

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la
Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Electromécanique

Thème

**Modélisation de la cellule photovoltaïque
bifaciale**

Réalisé par :

✚ MESBAHI Haroun
✚ CHRAIT Said
✚ HEZLA Aymen
✚ LOUNIS Moussa

Encadré par :

• Dr. LARGOT Soulef

Année Universitaire 2022-2023





Remerciements

Tout d'abord, je remercie dieu -ALLAH- de tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience durant toutes ces années d'études.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude et mes sincères remerciements à

***Dr. LARGOT Soulef**, Professeur à L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued,
pour avoir dirigé ce travail.*

Mes sincères remerciements aux messieurs les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en participant au jugement de ce travail.

Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidé à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.

En fin je remercie tout particulièrement mes parents, pour leur soutien inconditionnel tout au long de ces longues années d'études.





Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents qui m'ont soutenu durant toute la durée de mes études.

À mes très chères sœurs et à ma grande famille.

À tous mes amis.

À tous ceux qui m'aiment et que j'aime

À vous.





Sommaire

Dédicace

Remerciement

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale

a

Chapitre I : Notions de base et presentation de la cellule photovoltaïque	
I.1.Introduction	3
I.2. Le spectre solaire	3
I.3. La masse d'air	5
I.4. Rayonnement solaire	6
I. 4.1.Le rayonnement direct	6
I.4.2. Le rayonnement diffusé	6
I.4.3. Le rayonnement solaire réfléchi	6
I. 4.4. Le rayonnement globale	6
I.5.Le principe de L'effet photovoltaïque	8
I.5.1.Histoire de cellules solaires	8
I.5.2. L'effet photovoltaïque	8
I.5.3. Absorption du rayonnement dans le matériau (Propriétés optiques des semiconducteurs	9
I.6. La structure de la cellule solaire	10
I.6.1.L'émetteur et le base	10
I.6.2.Les contacts	10
I.6.3.La fenêtre	11
I.6.4.Couche anti reflet	11
I.7. Amélioration du rendement	12
I.7.1.Effet du confinement optique	12
I.7.2.Effet de passivation	12
I.7.3.Effet d'un champ avant ou arrière	12
I.8.Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	13
I.9.Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque	15
I.9.1.Le modèle à une seule diode	15
I.9.2. Le modèle simplifié à une seule diode	17

I.9.3. Le modèle à deux diodes	18
I.9.4. Détermination des paramètres du circuit équivalent	18
I.9.4.1. Le courant de court-circuit I_{cc}	19
I.9.4.2. La tension de circuit ouvert, V_{co}	20
I.9.4.3. La réponse spectrale, $SR(\lambda)$	20
I.9.4.4. La puissance maximale, P_m	20
I.9.4.5. Le facteur de forme, FF	21
I.9.4.6. Le rendement de conversion η	21
I.10. Les différentes filières photovoltaïques	21
I.10.1. Cellules au silicium cristallin	22
I.10.1.1. Cellule au silicium monocristallin	22
I.10.1.2. Cellule au silicium poly-cristallin	22
I.10.2. Cellules à base de couches minces	23
I.10.3. Cellules organiques et plastiques	24
I.10.4. Cellules PV multi-jonctions	25
I.11. Conclusion	26
Chapitre II : Modelisation de la cellule solaire bifaciale	
II.1. Introduction	28
II.2. Théorie du BSF	28
II.3. Structure et principe de fonctionnement de la cellule solaire bifaciale BSF	29
II.3.1. Structure de la cellule solaire bifaciale BSF	29
II.3.2. Principe de fonction de la cellule solaire bifaciale BSF	30
II.4. Caractéristique électrique de la cellule solaire bifaciale BSF	30
II. 5. La réflexion par Albédo	33
II.6. Modélisation électrique de la cellule solaire bifaciale BSF éclairée par face avant	33
II.6.1. Eclairement, puissance incidente et flux solaire au sol	34
II.6.2. Le coefficient d'absorption α	35
II.6.3. Génération	35
II.6.4. Calcul de la densité de photo courant, $J_{ph}(\lambda)$	35
II.6.4.1. La photo courant dans la première zone neutre N (l'émetteur)	36
II.6.4.2. La photo courant dans la deuxième zone neutre P (la base)	37
II.6.4.3. La photo courant dans la région de charge d'espace ZCE	39
II.6.4.4. Le photo courant dans la région fortement dopée P^+	39

II.6.5.La vitesse de recombinaison effective à la face arrière	40
II.7.Conclusion	40
Chapitre III : Discussions résultats de la modélisation	
III.1.Introduction	42
III.2.Aperçu sur la cellule solaire en couche mince Cbs/Cigs	42
III.2.1.Description générale des cellules solaires a base du CIGS	43
III.2.2.La cellule solaire bifaciale a base du CIGS	44
III.3.Simulation de la caractéristique de la cellule Cds/CIGS conventionnelle	45
III.3.1.Présentation des caractéristiques I(V) et P(V)	50
III.4.Simulation des caractéristiques de la cellule CdS/CIGS bifaciale	52
III.4.1.Présentation du photo-courant	52
III.4.2.Présentation des caractéristiques I(V) et P(V)	53
III.5.Etude comparative entre la cellule solaire CdS/CIGS conventionnelle et bifaciale	54
III.6.Influence des différents paramètres sur les caractéristiques de la cellule solaire bifaciale	55
III.6.1.Influence des paramètres de l'émetteur	55
III.6.1.1.L'influence de Xj (l'épaisseur de l'émetteur)	55
III.6.1.2.L'influence de Nd (dopage de l'épaisseur de l'émetteur)	56
III.6.2.L'Influence de l'épaisseur de la base	56
III.6.3.Conclusion de cette étape	57
III.7.Conclusions	57
Conclusion générale	60
Bibliographique	
Annexe	
Résumé	

An orange scroll graphic with a gradient, featuring a rolled-up top edge and a small circular detail on the left side.

Liste des figures

LISTE DES FIGURES

Page

Chapitre I : Notions de base et presentation de la cellule photovoltaïque		
Figure 1	<i>Spectre solaire</i>	3
Figure 2	<i>Description de l'incidence sur la terre</i>	4
Figure 3	<i>Spectres solaires hors atmosphère et au sol</i>	5
Figure 4	<i>Description du nombre de masse d'air</i>	6
Figure 5	<i>Types de rayonnement solaire reçus au sol</i>	7
Figure 6	<i>Rayonnement solaire capté par un plan horizontal et incliné.</i>	7
Figure 7	<i>Intensité de l'ensoleillement reçu sur un plan horizontal et incliné</i>	7
Figure 8	<i>Création du courant électrique sous l'effet de la lumière</i>	9
Figure 9	<i>Profondeur de pénétration et coefficient d'absorption de quelques semi-conducteurs à 300K en fonction de la longueur d'onde</i>	9
Figure 10	<i>La structure fondamentale d'une cellule solaire</i>	11
Figure 11	<i>Structure d'une cellule photovoltaïque</i>	13
Figure 12	<i>Structure basique d'une cellule solaire</i>	14
Figure 13	<i>Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque</i>	14
Figure 14	<i>Le modèle à une seule diode</i>	15
Figure 15	<i>Influence de la résistance série R_s et de la résistance parallèle R_{sh}</i>	16
Figure 16	<i>Le modèle à deux diodes pour une modélisation plus exacte</i>	18
Figure 17	<i>Courbe I-V simulée d'un module solaire : Le circuit équivalent simplifié</i>	19
Figure 18	<i>Caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule solaire</i>	21
Figure 19	<i>Cellule monocristallin</i>	22
Figure 20	<i>Cellule poly cristallin</i>	22
Figure 21	<i>Cellule amorphe</i>	23
Figure 22	<i>Câblage des cellules dans un module</i>	23
Figure 23	<i>Cellule PV organique</i>	24
Figure 24	<i>Classification des principales technologies de cellules PV</i>	25
Chapitre II : Modelisation de la cellule solaire bifaciale		
Figure 1	<i>Cellule solaire a champ BSF</i>	28
Figure 2	<i>Diagramme de bandes d'une cellule solaire à BSF</i>	29
Figure 3	<i>Représentation schématique de la structure d'une cellule solaire BSF</i>	30
Figure 4	<i>Le circuit électrique équivalent de la cellule solaire bifaciale</i>	30

Figure 5	<i>Représentation schématique du principe de la réflexion par albédo</i>	33
Figure 6	<i>Représentation schématique du model à une dimension de la cellule solaire bifaciale BSF</i>	34
Figure 7	<i>Approximation de l'éclairement solaire au sol</i>	34
Chapitre III : Discussions résultats de la modélisation		
Figure 1	<i>Structure de la cellule solaire à base CIGS</i>	43
Figure 2	<i>Cellule solaire (a) semi-transparente et (b) bifaciale à base de CIGS</i>	44
Figure 3	<i>Distribution de l'éclairement incidente en fonction de la longueur d'onde</i>	45
Figure 4	<i>Coefficient d'absorption du CIGS en fonction de la longueur d'onde</i>	46
Figure 5	<i>Coefficient d'absorption du CdS en fonction de la longueur d'onde</i>	46
Figure 6	<i>Nombre de photons incidents en fonction de la longueur d'onde</i>	47
Figure 7	<i>Densité du courant que déploie le CdS (courant des trous) en fonction de la longueur d'onde</i>	48
Figure 8	<i>Densité du courant que déploie le CIGS (courant des électrons) en fonction de la longueur d'onde</i>	48
Figure 9	<i>Densité du courant que déploie la ZCE en fonction de la longueur d'onde</i>	49
Figure 10	<i>La densité du courant total que délivre la cellule entière en fonction de la longueur d'onde</i>	50
Figure 11	<i>La caractéristique de sortie I(V) de la cellule CdS/CIGS</i>	50
Figure 12	<i>La puissance P(V) de la cellule CdS/CIGS en fonction de la tension</i>	51
Figure 13	<i>Densité du courant que déploie la couche arrière P+ en fonction de la longueur d'onde</i>	52
Figure 14	<i>La densité du courant total que délivre la cellule entière en fonction de la longueur d'onde</i>	53
Figure 15	<i>La caractéristique de sortie I(V) de la cellule CdS/CIGS BSF</i>	53
Figure 16	<i>La puissance P(V) de la cellule CdS/CIGS BSF en fonction de la tension</i>	54

An orange scroll graphic with a gradient from light to dark orange. It has a horizontal bar at the top and two circular elements on the left side, one at the top and one at the bottom, resembling the ends of a rolled-up scroll.

Liste des tableaux

LISTE DES TABLEAUX

Page

CHAPITRE I : Notions de base et presentation de la cellule photovoltaïque		
Tableau 1	<i>Les domaines spectraux du rayonnement solaire</i>	3
Tableau 2	<i>L'indice de réfraction de quelques matériaux</i>	11
CHAPITRE III : Discussions résultats de la modélisation		
Tableau 1	<i>Les paramètres de la cellule CdS/CIGS utilisées durant la simulation</i>	44
Tableau 2	<i>Caractéristiques de sortie de notre simulation de la cellule PV a base du CIGS</i>	51
Tableau 3	<i>Résultats des caractéristiques de sortie publier par NREL(National Renewable Energy Laboratory From The USA Department Of Energy)</i>	51
Tableau 4	<i>Caractéristiques de sortie de la cellule CdS/CIGS bifaciale</i>	54
Tableau 5	<i>Résultats de comparaisons entre la cellule conventionnelle et cellule bifaciale</i>	55
Tableau 6	<i>Résultats de l'influence de l'épaisseur de l'émetteur (X_j) sur le caractéristiques de la cellule solaire bifaciale</i>	55
Tableau 7	<i>Résultats de l'influence de dopage de l'émetteur (N_d) sur les caractéristiques de la cellule solaire bifaciale</i>	56
Tableau 8	<i>Résultats de l'influence de l'épaisseur de la base (W_b) sur les caractéristiques de la cellule solaire bifaciale</i>	56

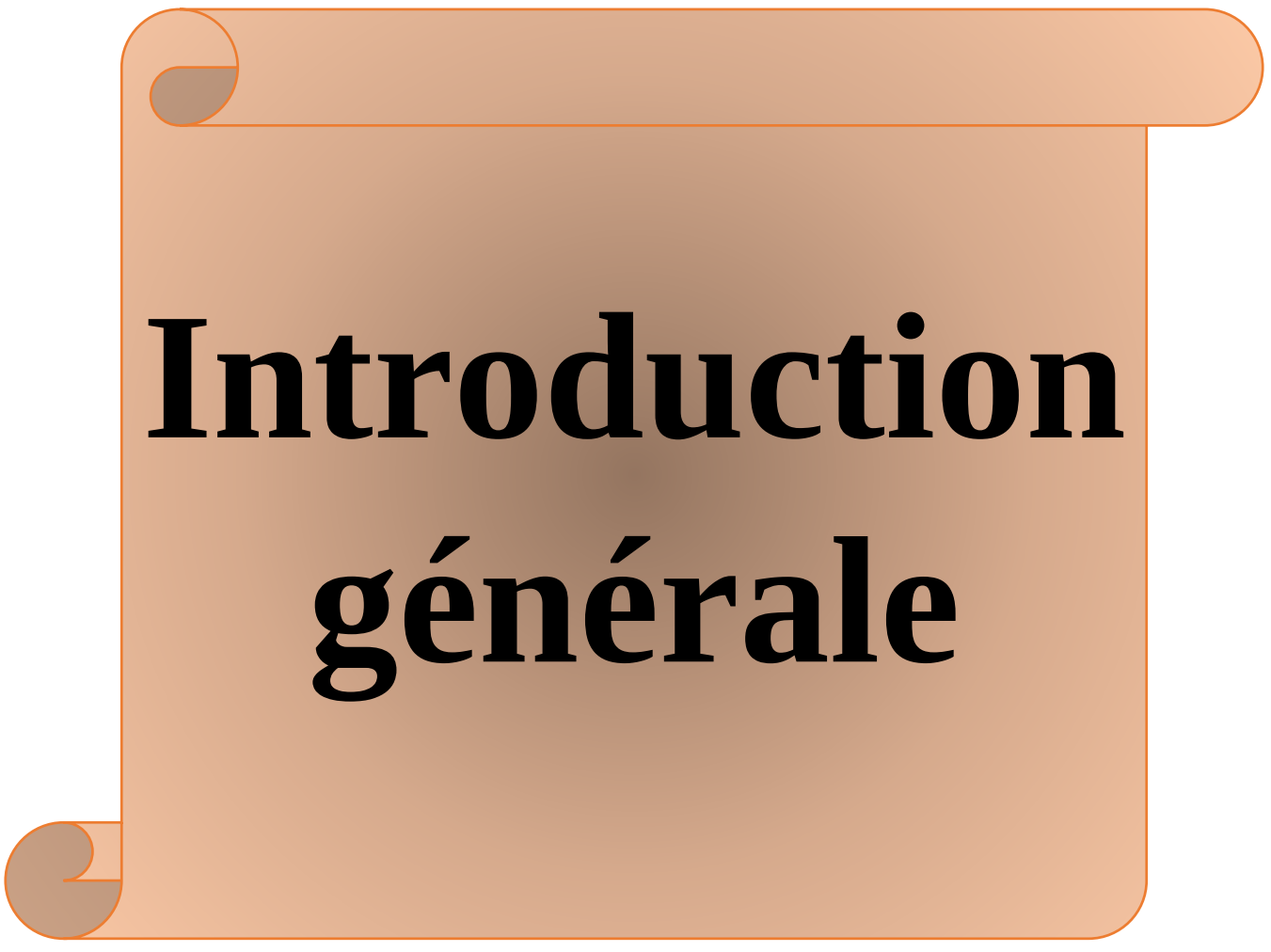
Nomenclature

Nomenclature :

- CIGS: Le quaternaire $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$.
- CdS: Le sulfure de cadmium.
- h : La constante de Planck.
- λ : 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_a : 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

- α : Le coefficient d'absorption de la lumière dans le semi-conducteur.
- R : Le coefficient de réflexion sur la surface du semi-conducteur.
- τ_n : Durées de vie d'électrons.
- n_p : densité des porteurs minoritaires dans la base.
- n_{p0} : densité des porteurs minoritaires dans la base à l'équilibre.
- E : le champ électrique interne.
- μ_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.
- μ_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.
- τ_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.
- E_{QE} : le rendement quantique externe.
- n : facteur d'idéalité de la diode.
- E_{QI} : le rendement quantique interne.

An orange scroll graphic with a gradient from light to dark orange. It has a horizontal bar at the top and a vertical bar on the left, both with rounded ends. The scroll is unrolled in the center, revealing the text.

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 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+.

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 la 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.

Chapitre I

**Notions de base et
présentation de la
cellule photovoltaïque**

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.

I.2. Le spectre solaire

La variété de rayonnements de couleurs qui composent la lumière solaire sont caractérisées par leur gamme de longueur d'onde. Le spectre solaire est défini par sa décomposition en longueur d'onde ou en couleurs [1].

La longueur d'onde des photons, grains de lumière qui constituent ce rayonnement électromagnétique, est liée à leur énergie par la relation:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (I.1)$$

ν = fréquence de l'onde électromagnétique (Hz)

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

C : est la vitesse de la lumière.

λ : est la longueur d'onde.

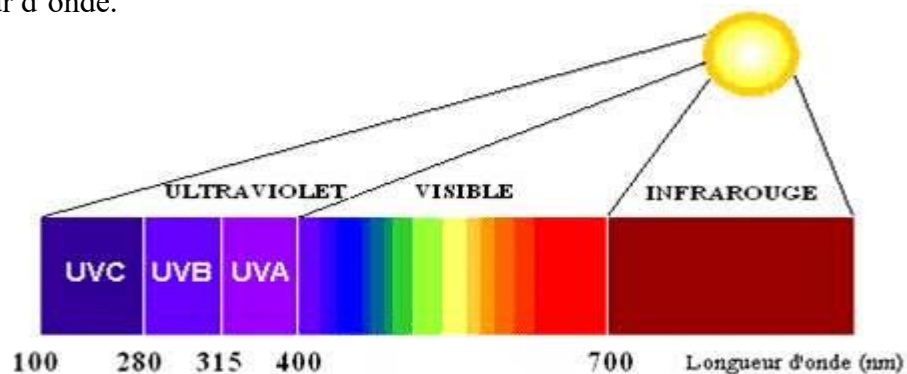


Figure I.1 : Spectre solaire [2].

Le tableau suivant explique la Figure I.1:

Le domaine	La longueur d'onde (nm)	Energie (%)
Ultra – Violet	200 - 400	07.0
Visible	400 - 800	47.0
Infra – Rouge	800 - 1400	45.5

Tableau I.1 : Les domaines spectraux du rayonnement solaire.

Une courbe standard de la répartition spectrale du rayonnement solaire extraterrestre Compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de AM0 [3].

