1) : Les paramètres de la cellule CdS/CIGS utilisées durant la simulation [46]

parameter	Matériau	CdS	CIGS	P+
Epaisseur de la couche, W (nm), paramètre de base		50	3000	
Affinity electronic, $\chi$ (eV)		4.4	4.5	
Permittivity relative, $\epsilon_r$		10	13.6	
$\mu_n$ (Cm <sup>2</sup> / V.s)		100	100	
$\mu_p$ (Cm <sup>2</sup> / V.s)		25	25	

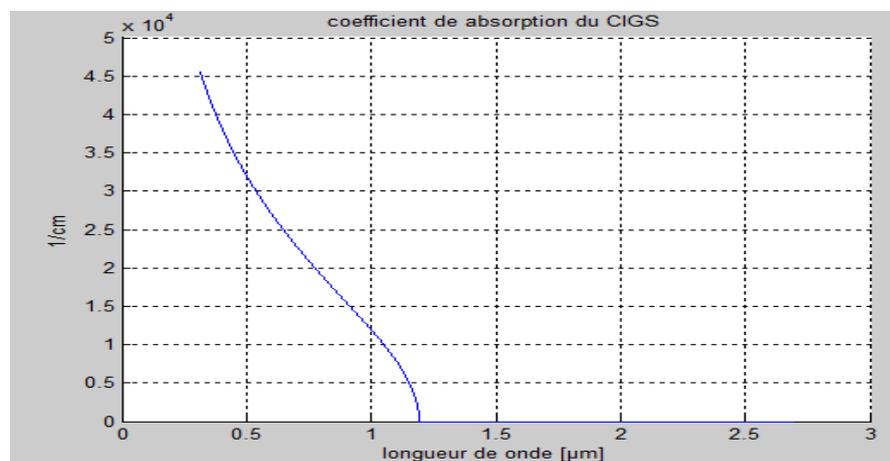
Durée de vie des électrons, $\tau_n(s)$	---	<b>22</b> $\times 10^{-19}$	
Durée de vie des trous, $\tau_p(s)$	<b><math>10^{-13}</math></b>	---	
Concentration des atomes accepteurs, $N_a$ ( $\text{cm}^{-3}$ ), paramètre de base	---	<b><math>2 \times 10^{16}</math></b>	
Concentration des atomes donneurs $N_d$ ( $\text{cm}^{-3}$ ), paramètre de base	<b><math>10^{17}</math></b>	---	
Énergie du gap, $E_g$ (eV), paramètre de base	<b>2.42</b>	<b>1.15</b>	
Densité effective des états dans la bande de conduction $N_c$ ( $\text{cm}^{-3}$ ),	<b><math>2.2 \times 10^{18}</math></b>	<b><math>2.2 \times 10^{18}</math></b>	
Densité effective des états dans la bande de valence $N_v$ ( $\text{cm}^{-3}$ ),	<b><math>1.8 \times 10^{19}</math></b>	<b><math>1.8 \times 10^{19}</math></b>	
Vitesse de recombinaison des électrons à la surface arrière $S_n$ (cm/s)	---	<b><math>10^7</math></b>	
Vitesse de recombinaison des trous à la surface avant $S_p$ (cm/s)	<b><math>10^7</math></b>	----	
Coefficient de réflexion, $R(\lambda)$	<b>0.05</b>		
Factor de quality, $Q$	<b>1.14</b>		
La temperature $T$ (K)	<b>300</b>		
L'épaisseur de la couche P+ $W_{bsf}$ ( $\mu\text{m}$ )			<b>0.7</b>
Le dopage de la couche P+ $N_{bsf}$ ( $\text{cm}^{-3}$ )			<b><math>8 \times 10^{18}</math></b>

### III.3 Simulation des caractéristiques de la cellule CdS/CIGS conventionnelle



**Figure (III.3):** Distribution de l'éclairement incidente en fonction de  
La longueur d'onde

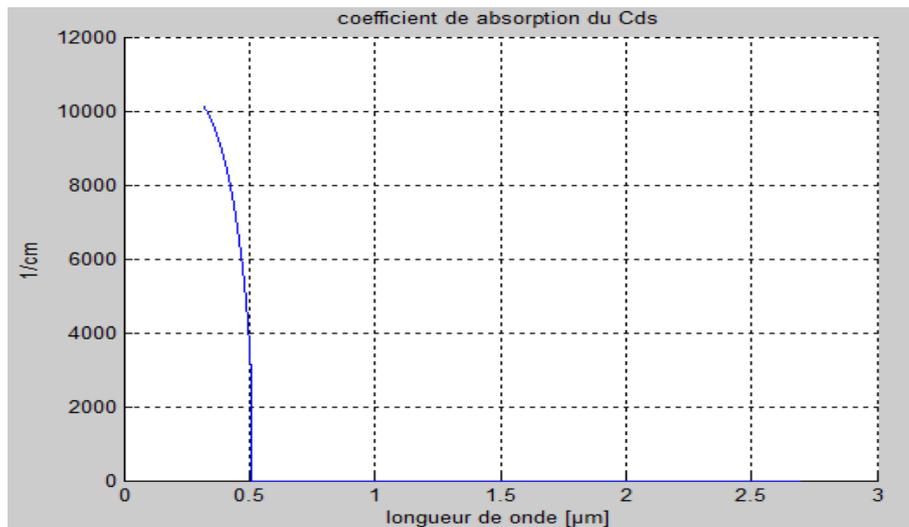
Cette figure représente l'éclairement solaire incident au sol en fonction de La longueur d'onde. On voit que le nombre des photons diminue exponentiellement, elle a la même allure de variation la distribution spectrale du rayonnement solaire. La cellule est très sensible aux photons incidents dans l'intervalle 0.3 μm à 0.75 μm, au-delà l'éclairement devient faible.



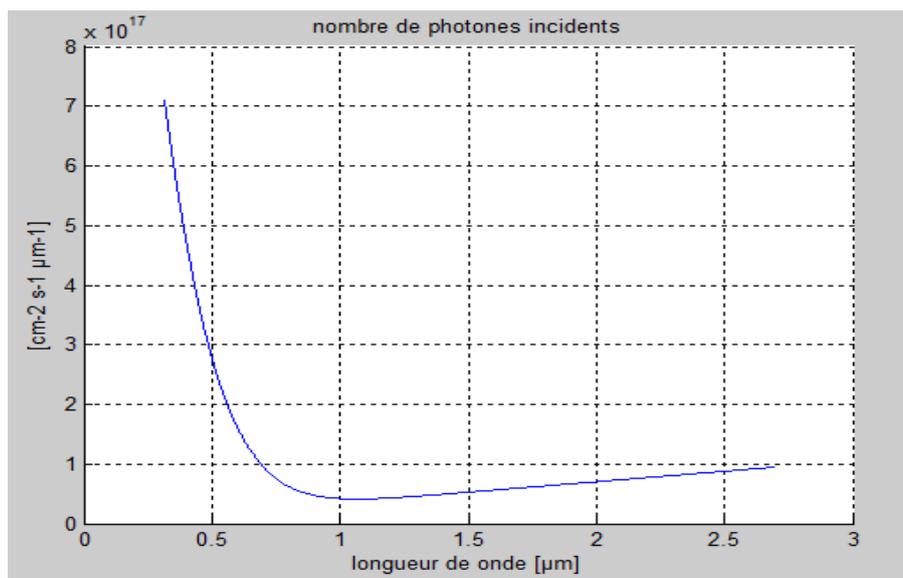
**Figure (III.4):** Coefficient d'absorption du CIGS en fonction de  
La longueur d'onde

Il est clair sur les figures (III.4) et (III.5) qui représente le coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde que, à cause de leur faible gap optique par rapport au CdS, le CIGS absorbe plus de photons que le CdS.

