

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA



Faculté des Nouvelles technologies de l'information et de la communication  
Département D'électronique

MEMOIRE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Electronique

Spécialité : Electronique Des systèmes

Embarques

Présenté par :

Rahmani FouadSaoud HoucineBouchaala faycel

Thème

# Etude et simulation d'une cellule solaire bi-faciale

Soutenu publiquement Le : 21/06/2021

Mr.	Rachedi Mohamed Yassine	MAA	Président	UKM Ouargla
Mr.	Benatmane Khaled	MAA	Encadreur	UKM Ouargla
Mr.	AOUF ANOAR ESSADATE	MAA	Examinatrice	UKM Ouargla

Année Universitaire : 2020 /2021

## *Remerciements*

Nous adressons nos remerciements particuliers à Allah d'abord, avant et après, car il est le peuple de grâce, ensuite nous adressons nos remerciements à ceux qui ont travaillé dur pour nous et nous ont aidés après Allah dans ce long voyage. Évaluer notre travail et je remercie tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin .....

## *Dédicaces*

Au terme de ce parcours académique, nous  
dédions cet humble travail aux parents

aux proches, aux camarades de classe

et à tous ceux qui nous ont enseigné depuis  
le primaire jusqu'à ce moment.....

## Sommaire

---

<b>sommaire</b>	<b>Page</b>
<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I: Notions générales et présentation d'un système photovoltaïque</b>	
<b>1. Introduction.....</b>	<b>3</b>
<b>2. Le rayonnement solaire.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1. Le soleil .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1.1. Caractéristiques générales.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1.2. Son énergie .....</b>	<b>4</b>
<b>2.2. Constantes d'illumination.....</b>	<b>4</b>
<b>3. La conversion photovoltaïque.....</b>	<b>6</b>
<b>3.1. L'interaction photon semi-conducteur.....</b>	<b>6</b>
<b>3.2. La cellule photovoltaïque.....</b>	<b>6</b>
<b>3.2.1. Structure et principe de fonctionnement .....</b>	<b>6</b>
<b>a. La structure.....</b>	<b>6</b>
<b>b. Principe de fonctionnement.....</b>	<b>7</b>
<b>3.2.2. Caractéristiques électriques de la cellule photovoltaïque .....</b>	<b>8</b>
<b>3.2.3. Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque .....</b>	<b>10</b>
<b>3.2.4. Réponse spectrale de la cellule photovoltaïque (RS).....</b>	<b>11</b>
<b>3.2.5. Modélisation mathématique de la cellule photovoltaïque.....</b>	<b>11</b>
<b>4. Conclusion.....</b>	<b>12</b>
<b>Chapitre II: Modélisation de la cellule solaire bifaciale</b>	
<b>1.Introduction .....</b>	<b>15</b>
<b>2. Cas de la cellule solaire BSF.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1. Procédés technologiques de réalisation de la cellule solaire BSF.....</b>	<b>15</b>
<b>3. Structure et principe de fonctionnement de la cellule solaire bifaciale BSF</b>	<b>18</b>

## Sommaire

---

3.1 Structure de la cellule solaire bifaciale BSF.....	18
3.2. Principe de fonctionnement de la cellule solaire bifaciale BSF.....	19
4. Caractéristiques électriques de la cellule solaire bifaciale BSF.....	20
5. La réflexion par albédo.....	22
6. Modélisation électrique de la cellule solaire bifaciale BSF éclairée par sa face avant.....	23
6.1. Le Photocourant généré par une cellule solaire bifaciale BSF.....	23
6.1.1. Le photocourant généré dans la région quasi-neutre P .....	24
6.1.2. Le photocourant dans la région quasi-neutre $N^+$ .....	26
6.1.3. Le photocourant dans la région de charge d'espace ZCE.....	27
6.1.4. Le photocourant dans la région fortement dopée $P^+$ .....	28
7. Modélisation électrique de la cellule solaire bifaciale BSF éclairée par sa face arrière.....	28
7.1. L'efficacité quantique interne (I.Q.E).....	28
7.2. La vitesse de recombinaison effective à la face arrière.....	28
7.3. Le courant de court circuit $I_{cc}$ .....	29
8. Conclusion.....	29
Chapitre III: Résultats de la simulation et discussions	
1. Introduction.....	32
2. Aperçu sur la cellule solaire en couches minces CdS/CIGS.....	32
2.1. Description générale des cellules solaires a base du CIGS.....	32
2.2. La cellule solaire bifaciale a base du CIGS.....	33
3. Résultats de la modélisation des cellules solaires conventionnelle et avec BSF.....	34
3.1. L'organigramme de calcul.....	34
3.2. Caractéristiques I(V) et P(V) des cellules solaires conventionnelle et avec BSF.....	36
3.3. Influence des différents paramètres sur les caractéristiques de la cellule solaire bifaciale.....	39
3.3.1. L'influence de l'épaisseur de l'émetteur.....	39
3.3.2. L'Influence de l'épaisseur de la base	40

## Sommaire

---

<b>4. Conclusion.....</b>	<b>41</b>
<b>Conclusion général.....</b>	<b>43</b>

Liste des figures:

<b>Figure(I.1)</b> : Représentation schématique des différentes constante d'illumination.....	<b>5</b>
<b>Figure (I.2)</b> : Représentation graphique des spectres solaire AM.0 et AM1.5 en fonction de la longueur d'onde . Le domaine spectral utile aux cellules en silicium est situé dans l'intervalle [0,25 1,25] $\mu\text{m}$ .....	<b>5</b>
<b>Figure (I.3)</b> : une illustration d'une cellule solaire.....	<b>7</b>
<b>Figure (I.4)</b> : un document expliquant le principe la cellule photovoltaïque.....	<b>8</b>
<b>Figure (I.5)</b> : Points et valeurs remarquables des caractéristiques $I=f(v)$ et $P=f(v)$ d'une cellule solaire conventionnelle. Ces courbes sont obtenues dans le cadre de ce travail en utilisant l'outil de programmation MATLAB.....	<b>9</b>
<b>Figure (I.6):</b> Le circuit électrique équivalent de la cellule solaire conventionnelle à exponentielle simple.....	<b>10</b>
<b>Figure (II.1):</b> Représentation schématique de la structure d'une celluleSolaire BSF.....	<b>19</b>
<b>Figure (II.2):</b> le circuit électrique équivalent de la cellule solaire bifaciale.....	<b>19</b>
<b>Figure (II.3)</b> :Représentation schématique d'un modèle à une dimension de la cellule solaire bifaciale.....	<b>23</b>
<b>Figure (III.1)</b> : Cellule solaire bifaciale À base de CIGS.....	<b>33</b>
<b>Figure (III.2):</b> Caractéristique $J(V)$ de la cellule solaire CIGS.....	<b>36</b>
<b>Figure (III.3):</b> Caractéristique $P(V)$ de la cellule solaire CIGS.....	<b>37</b>
<b>Figure (III.4):</b> représente la variation de rendement en fonction de longueur d'onde du rayonnement incident.....	<b>38</b>

### Liste des tableaux :

<b>Tableau (III.1) :</b> Les paramètres de la cellule CdS/CIGS utilisées durant la simulation	<b>34</b>
<b>Tableau (III.2) :</b> Paramètres obtenus par modélisation électrique des cellules BSF et conventionnelle..	<b>37</b>
<b>Tableau (III.3):</b> Résultats de l'influence de l'épaisseur de l'émetteur ( $X_j$ ) sur les caractéristiques de la cellule solaire bifaciale	<b>39</b>
<b>Tableau (III.4):</b> Les résultats de simulation.	<b>40</b>



## Nomenclature

---

### Nomenclature :

- CIGS: Le quaternaire Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>.
- CdS: Le sulfure de cadmium.
- $h$  : La constante de Planck.
- $\lambda$  : La longueur d'onde.
- $C$  : La vitesse de lumière.
- $n$ : le coefficient d'idéalité de la diode.
- $v_d$ : Tension aux bornes de la jonction.
- $q$ : Charge élémentaire.
- $k$ : Constante de Boltzmann.
- $T$ : La Température.
- $I_{cc}$ : Le courant de court-circuit.
- $I_s$  : Courant de saturation de diode
- $V_{co}$ : La tension en circuit ouvert.
- $FF$  : Le facteur de forme.
- $H$ : Le rendement de conversion d'énergie.
- $L_n$ : Longueur de diffusion des électrons.
- $L_p$ : Longueur de diffusion des trous.
- $V_M$ : 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.
- $R_{sh}$ : La résistance parallèle.
- $J_n$ : 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.
- $S_n$ : La vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires à la face
- $L_{bsf}$ : La longueur de diffusion des porteurs minoritaires dans la région fortement dopée (du BSF)
- $D_{bsf}$ : coefficient de diffusion, des porteurs minoritaires dans la région du BSF.
- $W_{bsf}$ : Epaisseur de la région fortement dopée.
- $\Delta\phi$ : Barrière de potentiel entre la base et la région fortement dopée.
- $N_{bsf}$ : concentration des porteurs dans la région du BSF.
- $N_a$ : concentration des trous dans la base.
- $N_{p+}$ : concentration des trous dans la région du BSF.
- $N_p$  : concentration des porteurs majoritaires dans la base.
- $n_i^-$  : concentration intrinsèque dans la base.
- $n_i^+$ : concentration intrinsèque dans la zone fortement dopée.
- $J_{p,bsf}$ : 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.

## Nomenclature

---

- $\alpha$ : Le coefficient d'absorption de la lumière dans le semi-conducteur.
- $R$  : Le coefficient de réflexion sur la surface du semi-conducteur.
- $\tau_n$ : Durées de vie d'électrons.
- $n_p$ : densité des porteurs minoritaires dans la base.
- $n_{p0}$ : densités des porteurs minoritaires dans la base à l'équilibre.
- $E$  : le champ électrique interne.
- $\mu_n$ : Mobilité des électrons.
- $D_n$ : Coefficient de diffusion des électrons.
- $L_n$ : longueur de diffusion d'électrons.
- $W$ : la largeur de la zone de déplétion.
- $W_{bsf}$ : la largeur de la région fortement dopée.
- $H$ : l'épaisseur totale de la cellule.
- $x_j$ : l'épaisseur de l'émetteur
- $H'$  : La partie neutre de la région de la base.
- $\mu_p$ : Mobilité des trous.
- $D_p$ : Coefficient de diffusion des trous.
- $p_{n0}$ : densité des porteurs minoritaires (trous) dans l'émetteur à l'équilibre.
- $p_n$ : densité des porteurs minoritaires dans l'émetteur.
- $\tau_p$ : la durée de vie des trous.
- $D_p$ : Coefficient de diffusion des trous.
- $L_p$ : longueur de diffusion des trous.
- $S_p$ : La vitesse de recombinaison des trous à la face avant.
- $N_a$ : concentration d'accepteurs dans la région P.
- $n_p$ : la concentration d'électrons dans la région P.
- $Z$ : zone de charge d'espace.
- EQE : le rendement quantique externe.
- $n$  : facteur d'idéalité de la diode.
- EQI : le rendement quantique interne.

## Introduction générale :

## Introduction générale

---

L'homme vise à atteindre son confort de vie en utilisant des outils qui lui permettent d'atteindre ce qu'il vise, et les efforts des êtres humains se sont poursuivis au fil du temps dans la recherche et les découvertes, et parmi les découvertes les plus importantes faites par l'humanité, par la grâce de Dieu, est l'énergie électrique qui est produite de diverses manières, et parmi ces méthodes se trouve la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par conversion photoélectrique à l'aide des cellules solaires, qui portent le nom du soleil.

Les pays industrialisés ont cherché à développer ces cellules pour améliorer leur productivité en production, et pour tenter de contribuer à ce développement, dans cette thèse nous avons étudié une simulation de cellule solaire biface, où nous :

- ✚ Le premier chapitre : Explication du système solaire et du principe et de la structure de la cellule solaire traditionnelle, alors que nous avons abordé ses caractéristiques.
  
- ✚ Le deuxième chapitre : Explication du principe et de la structure de la cellule solaire biface ( BSF ) et de ses caractéristiques.
  
- ✚ Chapitre trois : Nous avons modélisé des cellules solaires conventionnelles et bifaciales dans le programme MATLAB et présentons les résultats de notre code

# Chapitre I :

Notions générales et  
présentation d'un  
système  
photovoltaïque

# Chapitre I

---

## 1.Introduction :

L'étude des cellules solaires nécessite une connaissance du système solaire et de son principe de fonctionnement. Dans ce chapitre, nous aborderons l'explication du système solaire et expliquerons la structure et le principe des cellules solaires traditionnelles en principe, en passant par les caractéristiques de ces dernières.