Sa distribution en énergie est répartie comme suit :

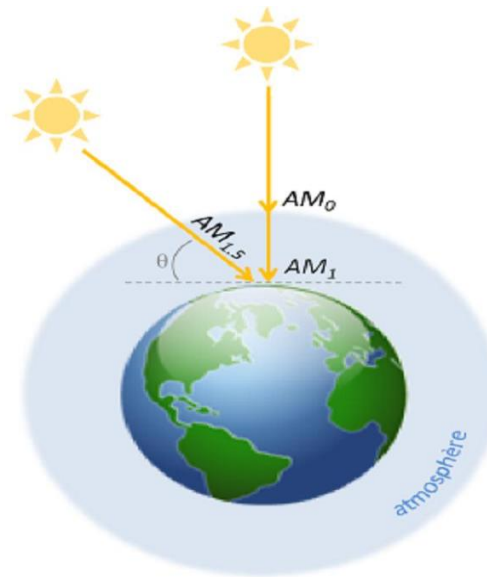


Figure I.2: Description de l'incidence sur la terre

Ultraviolet UV $0.20 < \lambda < 0.38 \mu\text{m}$ 64%

Visible $0.38 < \lambda < 0.78 \mu\text{m}$ 48.0%

Infrarouge IR $0.78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$ 45.6%

Il existe également deux autres types d'illumination simulée, décrits dans la bibliographie, les illuminations AM1 et AM0 (voir figure I.2), correspondant respectivement à une irradiation sous incidence normale à travers l'atmosphère et sans passer au travers de l'atmosphère [4].

La figure I.3 montre la courbe standard de la répartition spectrale du rayonnement solaire extra-terrestre désignée sous le nom d'AM0. La figure I.3 montre aussi l'atténuation observée après le passage à travers une épaisseur d'atmosphère correspondant à une masse d'air 1.5, soit l'équivalent d'une hauteur du soleil de 41.8° au niveau de la mer. Ce spectre de ciel clair, noté AM 1.5 sert de référence pour la mesure de cellules photovoltaïques. Les simulateurs utilisés pour mesurer les modules s'efforcent de reproduire le module le plus fidèlement possible. Le spectre AM 1.5 présente des bandes d'absorption qui correspondent aux gaz de l'atmosphère, tels que le CO_2 et la vapeur d'eau. La figure montre également le spectre d'un corps noir dont la température de couleur serait de 5900 K, qui est très proche du spectre solaire AM0. Le soleil est souvent associé à ce corps noir, ce qui permet aux physiciens d'élaborer des modèles pour expliquer son comportement et ses émissions de rayonnement. [5].

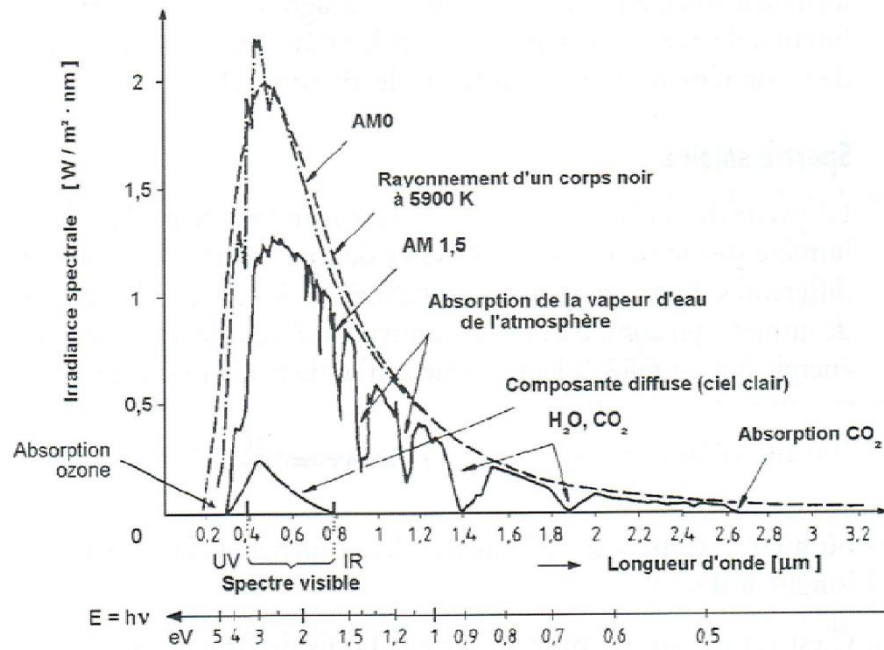


Figure I.3: Spectres solaires hors atmosphère et au sol [5].

I.3. La masse d'air

On appelle masse d'air AM , la perte de l'énergie solaire par l'absorption atmosphérique. Elle est donnée en fonction de l'angle entre le soleil et le zénith [2].

$$AM \approx \frac{1}{\sin \theta} \quad (I.2)$$

Où :

θ : représente l'angle entre la position du soleil et le zénith exprimée en (Deg).

Le spectre solaire $AM0$ correspond à une masse d'air nulle pour un rayonnement arrivant au-dessus de la couche atmosphérique à incidence normale, $AM1$ pour un soleil vertical à la terre (le soleil est au zénith), et $AM1.5$ pour un rayonnement solaire correspondant à une inclinaison du soleil de 45° par rapport au zénith.

Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith [1] .

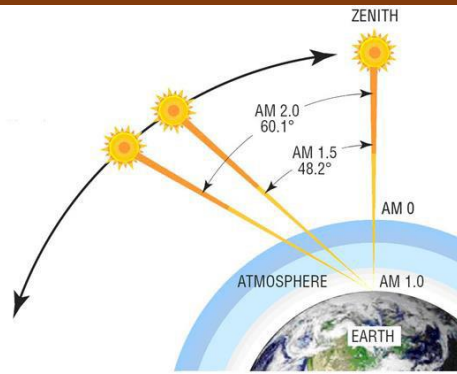


Figure I.4: Description du nombre de masse d'air.

I.4. Rayonnement solaire

La lumière du soleil ou ce qu'on appelle le rayonnement solaire contient un certain nombre d'ondes électromagnétiques qui sont envoyées par le soleil sous la forme de faisceaux lumineux, où ces derniers contiennent des ondes qui peuvent être vues et certaines d'autres ne peuvent pas être vues, le spectre visible ayant une couleur allant du rouge au violet [2].

Les rayons solaires traversant l'atmosphère terrestre sont répartis en :

I.4.1. Le rayonnement direct

Le rayonnement direct est la lumière qui provient directement du soleil par ciel clair.

C'est un flux uniforme de rayons parallèles de photons qui n'ont pas interagi avec les constituants atmosphériques.

I.4.2. Le rayonnement diffusé

Le rayonnement diffus est caractérisé par un simple changement de direction et émis indirectement par des obstacles tels que les nuages, le sol ou les bâtiments. Il peut également se propager dans toutes les directions. La part du rayonnement diffus est importante et peut atteindre 50 % du rayonnement global (selon la situation géographique du lieu).

I.4.3. Le rayonnement solaire réfléchi

Où 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).

I. 4.4. Le rayonnement global

Le rayonnement global est subdivisé en rayonnements directs, diffus et reflété par le sol) [1]. Dans la figure ci-dessous figure (I.5) est schématisé l'ensemble des rayonnements solaires reçu sur une surface terrestre.

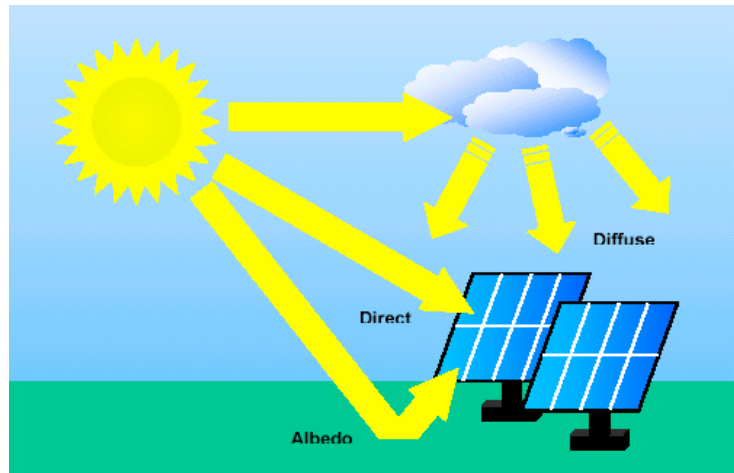


Figure I.5: Types de rayonnement solaire reçus au sol.

L'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan quelconque à un moment donné est appelée irradiation ou éclairement (noté généralement par la lettre G), il s'exprime en watts par mètre carré (W/m^2).

La valeur du rayonnement reçu par la surface du module photovoltaïque varie selon la position de ce dernier. Le rayonnement solaire atteint son intensité maximale lorsque le plan du module photovoltaïque est perpendiculaire aux rayons [5]:

Dans la figure (I.7) ci-après est illustré l'effet de l'inclinaison des modules photovoltaïques sur l'intensité de l'éclairement reçu sur leurs surfaces du levé au couché du soleil.

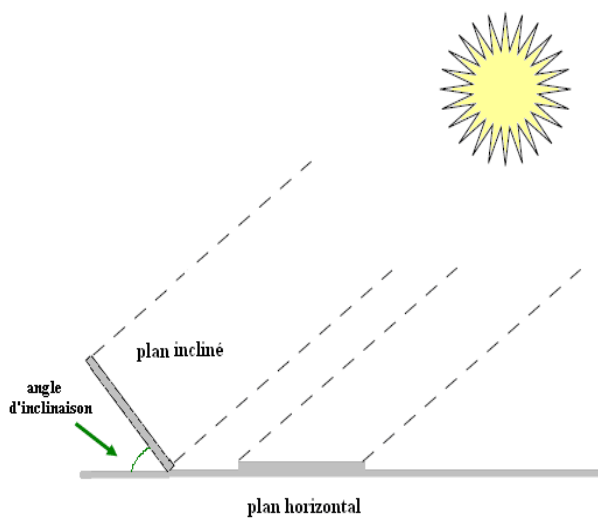


Figure I.6: Rayonnement solaire capté par un plan horizontal et incliné.

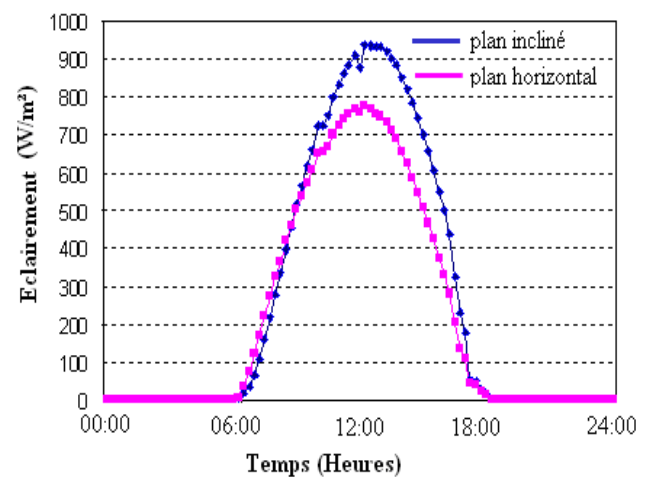


Figure I.7: Intensité de l'ensoleillement reçu sur un plan horizontal et incliné

I.5. Le principe de L'effet photovoltaïque

I.5.1. Histoire de cellules solaires

- En 1839, Antoine-César Becquerel constate les effets électriques que produisent les rayons solaires dans une pile.
- En 1905, Einstein découvrit que l'énergie de ces quanta de lumière est proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique.
- L'utilisation des cellules solaires débute dans les années quarante. Le domaine spatial a besoin d'une énergie sans combustible embarqué. La recherche s'intensifie sur le photovoltaïque.
- La première cellule solaire P-N à base de silicium monocristallin a été réalisée par Chapin, Fuller et Pearson dans les laboratoires Bell en 1954. Le rendement était de 6 % mais fut rapidement augmenté à 10%.

C'est dans les années soixante-dix avec la crise énergétique, que les cellules solaires ont connu leurs premières applications terrestres [6].

I.5.2. L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un processus de transformation de l'énergie émise par le soleil, sous forme de photons, en énergie électrique à l'aide d'un composant semi-conducteur appelé cellule solaire. Il absorbe facilement la lumière et permet de générer un champ électrique et une tension électrique [7].

Les rayons lumineux frappent la surface de la cellule solaire.

Les photons dont l'énergie est supérieure ou égale à l'énergie de gap des matériaux sont absorbés par le matériau semi-conducteur.

Des paires électrons-trous sont créées lorsque l'énergie du photon est transférée aux électrons.

Un courant électrique continu se produit lorsque des particules sont recueillies dans les électrodes de la cellule solaire.

Une partie d'un rayon lumineux est réfléchi par la cellule solaire, tandis que l'autre est absorbé par le réseau cristallin de semi-conducteur et converti directement en courant électrique. Les paires électrons-trous sont créées pour y parvenir. [8].

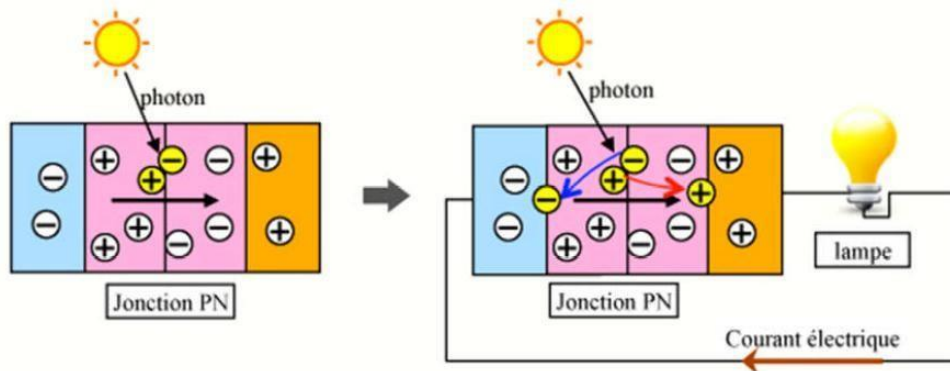


Figure I.8: Création du courant électrique sous l'effet de la lumière [10].

I.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 [7] :

$$I(\lambda, x) = I_i(\lambda)(1 - R(\lambda)\exp(-\alpha(\lambda)x) = I(\lambda, 0)\exp(-\alpha(\lambda)x) \quad (I.3)$$

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 Béer-Lambert est résumée par la figure ci-après.

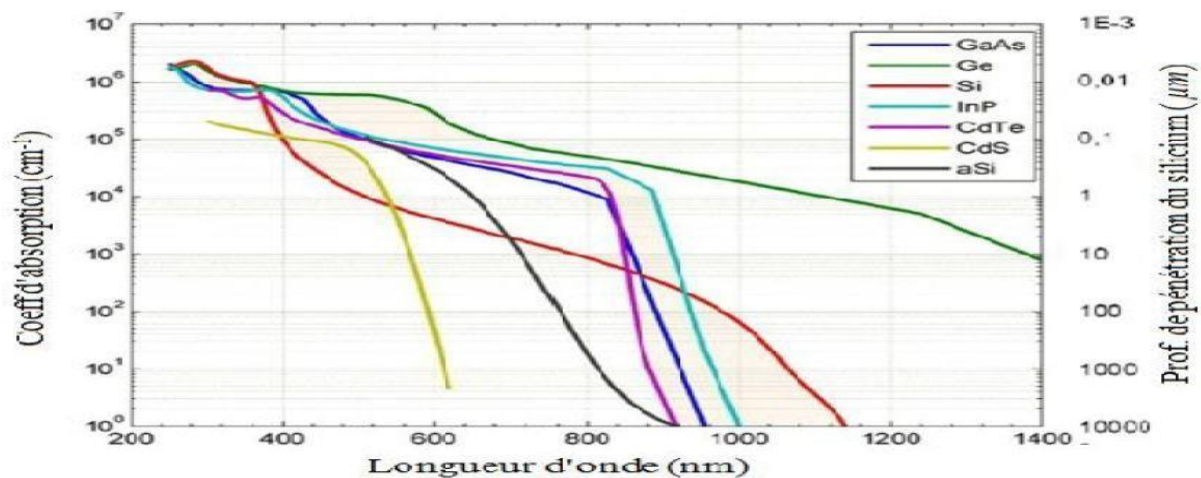


Figure I.9: Profondeur de pénétration et coefficient d'absorption de quelques semi-conducteurs à 300K en fonction de la longueur d'onde [9].

I.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 filière en général [20].

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.

I.6.1. L'émetteur et le 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. [10]

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

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 la cellule.

I.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 » [11]. 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 la cellule.

Parmi les métaux utilisés pour les contacts ohmiques des cellules solaires sont : Li, Na, K, Fe, Ni, Al, Cu, Ag, Au, Pt [12].

I.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 puissent 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 [13].

I.6.4. Couche anti reflet

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) [13].

Le rôle de la couche anti-réfléchissante est basé sur le principe de l'interférence des faisceaux lumineux dans les couches diélectriques minces [14].

Il est préférable d'utiliser une double couche antireflet (avec deux diélectriques différents) pour les cellules photovoltaïques à haut rendement [15].

Donc, sans la couche antireflet, la cellule solaire reflète jusqu'à 33 de la lumière incidente arrivant sur la surface de cellule solaire. [2].

Le tableau ci-après montre les matériaux utilisés comme des couches antireflets et leurs indices de réfraction [2].

Tableau I.2: L'indice de réfraction de quelques matériaux

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

La structure fondamentale de la cellule solaire est schématisée à la (Fig. I-10).

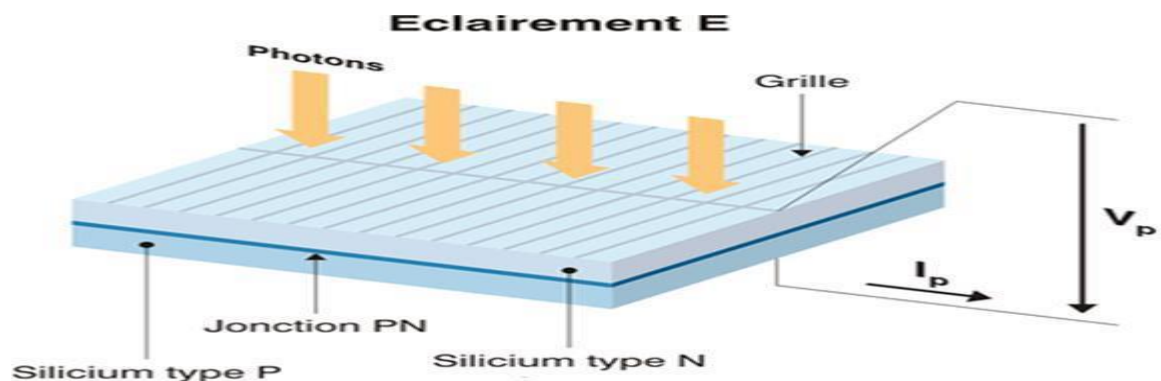


Figure I.10 : La structure fondamentale d'une cellule solaire [16].

I.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 [17].

I.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 texturisation de la surface avant par création de pyramide permettant une multitude de réflexions de la lumière à la surface soit par l'introduction des couches antireflets [18].

I.7.2. Effet de 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.

I.7.3. Effet d'un champ avant ou arrière

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 dopée (p+ ou n+) avec le même type de dopage que le substrat [20].

Dans cette zone les porteurs minoritaires injectés sont repoussés vers la jonction et participent au courant [16].