.



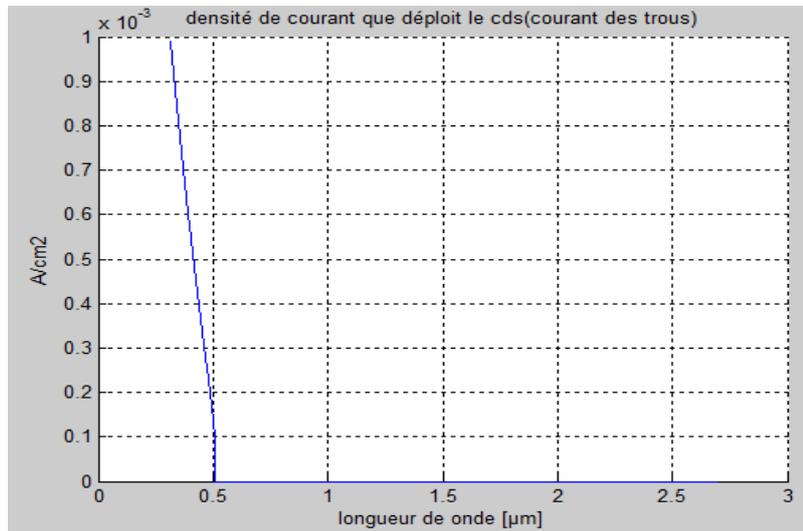
*Figure (III.5): Coefficient d'absorption du CdS en fonction de la longueur d'onde*



*Figure (III.6): Nombre de photons incidents en fonction de la longueur d'onde*

Cette figure représente le flux des photons incidents, c'est le nombre des photons qui tombent sur une surface par unité de temps. On voit que le nombre des photons diminue exponentiellement et cela est simplement expliqué par les propriétés de la lumière qu'elle est caractérisée par la nature ondulatoire/corpusculaire. La courbe a la même allure de variation la distribution spectrale du rayonnement solaire. D'un autre terme, le nombre (la quantité) signifie l'aspect corpusculaire, alors que la

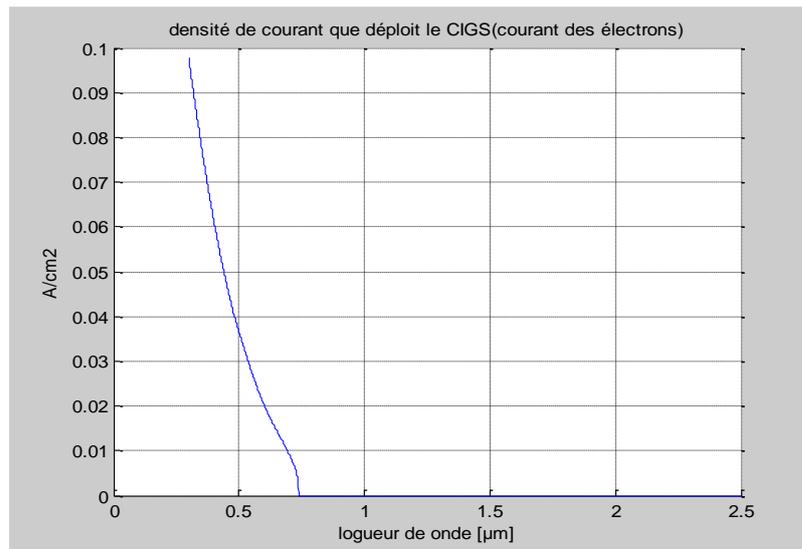
forme de ce graphe est expliquée par l'aspect ondulatoire de la lumière, donc plus que la longueur d'onde augmente plus le nombre des photons devient faible. Ce résultat nous permet de commencer la simulation de la cellule photovoltaïque à base du CIGS pour tirer les performances de cette cellule (le courant court-circuit  $I_{sc}$ , la tension  $V_{co}$  et après le rendement et le facteur de remplissage).



**Figure (III.7):** Densité du courant que déploie le CdS (courant des trous) en fonction de la longueur d'onde.

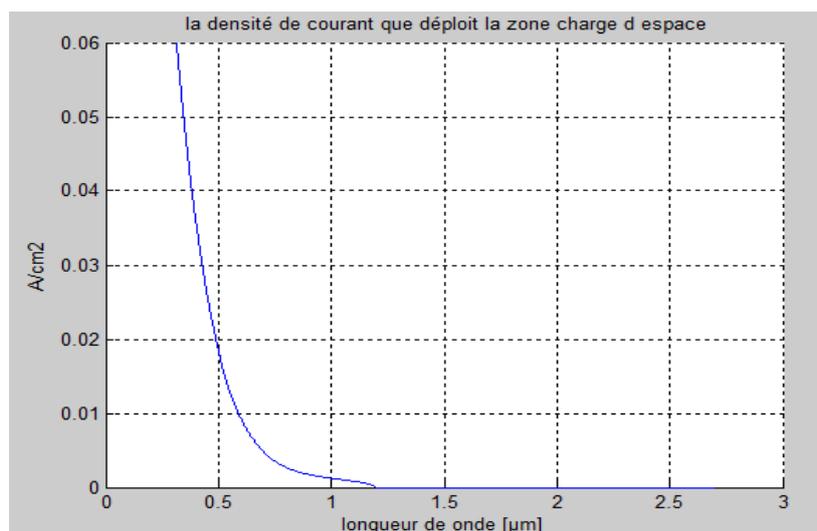
La figure (III.7) montre la variation de la densité du courant des trous dans l'émetteur CdS. Le courant de CdS munis des excitations énergétiques (le flux incident) varie selon l'allure de la courbe du flux des photons et de coefficient d'absorption.

Nous remarquons que les valeurs de ce courant sont très faibles par rapport aux autres couches par ce qu'il présente un courant de diffusion des trous ainsi que l'épaisseur de CdS est très fin comparant à celui de la base. La nullité de la courbe à partir de la valeur de  $\lambda=0.5 \mu_m$  confirme que ce courant dépend réellement de coefficient d'absorption.



*Figure (III.8): Densité du courant que déploie le CIGS (courant des électrons) en fonction de la longueur d'onde.*

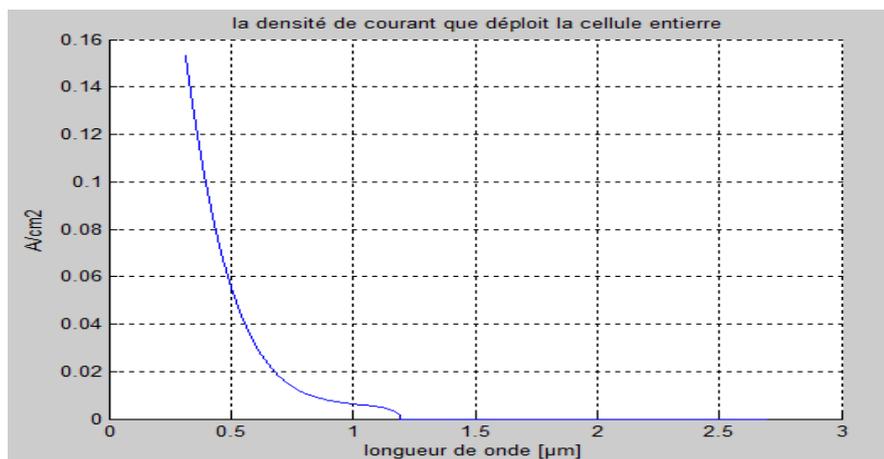
Les figures (III.5), (III. 8) successivement représentent le coefficient d'absorption et la photo courant délivrer par la base CIGS. En effet, le quaternaire CIGS présente une absorption importante. C'est l'avantage que représente ce semi-conducteur pour les cellules photovoltaïques à base du CIGS, car si on compare la densité de courant qu'il déploie avec celle que déploie le CdS on trouve que le CIGS déploie une densité largement très grande en plus l'avantage que lui donne son large domaine d'absorption ainsi son très grand coefficient d'absorption.