## 2. Le rayonnement solaire:

### 2.1. Lesoleil :

#### 2.1.1.Caractéristiques générales:

Le Soleil est une étoile ordinaire de type spectral G (de séquence principale) parmi les 200 milliards que compte notre Galaxie. Etant proche de nous (8 mn lumière, 150106 km), il présente un diamètre apparent sur le ciel d'un demi-degré ce qui permet de l'étudier en détails.

Agé de 5 milliards d'années, le Soleil tourne lentement autour du centre galactique en 240 millions d'années.

Il est constitué d'une sphère de gaz chaud de diamètre 1400000 km et de masse  $2 \cdot 10^{30}$  kg. Il est composé de 90% d'hydrogène et de 10% d'hélium. Tous les autres éléments (métaux) sont présents mais en trace. Le Soleil tourne sur lui même plus vite à l'équateur (26 jours) qu'aux pôles (31 jours).

C'est au centre du Soleil que des réactions thermonucléaires de fusion transmutent l'Hydrogène en Hélium en produisant l'énergie et le rayonnement de notre étoile (4 millions de tonnes disparaissent par seconde en énergie selon la loi  $E = m C^2$  !). Ces réactions sont confinées dans un milieu où la densité est élevée (150 fois celle de l'eau) et la température atteint 15 106 K.

L'énergie produite traverse lentement le Soleil pour atteindre les couches superficielles et est ensuite émise sous forme de lumière. La surface visible du Soleil (la photosphère, couche épaisse de 300 km seulement) est à une température de 5750 K et émet la lumière blanche naturelle. avec un instrument d'observation, on découvre des taches, qui sont des régions un peu plus «froides » (4000 K) qui présentent un champ magnétique très important (0.1 T). Le magnétisme est responsable de la plupart des phénomènes visibles dans l'atmosphère solaire. On pense qu'il est généré par des mouvements de charges dans les couches situées sous la surface en liaison avec la rotation différentielle de l'étoile (effet dynamo).

Au dessus de la photosphère, la température remonte pour atteindre environ 8000 K dans la chromosphère, couche de 2000 km d'épaisseur, qui n'est visible qu'avec une instrumentation spécialisée. On y observe des zones très brillantes (facules) mais aussi des filaments (sombres) de matière froide piégée par des champs magnétiques. Au-dessus de la chromosphère, pour des raisons encore mal expliquées, la température remonte à plus de 106 K. C'est la couronne.

# Chapitre I

---

Les coronographes en haute montagne et surtout les satellites qui sont au dessus de notre atmosphère permettent d'observer la couronne solaire très ténue. Les diverses manifestations de l'activité solaire (surface tachée, filaments, éruptions, éjections de masse coronale) sont modulées par un cycle de 11 ans. [1]

## 2.1.2. Son énergie :

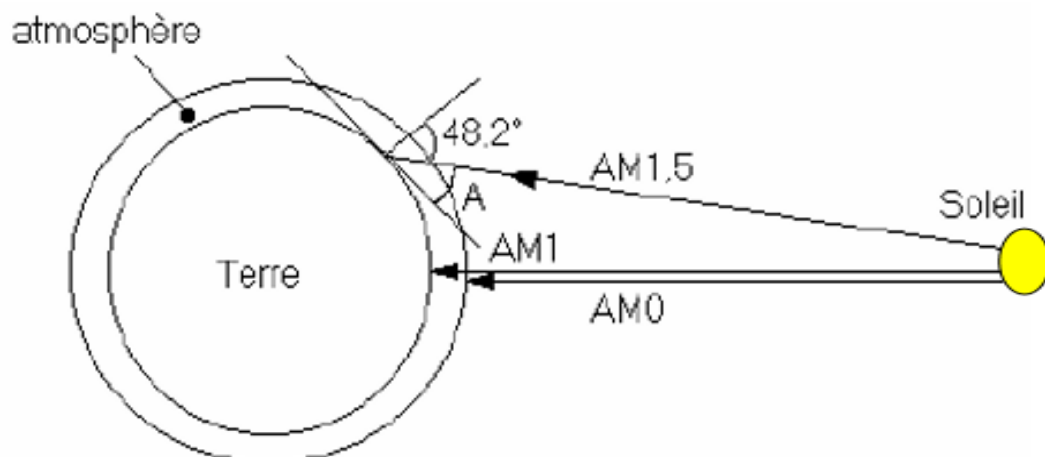
Un réacteur à fusion nucléaire qui fonctionne depuis des milliards d'années. Le soleil libère d'énormes quantités d'énergie qui atteint, après avoir parcouru environ 150 millions de kilomètres, la surface de la Terre. La Terre a une puissance moyenne d'environ 1000 W/m<sup>2</sup>. Au final, l'énergie solaire qui frappe la Terre est 10 000 fois supérieure à la demande énergétique totale de la population, l'énergie solaire est inégalement répartie sur la surface de la Terre et est soumise à des variations saisonnières changements.[2]

## 2.2. Constantes d'illumination :

L'intensité lumineuse issue du soleil et normalement incidente sur la surface de la Terre est appelée la constante solaire. Cette constante est approximativement d'une valeur de 1,4 kW/m<sup>2</sup> au-dessus de la couche atmosphérique. Elle est réduite sur la Terre à 1 kW/m<sup>2</sup> par réflexion et absorption des particules présentes dans la couche atmosphérique . [3]

Pour tenir compte de la position relative du soleil qui modifie l'épaisseur d'atmosphère traversée, on introduit un coefficient  $M_A$  appelé masse atmosphérique "masse air" de l'anglais "air mass (AM)", ou nombre d'air masse.

C'est la distance parcourue par le rayon lumineux depuis son entrée dans l'atmosphère jusqu'au sol Figure(I.1). Partant de cette définition, le spectre solaire est subdivisé en plusieurs « masse air ». La désignation AM0 correspond à une masse d'air nulle pour la lumière arrivant au-dessus de notre atmosphère à incidence normale. Le titre AM1 représente le spectre solaire à la surface de la terre quand le soleil est au zénith. L'appellation AM1.5 désigne la masse d'air rencontrée pour la lumière arrivant à 48.2° sur la surface de la terre, soit une lumière plus faible du fait que l'épaisseur de la couche atmosphérique traversée est plus grande. [3]

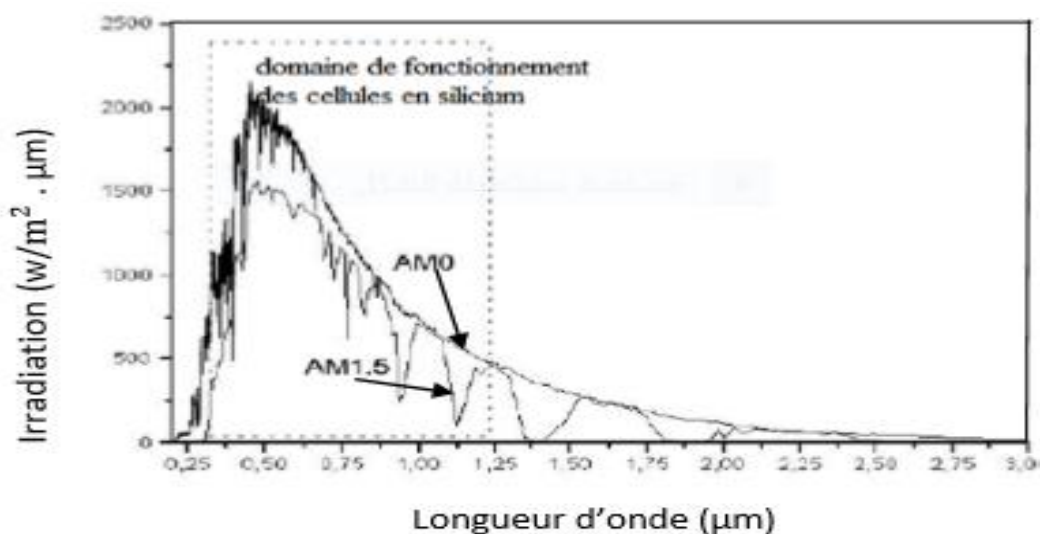


**Figure(I.1) :**Représentation schématique des différentes constantes d'illumination [3]

Dans les conditions normales et au niveau de la mer, le coefficient  $M_A$  est calculé comme suit :

$$M_A \approx \frac{1}{\sin(A)} \quad (I.1)$$

Les spectres AM0 et AM1.5 sont représentés sur la figure (I.2)



**Figure(I.2):**Représentation graphique des spectres solaire AM.0 et AM1.5 en fonction de la longueur d'onde. Le domaine spectral utile aux cellules en silicium est situé dans l'intervalle [0,25 1,25] μm [3]

On note que le nombre d'air masse sert à définir un spectre de référence pour calibrer les cellules étalons destinées à qualifier les performances des dispositifs photovoltaïques . [3]

## 3. La conversion photovoltaïque:

### 3.1. L'interaction photon semi-conducteur :

Le comportement électrique des semi-conducteurs est généralement modélisé, en physique de l'état solide, à l'aide de la théorie des bandes d'énergie. Selon celle-ci, un matériau semi-conducteur possède une bande interdite suffisamment petite pour que des électrons de la bande de valence puissent facilement rejoindre la bande de conduction. Si un potentiel électrique est appliqué à ses bornes, un faible courant électrique apparaît, provoqué à la fois

# Chapitre I

---

par le déplacement des électrons et par celui des « trous » qu'ils laissent dans la bande de valence. [4]

La conductivité électrique des semi-conducteurs peut être contrôlée par dopage, en introduisant une petite quantité d'impuretés dans le matériau afin de produire un excès d'électrons ou un déficit. Des semi-conducteurs dopés différemment peuvent être mis en contact afin de créer des jonctions, permettant de contrôler la direction et la quantité de courant qui traverse l'ensemble. Cette propriété est à la base du fonctionnement des composants de l'électronique moderne : diodes, transistors, etc .[4]

Le silicium est le matériau semi-conducteur le plus utilisé commercialement, du fait de ses bonnes propriétés, et de son abondance naturelle même s'il existe également des dizaines d'autres semi-conducteurs utilisés, comme le germanium, l'arséniure de gallium ou le carbure de silicium.[4]

Le comportement des semi-conducteurs, comme celui des métaux et des isolants est décrit via la théorie des bandes. Ce modèle stipule qu'un électron dans un solide ne peut que prendre des valeurs d'énergie comprises dans certains intervalles que l'on nomme « bandes », plus spécifiquement bandes permises, lesquelles sont séparées par d'autres « bandes » appelées bandes d'énergie interdites ou bandes interdites. [4]

Deux bandes d'énergie permises jouent un rôle particulier:

- ❖ la dernière bande complètement remplie, appelée « bande de valence».
- ❖ la bande d'énergie permise suivante appelée « bande de conduction ».[4]

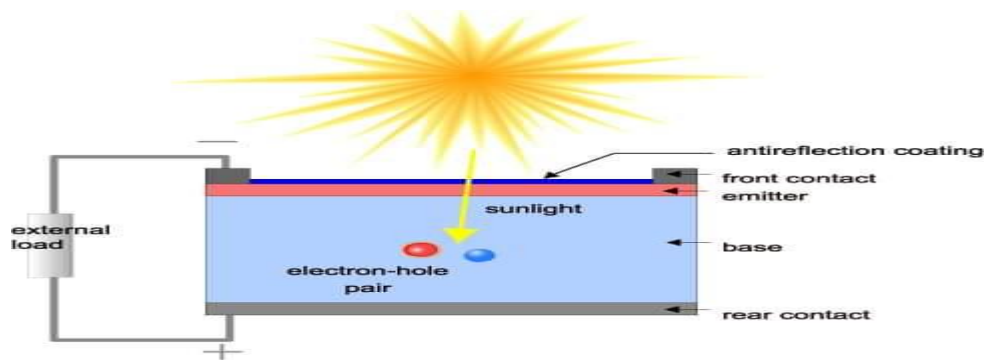
## **3.2. La cellule photovoltaïque :**

### **3.2.1. Structure et principe de fonctionnement:**

#### **a) La structure:**

Une seule cellule solaire est constituée de couches de silicium de différents types; Ensuite, deux éléments principaux sont ajoutés à chacun d'eux, qui sont le phosphore et le bore; Le phosphore est ajouté du côté dirigé vers le soleil (la couche N), ce qui lui confère la propriété de pomper l'électrification générée dès que le rayonnement solaire (photons) le heurte, et le côté opposé et orienté vers le bas (la couche P) .L'élément bore y est ajouté, ce qui lui donnerait la propriété d'absorber l'électrophorèse transmise par la couche supérieure à travers le conducteur électrique entre elles, et en assemblant les cellules solaires entre elles de manière série ou parallèle, des panneaux solaires sont formés, qui est l'un des composants du système solaire [5]