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

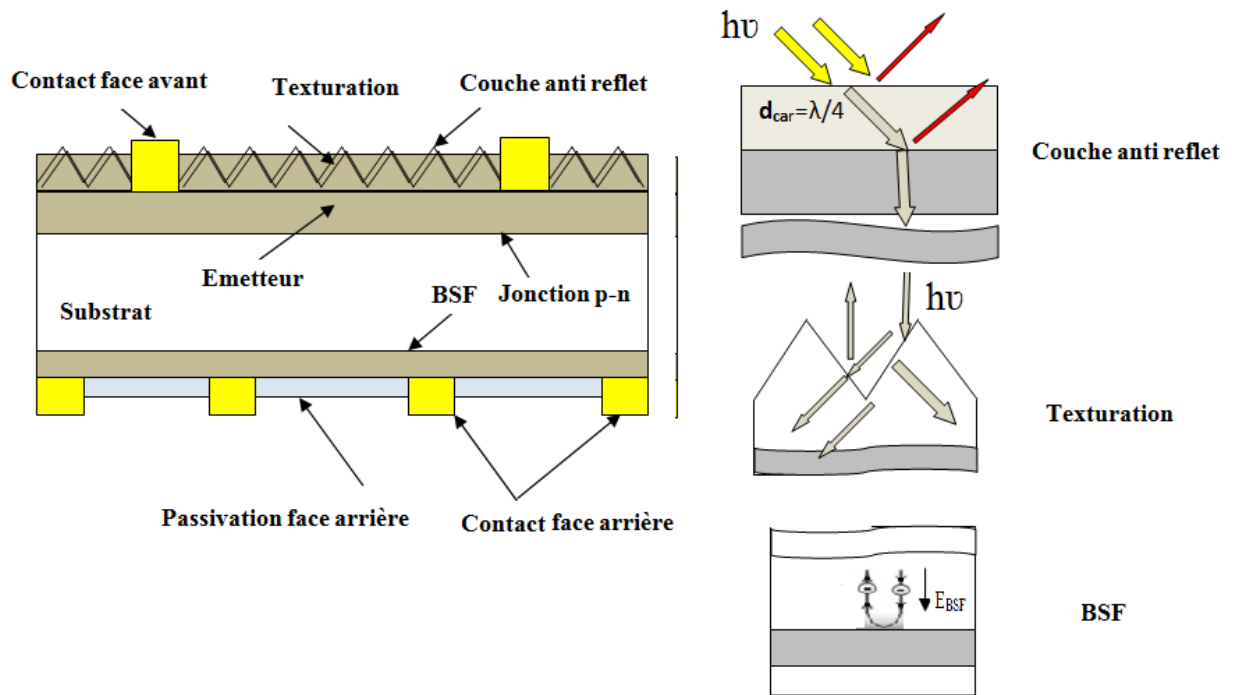


Figure I.11: Structure d'une cellule photovoltaïque [20].

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

Le plus petit composant d'une installation photovoltaïque est la cellule photovoltaïque, également appelée photopile.

Les cellules sont fabriquées à partir de lingots de silicium. En diffusant du bore ou du phosphore sur ces lingots, on les divise en fines couches de type P ou N [11]. Une jonction de type opposé, également connue sous le nom de jonction PN, est alors créée pour produire une cellule solaire. Un champ électrique au voisinage de la jonction maintient la séparation des charges positives et négatives.

Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- D'une fine couche semi-conductrice.
- D'une couche anti-reflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- D'une grille conductrice sur le dessus (cathode) et d'un métal conducteur sur le dessous (anode).
- Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

La Figure I.12 représente la structure basique d'une cellule photovoltaïque.

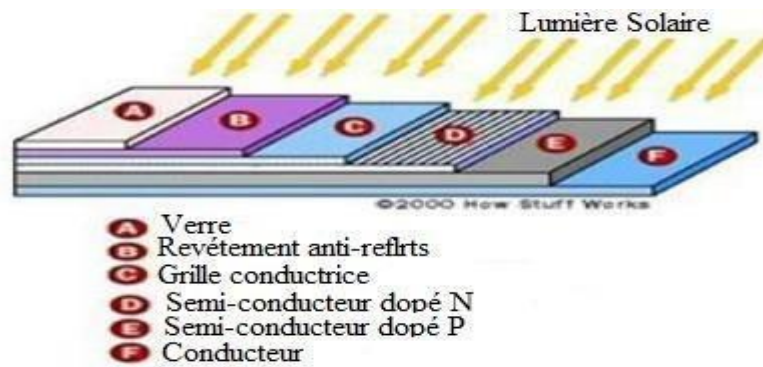


Figure I.12 : Structure basique d'une cellule solaire.

Une cellule photovoltaïque fonctionne grâce à l'effet photovoltaïque, un phénomène physique qui consiste à créer une force électromotrice lorsque sa surface est exposée à la lumière. La tension produite varie de 0,3 V à 0,7 V en fonction du matériau utilisé, de sa disposition, de la température et du vieillissement de la cellule [12].

Une cellule PV donc est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants [10] :

- Absorption de la lumière dans le matériau.
- Le transfert de l'énergie lumineuse aux électrons.
- La collecte des charges.

Ainsi, le matériau utilisé dans la cellule photovoltaïque doit avoir deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant, c'est pourquoi les semi-conducteurs sont importants dans cette industrie.

Un champ électrique qui permet de dissocier les paires électrons/trous créés est nécessaire pour collecter les particules produites.

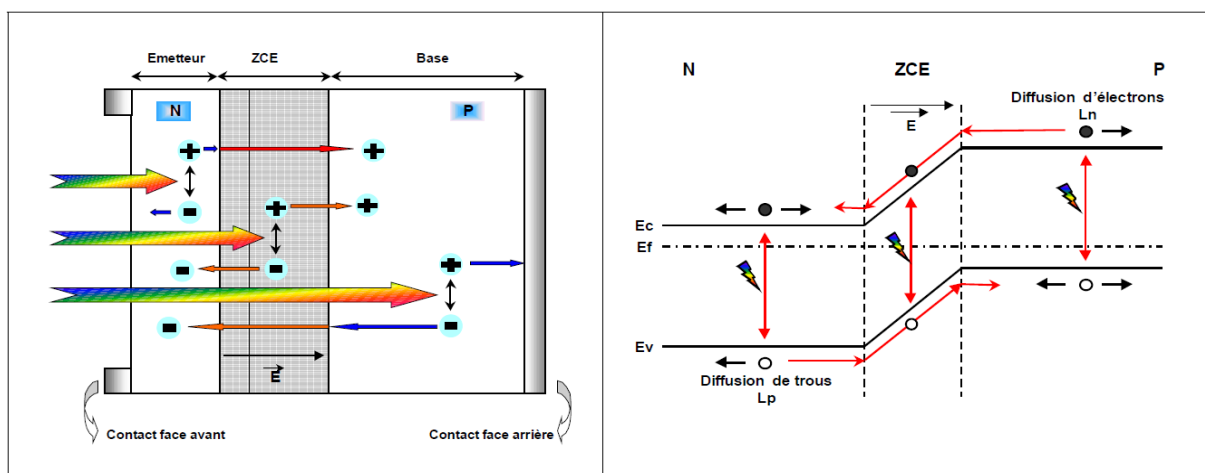


Figure I.13 : Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Comme nous montre la figure ci-dessus (Figure I.13), les photons incidents créent des porteurs dans les zones N et P et dans la zone de charge d'espace. Les photo-porteurs auront un comportement différent suivant la région :

- Lorsque les porteurs minoritaires atteignent la zone de charge d'espace dans la zone N ou P, le champ électrique les "envoie" dans la zone N (pour les électrons) ou dans la zone P (pour les trous), où ils seront majoritaires. Une image de diffusion courant sera présente.
- Dans la zone de charge d'espace, le champ électrique dissocie le pair électron/trou créé par les photons incidents : les électrons se dirigent vers la région N et les trous vers la région P.

Ce déplacement des photo porteurs donne naissance à une photo courant de génération. Ces deux contributions ensemble ont pour résultat de donner une photo courant total I_{Ph} . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse [14].

I.9.Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque

Il existe plusieurs modèles électriques d'une cellule photovoltaïque dont deux modèles sont les plus utilisés [9] :

- a) Le modèle standard (Modèle à une seule diode)
- b) Le modèle à deux diodes

I.9.1.Le modèle à une seule diode :

Après avoir atteint la zone de charge d'espace dans la zone N ou P, le champ électrique les dirige vers la zone N (pour les électrons) ou la zone P (pour les trous), où ils seront majoritaires. Il y aura une image de diffusion courant.

Le champ électrique dans la zone de charge d'espace brise le couple électron/trou formé par les photons incidents. Les électrons se dirigent vers la région N tandis que les trous se dirigent vers la région P.

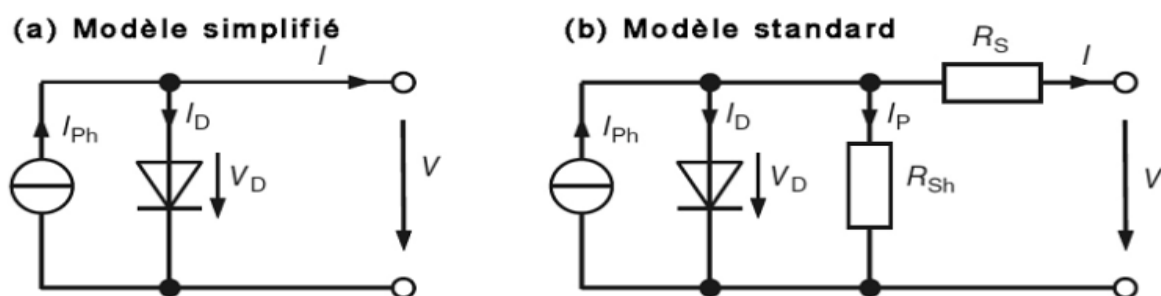


Figure I.14 : Le modèle à une seule diode

Pour obtenir les courbes caractéristiques du modèle standard, le courant délivré par une cellule PV devient :

$$I = I_D - I_P \quad (I.4)$$

Ainsi, on détermine le courant à travers la résistance parallèle R_{sh} par la relation I.5 :

$$I_P = \frac{V_D}{R_{sh}} = \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (I.5)$$

On déduit alors, une équation non linéaire qui décrit les courbes caractéristiques du modèle standard de la cellule photovoltaïque, exprimée par la formule I.6 :

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V+I \cdot R_s}{mV_T}} \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (I.6)$$

La figure I.16 montre que l'augmentation de la résistance en série R_s a un impact sur les courbes caractéristiques et une diminution significative du facteur de forme 'FF', ce qui entraîne une diminution du rendement énergétique de la cellule photovoltaïque. La situation est similaire lorsque les valeurs de R_{sh} augmentent, ce qui affecte la tension du circuit ouvert. Cependant, une augmentation du courant I_P réduit considérablement la tension de la diode V_D .

Il convient de noter que la cellule photovoltaïque fonctionne comme une diode dans l'obscurité. Elle ne produit aucune électricité. Cependant, un courant d'identification circule si elle est connectée à une source de tension externe. (I_D le courant de la jonction non éclairée).

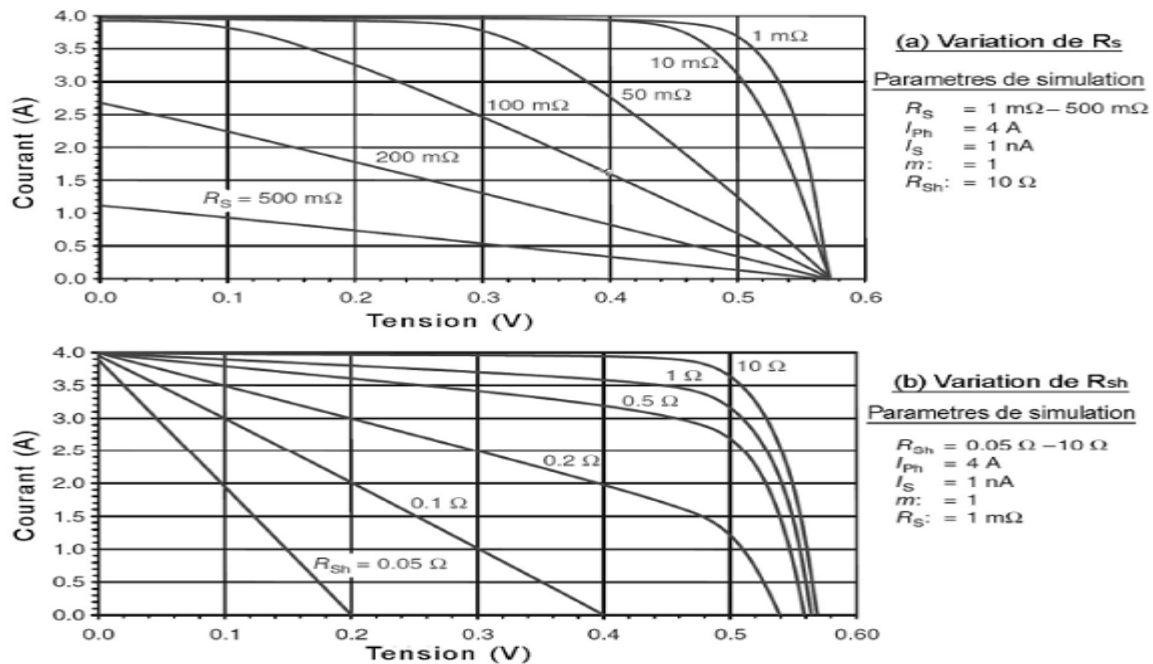


Figure I.15 : Influence de la résistance série R_s et de la résistance parallèle R_{sh} [22]

I.9.2. Le modèle simplifié à une seule diode :

Le circuit équivalent utilisé dans cette étude est encore simplifié. Les équations peuvent être utilisées pour représenter approximativement la relation entre le courant et la tension [20] :

$$I = I_{sc} \left(1 - C_1 \left[\exp \left(\frac{V}{C_2 V_{oc}} \right) - 1 \right] \right) \quad (I.10)$$

Avec :

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \cdot \exp \left(-\frac{V_m}{C_2 V_{oc}} \right) \quad (I.11)$$

$$C_2 = \frac{\left(\frac{V_m}{V_{oc}} - 1 \right)}{\ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right)} \quad (I.12)$$

I_{sc} : Courant de court-circuit du module (A),

V_{oc} : Tension de circuit ouvert du module (V),

I_m : Courant maximal dans les conditions standards (A),

V_m : Tension maximale du module dans les conditions standards (V),

L'adaptation de l'équation (1) à d'autres niveaux d'insolation et des températures, le modèle décale n'importe quel point (V_{ref} , I_{ref}) des courbes de référence I -V à un nouveau point (V_{nov} , I_{nov}) sur la base des équations suivantes :

$$\Delta T = T - T_{ref} \quad (I.13)$$

$$\Delta I = \alpha_0 \left(\frac{E}{E_0} \right) \Delta T + \left(\frac{E}{E_0} - 1 \right) I_{sc} \quad (I.14)$$

$$\Delta V = \beta_0 \Delta T - R_s \Delta I \quad (I.15)$$

$$I_{nov} = I_{ref} + \Delta I \quad (I.16)$$

$$V_{nov} = V_{ref} + \Delta V \quad (I.17)$$

Avec :

E : Irradiation solaire sur un plan incliné (W/m²),

E_0 : Irradiation solaire de référence (1000 W/m²),

α_0 : Coefficient de température de I_{sc} (A /°C),

β_0 : Coefficient de température de V_{oc} (V/°C),

T : Température de la cellule photovoltaïque (° C),

T_{ref} : Température de référence de la cellule photovoltaïque (25°C).

I.9.3. Le modèle à deux diodes :

Le phénomène de recombinaison représente des pertes significatives dans une cellule photovoltaïque réelle, qui ne peuvent pas être modélisées avec précision en utilisant le modèle de diode. Comme le montre la figure I.16, en tenant compte de ces pertes, une seconde diode est ajoutée au circuit [23]:

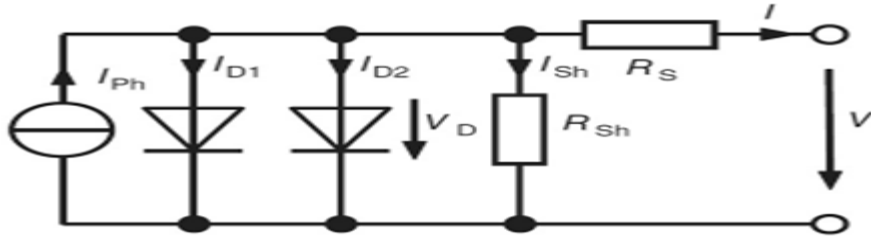


Figure I.16 : Le modèle à deux diodes pour une modélisation plus exacte

Cependant, l'équation de la courbe caractéristique du modèle à deux diodes peut être décrite, par analogie à l'équation I.14, par :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left(e^{\frac{V+I.R_s}{m_1 V_T}} - 1 \right) - I_{s2} \left(e^{\frac{V+I.R_s}{m_2 V_T}} - 1 \right) - \frac{V + I.R_s}{R_{sh}} \quad (I.18)$$

Ou: I_{s1} et I_{s2} sont les courants de saturation inverse de la diode 1 et de la diode 2. Le terme I_{s2} est introduit pour compenser la perte de recombinaison dans la jonction.

Il convient de souligner que le modèle à une diode est simple à utiliser, mais il est moins précis que le modèle à deux diodes. La méthode itérative mentionnée dans [25] est la plus efficace. Cependant, à faibles irradiations, en particulier à proximité de la tension de circuit ouvert, sa précision diminue [26]. Le nombre de paramètres augmente à sept lorsque la seconde diode est ajoutée au circuit : le courant de saturation inverse et le facteur d'idéalité de la seconde diode sont ajoutés. Le problème principal est la détermination de tous les paramètres du modèle.

I.9.4. Détermination des paramètres du circuit équivalent :

Les paramètres du circuit équivalent simplifié peuvent être déterminés à partir de la courbe (I-V) mesurée si cette dernière est disponible. Comme décrit plus haut, le photo-courant I_{sh} peut

être définie comme égale au courant de court-circuit I_{sc} . En Outre, et pour un facteur d'idéalité unitaire ($m=1$), le courant de saturation est alors déterminé à partir de l'équation I.5 par :

$$I = I_{sc} e^{-V_{oc}/V_t} \quad (I.19)$$

Si cette courbe (I-V) est disponible, les paramètres du circuit équivalent simplifié peuvent être calculés en utilisant celle-ci. Comme décrit plus haut, le courant de court-circuit I_{sc} est égal au photo-courant I_{sh} . En outre, pour un facteur d'idéalité unitaire ($m=1$), le courant de saturation peut être calculé à partir de l'équation I.5 par.