*Figure (III.9): Densité du courant que déploie la ZCE en fonction de La longueur d'onde.*

La figure (III.9) présente la photo courant délivrer dans la ZCE. Cette figure montre clairement que la photo génération dans cette zone donne un courant important pour une épaisseur très petite comparant avec celle de la base, cela est à cause du champ E à l'intérieur de cette zone.

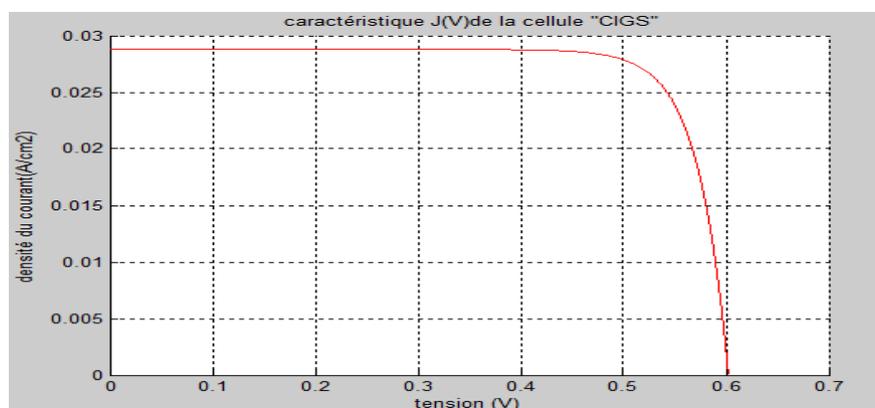
L'allure de cette courbe est identique à celle de la couche CIGS, cela signifie la prédominance de la densité de la photo courant de CIGS par rapport à celle de CdS.



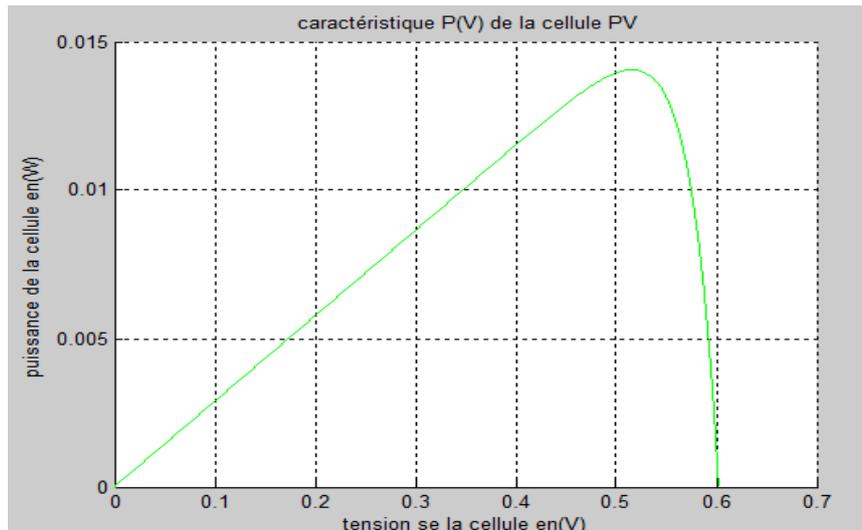
**Figure (III.10):** La densité du courant total que délivre la cellule entière en fonction de la longueur d'onde.

Cette figure (III.10) représente la variation de la photo courant total en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$  qui est la somme des trois courants. On constate que le CIGS renforce le courant total de la cellule, la photo courant de diffusion de la base s'accumule avec la courant photo généré dans la ZCE donnant une augmentation du courant total avec un pic de 0.158 mA.

### III.3.1 Présentation des caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ :



**Figure (III.11):** La caractéristique de sortie  $I(V)$  de la cellule CdS/CIGS.



**Figure (III.12):** La puissance  $P(V)$  de la cellule CdS/CIGS en fonction de La tension.

Les figures (III. 11, 12) représentent la caractéristique  $I(V)$ , ainsi que la caractéristique  $P(V)$ , nous avons des bons résultats avec MPP (Maximum Power Point) arrive à 0.0148 W.

Pour le courant du court-circuit, la tension du circuit-ouvert, le rendement et le facteur de forme, le tableau (III.2) résume ces résultats. Ces résultats sont comparables avec les résultats expérimentaux de NREL (national renewable energy laboratory from the USA département of énergie).

**Tableau (III.2) :** Caractéristiques de sortie de notre simulation de la cellule PV à base du CIGS.

paramètres	$I_{sc} (A/cm^2)$	$(V)V_{co}$	Rendement $\eta(\%)$	FF(%)
Cellule conventionnelle	0.0288	0.6022	19.3087	81.0869

**Tableau (III.3)** Résultats des caractéristiques de sortie publier par NREL (National Renewable Energy Laboratory From The USA Département Of Energie) [47].

Dispositive Nom	Secateurs (cm2)	$\zeta(\%)$	VCO(system mv)	FF (%)	$J_{sc}(mAcm2)$	Fonctionnarise Mea surement
M2992-11#5	0.419	19.9	690	81.2	35.4	Oui
C2183-12#5	0.416	19.9	697	80.0	35.7	Oui
C2219-21#7	0.417	19.8	714	79.1	35.1	Oui

M2992-11#4	0.419	19.7	690	81.2	35.1	Oui
M2992-11#6	0.419	19.7	690	81.1	35.3	Oui
C2183-12#4	0.417	19.7	695	80.0	35.5	Oui
C2200-22#1	0.420	19.6	725	80.6	33.6	Oui
C2213-22#2	0.994	19.2	716	80.4	33.4	Oui

Notre cellule donne une bonne rentabilité par un rendement de conversion intéressant  $\eta=19.3087\%$ . Pour la caractéristique P(V) nous avons obtenu un MPP (Maximum Power Point) qui a la valeur de 0.0148 W.

### III.4 Simulation des caractéristiques de la cellule CdS/CIGS bifaciale

#### III.4.1 Présentation du photo-courant

Dans cette partie on essaye de présenter les caractéristiques de la cellule CdS/CIGS BSF selon le modèle présenté dans le chapitre 2. Ces résultats ont été obtenus suite à la résolution des équations de continuité et des courants. En effet le calcul de ce photo-courant va nous permettre de déterminer ces caractéristiques.

L'ajout d'un champ électrique à la surface arrière au voisinage du contact ohmique fait, que les porteurs minoritaires vont être repoussés vers la zone de charge d'espace pour une meilleure collection.