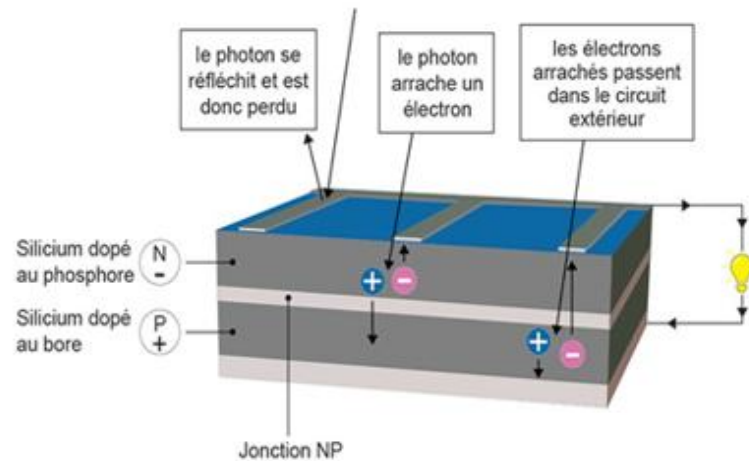
**Figure (I.3) :** illustration d'une cellule solaire [6]

### b) Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque est fondé sur les propriétés de semi-conducteurs qui, percutés par les photons, mettent en mouvement un flux d'électrons . Les photons sont des particules élémentaires qui transportent l'énergie solaire à 300 000 km/s et qu'Albert Einstein appelait dans les années 1920 les « grains de lumière ». Lorsqu'ils frappent un élément semi-conducteur comme le silicium , ils arrachent des électrons à ses atomes . Ces électrons se mettent en mouvement, de façon désordonnée, à la recherche d'autres « trous » où se repositionner. [7].

Mais pour qu'il y ait un courant électrique, il faut que ces mouvements d'électrons aillent tous dans le même sens. Pour les y aider, on va associer deux types de silicium. La face exposée au soleil est « dopée » avec des atomes de phosphore qui comportent plus d'électrons que le silicium, l'autre face est dopée avec des atomes de bore qui comportent moins d'électrons. Cette double face devient une sorte de pile : le côté très chargé en électrons devient la borne négative (N), le côté avec moins d'électrons devient la borne positive (P). Entre les deux il se crée un champ électrique . [7]

Quand les photons viennent exciter les électrons, ceux-ci vont migrer vers la zone N grâce au champ électrique, tandis que les « trous » vont vers la zone P. Ils sont récupérés par des contacts électriques déposés à la surface des deux zones avant d'aller dans le circuit extérieur sous forme d'énergie électrique. Un courant continu se crée. Une couche anti-reflet permet d'éviter que trop de photons se perdent en étant réfléchis par la surface. Voir la Figure (I.4)[7]



**Figure (I.4) :** expliquant le principe la cellule photovoltaïque [7]

### 3.2.2. Caractéristiques électriques de la cellule photovoltaïque:

Les différents paramètres caractéristiques de la cellule sont les suivants :

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

Il définit la quantité  $G$  des paires électron-trou créés et qui traverse la jonction sans recombinaison, ou bien c'est le courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule .Il est donné par la relation suivante :

$$I_{ph} = qG( L_n + L_p )(I.2)$$

Où :  $L_n$  et  $L_p$  sont les longueurs de diffusion des électrons et des trous respectivement. Pour une diode idéale  $I_{cc} = I_{ph}$ . [3]

#### ❖ La tension en circuit ouvert ( $V_{CO}$ ):

C'est la tension pour laquelle la cellule ne fournit aucun courant. Elle est obtenue à partir de l'équation [3]:

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

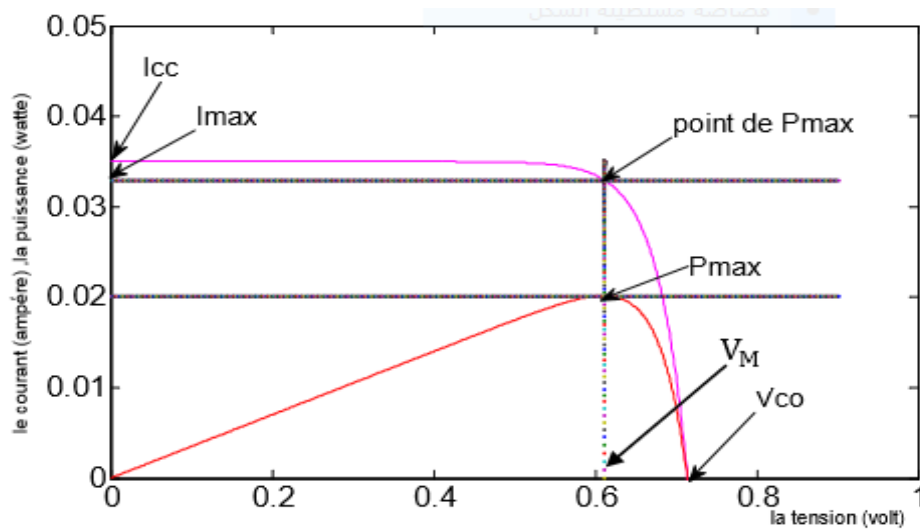
#### ❖ Le facteur de forme (FF) :

## Chapitre I

Le facteur de forme FF rend compte de la qualité de la forme des courbes I(V). Il est déterminé par l'équation suivante :

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

Où  $I_{max}$  et  $V_{max}$  représentent respectivement le courant et la tension du point de fonctionnement qui permet d'extraire le maximum de puissance ( $P_{max}$ ) de la cellule Figure(I.4). Plus la valeur de FF est grande, plus la caractéristique I(V) ressemble à celle d'une source idéale de courant  $I_{cc}$  tant que  $V < V_{co}$  et à une source idéale de tension pour  $I > I_{cc}$ . dans le cas limite  $FF \rightarrow 1$ , la puissance extraite de la cellule est maximale [8]



**Figure (I.5) :** Points et valeurs remarquables des caractéristiques  $I=f(v)$  et  $P=f(v)$  d'une cellule solaire conventionnelle. Ces courbes sont obtenues dans le cadre de ce travail en utilisant l'outil de programmation MATLAB. [3]

### ❖ Le rendement de conversion d'énergie ( $\eta$ ) :

$\eta$  Le rendement de conversion en puissance  $\eta$  des cellules photovoltaïques se définit comme le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente  $P_0$ . [8]

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_0} = FF \times I_{cc} \frac{V_{co}}{P_0} \quad (I.5)$$

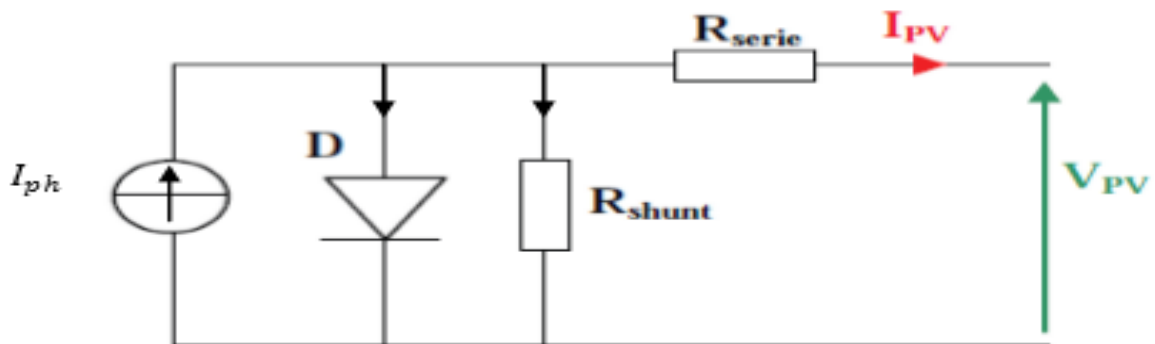
## 3.2.3. Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque:

La modélisation photovoltaïque passe nécessairement par un choix judicieux de circuits électriques équivalents. Pour développer un circuit micro-informatique photovoltaïque, il est essentiel de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule ainsi que les propriétés électriques de chaque composant, en prenant plus ou moins de détails .[9]

Nous utilisons un modèle exponentiel Facile, Ce dernier est le plus populaire et utilisé par de nombreux auteurs pour l'obtenir Valeurs de certains paramètres de la caractéristique courant-tension de la cellule solaire. c'est La propriété est définie par l'équation suivante(I.6).[3]

$$I(v) = I_{ph} \frac{(v+R_s \times I)}{R_{sh}} - I_s \times [\exp\left(\frac{q(v+R_s \times I)}{nkt}\right) - 1] \quad (I.6)$$

Le circuit électrique équivalent est schématisé sur la figure (I.6) :



**Figure (I.6):**circuit électrique équivalent de la cellule solaire conventionnelle à exponentielle simple [3]

Les différents paramètres de ce modèle sont:

- Le générateur de courant : il délivre le courant  $I_{ph}$  correspondant au courant photo-généré.[3]
- La résistance série: elle prend en compte la résistivité propre aux contacts entre les différentes régions constitutives de la cellule, à savoir l'émetteur, la base et les contacts métalliques.
- La résistance parallèle: également connue sous le nom de résistance shunt, elle traduit l'existence de shunts à travers l'émetteur, causé par un défaut. Ceci est le cas lorsque la

# Chapitre I

---

diffusion des contacts métalliques à haute température perce l'émetteur par des particules d'impuretés. Elle peut aussi être due à un court-circuit sur les bords de la cellule. Cette valeur devra être la plus élevée possible .[3]

d)  $I_s$ : le courant de saturation de la diode.

e)  $n$  : le facteur d'idéalité de la diode.

La méthode de calcul du courant  $I_{ph}$  est présentée dans le deuxième chapitre. Elle est basée sur la modélisation de trois courants :

$$I_{ph} = J_n + J_p + J_{dr} \quad (I.7)$$

Où :

$J_n$  : le courant photo-généré dans l'émetteur.

$J_p$  : le courant photo-généré dans la base pour la cellule simple.

$J_{dr}$ : le courant photo-généré dans la ZCE. [3]

### 3.2.4. Réponse spectrale de la cellule photovoltaïque ( $R_s$ ):

La réponse spectrale d'une cellule photovoltaïque est le rapport entre le courant généré par la cellule et la puissance lumineuse incidente, en fonction des différentes longueurs d'onde formant le rayonnement incident .La réponse spectrale  $R_s$  est donnée par la l'équation (I.8) :

$$R_s = \left(\frac{q\lambda}{hc}\right) EQE(q\lambda / h_c) EQE \quad (I.8)$$

EQE représente le rendement quantique externe de la cellule, c'est à dire le rapport du nombre de porteurs générés sur le nombre de photons incidents. Pour une longueur d'onde donnée, le rendement quantique externe est égal à 1 si chaque photon génère un électron. Si l'on prend en compte la réflectivité de la surface de la cellule photovoltaïque, on détermine son rendement quantique interne IQE .[10]

### 3.2.5. Modélisation mathématique de la cellule photovoltaïque :

Pour résoudre numériquement l'équation de la caractéristique  $I(V)$  de la cellule solaire éclairée, on utilise la méthode itérative de Newton raphson. Dans le code de , nous avons utilisé le langage de programmation MATLAB pour exécuter la fonction itérative obtenue. [3]

## 4. Conclusion:

## Chapitre I

---

Dans ce chapitre, nous avons abordé la définition du système solaire et expliqué comment il contribue au système photovoltaïque. Ensuite, nous avons expliqué le principe et la structure de la cellule photovoltaïque traditionnelle et évoqué ses caractéristiques. En fin de chapitre, nous avons traité les étapes de fabrication d'une cellule photovoltaïque BSF

**Références :**

## Chapitre I

---

- [1] Le soleil : principales caractéristiques –BASS2000. (20/04/2021).
- [2] Site web : ACYU ENVIRONNEMENT .com. (20/04/2021).
- [3] **Cherouana Abdelbaki**, « Modélisation par MATLAB de la cellule solaire bifaciale à base de silicium monocristallin ». Magister en Physique Spécialité : Energies Renouvelables (2013).
- [4] Site web: [https:// fr.m.wikipedia.org semi\\_conducteur](https://fr.m.wikipedia.org/wiki/semi_conducteur) wikipédia.(23/4/2021)
- [5] Site web: Damasus petrochemical refinery .com. (26/04/2021).
- [6] Site web: [www.pveducation.org](http://www.pveducation.org). (28/04/2021).
- [7] Site web: [planete.energies](http://planete.energies). (28/04/2021).
- [8] **AZIZ, H. SADDEK, S** « Modélisation et simulation d'une cellule photovoltaïque organique inversée ». MASTER EN PHYSIQUE ENERGETIQUE (2017).
- [9] **HELALI KAMELIA**, « Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative ». MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE OPTION : Machines Electriques (2012).
- [10] **Mancer Mansoura**, « Simulation numérique des caractéristiques électriques d'une cellule solaire à double jonction en (AlGaAs/GaAs) ». Magister en physique des Matériaux (2012).