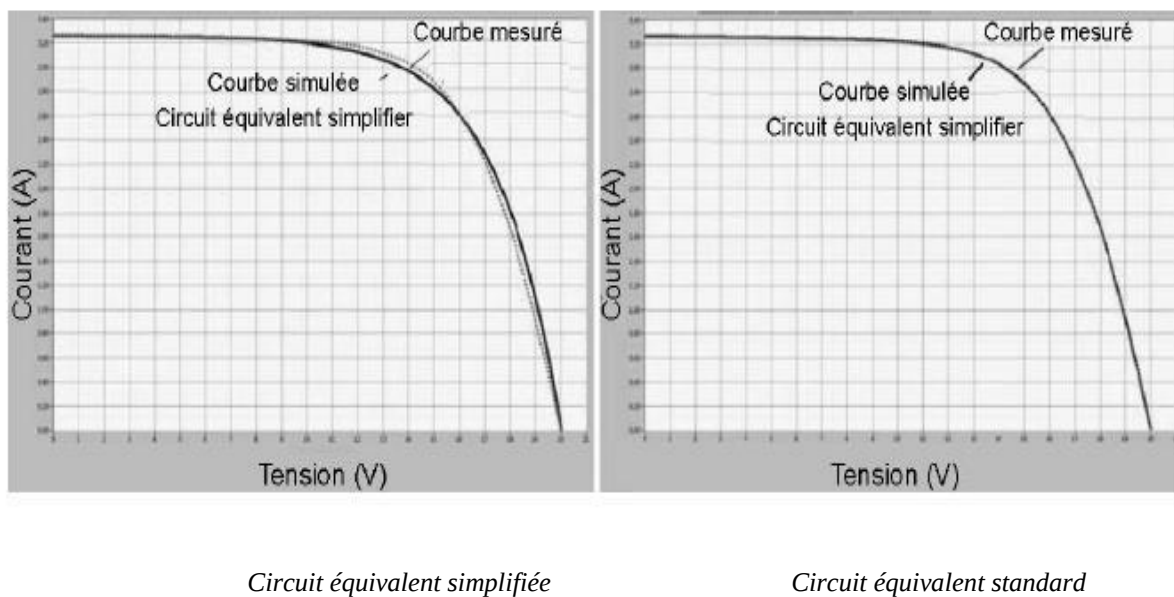


Figure I.17 : Courbe I-V simulée d'un module solaire : Le circuit équivalent simplifié [31].

Il convient de noter que la qualité du circuit équivalent standard est la meilleure par rapport au modèle simplifié.

R_s et R_{sh} sont déterminés à partir du gradient de courbe (I-V) aux voisinages des points de court-circuit et du circuit ouvert..

Une cellule photovoltaïque est caractérisée par plusieurs paramètres cités si dessous:

I.9.4.1. Le courant de court-circuit, I_{cc}

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule ($V=0$). Ce courant croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule, il dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

On peut écrire : $I_{cc} (V=0) = I_{ph}$

I.9.4.2. La tension de circuit ouvert, V_{co}

Comme son nom l'indique, c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie. Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction PN, jonction Schottky), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts de la couche active-électrode. Elle dépend de plus de l'éclairement de la cellule.

$$V_{co} = \ln \frac{nkt}{q} \quad (I.20)$$

n : Facteur d'idéalité de la diode.

K : constante de Boltzmann ($1,381.10^{-23}$ Joule/Kelvin).

T : Température de la jonction p-n des cellules.

q : Charge d'électron ($1,602.10^{-19}$ C).

E : Eclairement reçu.

E_0 : Eclairement de référence.

Il peut aussi être calculé par :

$$V_{co} = \frac{nkt}{q} \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_s} + 1 \right) \quad (I.21)$$

I_{cc} : Courant continu de la cellule.

I_s : Courant de saturation de la diode.

I.9.4.3. 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.

I.9.4.4. La puissance maximale, P_m

La puissance débitée par une cellule solaire est maximum quand le produit ($V.I$) 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 .

$$P_M = I_m \cdot V_M = (IV)_{max} \quad (I.22)$$

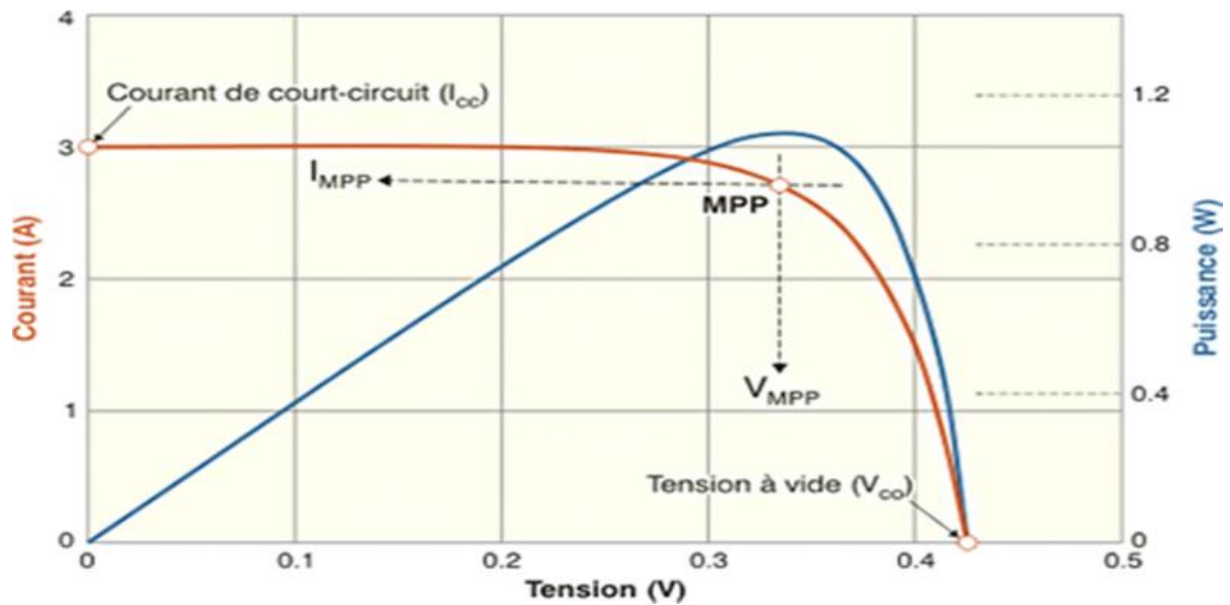


Figure I.18 : Caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule solaire [11].

I.9.4.5. Le facteur de forme, FF

Le facteur de forme montre l'efficacité de la cellule et peut nous dire quand la cellule vieillit. C'est le rapport entre la puissance qu'une cellule peut théoriquement obtenir et la puissance maximale qu'elle peut fournir.

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} = \frac{I_{opt} \cdot V_{opt}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (I.23)$$

I.9.4.6. Le rendement de conversion η

Le rendement de conversion d'énergie est le rapport de la puissance générée et de la puissance du rayonnement solaire incident P_o . On appelle rendement rapport de la puissance maximale fournie (P_{max}) sur la puissance du rayonnement solaire incident (P_i) :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_i} = \frac{I_{opt} \cdot V_{opt}}{\emptyset \cdot S} \quad (I.24)$$

S : Surface de la cellule solaire.

$\emptyset$: Flux incident.

I.10. Les différentes filières photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque peut être réalisée avec de nombreux semi-conducteurs. En réalité, il existe aujourd'hui trois principales filières technologiques : le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques. Ces filières se partagent inégalement le marché.

I.10.1. Cellules au silicium cristallin

La filière silicium représente aujourd'hui l'essentiel de la production mondiale des panneaux photovoltaïques. Cette filière comporte deux technologies : le silicium monocristallin et le silicium multi cristallin.

I.10.1.1. Cellule au silicium monocristallin

Le silicium monocristallin est obtenu par refroidissement, ce qui entraîne la solidification du silicium en un seul cristal. Les cellules bleues uniformes sont les plus performantes. Le rendement moyen des cellules est de 12 % à 18 % (version commerciale) et d'environ 24 % pour le meilleur rendement en laboratoire. Les inconvénients de cette technologie comprennent les faibles rendements obtenus sous un faible éclairage et, plus important encore, les coûts prohibitifs de production [19].



Figure I.19 : Cellule monocristallin

I.10.1.2. Cellule au silicium poly-cristallin

Près de 50 % du marché est représenté par le silicium poly cristallin, qui est devenu la technologie la plus utilisée aujourd'hui. La structure de ces cellules est hétérogène car les cristaux de silicium sont coulés. Selon les fabricants, son rendement est légèrement inférieur au silicium monocristallin et varie de 10 à 14 %. Sa fabrication est cependant beaucoup plus simple, ce qui signifie que les coûts de production sont inférieurs [17].



Figure I.20 : Cellule poly cristallin.

I.10.2. Cellules à base de couches minces

qui produisent des modules de rendement légèrement inférieurs (de 7 à 13 %) en utilisant le processus de dépôt du matériau semi-conducteur à faible épaisseur sur divers substrats, donnant un aspect uni. L'ensemble de ces technologies occupe une part de marché d'environ 10 % et demeure relativement stable. En raison des investissements massifs dans le silicium au début des années 2000, ces filières ont perdu leur avantage de leur faible coût de production [18].

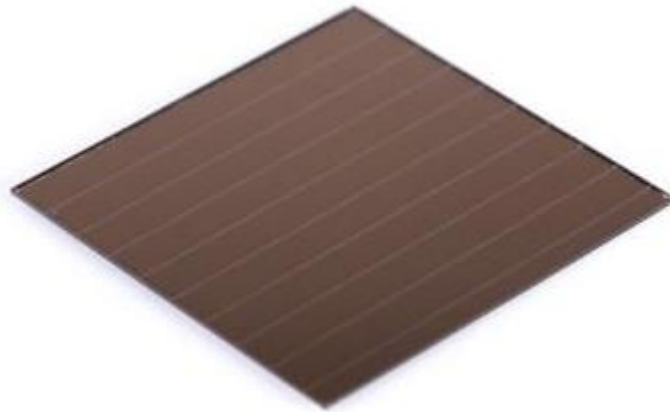


Figure I.21 : Cellule amorphe.

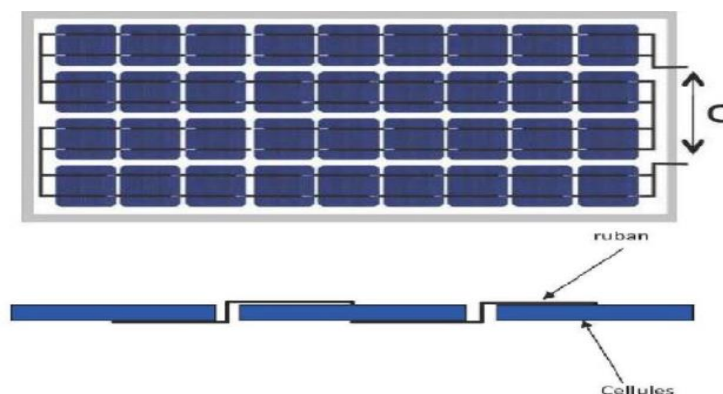


Figure I.22 : Câblage des cellules dans un module. [16]

La technologie à couche mince dont la plus mûre est le silicium amorphe (Sia) représentait en 2008 plus de 7% du marché mondial. L'avantage de cette technique est l'utilisation de substrats à bas coût.

Le silicium est déposé à basse température sur un substrat en verre. De plus, il est possible de déposer ces cellules sur des substrats souples, et ainsi de fabriquer des cellules souples. Son prix est plus faible que les cellules cristallines ; en revanche, le rendement d'une cellule en Sia est inférieur à celui des cellules cristallines, il est d'environ 7%.

Les cellules amorphes sont moins sensibles aux variations de rayonnement direct car elles captent bien le rayonnement diffus. Ainsi, ces cellules sont une excellente alternative aux cellules cristallines dans les endroits où il y a une forte ombrage.

Les filières à couches minces utilisent également d'autres matériaux, tels que le tellure de cadmium (CdTe), le di séléniure de cuivre et d'indium (CIS) et le gallium (CIGS). Ces technologies ont des rendements élevés, pouvant aller jusqu'à 19 %. Malgré les possibilités de ces trois technologies, elles seront limitées au laboratoire ou à des applications très spécifiques en raison des problèmes de toxicité sur l'environnement et d'approvisionnement en matières premières qu'elles soulèvent. [17]

I.10.3. Cellules organiques et plastiques

Celles organiques L'effet photovoltaïque a connu un grand essor au cours des dix dernières années dans les matériaux semi-conducteurs organiques.

Au départ, avec des valeurs de rendement de conversion très faibles, cette application particulière des semi-conducteurs organiques a attiré l'attention en 1986 lorsque l'équipe de Tang a démontré que les rendements proches du pourcent étaient atteignables, conformément aux prédictions de Merritt en 1978. La cellule, qui est composée alors d'une bicouche de molécules évaporées sous vide, atteint un rendement de conversion de 0,95%.

Deux voies sont présentes dans ces cellules : la voie des cellules "humides" et la voie des cellules polymères organiques, également appelées cellules "plastiques". Ces technologies progressent rapidement, battant souvent les records de rendement (actuellement près de 6 % environ). Le principal obstacle à l'adoption de ces technologies est leur stabilité et leur durée de vie (actuellement d'environ 1000 heures). [17]

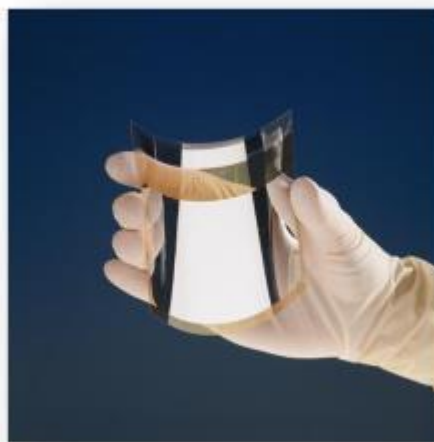


Figure I.23 : Cellule PV organique. [17]

I.10.4. Cellules PV multi-jonctions

En parallèle, des cellules photovoltaïques multi-jonctions à base d'associations de matériaux semi-conducteurs III-V (GaAs, AlGaAs, InGaAs, etc.) sont également disponibles. Celles-ci ont été développées depuis les années 60 et présentent des rendements très élevés, parfois supérieurs à 40 %.

Leur popularité est limitée en raison de leurs coûts de fabrication, et leur développement a été principalement motivé par les applications spatiales.

Leur résistance aux radiations et aux impacts est un avantage important de ces cellules. Ces cellules ont montré au fil du temps qu'il était possible d'avoir des générateurs d'énergie qui vieillissent d'une manière acceptable et qui peuvent continuer à produire de l'énergie même après avoir subi des détériorations [19].

La figure I.24 montre les cellules combinant diverses technologies pour maximiser les rendements.

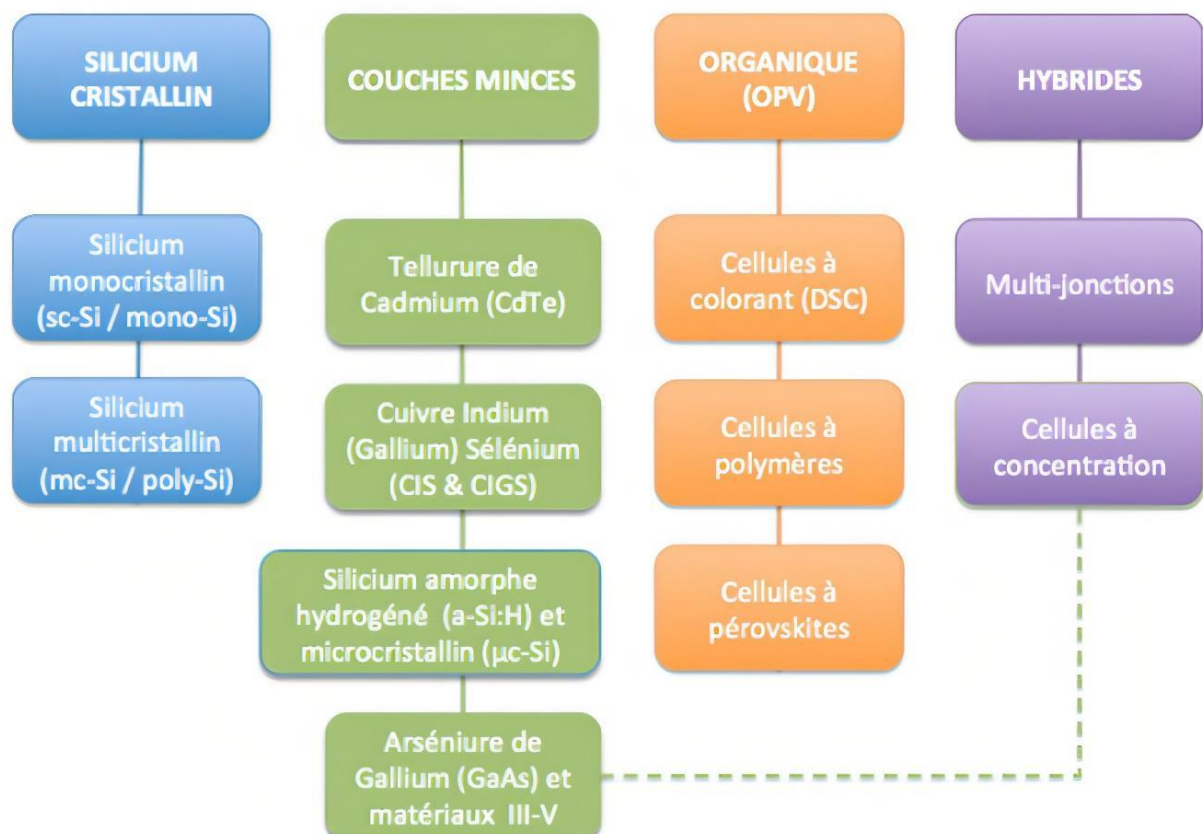


Figure I.24 : Classification des principales technologies de cellules PV.

I.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

Modélisation de la cellule solaire bifaciale

II.1. Introduction

Pour obtenir un bon rendement avec une réduction des coûts de réalisation, l'optimisation des performances est nécessaire quel que soit la structure de la cellule solaire. L'épaisseur de la cellule, le niveau et les profils de dopage, la configuration des contacts, le confinement optique et la collection de lumière sont généralement les paramètres à optimiser [31]. La structure de la cellule solaire, la qualité des matériaux utilisés (couches et contacts métalliques différents) et la vitesse de recombinaison en surface (face avant et arrière) sont tous des facteurs qui déterminent les paramètres les plus appropriés [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

Une recombinaison en surface avec une vitesse, qui caractérise la qualité de la surface, représente les pertes causées par les défauts et les contacts ohmiques sur les deux surfaces de la cellule solaire. La figure (II-1) montre une structure de cellule solaire la plus simple de ce type de photopile qui a été utilisée pour résoudre ce problème en réduisant ces pertes [32].