Donc la densité totale du photo-courant produit par la cellule bifaciale  $J_{ph}$  est égale à la somme des photos courantes générées dans chaque région de la cellule:

$$J_{ph} = J_n + J_P + J_{dr} + J_{bsf}$$

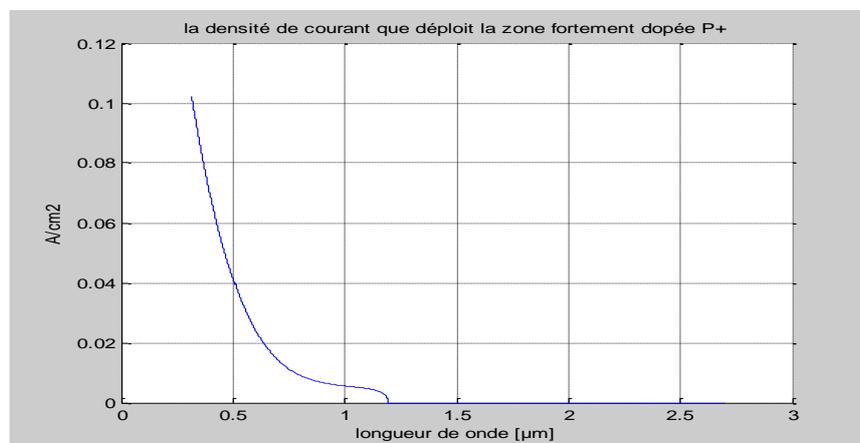
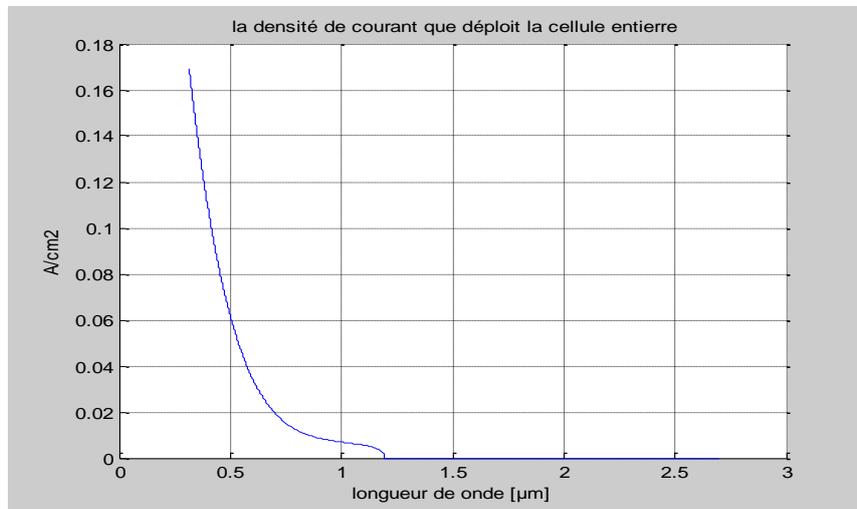


Figure (III.13): Densité du courant que déploie la couche arrière  $P^+$  en fonction De la longueur d'onde.

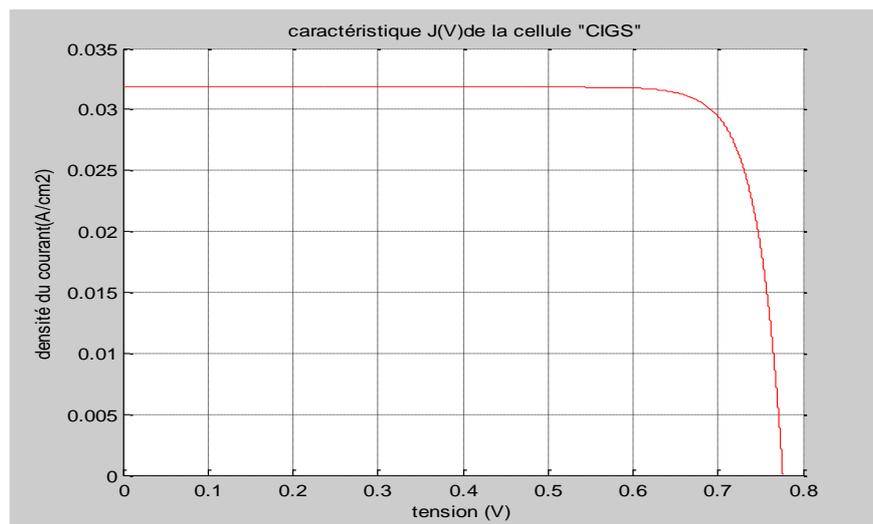
La figure (III.13) présente le photocourant délivré dans la couche arrière P<sup>+</sup>. Cette figure montre clairement que la couche fortement dopée introduit un courant important pour une épaisseur très petite comparant de la base.



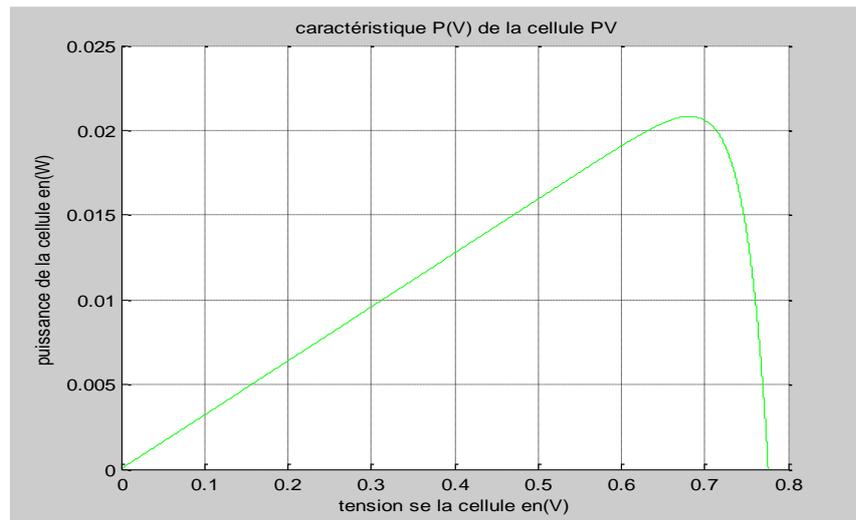
**Figure (III.14):** La densité du courant total que délivre la cellule entiere en fonction de la longueur d'onde.

Cette figure (III.14) représente la variation du photocourant total en fonction de longueur d'onde  $\lambda$  qui est la somme des quatre courants. On constate que le la couche BSF renforce le courant total de la cellule.

#### III.4.2 Présentation des caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ :



**Figure (III.15):** La caractéristique de sortie  $I(V)$  de la cellule CdS/CIGS BSF.



**Figure (III.16):** La puissance  $P(V)$  de la cellule CdS/CIGS BSF en fonction de la tension.

D'après les figures (III.15, 16) on constate une augmentation pour les caractéristiques de sortie de la cellule à cause le photocourant de la zone fortement dopée P+. Le tableau(III.4) résume ces résultats, nous arrivons des bons résultats avec un  $I_{SC}=31.8 \text{ mA/cm}^2$ , un MPP (Maximum Power Point) de 0.0216 W et un rendement qui arrive à 22.91%.

**Tableau (III.4) :** Caractéristiques de sortie de la cellule CdS/CIGS bifaciale

paramètres	$I_{sc} (A/cm^2)$	$V_{co} (V)$	Rendement $\eta(\%)$	FF(%)
Cellule bifaciale	0.0318	0.6404	22.9135	81.9045

### III.5 Etude comparative entre la cellule solaire CdS/CIGS conventionnelle et bifaciale

Les résultats sur les figures (III.11) et (III.15), les figures (III.12) et (III.16) respectivement, ainsi les caractéristiques de sortie des deux cellules sur le tableau (III.5) montrent clairement que les valeurs fournies par la cellule bifaciale mieux que celles-ci fournies par la cellule solaire conventionnelle.