# Chapitre **II**:

Modélisation de la  
cellule solaire bifaciale



# Chapitre II

---

## 1.Introduction:

Les chercheurs en technologie cherchent à augmenter la rentabilité de la production de tout élément électronique et à réduire le coût de sa fabrication. Parmi ces éléments électroniques se trouvent les cellules photovoltaïques. À partir de ce chapitre, nous commencerons à étudier les cellules photovoltaïques bifaciales sous plusieurs aspects en termes de leurs matériaux, comment les fabriquer, leur structure et leur principe de fonctionnement, et enfin, nous les modéliserons électriquement.

## 2. Cas de la cellule solaire BSF:

Le champ électrique postérieur (BSF: posterior surface field) consiste à créer une barrière de potentiel (par exemple, une jonction p + -p) sur la face arrière de la cellule pour assurer la passivation. La barrière de potentiel provoquée par la différence de niveau de dopage entre la base et le BSF tend à confiner les porteurs minoritaires à la base, elle est donc maintenue à l'écart de la face arrière qui a un taux de recombinaison très élevé. [1]

### 2.1. Procédés technologiques de réalisation de la cellule solaire BSF:

Les principales étapes technologiques pour réaliser la cellule solaire BSF sont les suivantes:

#### a) Traitement de la surface des plaquettes et texturation:

Les plaquettes de silicium utilisées pour la fabrication des photopiles sont de type p dopées au bore, d'orientation (100) et de résistivité comprise entre 0,2 et 3  $\Omega$ .cm. Elles sont issues de lingots cylindriques obtenus par la méthode de croissance Czochralski pour le silicium monocristallin et par des procédés nouveaux entre autres celui de H.E.M ,Silso ,Polyxet Soplin ,pour les plaquettes de silicium multicristallin. Leurs surfaces sont brutes de sciage surtout depuis la mise au point du sciage à fil notamment pour les dernières où la perturbation est ramenée de 10 à 5 microns .Elles doivent donc être traitées de manière à éliminer les traits de scie ainsi que les graisses et les effluent de sciage. Par ailleurs, les épaisseurs des plaquettes étant fixées par le diamètre du lingot et la technique de sciage ne sont pas optimisées. Il faut donc les amincir et éliminer les traces de sciage. Le dégraissage est effectué dans des bains classiques de solvants bien connus dans la technologie des semi-conducteurs. Quant à l'amincissement, il est réalisé dans des bains constitués par un mélange d'acides et tout récemment, dans le but d'alléger le procédé de décapage, dans une solution à base de d'hydroxyde de sodium ou de potassium ( NaOH ou KOH ) .Ces produits bon marché et peu dangereux que les premiers ont contribué largement à la simplification de l'étape et à la réduction du coût du dispositif tout en permettant à la fois l'amincissement de la plaquette et la croissance de micropyramides à la surface outexturation.[2]

## Chapitre II

---

### b) Formation de la jonction n+/p et de la structure n+/pp+:

C'est l'étape la plus importante dans la technologie de fabrication des photopiles au silicium cristallin. Bien que techniquement maîtrisée par son utilisation dans la technologie des circuits intégrés, la formation de la jonction dans un four à tube ouvert par la diffusion du phosphore à partir d'une source liquide d'oxychlorure de phosphore ( $\text{POCl}_3$ ), solide de pentaoxyde de phosphore ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) ou gazeuse de phosphine ( $\text{PH}_3$ ) est lourde, coûteuse notamment en énergie et dangereuse à l'usage. Ces considérations et principalement celle du coût ont conduit à la recherche de procédés de diffusion alternatifs. Ces derniers issus, entre autres, de la technologie des couches épaisses (épaisseur de l'ordre de 10 microns) et de l'étalement des résines photocensibles sont en compétition. Les plus prometteurs sur le plan économique et la possibilité de la conception locale de l'équipement sont la sérigraphie, la pulvérisation chimique (spray) et la technique de rotation (spin-on). Celles-ci permettent la réalisation de plusieurs étapes avec un même équipement et notamment la couche p+ (BSF) sur la face arrière, la couche antireflet et pour le premier, en plus, celle de la métallisation. Par ailleurs, le recuit peut être réalisé dans un four à convoyeur à l'air libre, plus approprié pour une production industrielle de photopiles solaires. Les températures de recuit varient entre 850 °C et 1100 °C. [2]

### c) Isolation de la jonction parasite:

Cette étape qui est souvent occultée dans les procédés de réalisation des photopiles a une incidence directe sur les performances électriques du dispositif et son coût. En effet, à l'exception du procédé de sérigraphie ou des dispositions qui peuvent être prises pour éviter la formation d'une jonction parasite, pour les autres, l'émulsion de viscosité plus faible déborde sur les bords de la plaquette et conduit à la formation d'une jonction parasite lors du recuit. Ceci est bien établi dans le cas d'une diffusion en tube ouvert à partir d'une source liquide ou solide à moins de prendre la précaution de protéger la face arrière de la plaquette par une épaisse couche d'oxyde. Pour isoler la jonction parasite, plusieurs techniques ont été développées. Les deux premières ont été abandonnées depuis la mise au point de la troisième, appelé gravure plasma [2]

### d) Passivation de la surface :

Après formation de la jonction, on fait croître une couche d'oxyde thermique d'une épaisseur de l'ordre de 10 nm. Cette étape est réalisée par différentes techniques dont la plus courante et la plus simple est la croissance d'un film mince dans un tube ouvert sous une ambiance d'oxygène sec. Elle permet la réduction de la vitesse de recombinaison en surface et améliore l'interface métal - semiconducteur. [2]

### e) Métallisation : dépôt de la grille collectrice et du contact de base:

Dans la technologie de réalisation des cellules solaires, la métallisation est l'étape principale après celle de la formation de la jonction. Elle permet d'établir la liaison entre la structure et le circuit extérieur lors de l'assemblage des photopiles dans un cadre rigide (ou encapsulation). [3]

#### 1-)Dépôt de la grille collectrice :

Les configurations des grilles collectrices sont définies en tenant compte de plusieurs paramètres dont les principaux sont une occultation minimale de la surface active ( $< 10\%$ ) et une faible résistance de contact pour limiter les pertes par effet joule, tout en diminuant la consommation de matière. Son dépôt, éventuellement sur les deux faces, est effectué, entre autres, par évaporation thermique sous vide d'un alliage Ti/Pd/Ag à travers un masque ou par photolithographie d'une couche métallique déposée par la même technique. Cette dernière est lourde et coûteuse en matériaux et en équipement. Par ailleurs, elle ne permet que le traitement d'un nombre limité de plaquettes par opération et donc mal adapté pour une production à grande échelle. Ces handicaps ont orienté la recherche vers de nouveaux procédés dont le plus important est la sérigraphie. Celui-ci, bien adapté pour une production en série, est aujourd'hui le plus utilisé pour la fabrication industrielle de photopiles au silicium cristallin à usage terrestre. [2]

#### 2)-Dépôt du contact arrière :

Sauf dans certains cas où une grille est également imprimée sur la face arrière notamment pour les cellules solaires bifaciales, lorsqu'on fait subir des traitements particuliers (passivation de la face arrière pour les photopiles au silicium multicristallin) ou une économie de matériaux, le contact arrière couvre toute la surface jusqu'à 2 mm du bord de la plaquette. Le procédé retenu, pour son dépôt, est celui de grille collectrice. Il présente moins de difficultés que celles de cette dernière, notamment lorsqu'il y a formation de la couche p+ fortement dopée (BSF) qui favorise l'ohmicité du contact. [2]

### f) Dépôt de la couche antireflet:

Le rayonnement solaire incident perd une fraction relativement importante de son énergie par réflexion en surface, une autre par absorption dans le matériau et le reste constitue la partie transmise. Dans une cellule solaire, on cherche à capter la plus grande partie des photons utiles du spectre solaire, en minimisant la réflexion à la surface de la plaquette par un traitement chimique (texturation) [4] ou par dépôt d'une couche d'oxyde avec un indice de réflexion  $n$  adapté à celui du silicium pour la longueur d'onde à laquelle on désire obtenir une réflexion minimale ( $\lambda_0$ ) et dont l'épaisseur  $e$  est déterminée par l'expression  $e = \lambda_0 / 4nc$ . Les oxydes déposés sur le silicium cristallin ont l'indice de réfraction qui varie entre 1,5 et 2,3. Les plus adaptés sont le monoxyde et le dioxyde de silicium ( $\text{SiO}$ ,  $n = 1,9$  et  $\text{SiO}_2$ ,  $n = 1,9$ ),

## Chapitre II

---

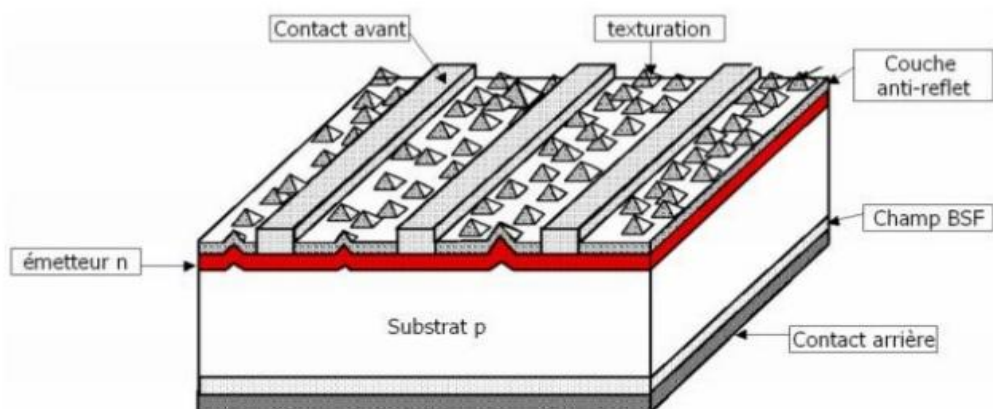
le pentaoxyde de tantale ( $Ta_2O_5$ ,  $n = 2,1$ ) et le dioxyde de titane ( $TiO_2$ ,  $n = 2,3$ ) [32]. Ces derniers sous forme d'organo-métalliques dissous dans un solvant tel que l'éthanol ou rendu pâteux sont déposés par les nouveaux procédés décrits ci-dessus pour la formation de la jonction. Par ailleurs, le dépôt, par ces procédés, nécessitent une bonne morphologie de la surface de la plaquette. Cette étape qui peut être réalisée avant ou après celle de la métallisation est la dernière du procédé de fabrication de la photopile au silicium cristallin.[5]

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

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

La structure de la cellule solaire bifaciale BSF est illustrée par la Figure (II.1). Elle se compose de plusieurs couches, à savoir .[5]

- 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 ( $SiO_2$ ) ou de nitrure de silicium hydrogéné ( $Si_n x:H$ ). [5]
  - b) une couche antireflet pour minimiser la réflexion de la lumière à la surface texturisée
- l'émetteur de type N formé par la diffusion homogène de phosphore
- 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
- Une couche fortement dopée  $P+$ , formée par les mêmes procédés que ceux de la jonction  $N+/p$ , permettant la création d'un champ électrique arrière appelé BSF (Back Surface Field). [5]

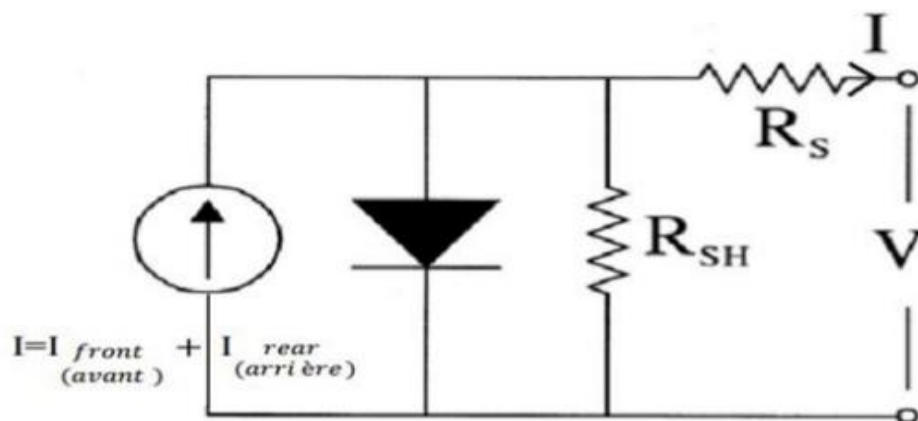


**Figure (II.1):** Représentation schématique de la structure d'une cellule Solaire BSF [5]

### 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 totale est constituée 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). [5]

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



**Figure (II.2) :** le circuit électrique équivalent de la cellule solaire bifaciale [5]

## Chapitre 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 $I_{cc}$ :

C'est le courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule solaire bifaciale. Il est égal à la somme du courant photo-généré dû à l'absorption de la lumière par la face avant et du courant photo-généré dû à l'absorption de la lumière par la face arrière.[6]

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

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

Où :

$I_{ph1} = I_{cc_{\text{avant}}}$ : Le photocourant produit par la cellule solaire bifaciale éclairée par sa face avant.