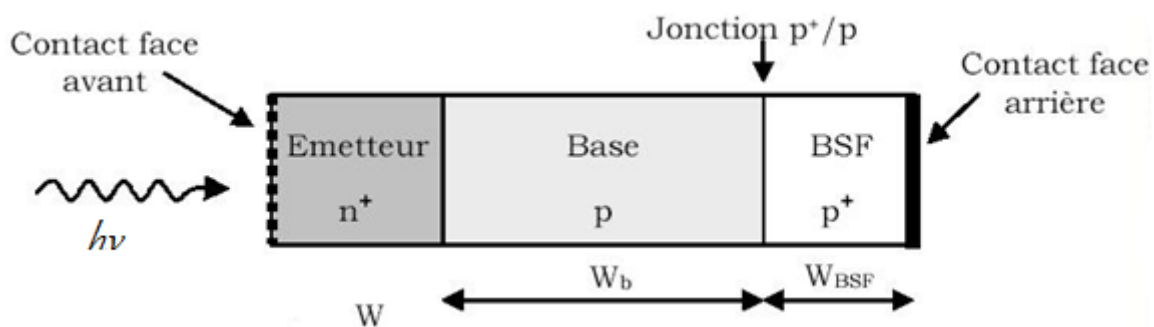


Figure II.1 : Cellule solaire a champ BSF [32].

La base d'une cellule solaire est composée de deux zones, la base elle-même et une zone fortement dopée à proximité du contact arrière, ce qui a deux effets : la création d'une petite barrière d'énergie supplémentaire et le confinement des porteurs minoritaires dans la base. Les porteurs de charge créés à l'arrière de la base au voisinage du contact ohmique, qui sont généralement perdus dans les cellules simples, sont récupérés de cette manière. La structure énergétique de la cellule solaire BSF avec le confinement des porteurs minoritaires est illustrée dans la figure (II.2).

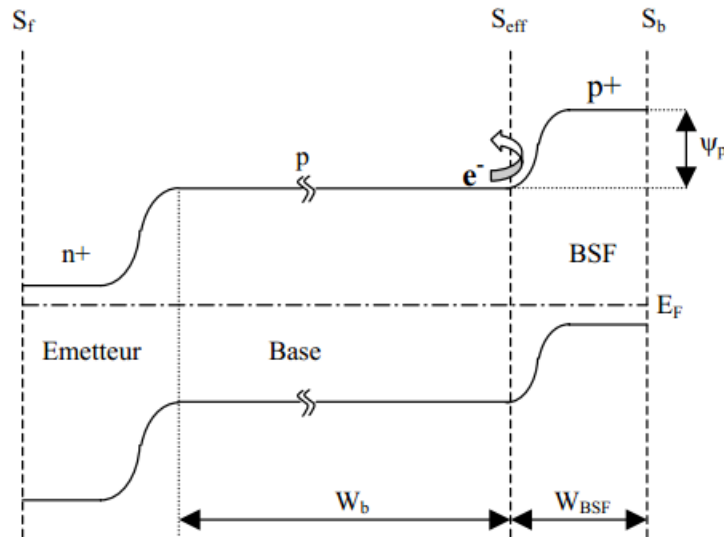


Figure II.2 : Diagramme de bandes d'une cellule solaire à BSF [32]

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

II.3.1. Structure de la cellule solaire bifaciale BSF

La Figure (II -3) montre la structure de la cellule solaire BSF bifaciale. Elle est constituée de plusieurs couches, comme [33] :

- Un contact ohmique sous forme de grille sur les deux faces avant et arrière.
- Une couche texturisée sur les faces avant et arrière, généralement de forme pyramidale, dont les dimensions sont supérieures à la longueur d'onde de la lumière incidente. Deux sous-couches composent cette couche texturisée :
 - 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_3N_4) [33].
 - b) Une couche antireflet pour minimiser la réflexion de la lumière à la surface texturisée [33].
- Il s'agit d'un émetteur de type N qui est créé par une diffusion homogène du phosphore [34].
- Une zone de charge d'espace Z.C.E entre l'émetteur et la base.
- La diffusion du bore est responsable de la formation de la base de type P [34].
- La création d'un champ électrique arrière appelé BSF (Back Surface Field) est possible grâce à une couche PP^+ fortement dopée qui est formée selon les mêmes méthodes que celles utilisées pour la jonction NN^+/p [33].

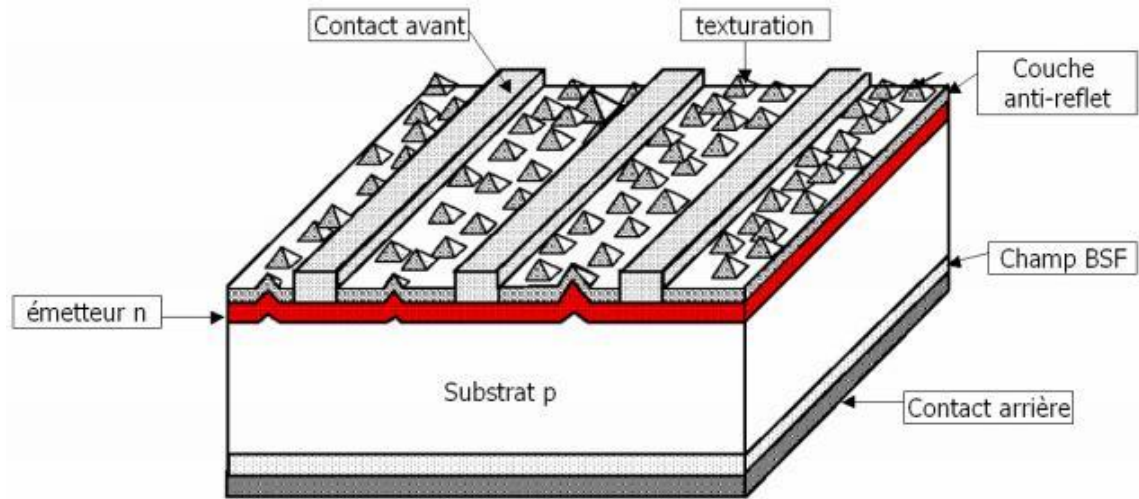


Figure II.3: Représentation schématique de la structure d'une cellule Solaire BSF [35]

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

La cellule solaire bifaciale BSF fonctionne de la même manière que les cellules solaires traditionnelles. La cellule bifaciale, cependant, collecte la lumière par ses deux faces avant et arrière. Par conséquent, la somme des deux courants photovoltaïques générés, qui sont le résultat de l'éclairement de la cellule par la face avant (l'émetteur) et la face arrière (la base), constitue la courante photovoltaïque totale [36].

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

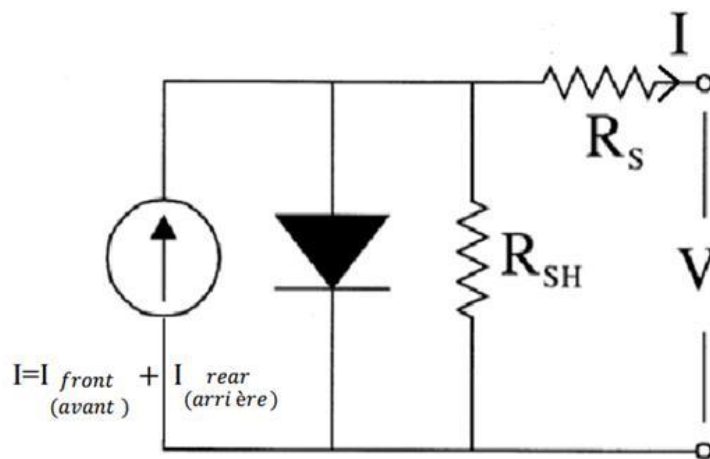


Figure II.4: Le circuit électrique équivalent de la cellule solaire bifaciale [36].

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 :** Le courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule solaire bifaciale est connu sous le nom de I_l représente la somme de la courante photo produite par la face avant et la courante photo produite par la face arrière [36].

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

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

Ou :

$I_{ph1}=I_{cc.front}$: La photo 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 :** La tension pour laquelle la cellule bifaciale ne fournit aucun courant est la tension. La tension de circuit ouvert ($V_{CO.bif}$) de la cellule solaire bifaciale peut être déterminée à partir de son circuit électrique équivalent, comme indiqué dans la figure (II-4) [36].

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

Où I_s : le courant de saturation de la diode.

- **Le facteur de forme FF :** Il établit les limites de l'efficacité de la cellule solaire [37]. Voici le rapport entre la puissance idéale et la puissance maximale débitée [38] :
- Le facteur de forme pour la cellule solaire BSF bifaciale éclairée seulement par la face avant est obtenu à partir de l'équation suivante:

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

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, le facteur de forme pour l'éclairement de la cellule solaire BSF bifaciale seulement par la face arrière peut être calculé en utilisant l'équation suivante :

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

$I_{CC.rear} \times V_{CO.rear}$: 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 η** : 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 η_{front} est calculé par la relation suivante:

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

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

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

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

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:

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

Avec:

PM_{front} : 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 :

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

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:

$$PM_{tot} = PM_{front} \times PM_{rear} \quad (II.9)$$

II.5. La réflexion par albédo

Lorsqu'on utilise la réflexion par albédo, qui est le rayonnement réfléchi sur la surface arrière de la photopile, on peut augmenter la puissance lumineuse incidente sur la face arrière de la cellule solaire bifaciale jusqu'à 50 % [39]. Le rayonnement solaire incident est réfléchi par la surface du milieu. La figure (II -5) montre le fondement de cette réflexion.

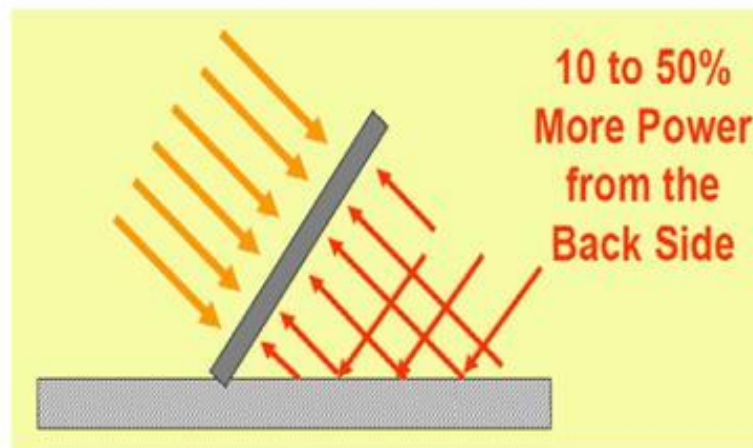


Figure II.5: Représentation schématique du principe de la réflexion par albédo [39].

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

On utilise un modèle à une dimension pour représenter la cellule solaire bifaciale, qui comprend quatre régions : la zone $N+$ (l'émetteur), la zone P (la base), la zone de charge d'espace (ZCE) et la zone fortement dopée ($P+$). illustration (II - 6) [40].

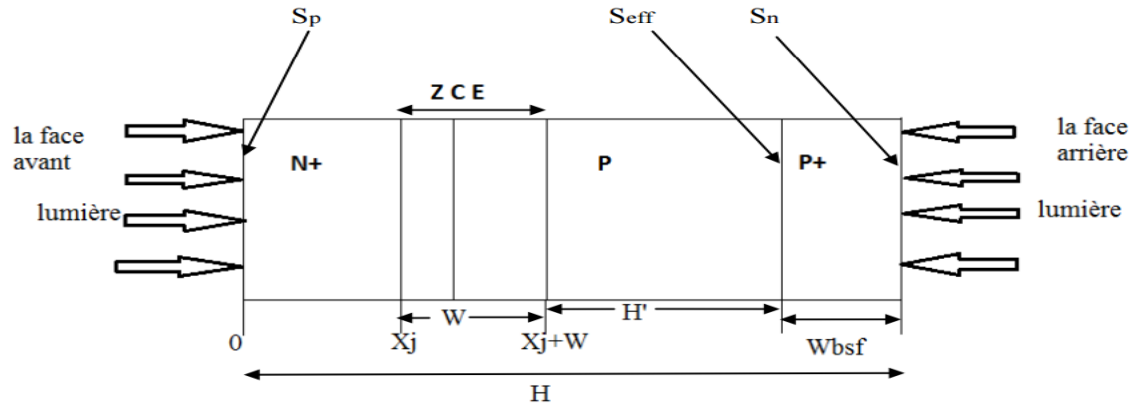


Figure II.6: Représentation schématique du modèle à une dimension de la cellule solaire bifaciale BSF [40].

II.6.1. Eclairement, puissance incidente et flux solaire au sol

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

$$E_{cl}(\lambda) = 0.06977 + 7.0625 \left| 1 - e^{\frac{-(\lambda-0.26053)}{0.15994}} \right| 2.28411 e^{\frac{-(\lambda-0.26053)}{0.22285}} [KW m^{-2} \mu m^{-1}] \quad (II.10)$$

D'où le flux solaire au sol :

$$F(\lambda) = \frac{E_{cl}(\lambda)}{h\nu} [cm^{-2} s^{-1} \mu m^{-1}] \quad (II.11)$$

Et la puissance incidente au sol

$$P_i = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} E_{cl}(\lambda) d\lambda [W cm^{-2}] \quad (II.12)$$

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

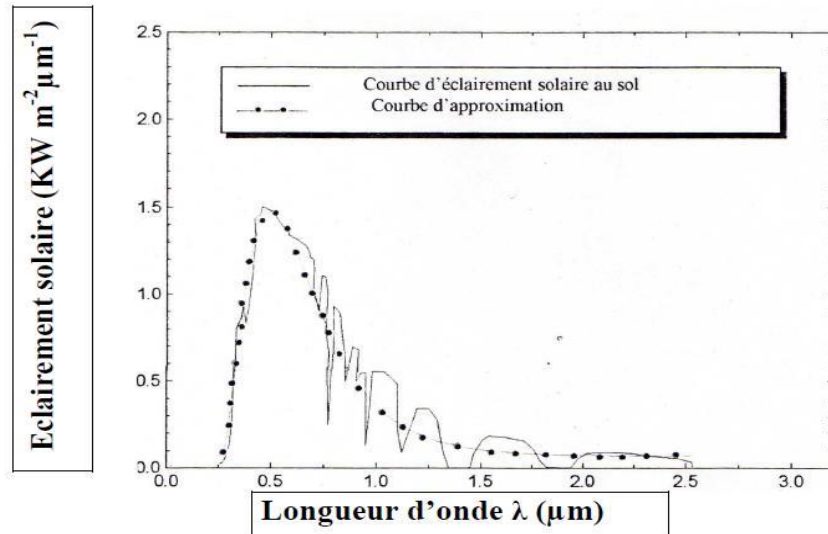


Figure II.7: Approximation de l'éclairement solaire au sol [41].

II.6.2. Le coefficient d'absorption α

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, α_1 , α_2 pour les deux matériaux l'émetteur et la base.

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

$$\alpha = A_d(h\nu - E_g)^{1/2} \quad (\text{II.13})$$

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 λ qui est la longueur d'onde du photon incident.

$$G(x, \lambda) = \alpha(\lambda)F_i(\lambda)(1 - R(\lambda))\exp(-\alpha(\lambda)x) \quad (\text{II.14})$$

Où :

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

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

R : coefficient de réflexion.

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

On admet que le dopage est uniforme lorsqu'une lumière monochromatique de longueur d'onde λ est généralement incidente par rapport à la surface d'un semi-conducteur. Le champ électronique devient nul dans les zones neutres (hors la zone de charge d'espace) et une 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 produites dans chaque région de la cellule :

$$J_{ph} = J_n + J_p + J_{dr} + J_{bsf} \quad (\text{II.15})$$

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. La photo courant dans la première zone neutre N (l'émetteur)

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

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

$$G_p - \frac{P_n + P_{n0}}{\tau_p} - \frac{1}{q} \frac{dJ_p}{dx} = 0 \quad (\text{II.16})$$

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

➤ L'équation de densité de courant est alors :

$$J_p = -q\mu_p p_n - qD_p \frac{d p_n}{dx} \quad (\text{II.17})$$

Avec:

α_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.

μ_p : Mobilité des trous

τ_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 :

$$J_p = -qD_p \frac{d p_n}{dx} \quad (\text{II.18})$$

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

$$D_p \frac{d^2 p_n}{dx^2} + \alpha_1 F(1 - R) \exp(-\alpha_1 x) - \frac{P_n - P_{n0}}{\tau_p} = 0 \quad (\text{II.19})$$

La solution de cette équation est donnée par :

$$P_n - P_{n0} = A_1 \operatorname{ch}\left(\frac{x}{L_p}\right) + B_1 \operatorname{ch}\left(\frac{x}{L_p}\right) - \frac{\alpha_1 F(1-r)\tau_p}{\alpha_1^2 L_p^2 - 1} \exp(-\alpha_1 x) \quad (\text{II.20})$$

Ou :

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

En peut trouver les deux constantes A_1 et B_1 à partir des conditions aux limites :

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

$$D_p \frac{d(p_n - p_{n0})}{dx} = S_p (p_n - p_{n0}) \quad \text{À } x=0 \quad (\text{II.21})$$

➤ 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 :

$$\Delta_p \frac{-\alpha_1 F(1-R)\tau_p}{\alpha_1^2 L_p^2 - 1} \left[\frac{\left(\frac{S_p L_p}{D_p} + \alpha_1 L_p \right) \sinh\left(\frac{x_j - x}{L_p}\right) + \exp(-\alpha_1 x_j) \left(\frac{S_p L_p}{D_p} \sinh\left(\frac{x}{L_p}\right) + \cosh\left(\frac{x}{L_p}\right) \right)}{\frac{S_p L_p}{D_p} \sinh\left(\frac{x_j}{L_p}\right) + \cosh\left(\frac{x}{L_p}\right)} - \exp(-\alpha_1 x) \right] \quad (\text{II.22})$$

La densité de photo courant dans cette région est :

$$J_p = -q D_p \left(\frac{dp_n}{dx} \right) x_j \quad (\text{II.23})$$

Alors :

$$J_p \frac{-\alpha_1 F(1-R)\tau_p}{\alpha_1^2 L_p^2 - 1} \left[\frac{\left(\frac{S_p L_p}{D_p} + \alpha_1 L_p \right) - \exp(-\alpha_1 x_j) \left(\frac{S_p L_p}{D_p} \cosh\left(\frac{x_j}{L_p}\right) + \sinh\left(\frac{x_j}{L_p}\right) \right)}{\frac{S_p L_p}{D_p} \sinh\left(\frac{x_j}{L_p}\right) + \cosh\left(\frac{x}{L_p}\right)} - \alpha_1 L_p \exp(-\alpha_1 x) \right] \quad (\text{II.24})$$

II.6.4.2. La 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 :

$$D_p \frac{\partial^2 \Delta n}{\partial^2 x} + G_n - \frac{\Delta n}{\tau n} = 0 \quad (\text{II.25})$$

Avec :

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

$$(\lambda, x) = \alpha_2(\lambda)F(1 - R)\exp(-\alpha_1(x_j + w_1))\exp(\alpha_2 w_2)\exp(-\alpha_2 x) \quad (\text{II.26})$$

L'équation de densité de courant est alors

$$J_n = q\mu_n n_p E + qD_n \frac{dn_p}{dx} \quad (\text{II.27})$$

Dans cette région $E=0$, donc :

$$J_n = qD_n \frac{dn_p}{dx} \quad (\text{II.28})$$

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 :

$$n_p - n_{p0} = 0 \quad \text{à } x = x_j + W_1 + W_2 \quad (\text{II.29})$$

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

$$S_{eff} \Delta n = D_n \left. \frac{\partial \Delta n}{\partial x} \right|_{x=H-W_{bsf}} \quad (\text{II.30})$$

H : est l'épaisseur de la cellule entière.