*Tableau (III.5) : Résultats de comparaisons entre la cellule conventionnelle et cellule bifaciale*

paramètres	$I_{sc}$ (A/cm <sup>2</sup> )	$V_{co}$ (V)	Rendement $\eta$ (%)	FF(%)
Cellule bifaciale	0.0318	0.6404	22.9135	81.9045
Cellule conventionnelle	0.0288	0.6022	19.3087	81.0869

Ainsi le fonctionnement de la cellule solaire bifaciale BSF est pareille que celui de la cellule solaire conventionnelle. Cependant, la cellule bifaciale collecte la lumière par ses deux faces avant et arrière. Donc, le courant photo généré total est constitué par la somme des deux courants photos générés, qui sont dus à l'éclairement de la cellule par la face avant et par la face arrière, grâce à la participation de la couche fortement dopée par un photocourant des électrons et elle minimise aussi les recombinaisons au niveau la face arrière.

### ***III.6 Influence des différents paramètres sur les caractéristiques de la cellule solaire bifaciale***

Dans cette partie de la modélisation, nous avons étudié l'effet du dopage, de l'épaisseur et de gap optique sur les caractéristiques de la cellule solaire bifaciale.

-L'émetteur: dopé type n  $N_{a.} = 10^{17}/\text{cm}^3$  et d'épaisseur  $X_j. = 50 \text{ nm}$ .

-La base: dopée type p  $N_a = 2 \times 10^{16}/\text{cm}^3$  et d'épaisseur  $W_b = 1.5 \mu\text{m}$ .

La couche BSF: fortement dopée type p  $N_{BSF} = 8 \times 10^{18}/\text{cm}^3$  et d'épaisseur  $W_{BSF} = 0.7 \mu\text{m}$ .

Nous rappelons que tous les autres paramètres de la cellule sont maintenus fixes

#### ***III.6.1 Influence des paramètres de l'émetteur***

##### ***III.6.1.1 L'influence de $X_j$ (l'épaisseur de l'émetteur)***

Pour étudier l'impact de l'épaisseur de l'émetteur, sur les paramètres de la cellule bifaciale, nous avons fixé les épaisseurs de la base et de la BSF et nous avons fait varier celle de l'émetteur. Le tableau suivant montre la variation des caractéristiques de la cellule solaire bifaciale en fonction de  $X_j$ .

**Tableau (III.6):** Résultats de l'influence de l'épaisseur de l'émetteur ( $X_j$ ) sur les caractéristiques de la cellule solaire bifaciale

Epaisseur / paramètres	$I_{sc}$ (A/cm <sup>2</sup> )	$V_{co}$ (V)	$\eta$ (%)	FF(%)
$X_j=0.005 * 10^{-4}$ m	0.0318	0.6405	22.9138	81.9051
$X_j=0.01 * 10^{-4}$ m	0.0318	0.6404	22.9135	81.9045
$X_j=0.012 * 10^{-4}$ m	0.0318	0.6404	22.9037	81.9043

Les résultats mentionnés dans le tableau montrent que le rendement et le facteur de qualité diminuent en augmentant l'épaisseur de l'émetteur. Cette diminution est liée au fait que l'augmentation de l'épaisseur de la couche émettrice l'opacifie (la couche devient opaque par rapport à la lumière incidente), c'est-à-dire que la pénétration de la lumière dans la base sera de plus en plus faible. Ceci diminue le nombre de porteurs créés dans la base. Cependant pour les grandes épaisseurs de l'émetteur, les paires générées près de la surface par des photons de faibles longueurs d'onde ne seront pas utilisables, ce qui limite la réponse de la cellule photovoltaïque et par conséquent la diminution du rendement et de la puissance délivrée par la cellule.

### III.6.1.2L'influence de $N_d$ (le dopage de l'émetteur)

Pour étudier l'influence du dopage de l'émetteur sur les différents paramètres de la cellule solaire bifaciale, nous avons varié le niveau du dopage et nous avons fixé ceux de la base et de la BSF. Les résultats obtenus, par notre code de calcul sont montrés par le tableau ci-dessous.

**Tableau (III.7):** Résultats de l'influence de dopage de l'émetteur ( $N_d$ ) sur les caractéristiques de la cellule solaire bifaciale

dopage / paramètres	$I_{sc}$ (A/cm <sup>2</sup> )	$V_{co}$ (V)	$\eta$ (%)	FF(%)
$N_d=10^{17}$ cm <sup>-3</sup>	0.0318	0.6405	22.9138	81.9051
$N_d=10^{18}$ cm <sup>-3</sup>	0.0318	0.6405	22.9138	81.9051

$N_d=10^{18}\text{cm}^{-3}$	0.0318	0.6405	22.9138	81.9051
-----------------------------	--------	--------	---------	---------

Le tableau (III.7) montre que, le dopage de la couche émettrice n'a aucune influence sur les caractéristiques de sorties de la cellule solaire. Cela revient à la faible épaisseur de l'émetteur.

### III.6.2 L'Influence de l'épaisseur de la base

L'optimisation de la géométrie de la base est un facteur important qui permet de définir les meilleures caractéristiques de la cellule solaire. Pour cette raison nous avons varié l'épaisseur de la base et nous avons fixé les épaisseurs de l'émetteur et de la BSF. Le tableau suivant représente les variations des caractéristiques de la cellule solaire bifaciale en fonction de ce paramètre.

**Tableau (III.8):** Résultats de l'influence de l'épaisseur de la base ( $W_b$ ) sur les caractéristiques de la cellule solaire bifaciale

<b>Epaisseur</b> <b>paramètres</b>	$W_b=1.5 * 10^{-4} \text{ m}$	$W_b=2 * 10^{-4} \text{ m}$	$W_b=2.5 * 10^{-4} \text{ m}$
$I_{sc}$	0.0318	0.0322	0.03441
$V_{co}$	0.6405	0.6459	0.6475
<b>Rendement %</b>	22.9381	23.1819	23.5730
<b>FF</b>	81.9051	82.0143	82.0466

Le tableau montre les variations du courant de court circuit, la tension du circuit ouvert, le rendement et le facteur de qualité. Elles montrent, que tous ces paramètres augmentent avec l'augmentation de l'épaisseur de la base. Ceci est expliqué par l'élévation du nombre de porteurs de charges générés dans cette région, car les photons qui ont des énergies importantes seront absorbés près de la surface de la cellule pour des faibles longueurs d'ondes. Cependant, les photons qui ont des énergies moins importantes (longueur d'onde plus importante) seront absorbés loin de la surface. Ainsi, plus l'épaisseur de la base est épaisse plus on aura la possibilité de générer des porteurs qui participent à l'amélioration du photocourant. Mais il ne faut pas la prendre d'une façon absolue, elle joue sur le rapport coût/épaisseur de la cellule.

### III.6.3 Conclusion de cette étape

Avec cette présentation des influences des paramètres des couches de la cellule sur les caractéristiques de sorties pour tirer les valeurs optimisées on a constaté :

-Qu'il faut faire étaler l'étude sur des intervalles de variation continus et non discrets pour bien adapter les valeurs optimaux.

-Ainsi il faut étudier la variation de chaque caractéristique de sortie en fonction des différents paramètres de la cellule pour arriver à une optimisation de cellule bifaciale.-

Et cela on le prend comme une prévenir de cette étude.

### III.7 Conclusion

Dans ce chapitre qui est pour but d'obtenir une vision globale sur les caractéristiques des cellules solaires: la cellule solaire conventionnelle et la cellule solaire bifaciale le plus, et qu'on a pris comme exemple d'application la structure en couches minces CdS/CIGS. On a présenté les résultats sous forme des graphes et des tableaux pour les mettre au plus claire que possible. Les résultats obtenus ont montré que les performances de la cellule sont contrôlées par les paramètres de chaque région de la cellule, qui sont eux même fortement liés à la face éclairée.