$I_{ph2} = I_{cc_{\text{arrière}}}$ : Le photo-courant produit par la cellule solaire bifaciale éclairée par sa face arrière.

$I_{ph}$  : Le photo-courant total 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 . [6]

$$V_{co.bif} = \left(\frac{KT}{T}\right) \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) (\text{II.2})$$

Où :

$I_s$  : Le courant de saturation de la diode.

#### ●Le facteur de forme FF :

Il définit l'efficacité de la cellule solaire. C'est le rapport entre la puissance maximale débitée et la puissance idéale, il est obtenu comme suit [6] :

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

$$FF_{\text{avant}} = \frac{I_{M.\text{avant}} \times V_{M.\text{avant}}}{I_{cc.\text{avant}} \times V_{co.\text{avant}}} (\text{II.3})$$

## Chapitre II

---

Avec :

$I_{M.avant}, V_{M.avant}$ : 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 :

$$FF_{\text{arrière}} = \frac{I_{M.\text{arrière}} \times V_{M.\text{arrière}}}{I_{cc.\text{arrière}} \times V_{co.\text{arrière}}} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

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

### • 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 [6].

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

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

Avec :

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

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

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

## Chapitre II

---

Avec :

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

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.[6]

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

$$P_{M,avant} = I_{M,avant} \times V_{M,avant} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

$P_{M,avant}$ : La puissance maximale générée par la cellule bifaciale éclairée par sa face avant.

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

$$P_{M,arrière} = I_{M,arrière} \times V_{M,arrière} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

$P_{M,arrière}$ : La puissance maximale générée par la cellule bifaciale éclairée par sa face arrière.

Ainsi La puissance maximale générée par la cellule bifaciale BSF, illuminée par les deux faces avant et arrière ( $P_{M,tot}$ ) est calculée par l'équation suivante :

$$P_{M,tot} = P_{M,front} + P_{M,arrière} \quad (\text{II.9})$$

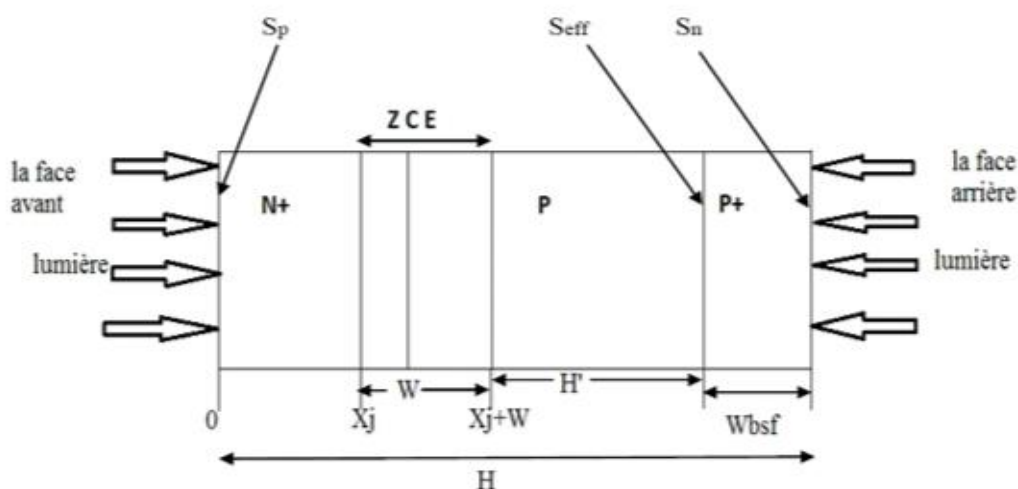
### 5. La réflexion par albédo:

On peut augmenter la puissance lumineuse incidente sur la face arrière de la cellule solaire bifaciale jusqu'à 50% , lorsqu'on utilise le rayonnement qui est réfléchi sur la surface arrière de la photopile, c'est la réflexion par albédo. Il est dépend de la surface dumilieu qui réfléchit le rayonnement solaire incident.[3]



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

Pour modéliser la cellule solaire bifaciale, on utilise le modèle 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+). [3]



**Figure (II.3)** : Représentation schématique d'un modèle à une dimension de la cellule solaire bifaciale. [3]

#### 6.1. Le Photocourant généré par une cellule solaire bifaciale BSF :

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 photo-courants générés dans chaque région de la cellule.[6]

$$J_{ph} = J_n + J_{p+} + J_{dr} + J_{bsf} \quad (\text{II.10})$$

## Chapitre II

---

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+).

### 6.1.1. Le photocourant généré dans la région quasi-neutre P :

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

$$G_n - \frac{np - np_0}{\tau_n} + \frac{1}{q} \frac{dJ_n}{dx} = 0 \quad (\text{II.11})$$

Avec :

$G_n$ : Le taux de génération des paires électron-trou à une distance  $x$  de la surface,  $G_n(x)$  est donné par la relation suivante [6] :

$$G_n(x) = \alpha \phi (1 - R) \exp(-\alpha x) \quad (\text{II.12})$$

La densité du courant des électrons dans la base est donnée par l'équation suivante :

$$J_n = q \mu_n n_p E + q D_n \frac{dn_p}{dx} \quad (\text{II.13})$$

Avec :

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

$\phi$ : Le flux des photons sur la surface du semi-conducteur,

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

$\tau_n, J_n$ : Durée de vie et densité du courant d'électrons dans la base, respectivement,

$n_p$ : La densité des porteurs minoritaires dans la base,

$n_{p_0}$ : La densité des porteurs minoritaires à l'équilibre,  $q$  étant la charge de l'électron,

$E$ : Le champ électrique interne,

$\mu_n, D_n$ : La mobilité et coefficient de diffusion des électrons, respectivement.

## Chapitre II

---

La combinaison des équations permet d'aboutir à l'expression suivante :

$$D_n \frac{d^2 np}{dx^2} + \alpha \phi (1 - R) \exp(-\alpha x) - \left( \frac{np - np_0}{\tau_n} \right) = 0 \quad (\text{II.14})$$

La relation générale est obtenue via la relation :

$$n_p - n_{p0} = A \cos h\left(\frac{x}{L_n}\right) + B \sin h\left(\frac{x}{L_n}\right) - \left( \frac{\alpha \phi (1 - R) \tau_n}{\alpha^2 L_n^2 - 1} \right) \exp(-\alpha x) \quad (\text{II.15})$$

Où :

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

A et B : Constantes.

Les deux conditions aux limites sont obtenues :

• Pour  $x = X_j + w$

$$n_p - n_{p0} \approx 0 \quad (\text{II.16})$$

• pour  $x = H - W_{bsf}$

$$S_{eff}(n_p - n_{p0}) = -D_n \frac{d(np - np_0)}{dx} \quad (\text{II.17})$$

Où :

W : Est la largeur de la zone de déplétion.

$W_{bsf}$ : La largeur de la région fortement dopée.

H : L'épaisseur totale de la cellule.

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

$$S_{eff} = \frac{N_a D_{bsf}}{N_{bsf} L_{bsf}} \frac{S_n L_{bsf} + th\left(\frac{W_{bsf}}{L_{bsf}}\right)}{1 + \frac{S_n L_{bsf}}{D_{bsf}} th\left(\frac{W_{bsf}}{L_{bsf}}\right)} \quad (\text{II.18})$$

## Chapitre II

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

$$n_{p-} = \frac{\alpha \phi (1-R) \tau n}{\alpha^2 L_n^2 - 1} e^{-\alpha(x_j+w)} \left[ \cosh\left(\frac{x-x_j-w}{L_n}\right) - e^{-\alpha(x-x_j-w)} \right] - \frac{S_{eff} L_n D_n \cos\left(\frac{H'}{L_n}\right) - e^{-\alpha H'} + \sinh\left(\frac{H'}{L_n}\right) + \alpha L_n e^{-\alpha H'} S_{eff} L_n D_n \sin\left(\frac{H'}{L_n}\right) + \cosh\left(\frac{H'}{L_n}\right)}{\alpha L_n - \frac{(S_{eff} L_n)}{D_n} \sin\left(\frac{H'}{L_n}\right) + \cosh\left(\frac{H'}{L_n}\right)} e^{-\alpha(x-x_j-w)} \quad (II.19)$$

À Partir de l'équation , on peut calculer le photo-courant du aux électrons collectés à la limite de la zone de charge d'espace :

à  $x = x_j + w$

$$J_n = q D_n \left( \frac{dn_p}{dx} \right)_{x_j+w} = \frac{q \phi (1-R) \alpha L_n}{\alpha^2 L_n^2 - 1} e^{-\alpha(x_j+w)} \times \left[ \frac{\alpha L_n - \frac{(S_{eff} L_n)}{D_n} \cos\left(\frac{H'}{L_n}\right) - e^{-\alpha H'} + \sinh\left(\frac{H'}{L_n}\right) + \alpha L_n e^{-\alpha H'}}{\frac{(S_{eff} L_n)}{D_n} \sin\left(\frac{H'}{L_n}\right) + \cosh\left(\frac{H'}{L_n}\right)} \right] \quad (II.20)$$

$H'$  : Est la partie neutre de la région de la base telle qu'il est montré par la figure (II.3). L'équation (II.20) est obtenue en supposant que la durée de vie, la mobilité et le dopage dans la région de base sont constants

### 6.1.2. Le photocourant dans la région quasi-neutre $N+$ :

Pour la région de l'émetteur, la combinaison des équations de continuité et de la densité des trous dans la zone  $N+$  permet l'obtention de l'expression suivante :

$$D_P \frac{d^2 p_n}{dx^2} + \alpha \phi (1-R) \exp(-\alpha x) - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_P} = 0 \quad (II.21)$$

La solution générale est exprimée par:

$$p_n - p_{n0} = A \cos h\left(\frac{x}{L_P}\right) + B \sin h\left(\frac{x}{L_P}\right) - \frac{\alpha \phi (1-R) \tau_P}{\alpha^2 L_P^2 - 1} \exp(-\alpha x) \quad (II.22)$$

Où:

$L_P = \sqrt{D_P \times \tau_P}$  : La longueur de diffusion des trous.

## Chapitre II

A et B : Constantes.

Les deux conditions aux limites sont :

- Pour  $x = 0$ , à la surface ( $x=0$ ) ou il se produit une recombinaison superficielle de vitesse  $S_P$  (due à la présence de défauts).

$$D_P \frac{d(pn - pn_0)}{dx} = S_P (pn - pn_0) \quad (\text{II.23})$$

- Pour  $x = x_{\square}$ , à la limite de la zone de charge d'espace ( $x = x_{\square}$ ), on admet que tous les porteurs minoritaires en excès sont recombinés (à cause du champ électrique dans la zone de déplétion).