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

$$S_{eff} = \frac{N_a}{N_{bsf}} \frac{D_{bsf}}{L_{bsf}} \frac{\frac{S_n L_{bsf}}{D_{bsf}} + th\left(\frac{W_{bsf}}{L_{bsf}}\right)}{1 + \frac{S_n L_{bsf}}{D_{bsf}} th\left(\frac{W_{bsf}}{L_{bsf}}\right)} \quad (\text{II.31})$$

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

$$\Delta_n \frac{\alpha_2 F (1 - R) \tau_n \exp(-\alpha_1 (x_j + W_1)) \exp(-\alpha_2 W_2)}{(\alpha_1^2 L_n^2 - 1)} \left[\cosh\left(\frac{x - (x_j + W_1 + W_2)}{L_n}\right) - \exp(x - (x - (x_j + W_1 + W_2))) \right] - \frac{\left(\frac{S_{eff} L_n}{D_n}\right) \left(\cosh\left(\frac{x_p}{L_n}\right) - \exp(-\alpha_2 x_b)\right) + \sinh\left(\frac{x_p}{L_n}\right) + \alpha_2 L_n \exp(-\alpha_2 x_b)}{\left(\frac{S_{eff} D_n}{L_n} \sinh\left(\frac{x_p}{L_n}\right) + \cosh\left(\frac{x_p}{L_n}\right)\right)} \sinh\left(\frac{x - (x_j + W_1 + W_2)}{L_n}\right) \quad (II.32)$$

Où : $L_n = D_n \tau_n$: est la longueur de diffusion d'électrons $x_b = H$

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

$$J_n = \frac{q F (1 - R) \exp(-\alpha_1 (x_j + W_1)) \exp(-\alpha_2 W_2) \alpha_2 L_n}{(\alpha_1^2 L_n^2 - 1)} \left[\alpha_2 L_n - \frac{\left(\frac{S_{eff} L_n}{D_n}\right) \left(\cosh\left(\frac{x_p}{L_n}\right) - \exp(-\alpha_2 x_b)\right) + \sinh\left(\frac{x_p}{L_n}\right) + \alpha_2 L_n \exp(-\alpha_2 x_b)}{\frac{S_{eff} L_n}{D_n} \sinh\left(\frac{x_p}{L_n}\right) + \cosh\left(\frac{x_p}{L_n}\right)} \right] \quad (II.33)$$

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

La génération de photocourant a également lieu dans la zone de charge d'espace. Étant donné le champ électrique assez élevé dans cette région, les porteurs excédentaires générés sont drainés hors de la zone de déplétion avant qu'ils ne puissent se recombiner. Par conséquent, on peut dire que le nombre de photons absorbés détermine la densité d'une photo courant.

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

$$J_g = q f (1 - R) \exp(-\alpha_1 x_1) [(1 - \exp(-\alpha_1 W_1)) + \exp(-\alpha_1 W_1) (1 - \exp(-\alpha_2 W_2))] \quad (II.34)$$

II.6.4.4. La photo courant dans la région fortement dopée P+

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

$$J_{bsf} = - \left(\frac{qD_{bsf}}{L_{bsf}} \right) \left[\frac{N_a + N_e}{n_{bsf}} - n_p \right] + \cosh \left(\frac{w_{bsf}}{L_{bsf}} \right) \quad (\text{II.35})$$

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]:

$$S_{eff} = \frac{N_a}{N_{bsf}} \frac{D_{bsf}}{L_{bsf}} \frac{\frac{S_n L_{bsf}}{D_{bsf}} + th\left(\frac{w_{bsf}}{L_{bsf}}\right)}{1 + \frac{S_n L_{bsf}}{D_{bsf}} th\left(\frac{w_{bsf}}{L_{bsf}}\right)} \quad (\text{II.36})$$

II.7 Conclusion

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

Nous avons présenté la structure et le principe de fonctionnement de la cellule solaire BSF bifaciale. Ensuite, nous avons fourni une explication de la modélisation de cette cellule en décrivant les méthodes de calcul des différentes courantes photos générées dans chaque zone (l'émetteur, la base, la ZCE et la couche sur dopée p+). Nous avons également expliqué la méthode utilisée pour estimer l'efficacité quantique interne (l'efficacité quantique interne, IQE) et la puissance produite à l'aide d'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 η) seront calculés dans les prochains chapitres via notre code de calcul.

Chapitre III

**Discussions résultats de
la modélisation**

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_{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 obtenues par le NREL (USA National Renewable Energy laboratory).

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

En raison de ses caractéristiques, telles que son coefficient d'absorption très élevé dans la gamme du spectre solaire et ses propriétés électriques et optiques qui varient en fonction des conditions de préparation et des techniques d'élaboration, le di sélénure de cuivre et d'indium $CuInSe_2$ dans sa structure chalcopyrite est un semi-conducteur favorable aux applications photovoltaïques. Cela permet l'utilisation de ce semi-conducteur comme matériau fondamental. 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 $Cu(In, Ga)Se_2$ ont un coefficient d'absorption élevé ($>10^5 \text{ cm}^{-1}$), ce qui réduit l'épaisseur totale de la cellule de 4 à 2 μm . De plus, il a été démontré que l'écart de stoechiométrie n'altère pas leurs propriétés d'absorption, ce qui permet leur utilisation 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 principaux critères pour le photovoltaïque terrestre.

III.2.1 Description générale des cellules solaires à 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 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 $1 \text{ à } 10^{-2}(\Omega.cm)^{-1}$
- 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.

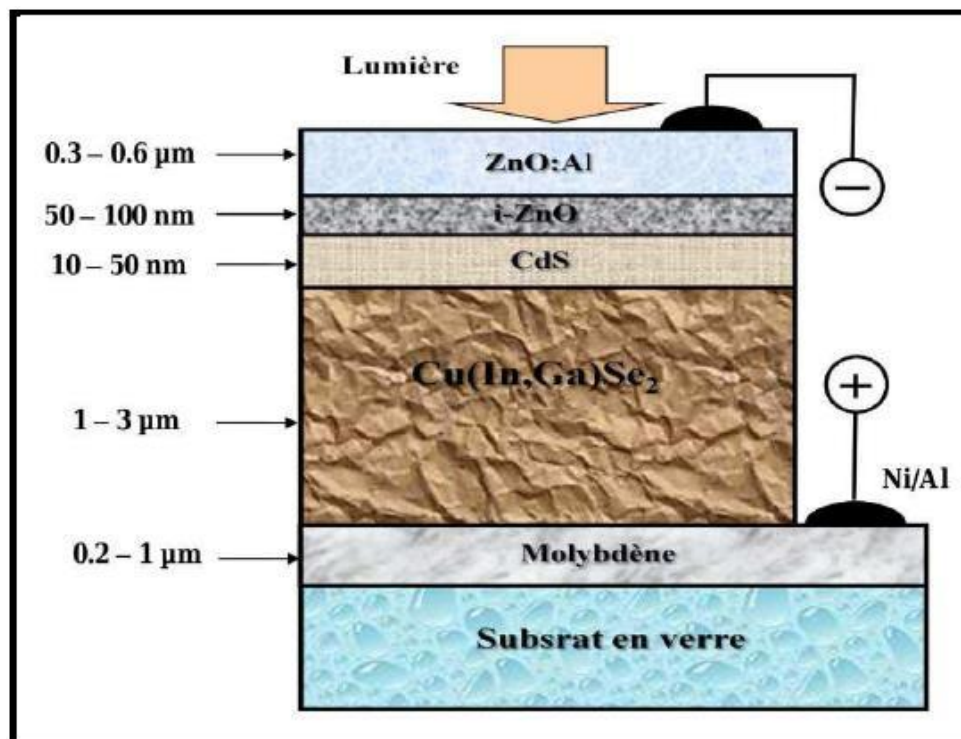


Figure III.1: Structure de la cellule solaire à base de CIGS [44]

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

La cellule bifaciale Fig.(III.2) peut être éclairée des deux côtés. Les performances d'éclairement à travers la face avant sont meilleures que celles d'éclairement à partir de la face arrière.

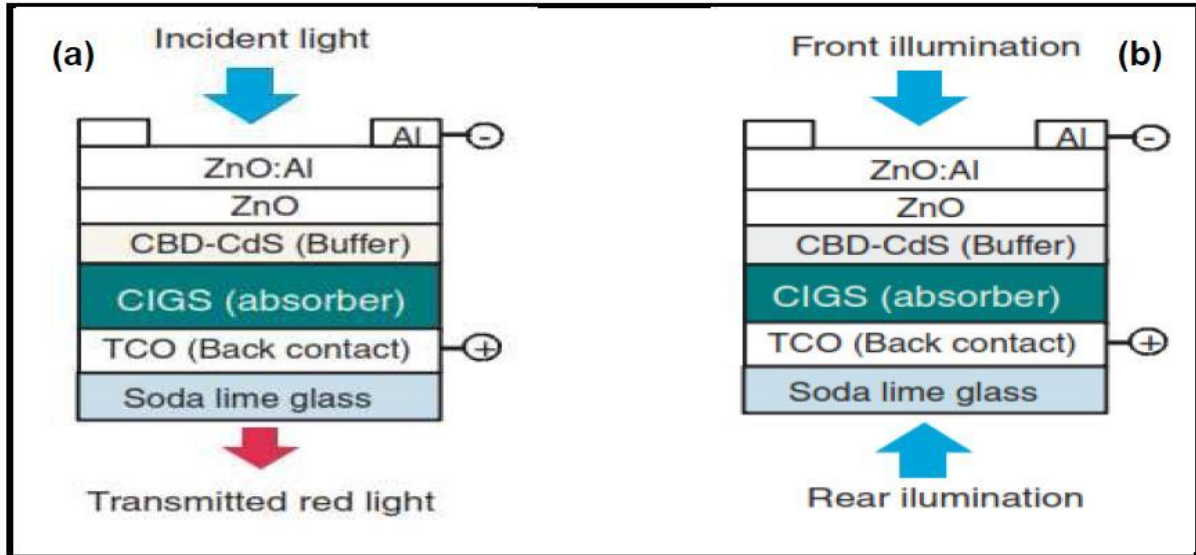


Figure III.2: Cellule solaire : (a) semi-transparente et (b) bifaciale À base de CIGS [45].

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, χ (eV)	4.4	4.5	
Permittivity relative, ϵ_r	10	13.6	
μ_n (Cm ² / V.s)	100	100	
μ_p (Cm ² / V.s)	25	25	
Durée de vie des électrons, τ_n (s)	---	22×10^{-19}	
Durée de vie des trous, τ_p (s)	10^{-13}	---	
Concentration des atomes accepteurs, Na (cm ⁻³), paramètre de base	---	2×10^{16}	
Concentration des atomes donneurs Nd (cm ⁻³), paramètre de base	10^{17}	---	
Énergie du gap, E_g (eV), paramètre de base	2.42	1.15	
Densité effective des états dans la bande de conduction Nc(cm ⁻³),	2.2×10^{18}	2.2×10^{18}	

Densité effective des états dans la bande de valence $N_v(\text{cm}^{-3})$,	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}	
Vitesse de recombinaison des électrons à la surface arrière $S_n(\text{cm/s})$	---	10^7	
Vitesse de recombinaison des trous à la surface avant $S_p(\text{cm/s})$	10^7	---	
Coefficient de réflexion, $R(\lambda)$	0.05		
Factor de quality, Q	1.14		
La temperature $T(K)$	300		
L'épaisseur de la couche $P^+ W_{bsf}(\mu\text{m})$			0.7
Le dopage de la couche $P^+ N_{bsf}(\text{cm}^{-3})$			8×10^{18}

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

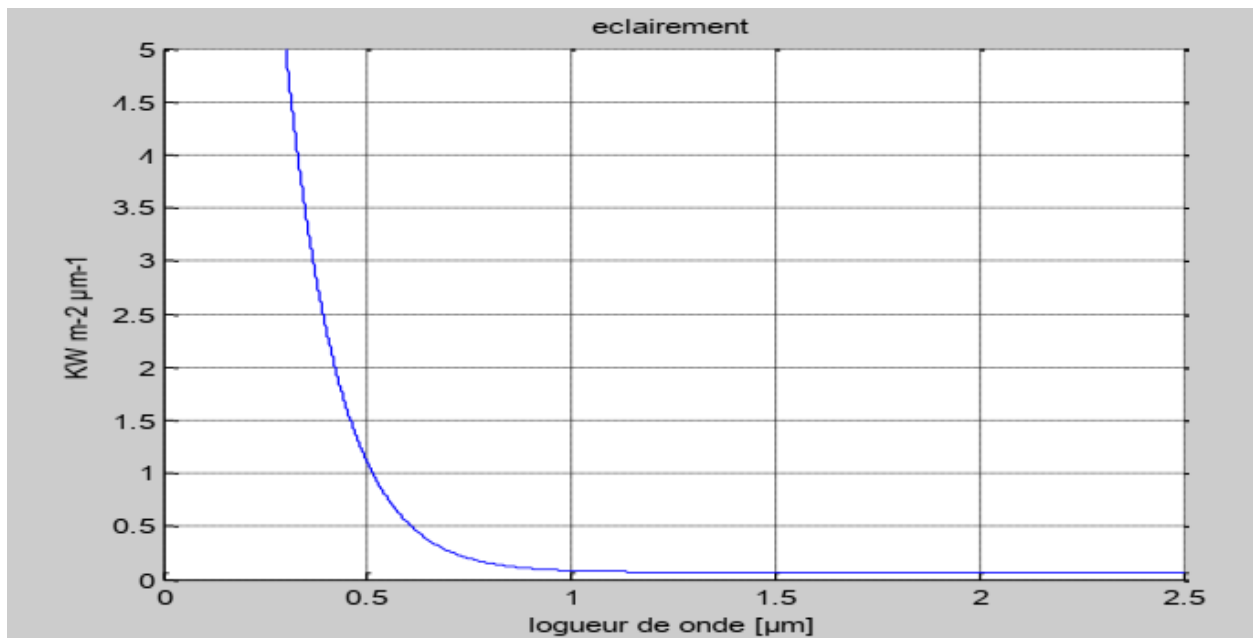


Figure III.3: Distribution de l'éclairement incidente en fonction de la longueur d'onde

En fonction de la longueur d'onde, cette figure représente l'éclairement solaire incident au sol. Le nombre de photons diminue exponentiellement et la distribution spectrale du rayonnement solaire présente la même allure de variation. Au-delà de 0.3 μm à 0.75 μm , la cellule est très sensible aux photons.

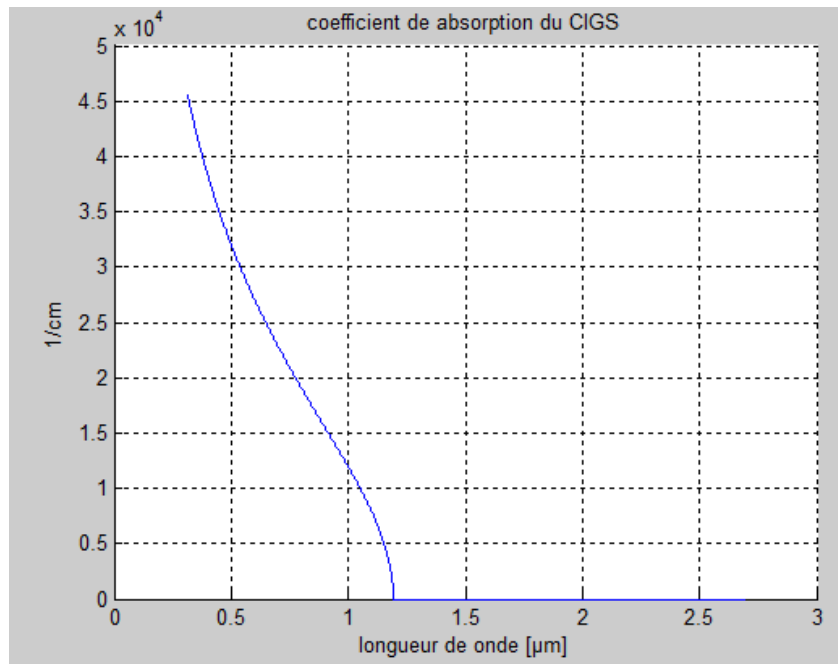


Figure III.4: Coefficient d'absorption du CIGS en fonction de la longueur d'onde

Sur les figures (III.4) et (III.5) qui représentent le coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde, il est évident que le CIGS absorbe plus de photons que le CdS en raison de leur faible différence optique par rapport au CdS.

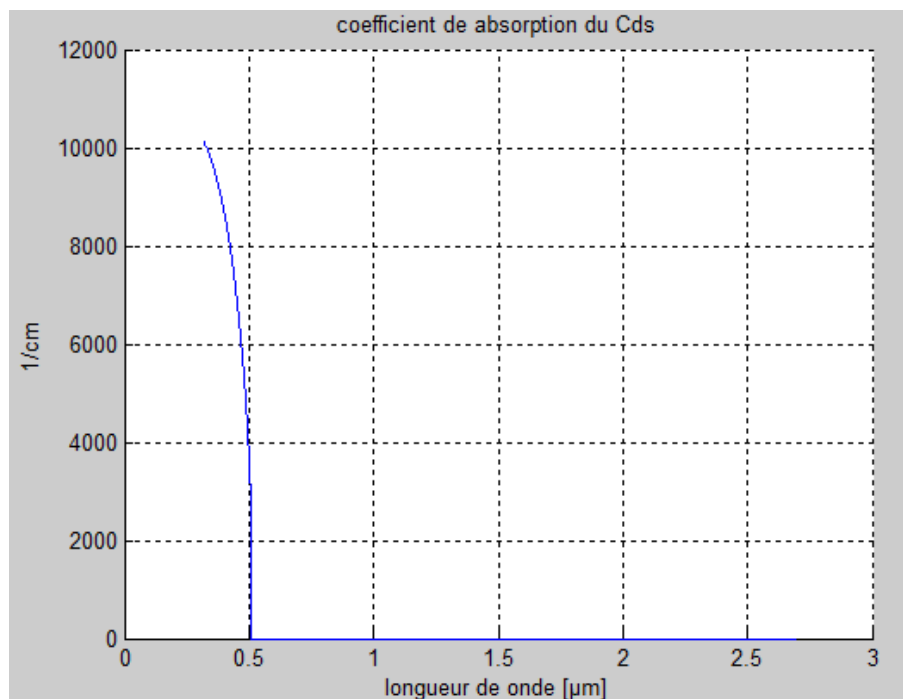


Figure III.5: Coefficient d'absorption du CdS en fonction de la longueur d'onde

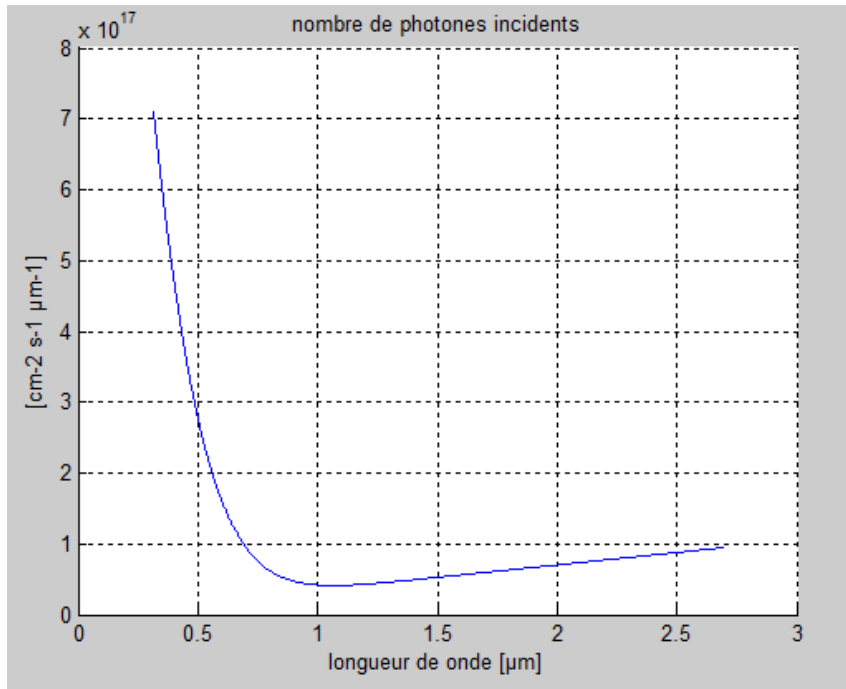


Figure III.6: Nombre de photons incidents en fonction de la longueur d'onde.