D'après notre analyse on a trouvé que :

- La prédominance de la densité de la photo courant de CIGS par rapport à celle de CdS.
- La photo génération dans la zone ZCE donne un courant important pour une épaisseur très petite comparant avec celle de la base.
- Le courant total de la cellule est dominé par;le photo courant de diffusion de la base qui s'accumule avec le courant photo généré dans la ZCE donnant une augmentation du courant total.
- Le fonctionnement de la cellule solaire bifaciale BSF est pareille que celui de la cellule solaire conventionnelle avec l'ajout d'un champ électrique à la surface arrière au voisinage du contact ohmique (l'effet de la couche fortement dopé P+).
- La couche fortement dopé  $P^+(w_{bsf})$  renforce laphoto courant total de la cellule bifaciale qui passe de la valeur **28.8** mA/cm<sup>2</sup> à la valeur de **31.8** mA/cm<sup>2</sup>.

- Les résultats obtenus montrent clairement que les valeurs des output fournies par la cellule bifaciale sont mieux que celles-ci fournies par la cellule solaire conventionnelle avec un rendement qui arrive à **22.9135 %**.

### Conclusion générale

Le photovoltaïque est aujourd'hui une réalité industrielle, depuis la fin des années 90, ce secteur connaît une croissance très forte.

Dans le cadre de notre travail l'étude est basée sur l'analyse d'une modélisation pour décrire les cellules solaires: la cellule solaire conventionnelle et la cellule solaire BSF. Nous avons pris comme exemple d'application la structure en couches minces CdS/CIGS.

On a entamé une étude pour présenter les modèles électrique et mathématique qui régissent les paramètres de la cellule photovoltaïque comme le courant de saturation, la largeur de la ZCE et  $V_d$ , ces équations modélisent aussi la densité du photo-courant qui sort de chacune des quatre parties de la cellule (l'émetteur, la base, la ZCE et la couche P+) et qui est obtenus suite à la résolution des équations de continuité et des courants. En effet le calcul de ce photo-courant va nous permettre de déterminer les caractéristiques électriques de sortie de la cellule photovoltaïque qu'elle est caractérisée essentiellement par sa tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , son courant court-circuit  $I_{sc}$ , son facteur de forme et son rendement.

Cependant la non linéarité de l'équation de sortie  $I(V)$  rends inévitable sa résolution numérique, nécessitant de ce fait un intense outil informatique provoqué par le logiciel MATLAB. Les résultats obtenus ont montré que les performances de la cellule sont contrôlées par les paramètres de chaque région de la cellule, qui sont eux même fortement liés à la face éclairée.

On a simulé en premier lieux le comportement de la cellule solaire conventionnelle en fonction de la longueur d'onde des photons incidents sur la cellule photovoltaïque avec une puissance de  $1000W/m^2$  puis la cellule solaire BSF. Les principaux résultats obtenus montrent que :

- La prédominance de la densité du photo courant de CIGS par rapport à celle de CdS.
- La photo génération dans la zone ZCE donne un courant important pour une épaisseur très petite comparant avec celle de la base.
- Le courant total de la cellule est dominé par; le photo courant de diffusion de la base qui s'accumule avec le courant photo généré dans la ZCE donnant une

augmentation du courant total.

- Le fonctionnement de la cellule solaire bifaciale BSF est pareille que celui de la cellule solaire conventionnelle avec l'ajout d'un champ électrique à la surface arrière au voisinage du contact ohmique (l'effet de la couche fortement dopé P+).
- La couche fortement dopé P+(Wbsf) renforce le photocourant total de la cellule bifaciale qui passe de la valeur **28.8** mA/cm<sup>2</sup> à la valeur de **31.8** mA/cm<sup>2</sup>.
- Les résultats obtenus montrent clairement que les valeurs des output fournies par la cellule bifaciale sont mieux que celles-ci fournies par la cellule solaire conventionnelle avec un rendement qui arrive à **22.9135** %.

### *Perspective:*

L'étude de l'influence des paramètres des couches de la cellule sur les caractéristiques de sorties est insuffisance pour tirer les valeurs optimales. On a signalé qu'il faut:

- S'étaler l'étude sur des intervalles de variation continus et non discrets pour bien adapter les valeurs optimaux.
- Etudier la variation de chaque caractéristique de sortie en fonction des différents paramètres de la cellule pour arriver à une optimisation de cellule bifaciale.
- Et cela on le prend comme une perspective de ce travail.

## Bibliographie

---

- [1] Mallem, «Simulation des cellules solaires hétérojonction Si-SiGean SILVACO», mémoire de magister, 2014.thesis.univ-biskra.dz
- [2] B. Garcia Jr., «Indium Gallium Nitride Multi Junction Solaire Cellule Simulation Usine Silva Co Atlas», mémoire de master, Juin 2007. University circle Monterey, California USA 93943
- [3] R. Legros, « les semi-conducteurs, Physique des semi-conducteurs Technologie-Diodes », Eyrolles 1974.
- [4] Souici Fatma-Zohra, Modélisation d'une cellule solaire en couche mince à base de Cuivre Indium Sélénium (CuInSe<sub>2</sub>) ; 2009. Univ-ouragla.dz
- [5] F. Bouraba, «Etude D'une LED à base d'un InGaN pour l'émission de la lumière blanche », mémoire de magister, 2012. Univ-Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
- [6] M. Mohammadi, « Etude et simulation de cellules photovoltaïques à contacts arrière inter digités sous environnement Silvaco », mémoire de magister, 2012. Univ-tlemcen.dz
- [7] H. Bencherif, « Etude et modélisation analytique d'une cellule solaire à base de Si-Ge », mémoire de magister, 2015. Univ-setif.dz
- [8] Periodic table of elements, 21 March 2007, <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/student-science-tech/>
- [9] S. Mostefa Kara, « Etude et simulation de cellules photovoltaïques à couches minces à base de CIS et CIGS », mémoire de magister, Juin 2011. Univ-Msila.dz
- [10] A. Bali, « Etude Comparative entrées Cellules Solaires de Type P+-AlGaAs/P-GaAs/N-GaAs Et Une Autre De Type N+-AlGaAs/N-GaAs/P-GaAs », Mémoire de magister, 2013. Univ-biskra.dz
- [11] J. C. Manifacier, J. Gaviot, J. P. Filard, J. Phys. E: SCI. Instrument. 9 (1976) 1002.
- [12] B. Lakehal, « Etude des propriétés électriques d'une photopile à base d'une structure Schottky », mémoire de magister, 2009. Univ-batna.dz
- [13] F. Boudjerad, « Amélioration du rendement énergétique de cellules photovoltaïques en couches minces à base de CZTS », Mémoire de master, 2013. Univ-tlemcen.dz
- [14] M. MERAD BOUDIA, « Modélisation électro-optique et optimisation des cellules solaires organiques », thèse de doctorat, 2016. Univ-usto.dz
- [15] Bailly, « Thermodynamiques : Rayonnement Bordas, 1979. fac.umc.edu.dz
- [16] S. Duchemin, N. Romain, « Caractérisations de couches minces de CuGaSe<sub>2</sub> obtenues par MOCVD », Thèse de doctorat, Science et techniques du Languedoc, Université de Montpellier II, 1999.