Donc :

$$pn - pn_0 \approx 0 \quad (\text{II.24})$$

En utilisant ces conditions aux limites dans l'équation (II.22), on peut calculer la densité des trous dans la région  $N^+$  :

$$pn - pn_0 = \left[ \frac{\alpha \varnothing (1-R) \tau_P}{(\alpha^2 L_P^2 - 1)} \right] \times \left[ \frac{\left( \frac{S_P L_P}{D_P} + \alpha L_P \right) \sin h \left( \frac{x_{\square} - x}{L_P} \right) + e^{-\alpha x_{\square}} \left( \frac{S_P L_P}{D_P} \sin h \frac{x}{L_P} + \cos \frac{x}{L_P} \right)}{\left( \frac{S_P L_P}{D_P} \sin h \frac{x_{\square}}{L_P} + \cos \frac{x_{\square}}{L_P} \right)} - e^{-\alpha x} \right] \quad (\text{II.25})$$

La densité du photo-courant des trous générés dans la zone avant de la jonction, à la limite de la zone de déplétion est exprimée par :

$$J_P = -q D_P \left( \frac{dpn}{dx} \right)_{x_{\square}} = \frac{q \varnothing (1-R) \alpha L_P}{\alpha^2 L_P^2 - 1} \times \left[ \frac{\left( \frac{S_P L_P}{D_P} + \alpha L_P \right) - e^{-\alpha x_{\square}} \left( \frac{S_P L_P}{D_P} \cos h \frac{x_{\square}}{L_P} + \sin h \frac{x_{\square}}{L_P} \right)}{\frac{S_P L_P}{D_P} \sin h \frac{x_{\square}}{L_P} + \cos h \frac{x_{\square}}{L_P}} - \alpha L_P e^{-\alpha x_{\square}} \right] \quad (\text{II.26})$$

### 6.1.3. Le photocourant 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 :

Recombinaison. Ainsi, on peut dire que la densité du photo-courant ne dépend que du nombre de photons absorbés. Le photo-courant généré dans la ZCE est exprimé par [6] :

## Chapitre II

$$J_{dr} = q\phi(1-R) \exp(-\alpha x) [1 - \exp(-\alpha w)] \quad (\text{II.27})$$

### 6.1.4. Le photocourant dans la région fortement dopée P+:

Le photo-courant généré dans la région P+ est donné par la relation suivante. [5]

$$J_{bsf} = -\left(\frac{qD_{bsf}}{L_{bsf}}\right) \left[ \frac{N_a + N_e}{n_{bsf}} - n_P \right] \cosh\left(\frac{W_{bsf}}{L_{bsf}}\right) \quad (\text{II.28})$$

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  $x=H - W_{bsf}$ .

## 7. Modélisation électrique de la cellule solaire bifaciale BSF éclairée

### par sa face arrière :

Pour modéliser électriquement la cellule solaire bifaciale (N+/PP+), quand celle à est illuminée par sa face arrière, on utilise toujours le modèle présenté par la figure (II.3). Le courant de court-circuit, la vitesse de recombinaison effective à la face arrière et le rendement quantique interne (I.Q.E) sont calculés en prenant en considération la génération dans la couche P+.

### 7.1. L'efficacité quantique interne (I.Q.E) :

Le Rendement quantique interne de la cellule solaire bifaciale, quand elle est illuminée par sa face arrière, est donné par la relation suivante.[6]

$$Q(\lambda) = \frac{\alpha L_{bsf}}{(\alpha^2 L^2 b_{sf} - 1) \left( \frac{S_{eff} L_n}{D_n} \sinh\left(\frac{H}{L_p}\right) + \cosh\left(\frac{H}{L_p}\right) \right)} \left[ \frac{\alpha L_{bsf} + \frac{S_n L_{bsf}}{D_{bsf}}}{\left( \frac{S_n L_{bsf}}{D_{bsf}} \right) \sinh\left(\frac{W_{bsf}}{L_{bsf}}\right) + \cosh\left(\frac{W_{bsf}}{L_{bsf}}\right)} - \left[ \alpha L_{bsf} + \frac{S_n L_{bsf}}{D_{bsf}} \right] \right] \quad (\text{II.29})$$

### 7.2. La vitesse de recombinaison effective à la face arrière :

La vitesse de recombinaison effective à la face arrière de la cellule solaire bifaciale BSF, illuminée par sa face arrière,  $S_{eff}$  est donnée par l'équation suivante [5] :

## Chapitre II

---

$$S_{\text{eff}} = \frac{N\alpha}{N_{\text{bsf}}} \frac{D_{\text{bsf}}}{L_{\text{bsf}}} \frac{\frac{S n L_{\text{bsf}}}{D_{\text{bsf}}} + t h\left(\frac{W_{\text{bsf}}}{L_{\text{bsf}}}\right)}{1 + \frac{S n L_{\text{bsf}}}{D_{\text{bsf}}} t h\left(\frac{W_{\text{bsf}}}{L_{\text{bsf}}}\right)} \quad (\text{II.30})$$

### 7.3. Le courant de court circuit $J_{\text{cc}}$ :

Le courant de court-circuit  $I_{\text{cc}}$  de la cellule solaire bifaciale, illuminée par sa face arrière, est donné par la relation suivante [6] :

$$J_{\text{cc}} = S \times q \times \int_{\lambda_{\text{min}}}^{\lambda_{\text{max}}} \emptyset(\lambda) \times Q(\lambda) \times (1 - R) d\lambda \quad (\text{II.31})$$

Avec :

$\emptyset(\lambda)$  : Le flux des photons incidents.

$Q(\lambda) \times (1 - R)$  : Le flux des photons transmis.

$J_{\text{cc}}$ : Le courant de court-circuit.

$q$ : La charge de l'électron.

$S$  : La surface photo-active de la cellule solaire.

$\lambda$ : La longueur d'onde.

Le courant photo-généré par la cellule bifaciale est égal à la somme des deux courants générés, c'est-à-dire le courant généré par l'éclairement de la face avant et le courant généré par l'éclairement de la face arrière.[6]

## 8. 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 fabrication de la structure de la cellule photovoltaïque la 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 éclairement par la face avant.

## Chapitre II

---

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.[5]

### Références :

- [1] **FOUTEM FATIMA**, « Etude de la Contribution d'une Couche BSF (Back Surface Field) sur les Performances des Cellules Solaires en GaAs ». Magister en physique (2013/2014).
- [2] **A. Mouhoub**, « Procédés Technologiques Alternatifs de Réalisation des Photopiles Solaires au Silicium Cristallin ». Rev. Enger. Ren. Vol. 4 (2001), 11-22.
- [3] Modélisation par MATLAB de la cellule solaire bifaciale à base de silicium monocristallin PAR Cherouana Abdelbaki Soutenu le : 30 /06/2013
- [4] Site web: Damasus petrochemical refinery .com. (26/04/2021).
- [5] Modélisation de la cellule photovoltaïque bifaciale Réalisé par : -Yahia Cherif Khaled ,2019/2020.
- [6] « Optimisation des paramètres photovoltaïques de cellules solaires bifaciales au silicium à base de type N et leur comparaison avec celles de type P » Soutenu le 22/05/2017

Présenté par : DJELIL Noura ,Soutenu le 22/05/2017



# **Chapitre III :**

## **Résultats de la simulation et discussions**

## Chapitre III

---

### 1. Introduction :

La simulation numérique est couramment utilisée pour l'optimisation des cellules solaires. Pour valider les modèles physiques présentées 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  $I_{cc}$  et Son facteur de forme  $FF$  et d'essayer d'optimiser leurs performances.

Pendant 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.

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

Le di séléniure de cuivre et d'indium  $CuInSe_2$  dans sa structure chalcopyrite est un semi-conducteur promoteur 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 stœchiométrie 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

#### 2.1 Description générale des cellules solaires a base du CIGS :

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

- Une électrode métallique arrière en Molybdène déposée sur substrat de verre.

## Chapitre III

- Une couche absorbante Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> de type p et a un fort coefficient d'absorption (de l'ordre de  $10^{-5} \text{cm}^{-1}$ ) 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  $1 \text{ à } 10^{-2} (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$ .
- 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  $10^4 (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$ .
- Une grille métallique avant 'aluminium-nickel' nécessaire pour la collecte de courant.

### 2.2. La cellule solaire bifaciale a base du CIGS :

Dans le cas de la cellule bifaciale Figure (III.1), 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.

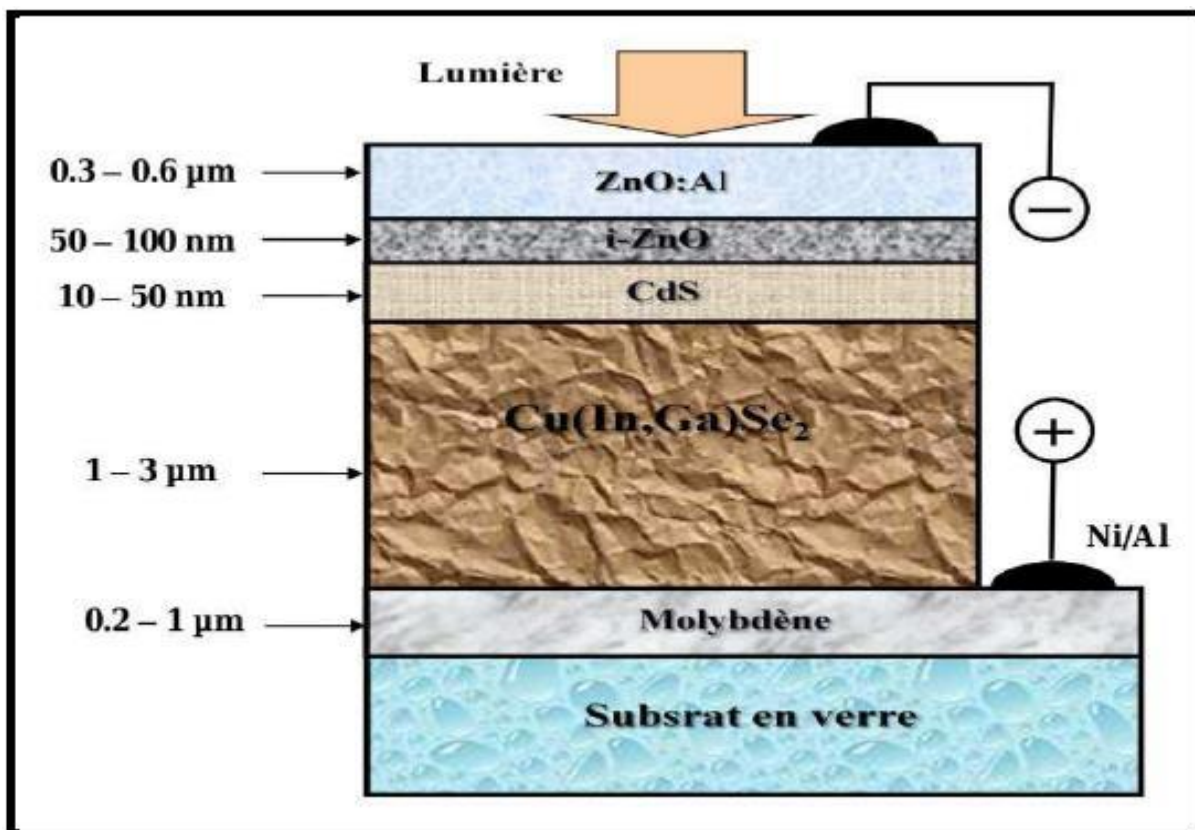


Figure (III.1) : Cellule solaire bifaciale À base de CIGS [5].