Le nombre de photons qui tombent sur une surface par unité de temps est représenté dans cette figure sous le nom de flux de photons incidents. Le nombre de photons diminue exponentiellement, ce qui est simplement dû aux propriétés de la lumière, qui sont ondulatoire et corpusculaire. La distribution spectrale du rayonnement solaire et la courbe ont la même allure de variation.

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).

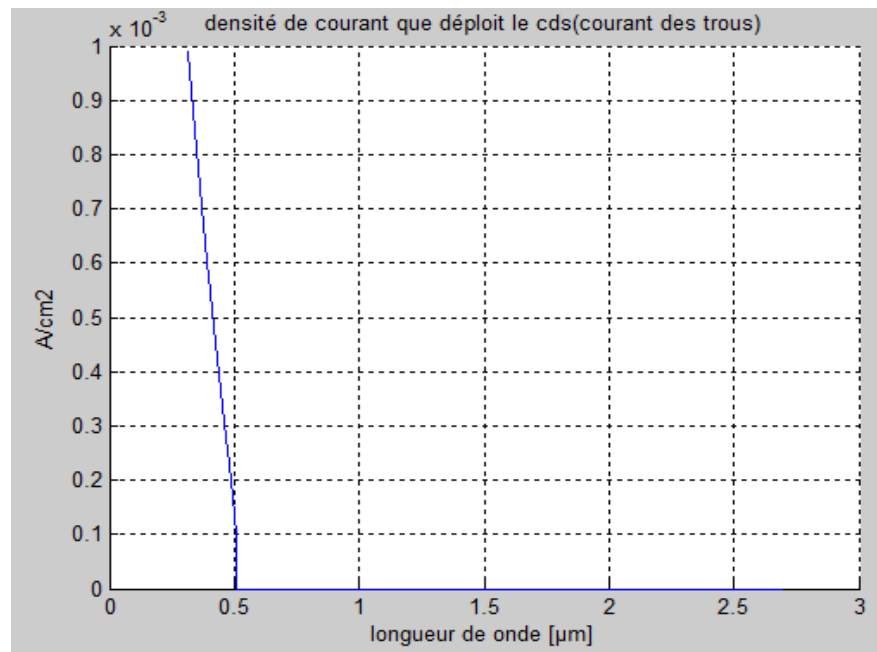


Figure III.7: Densité du courant que déploie le CdS (courant des trous) en fonction de la longueur d'onde.

La variation de la densité du courant des trous dans l'émetteur CdS est illustrée à la figure (III.7). La courbe du flux des photons et le coefficient d'absorption affectent la photo courant de CdS avec des excitations énergétiques (le flux incident).

Par ce qu'il présente un courant de diffusion des trous, nous remarquons que les valeurs de ce courant sont très faibles par rapport aux autres couches. De plus, l'épaisseur du CdS est très fine par rapport à celle de la base. La nullité de la courbe à partir de la valeur $\lambda=0.5 \mu\text{m}$ confirme que ce courant dépend réellement au coefficient d'absorption.

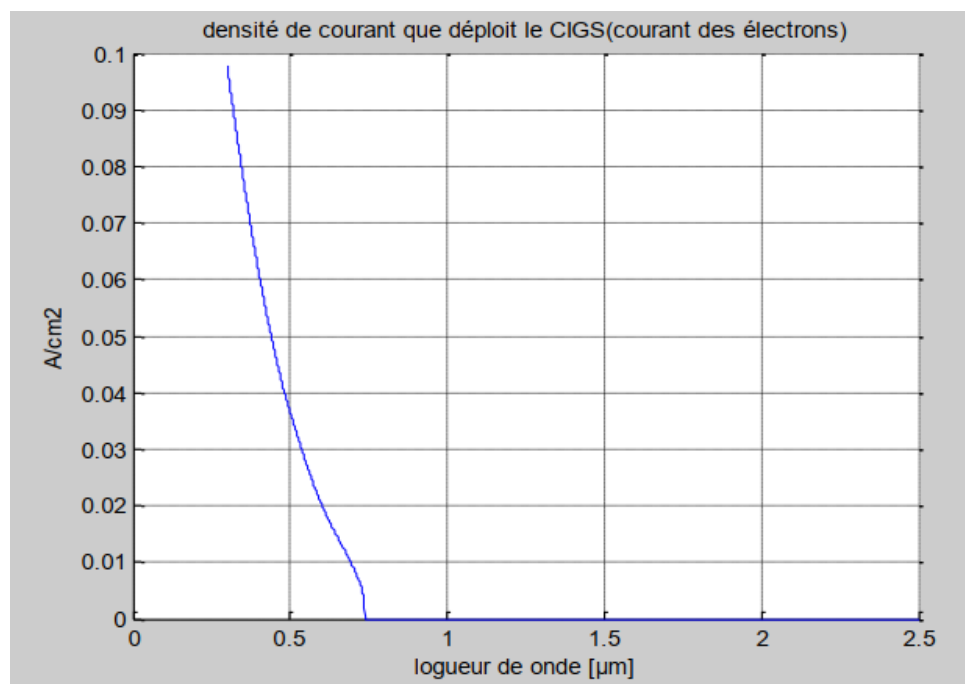


Figure III.8: Densité du courant que déploie le CIGS (courant des électrons) en fonction de la longueur d'onde.

Le coefficient d'absorption et la photocourant émis par la base CIGS sont représentés successivement dans les figures (III.5) et (III.8). En effet, il y a une forte absorption dans le quaternaire CIGS. Ce semi-conducteur est un avantage pour les cellules photovoltaïques à base de CIGS car, si l'on compare la densité de courant qu'il déploie avec celle du CdS, le CIGS déploie une densité beaucoup plus élevée. Il a également un large domaine d'absorption et un très grand coefficient d'absorption.

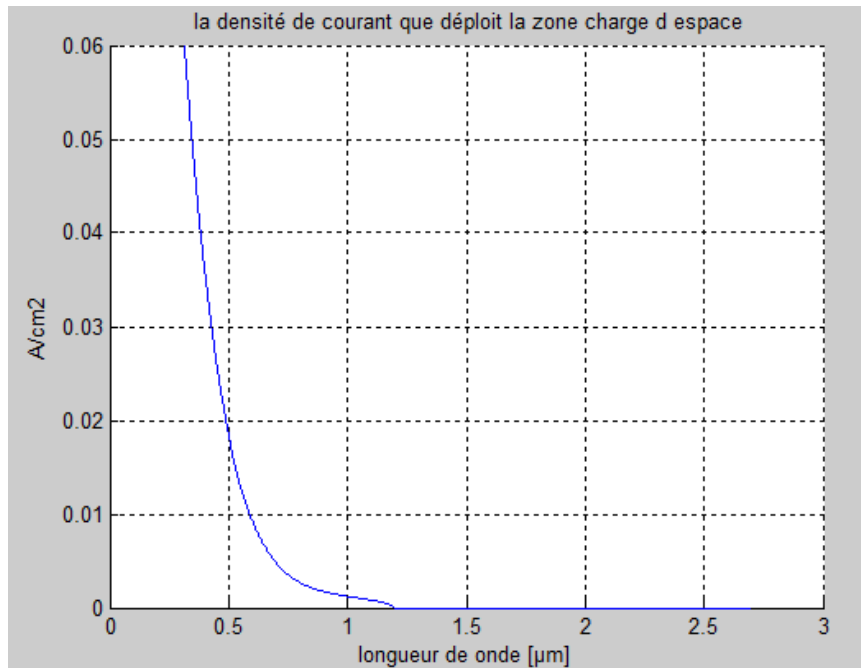


Figure III.9: Densité du courant que déploie la ZCE en fonction de la longueur d'onde.

La photo du courant livré dans la ZCE est illustrée à la figure (III.9). En raison du champ E à l'intérieur de cette zone, la photo génération dans cette zone produit un courant important pour une épaisseur très petite par rapport à celle de la base, comme le montre clairement cette figure.

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.

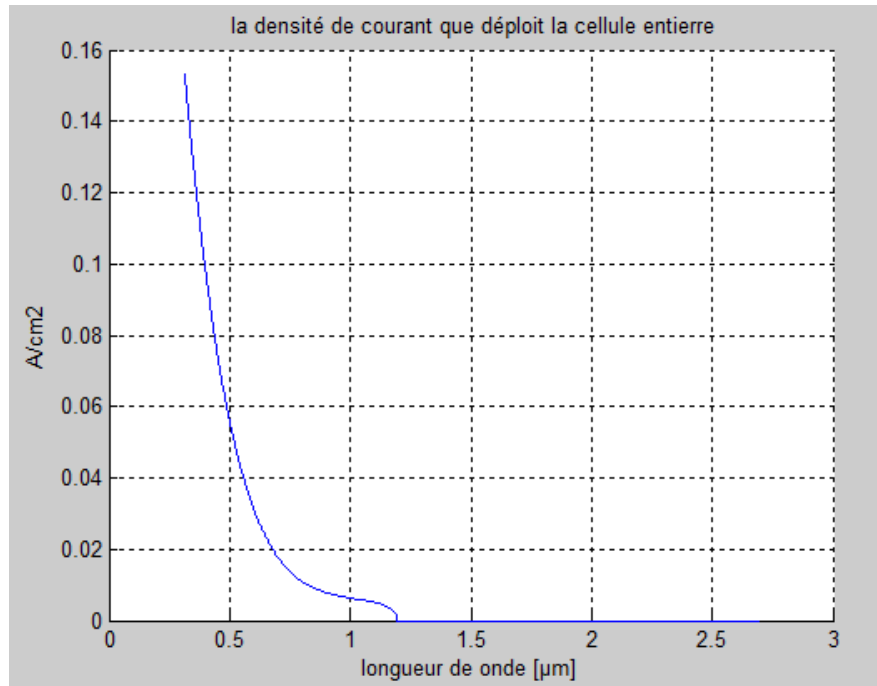


Figure III.10: La densité du courant total que délivre la cellule entière en fonction de la longueur d'onde.

La variation du photocourant total en fonction de la longueur d'onde λ , qui est la somme des trois courants, est illustrée dans cette figure (III.10). Le CIGS augmente le courant total de la cellule et le courant photo de diffusion de la base s'accumule avec le courant photo produit dans la ZCE, ce qui augmente le courant total avec un pic de 0.158 mA.

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

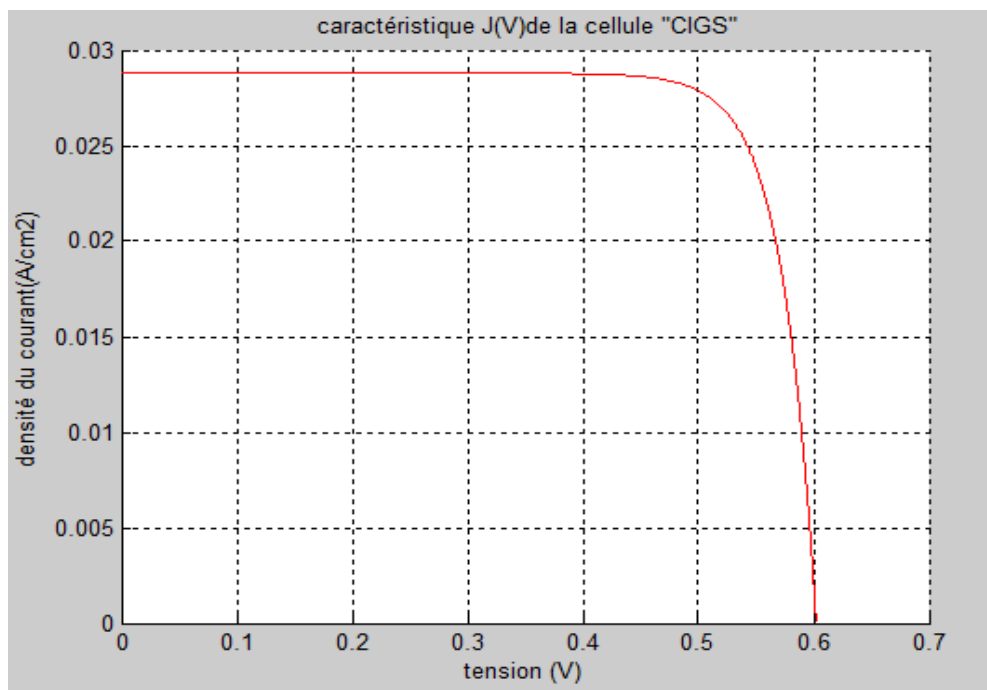


Figure III.11: La caractéristique de sortie I(V) de la cellule CdS/CIGS.

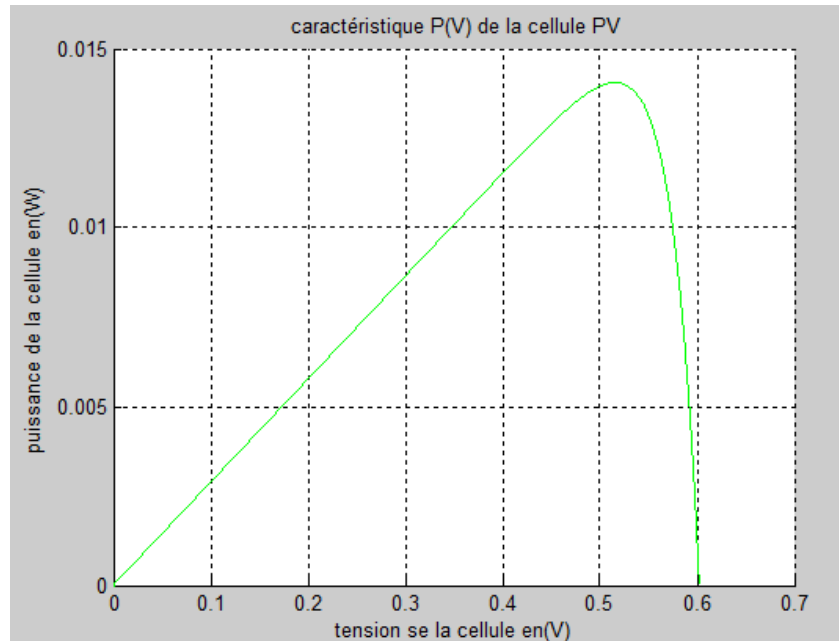


Figure III.12: La puissance $P(V)$ de la cellule CdS/CIGS en fonction de la tension.

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_{co} (V)	Rendement η (%)	FF(%)
Cellule conventionnelle	0.0288	0.6022	19.3087	81.0869

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

Nom Dispositive	Secateurs (cm ²)	ζ (%)	VCO(system mv)	FF (%)	J_{sc} (mA cm ²)	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
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 :

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

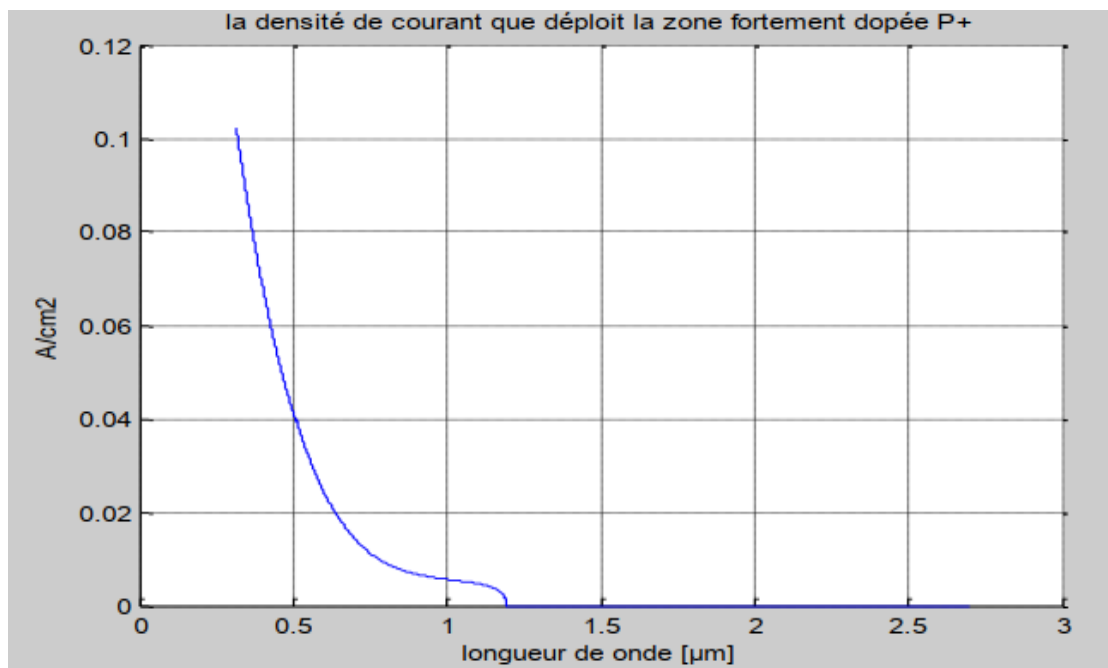


Figure III.13: Densité du courant que déploie la couche arrière P+ en fonction de la longueur d'onde.

La photo courant produite dans la couche arrière P+ est illustrée dans la figure (III.13). Comparé à la base, la coche fortement dopée introduit un courant important pour une épaisseur très petite, comme l'illustre cette figure.