## Bibliographie

---

- [17] A. Laugier et Jean-Alain Roger, "Photopiles solaires du matériau au dispositif" technique et documentation paris, 1981.
- [18] A. Mahfoud, « Modélisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement », thèse de doctorat, université de Sétif 1,2015
- [19] S.M. Sze, and Kwok K. Ng, «Physics of semiconductor devices», J. Wiley and Sons, 2007
- [20] Khelifi et A. Belghachi, « Le Rôle de la Couche Fenêtre dans les Performances d'une Cellule Solaire GaAs», Rev. Energ. Ren. Vol.7(2004)13-21.Univ-usto.dz
- [21] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/antiref.html#c2>
- [22] Atlas Software for Spacecraft Power Beaming Applications», memoir de master, Juin2010.Univ-blida.dz
- [23] Chapin D.M, Fuller C.S.and Pearson G.L, «A new silicon pn junction photocell for converting solar radiation into», Electrical power J.Apple; physic, vol, 25, pp.676-677, 677, (1954).
- [24] Nahe Romain,Caractérisations de couches minces de  $\text{CuGaSe}_2$  Obtenues Par MOCVD, le 16 decembre 1999.Univ-stif.dz
- [25] : R. Legros, « les semi-conducteurs, Physique des semi-conducteurs Technologie-Diodes », Eyrolles 1974.Univ-bijaia.dz
- [26] S. QuoiZola, « Epitaxie en phase vapeur de silicium sur silicium me soporeux pour report sur substrats économiques et application photovoltaïque bas coût », thèse de doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2007
- [27] **M. Madani**, «*Réalisation Des Couches Antireflets Dans Les Cellules Solaires a Couches Minces*». Thèse de Magister, Abou-BakrBelkaid De Tlemcen. Algérie, (2006).
- [28] **T. Uematsu. Tsutsui**, «*Development of Bifacial Pv Cells For New Applications of Flat- Plate Modules*» Solar Energy Materials & Solar Cells 75 (2003) 557–566.
- [29] **M.Belhadj**.« modélisation d'un système de captage photovoltaïque », Mémoire de magistère. Université de Béchar, 2008.
- [30] [http://www.ecosources.info/dossiers/types\\_de\\_cellules\\_photovoltaïque,22/03/2017](http://www.ecosources.info/dossiers/types_de_cellules_photovoltaïque,22/03/2017).
- [31] A. Zerga "Effets de l'ajout d'une couche de  $\text{SiO}_2$  à l'interface arrière. métal/semi-conducteur sur les performances d'une cellule solaire conventionnelleà base de silicium de type n+p", 0-7803-7117-8/01/\$10.00 (C) 2001 IEEE
- [32] A. Mouhoub, « Procédés Technologiques Alternatifs de Réalisation des Photopiles Solaires au Silicium Cristallin». Rev. Energ. Ren. Vol. 4 (2001), 11-22.Univ-biskra.dz
- [33] Kränzll et R. Kopeck, «Bifacial Solar cells On Multi-crystalline Silicon With Boron BSF And Open Rear Contact» IEEE, International Solar Energy Research Centre, Allemande.