## Chapitre III

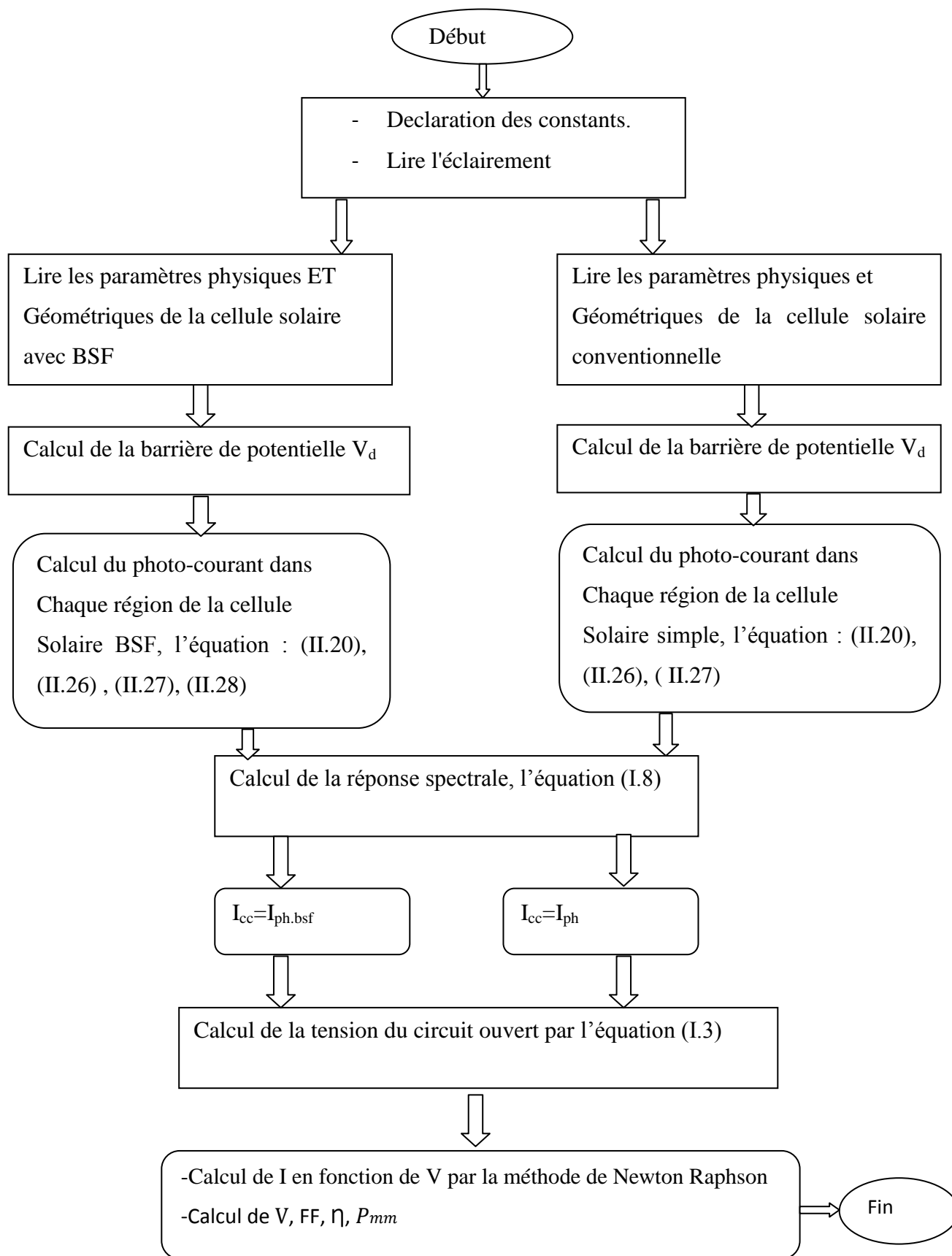
Par la suite le tableau (III.1) montre les performances des cellules photovoltaïques en couches minces à base de matériau CIGS utilisées durant la simulation :

régions paramètres	CdS	CIGS	$P^+$
Épaisseur ( $\mu\text{m}$ )	0.05	3.5	
$E_g$ (eV)	2.4	1.16	
$N_c$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$2.2 \cdot 10^{18}$	$2.2 \cdot 10^{18}$	
$N_v$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$1.2 \cdot 10^{19}$	$1.2 \cdot 10^{19}$	
Mobilité des électrons (trous) ( $\text{cm}^2/\text{V.s}$ )	100(25)	100(25)	
Permittivité	10	13.6	
Coefficient de réflexion, ( $\lambda$ )	0.05		
Factor de quality, $Q$	1.14		
Vitesse de recombinaison des trous à la surface avant ( $\text{cm/s}$ )	$10^7$		
Vitesse de recombinaison des électrons à la surface arrière ( $\text{cm/s}$ )	$10^7$		
Affinité électronique(eV)	4.4	4.5	
L'épaisseur de la couche $P^+$ $W$ ( $\mu\text{m}$ )			0.7
Le dopage de la couche $P^+$ ( $\text{cm}^{-3}$ )			$8 \cdot 10^{18}$

**Tableau (III.1) :** Les paramètres de la cellule CdS/CIGS utilisées durant la simulation [6]

### 3. Résultats de la modélisation des cellules solaires conventionnelle et avec BSF

**3.1. L'organigramme de calcul :** Pour prévoir les caractéristiques des deux cellules en question (conventionnelle et avec BSF), nous avons réalisé un programme informatique sous MATLAB. Ce dernier est mis au point suivant l'organigramme ci-dessous.

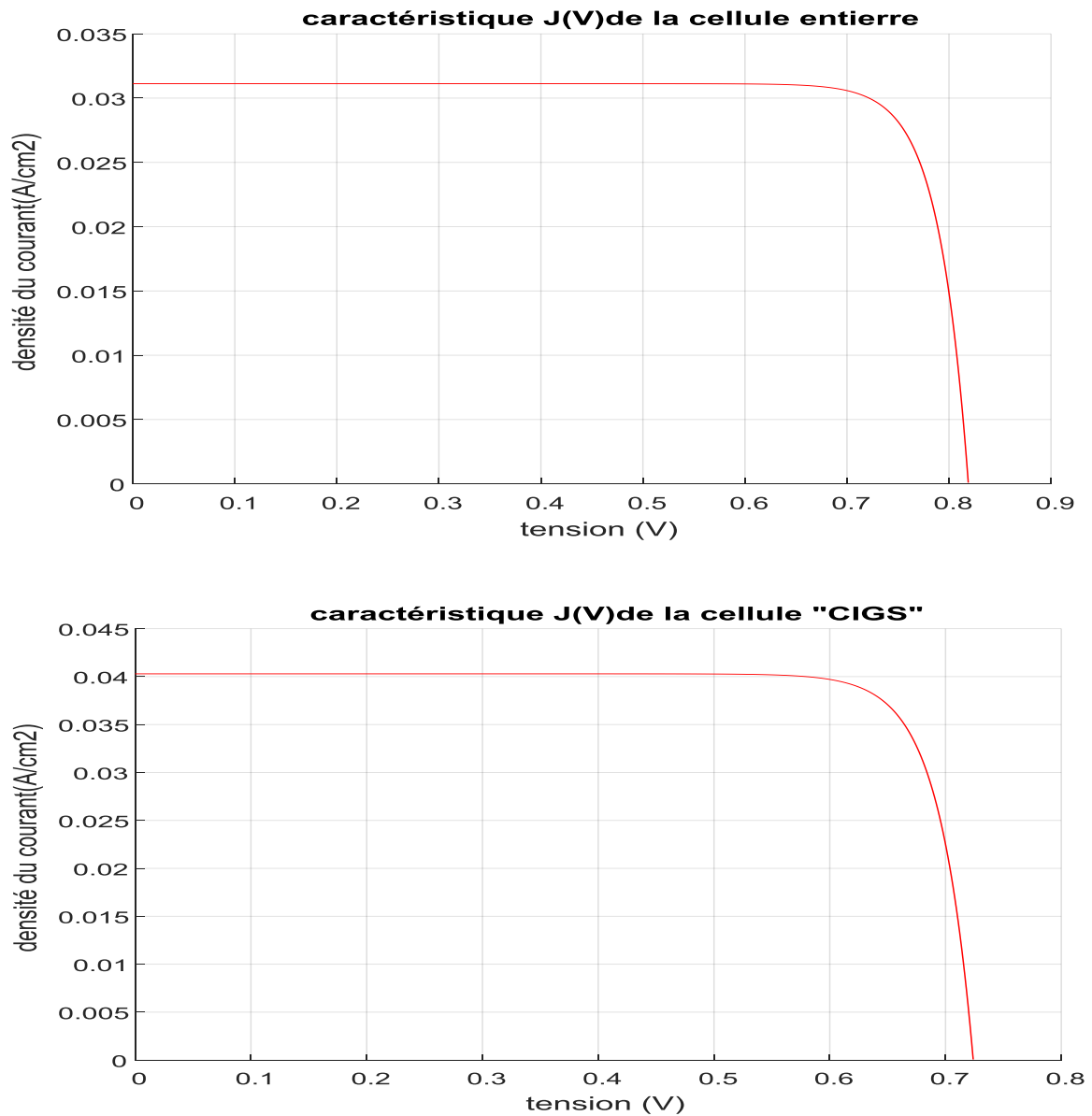


### Organigrammes de simulation

#### 3.2. Caractéristiques I(V) et P(V) des cellules solaires conventionnelle et avec BSF :

## Chapitre III

Pour obtenir les caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$ , nous avons utilisé le circuit électrique équivalent représenté par la figure(I.6), les résultats obtenus sont représentés sur la figure III.2 et III.3.



**Figure III.2:**Caractéristique  $J(V)$  de la cellule solaire CIGS

Les paramètres essentiels que nous avons obtenus par la modélisation des deux cellules sont résumés dans le tableau (2).

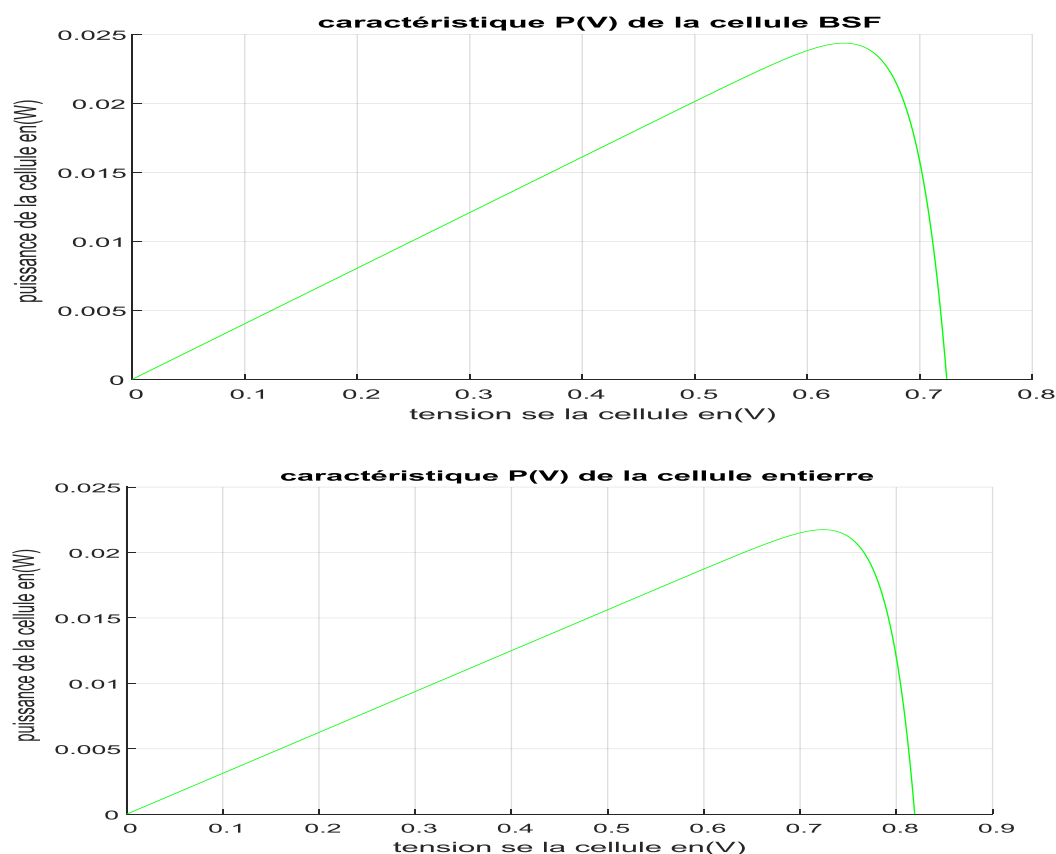
## Chapitre III

paramètres	$I_{cc} (A/cm^2)$	$V_{co}(V)$	Rendement $\eta(\%)$	Puissance(W)	FF(%)
Cellule BSF	0.0403	0.7239	22.1844	0.1098	83.5251

paramètres	$I_{cc} (A/cm^2)$	$V_{co}(V)$	Puissance(W)	Rendement $\eta(\%)$	FF(%)
Cellule conventionnelle	0.0312	0.8191	0.0728	18.1313	84.9578

**Tableau (III.2) :** Paramètres obtenus par modélisation électrique des cellules BSF et conventionnelle.

La caractéristique électrique J(V) sous éclairage par le spectre solaire AM 1.5 et de densité de puissance  $109.8 \text{ mW/cm}^2$  est représentée sur la figure III.2. La densité du courant de court Circuit  $J_{cc} = 40.03 \text{ mA/cm}^2$ , la tension en circuit ouvert  $V_{co} = 0.7239 \text{ V}$ , le facteur de forme  $FF = 83.5 \%$  et le rendement de conversion  $\eta = 22.18 \%$ .