## Bibliographie

---

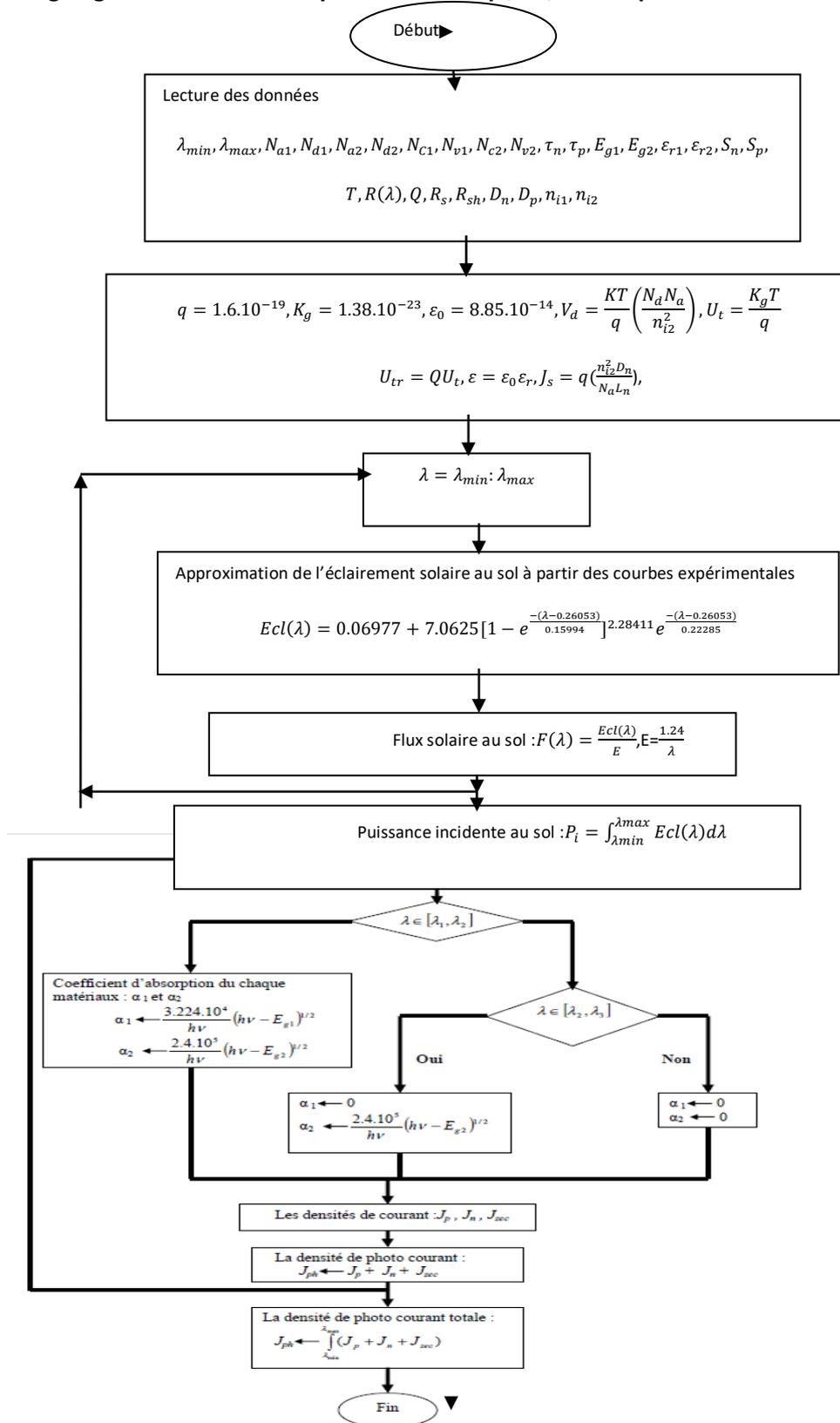
(2006) 968-971

- [34] Nahe Romain, Caractérisations de couches minces de  $\text{CuGaSe}_2$  Obtenues Par MOCVD, le 16 decembre 1999.tel.archives-ouvertes.fr
- [35] T. Uematsu. Tsutsui, «Development of Bifacial Pv Cells For New Applications of Flat-Plate Modules» Solar Energy Materials & Solar Cells 75 (2003) 557–566.
- [36] W.C. Benmoussa, S. Amara et A. Zerga, «Etude Comparative Des Modèles De La Caractéristique Courant-Tension D'une Cellule Solaire Au Silicium Monocristallin» Revue des Energies Renouvelables ICRES-07 Tlemcen, Algérie, (2007), 301 – 306.
- [37] G. Adolf, K. Joachim, V. Bernhard, «Crystalline Silicon Solar Cells». Fraunhofer Institute for Solar Energy System, Freiburg, Germany, (1998).
- [38] Site web: [www.GAMMASOLAR.COM](http://www.GAMMASOLAR.COM).
- [39] H. Salhi, H. Samet, M. Ben Amar, « Effect of BSF Layer on the Performance of a Monocrystalline Solar Cell». International Renewable Energy Congress, Sousse, Tunisie, (2010).
- [40] Moualkia, «Simulation D'une Cellule Solaire En Couches Minces A Base d'Oxyde De Zinc». Thèse de Magister, Université de Constantine. Algérie, (2010).
- [41] Site Web: [www.éditionsdumoniteur.com](http://www.éditionsdumoniteur.com).
- [42] S. BRIGAND « Les Principes de l'énergie solaire photovoltaïque », [www.lemoniteur.fr](http://www.lemoniteur.fr)
- [43] Lev Kreinin, «A Novel Method for Determining Bulk Diffusion Length in Bifacial Silicon Solar Cells» IEEE, University de Jerusalem, (2000) 248-251.
- [44] I. Bouchama, "Contribution à l'amélioration des performances des cellules solaires  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ ", Thèse de doctorat, Université de Sétif (2012).
- [45] T. Nakada, Y. Hirabayashi, T. Tokado, D. Ohmori, T. Mise, Sol. Energy 77 (2004) 739.
- [46] M. Gloeckler, A. L. Fahrenbruch, ET J. R. Sites, in Proc. 3rd World Conf. Photovoltaic Energy Conversion, vol. 1, (2003) pp. 491–494.
- [47] Characterization of 19.9%-Efficient CIGS Absorbers Conference Paper NREL/CP-520-42539 May 2008

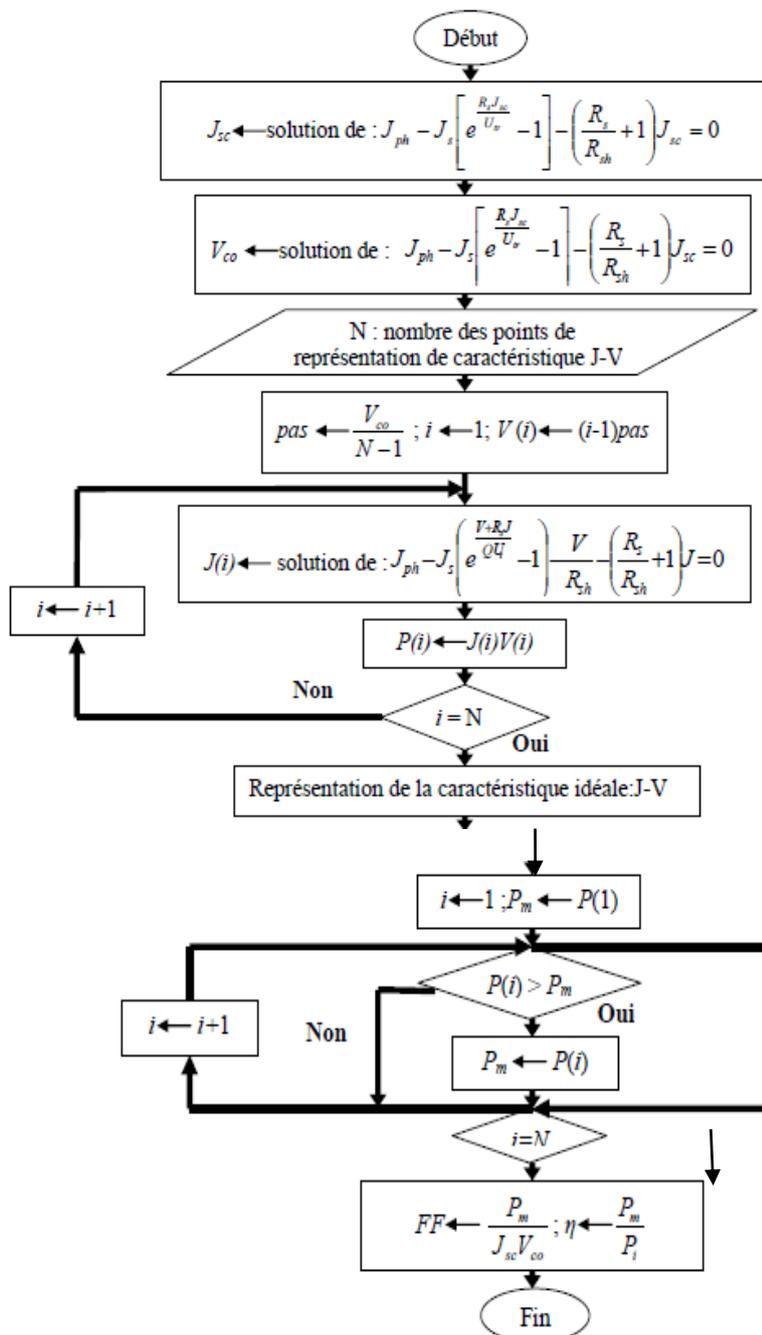
## Annexe

Organigrammes de simulation :

1 Organigramme de calcul du photo courant  $J_p$ ,  $J_n$ ,  $J_{sc}$  et  $J_{ph}$ :



## 2 Organigramme de la simulation de la caractéristique I(V) [réelle] :



## **Résumé**

Ce mémoire intitulé « Modélisation de la cellule solaire bifaciale » a l'objectif principal d'améliorer la puissance et le rendement de conversion des cellules solaires. Nous avons modélisé deux types des cellules solaires: la cellule solaire conventionnelle et la cellule solaire bifaciale BSF. Nous avons pris comme exemple d'application la structure en couches minces CdS/CIGS.

Par le biais de simulation sous le logiciel MATLAB, nous avons validé notre model pour les deux types des cellules où la première servait comme référence pour comparer la deuxième. Les résultats obtenus montrent clairement que les valeurs des output fournies par la cellule bifaciale sont mieux que celles-ci fournies par la cellule solaire conventionnelle avec un rendement qui arrive à **22.9135 %** devant **19.31%**, à cause l'ajout d'un champ électrique à la surface arrière au voisinage du contact ohmique (l'effet de la couche fortement dopé  $P^+$ ).

## **Abstract**

This thesis entitled "Modeling the bifacial solar cell" has the main objective of improving the power and conversion efficiency of solar cells. We have modeled two types of solar cells: the conventional solar cell and the BSF bifacial solar cell. We took as an example of application the CdS / CIGS thin film structure.

Through simulation under MATLAB software, we validated our model for the two types of cells where the first was used as a reference to compare the second. The results obtained clearly show that the output values provided by the bifacial cell are better than those provided by the conventional solar cell with an efficiency which arrives at 22.9135% before 19.31%, due to the addition of an electric field to the rear surface in the vicinity of the ohmic contact (the effect of the heavily doped  $P^+$  layer).

## **ملخص**

هذه الرسالة بعنوان "نمذجة الخلايا الشمسية ثنائية الوجه" تهدف بشكل رئيسي إلى تحسين الطاقة وكفاءة التحويل للخلايا الشمسية. لقد قمنا بنمذجة نوعين من الخلايا الشمسية: الخلية الشمسية التقليدية والخلية الشمسية ثنائية الوجه BSF. أخذنا كمثال لتطبيق بنية الأغشية الرقيقة CdS / CIGS من خلال المحاكاة باستخدام برنامج MATLAB، تحققنا من صحة نموذجنا لنوعي الخلايا حيث تم استخدام الأول كمرجع لمقارنة النوع الثاني. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها بوضوح أن قيم المخرجات التي توفرها الخلية ثنائية الوجه أفضل من تلك التي توفرها الخلية الشمسية التقليدية بكفاءة تصل إلى 22.9135% بعدما كانت 19.31%، وذلك بسبب إضافة مجال كهربائي إلى السطح الخلفي في محيط التلامس الأومي (تأثير طبقة  $P^+$  المحقونة بشدة).