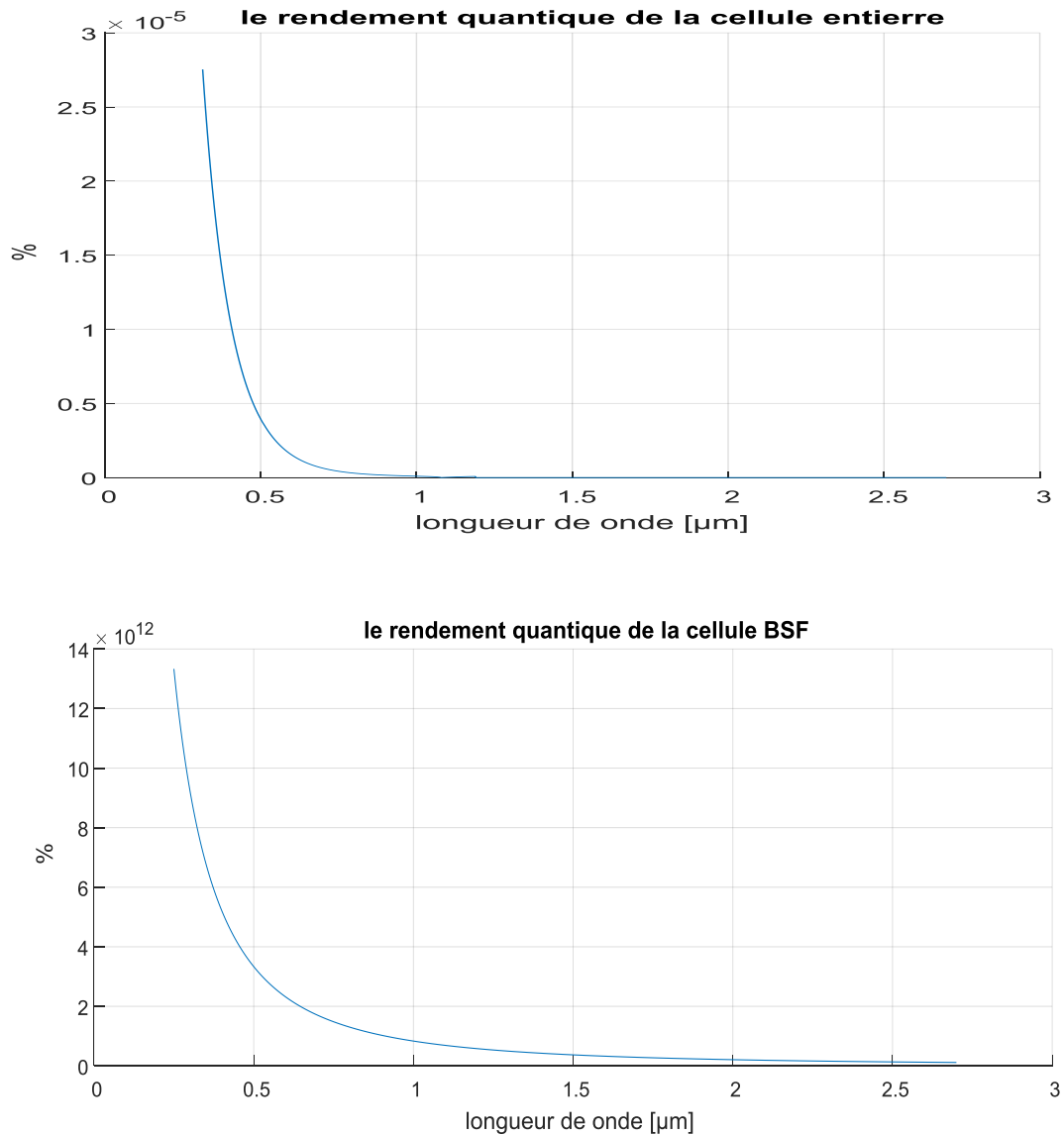


**Figure III.3:**Caractéristique P (V) de la cellule solaire CIGS

## Chapitre III

---

Notre cellule donne une bonne rentabilité par un rendement de conversion intéressant  $\eta=22.1844\%$ . Pour la caractéristique P(V) nous avons obtenu un MPP (Maximum Power Point) qui a la valeur de 0.0244 W.



**Figure III.4:**représente la variation de rendement en fonction de longueur d'onde du rayonnement incident

### 3.3. Influence des différents paramètres sur les caractéristiques de la cellule solaire bifaciale :



## Chapitre III

Dans cette partie de la modélisation, nous avons étudié l'effet du dopage, de l'épaisseur et de la vitesse de recombinaison (des porteurs minoritaires) sur les caractéristiques de la cellule solaire bifaciale. La cellule modélisée est à base de CDS/CIGS. L'émetteur (dopé type n,  $N_d=10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) est d'épaisseur égale à **0.05  $\mu\text{m}$** . La base est dopée type p ( $N_a=2 * 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ) et d'épaisseur égale à **1.55  $\mu\text{m}$**  et la BSF (fortement dopée, ( $N_{bsf}=8 * 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) est d'épaisseur égale à **0.7  $\mu\text{m}$** . Les vitesses de recombinaison à la surface avant et à la surface arrière sont respectivement égales à  $S_n = 10^7 \text{ cm.s}^{-1}$  et  $S_p = 10^7 \text{ cm.s}^{-1}$ . L'ordre de grandeur de ces paramètres a été choisi sur la base de la littérature [1, 4].

### 3.3.1. L'influence de l'épaisseur de l'émetteur :

Paramètres Epaisseur	$I_{cc} (\text{A}/\text{cm}^2)$	$V_{co} (\text{V})$	$\eta (\%)$	FF(%)
0.05 $\mu\text{m}$	0.0399	0.7239	21.9513	83.5202
0.01 $\mu\text{m}$	0.0403	0.7239	22.1844	83.5251
0.012 $\mu\text{m}$	0.0403	0.7239	22.1722	83.5249

**Tableau (III.3):** Résultats de l'influence de l'épaisseur de l'émetteur ( $X_j$ ) sur les caractéristiques de la cellule solaire bifaciale.

Dans le tableau III.3, nous avons représenté l'influence de l'épaisseur du CdS sur le courant De court-circuit, nous remarquons que le courant de court-circuit décroît avec l'augmentation De l'épaisseur. et nous avons reporté l'influence de l'épaisseur sur la tension en circuit ouvert ; nous observons que l'épaisseur n'a pas beaucoup d'influence sur  $V_{co}$  et nous constatons que le facteur de forme est presque constant avec l'augmentation de l'épaisseur. et le rendement photovoltaïque décroît avec l'augmentation de l'épaisseur. Ces résultats sont en accord avec des résultats de Simulation d'une cellule solaire en CIGS dans [2].

L'effet de l'épaisseur de la couche en CdS peut être expliqué comme suit : pour une couche en CdS plus mince, la plupart des porteurs photo générés dans cette couche sont collectés. Quand L'épaisseur augmente, les photons de courtes longueurs d'onde sont absorbés à une distance plus loin de la jonction CdS/CIGS par conséquent les porteurs photo générés se recombinent avant d'atteindre la jonction. Par conséquent, il y'a une chute du courant de court-circuit, de la tension en circuit ouvert et le rendement avec l'augmentation de l'épaisseur du CdS. Généralement l'épaisseur de la couche en CdS doit être entre 50 nm et 60 nm [3].

### 3.3.2. L'Influence de l'épaisseur de la base :

## Chapitre III

---

Nous avons simulé la variation des paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en fonction de l'épaisseur de la couche en CIGS comprise entre 1.5  $\mu\text{m}$  et 5 $\mu\text{m}$  et la couche en CdS est de 10 nm. Les résultats de simulation sont illustrés dans le tableau III.4

Paramètres Epaisseur	$I_{cc} \left( \frac{A}{cm^2} \right)$	$V_{c0} (V)$	$\eta (\%)$	FF(%)
1.5 $\mu\text{m}$	0.0318	0.6405	21.9381	81.9051
2 $\mu\text{m}$	0.0322	0.6459	23.1819	82.0143
5 $\mu\text{m}$	0.0393	0.6750	22.1722	83.5249

**Tableau (III.4):**Les résultats de simulation

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 de la photo courant.

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

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

## 4.Conclusion:

## Chapitre III

---

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.

La simulation numérique de la cellule solaire en CIGS par MATHLAB a été présentée dans ce chapitre. Ses caractéristiques électriques sont étudiées et analysées par la variation des grandeurs des paramètres : épaisseurs et dopages des couches en CdS et CIGS. Il s'est avéré que la variation des paramètres de la couche frontale (en CdS de type n) ont généralement des effets moins significatifs sur les caractéristiques électriques de la cellule en comparaison avec les paramètres de la couche absorbante (en CIGS de type p). Cela est justifié par le fait que la couche frontale en CdS est généralement d'une épaisseur très fine en comparaison avec l'épaisseur de la couche absorbante en CIGS. De plus, l'absorption de la lumière dans le CdS est limitée du fait qu'il possède un gap d'énergie large ( $E_g = 2.4 \text{ eV}$ ). avec fraction molaire  $x$  de la couche en CIGS a une valeur optimale autour de 0.31 correspondante à une énergie du gap de 1.16 eV, ce résultat est en très bon accord avec celui trouvé expérimentalement.

## Références

### Chapitre III

---

- [1] **A. Helmaoui, A. Belghachi et B. Bellali**, « Amélioration Du Rendement De Collecte Et La Tension  $V_{cd}$  d'une Cellule Solaire Avec Couche BSF ». Revue des Energies Renouvelables CER 07 Oujda, (2007) 153-156.
- [2] **R. Merahi<sup>1</sup>, R. Chenni<sup>2</sup>, M. Houbes**, « Modélisation et Simulation d'un Module PV par MatLab ». 10ème Séminaire International sur la Physique Energétique, Journal of Scientific Research N° 0 vol. 1, (2010).
- [3] **G. Adolf, K. Joachim, V. Bernhard**, «Crystalline Silicon Solar Cells». Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Freiburg, Germany, (1998).
- [4] **A. Zerga, A. Oulebsir, M. Zitouni-Amini**, « Modélisation, Simulation et Optimisation des Performances d'une Cellule Solaire Conventiennelle au Silicium ». Rev. Energ. Ren. Valorisation (1999) 279-285.
- [5] **I. Bouchama**, "Contribution à l'amélioration des performances des cellules solaires  $CuIn_{1-x}Ga_xSe_2$  ", Thèse de doctorat, Université de Sétif (2012).
- [6] **M. Gloeckler, A. L. Fahrenbruch, ET J. R. Sites**, in Proc. 3rd World Conf. Photovoltaic Energy Conversion, vol. 1, (2003) pp. 491–494.

**Conclusion générale :**

## 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  $V_{d, On}$  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<sup>2</sup> puis la cellule solaire BSF. Les principaux résultats obtenus montrent 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 ; la 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+).
- ✚ Les résultats obtenus montrent clairement que les valeurs des outputs fournis par la cellule bifaciale sont mieux que celles-ci fournies par la cellule solaire conventionnelle

## Résumé

Ce mémoire intitulé « Etude et simulation d'une cellule solaire bi-faciale » a l'objectif principal d'améliorer la puissance et le rendement de conversion photovoltaïque 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 modèle 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 outputs fournies par la cellule bifaciale sont mieux que celles-ci fournies par la cellule solaire conventionnelle

**Les mots clés :** cellule solaire bifaciale – simulation – énergie - photovoltaïque

## Abstract

This thesis entitled "Modeling the bifacial solar cell" has the main objective of improving the power and conversion PV 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.

**key words :** bifacial solar cell – simulation – energy - PV

## ملخص

هذا الرسالة بعنوان "دراسة محاكاة لخلية شمسية ثنائية الوجه" تهدف بشكل رئيسي إلى تحسين الطاقة وكفاءة التحويل الكهروضوئية للخلايا الشمسية. لقد قمنا بمحاكاة نوعين من الخلايا الشمسية: الخلية الشمسية التقليدية والخلية الشمسية ثنائية الوجه (BSF) أخذنا كمثال للتطبيق تقنية الأغشية الرقيقة CdS / CIGS من خلال المحاكاة باستخدام برنامج MATLAB تحققنا من صحة نموذجنا ونوع الخلايا باستخدام الأول كمرجع لمقارنة الثاني. أظهرت النتائج أن قيم المخرجات التي توفرها الخلية ثنائية الوجه أفضل من تلك التي توفرها الخلية الشمسية التقليدية.

**الكلمات المفتاحية:** خلية شمسية ثنائية الوجه – محاكاة – الطاقة - الكهروضوئية