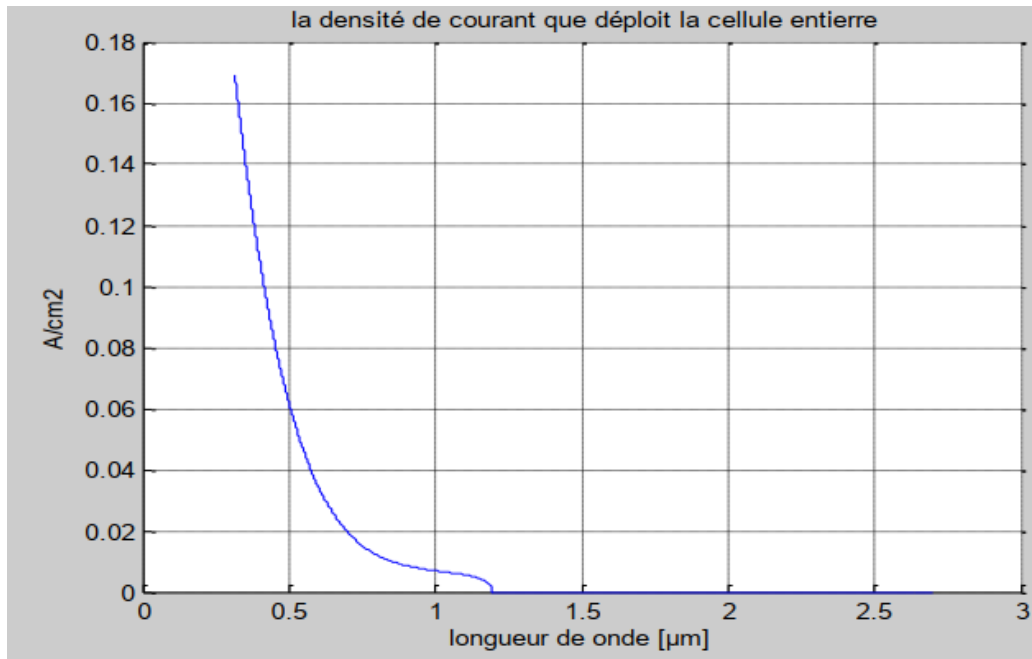


Figure III.14: La densité du courant total que délivre la cellule entière en fonction de la longueur d'onde.

La variation du photocourant total en fonction de la longueur d'onde λ , qui est la somme des quatre courants, est illustrée dans cette figure (III.14). La couche BSF augmente le courant total de la cellule.

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

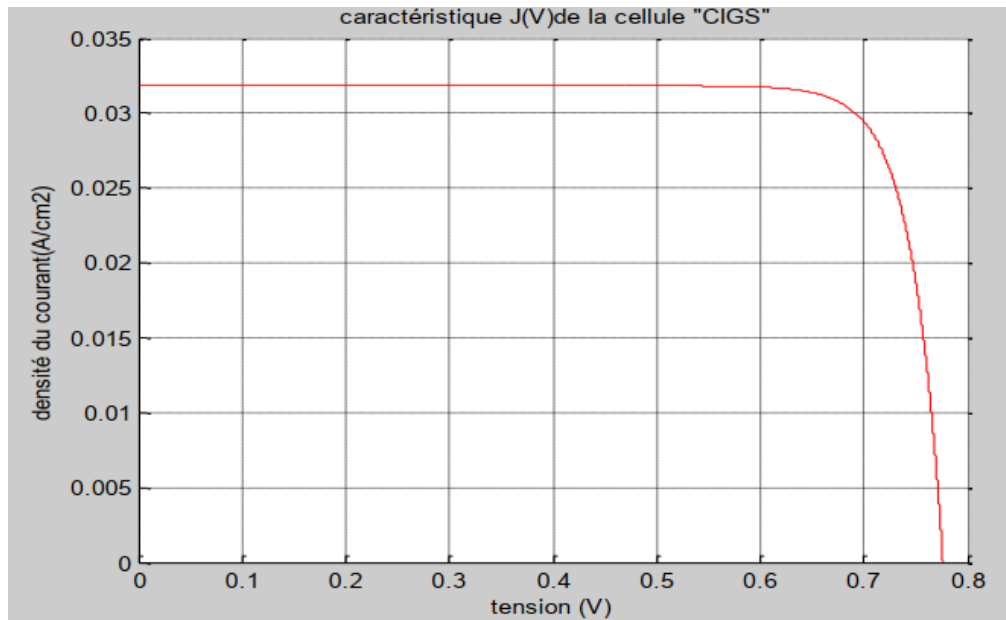


Figure III.15: La caractéristique de sortie I(V) de la cellule CdS/CIGS BSF.

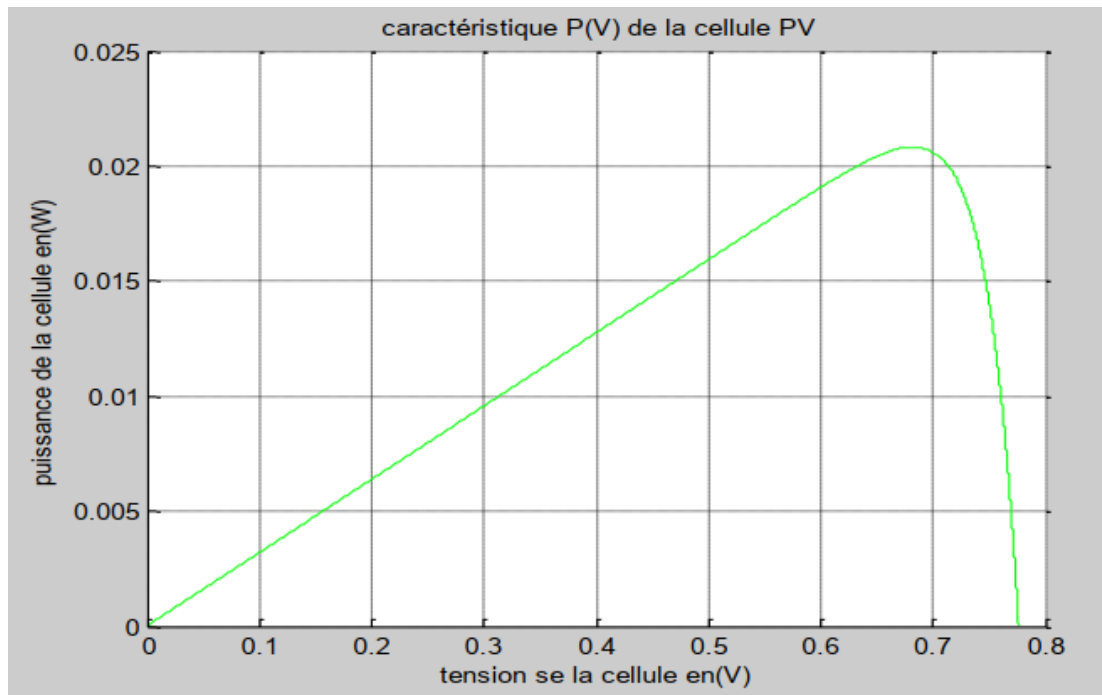


Figure III.16: La puissance $P(V)$ de la cellule CdS/CIGS BSF en fonction de la tension.

D'après les figures (III.15, 16) on constate une augmentation pour les caractéristiques de sortie de la cellule à cause la photo courant 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	$I_{sc} \text{ (A/cm}^2\text{)}$	$V_{co} \text{ (V)}$	Rendement $\eta(\%)$	FF(%)
Cellule conventionnelle	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 ²)	V_{co} (V)	Rendement η (%)	FF(%)
Cellule bifaciale	0.0318	0.6404	22.9135	81.9045
Cellule conventionnelle	0.0288	0.6022	19.3087	81.0869

Le fonctionnement de la cellule solaire BSF bifaciale est identique à celui de la cellule solaire traditionnelle. La cellule bifaciale, cependant, collecte la lumière par ses deux faces avant et arrière. La somme des deux courants photo 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 une photocourant des électrons et à la minimisation des recombinaisons au niveau de la face arrière, constitue le courant photo généré total.

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 $N_d = 10^{17}/\text{cm}^3$ 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

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

Les résultats du tableau montrent que l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur réduit le rendement et le facteur de qualité. L'opacification de la couche émettrice (la couche devient plus opaque par rapport à la lumière incidente) explique cette diminution, ce qui signifie que la pénétration de la lumière dans la base sera de plus en plus faible. Ce nombre de porteurs créés dans la base est réduit. Cependant, les paires générées près de la surface par des photons de faibles longueurs d'onde ne seront pas utilisables pour les grandes épaisseurs de l'émetteur, ce qui limite la réponse de la cellule photovoltaïque et, par conséquent, la puissance et le rendement de la cellule photovoltaïque.

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

Nous avons varié les niveaux de dopage et fixé ceux de la base et de la BSF pour étudier l'impact du dopage de l'émetteur sur les différents paramètres de la cellule solaire bifaciale. Le tableau ci-dessous montre les résultats de notre code de calcul.

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

paramètres dopage	I_{sc} (A/cm ²)	V_{co} (V)	Rendement η (%)	FF(%)
$N_d=10^{17}$ cm ⁻³	0.0318	0.6405	22.9138	81.9051
$N_d=10^{18}$ cm ⁻³	0.0318	0.6405	22.9138	81.9051
$N_d=10^{19}$ 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

Un facteur important qui permet de définir les meilleures caractéristiques de la cellule solaire est l'optimisation de la géométrie de la base. Nous avons donc changé l'épaisseur de la base et fixé les épaisseurs de l'émetteur et de la BSF. Le tableau ci-dessous montre comment les caractéristiques de la cellule solaire bifaciale ont changé 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

Epaisseur paramètres	I_{sc} (A/cm ²)	V_{co} (V)	Rendement η (%)	FF(%)
$W_b= 1.5*10^{-4}$ m	0.0318	0.6405	22.9381	81.9051
$W_b= 2*10^{-4}$ m	0.0322	0.6459	22.1819	82.0143
$W_b= 2.5*10^{-4}$ m	0.03441	0.6475	22.5730	82.0466

Les variations du courant de court-circuit, de la tension du circuit ouvert, du rendement et du facteur de qualité sont représentées dans le tableau. Selon eux, tous ces paramètres augmentent avec l'épaisseur de la base. Étant donné que les photons d'une grande énergie seront absorbés près de la surface de la cellule pour des faibles longueurs d'ondes, le nombre de porteurs de charges générés dans cette région augmente. Cependant, les photons d'une longueur d'onde plus élevée (d'une énergie inférieure) seront absorbés loin de la surface. Par conséquent, plus l'épaisseur de la base est épaisse, plus il est possible de produire des porteurs qui contribuent à l'amélioration de la photo courant. Mais il ne faut pas la prendre d'une façon absolue, elle joue sur rapport court/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 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.

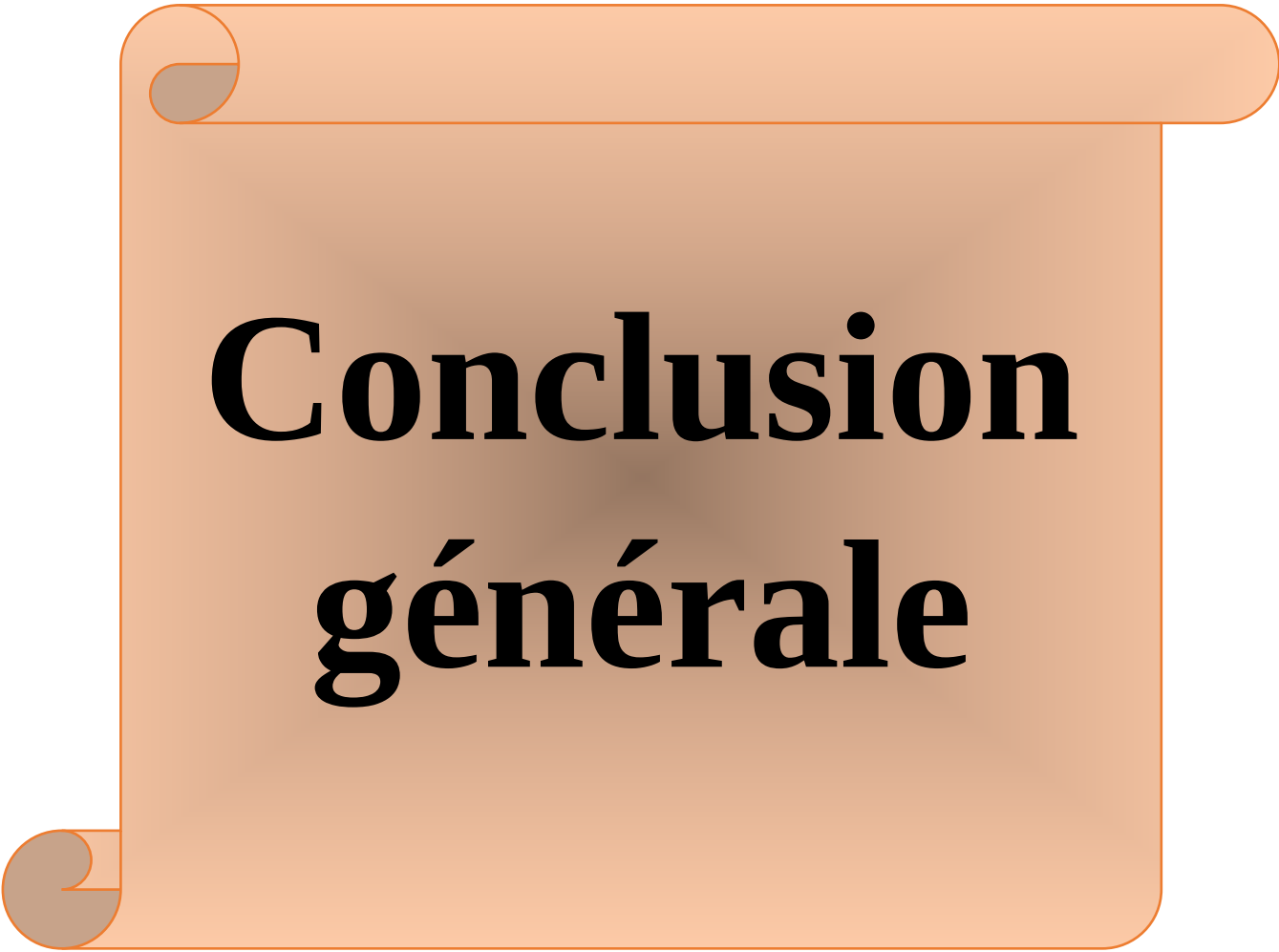
III.7. Conclusion

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 ; 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^+).
- La couche fortement dopé $P^+(W_{bsf})$ renforce la photo courant total de la cellule bifaciale qui passe de la valeur 28.8 mA/cm^2 à la valeur de 31.8 mA/cm^2 .
- 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 avec un rendement qui arrive à 22.9135 %.

An orange scroll graphic with a light orange background and a darker orange border. The scroll is unrolled, showing the text. The top and bottom edges of the scroll are slightly curved, and there are small circular details on the left side suggesting the binding of the scroll.

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 , 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 du 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 :

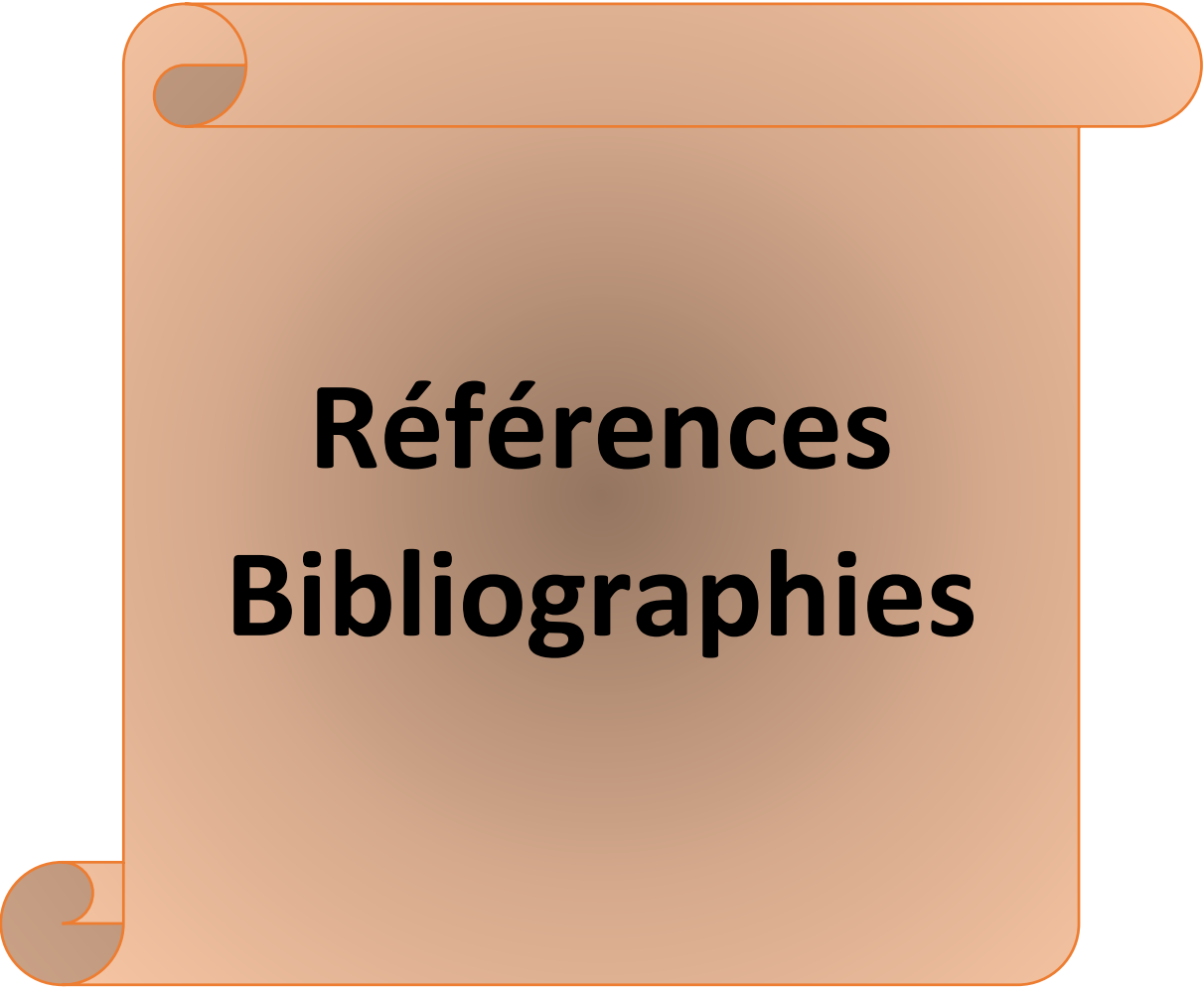
- La prédominance de la densité de la photo courant de CIGS par rapport à celle de CdS.
- La photo génération dans la zone ZCE donne un courant important pour une épaisseur très petite comparant avec celle de la base.
- Le courant total de la cellule est dominé par ; la photo courant de diffusion de 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^+).

- La couche fortement dopé $P^+(W_{bsf})$ renforce la photo courant total de la cellule bifaciale qui passe de la valeur 28.8 mA/cm^2 à la valeur de 31.8 mA/cm^2 .
- 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 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 optimales.
- ✓ 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.

An orange scroll graphic with a gradient from light to dark orange. It has a horizontal top flap and two circular tabs on the left side, one at the top and one at the bottom.

Références

Bibliographies

Références Bibliographies

- [1] Djarallah, Mohamed, "Contribution A L'étude Des Systèmes Photovoltaïques Résidentiels Couples Au Réseau Electrique," UNIVERSITE DE BATNA Thèse de Doctorat en Science, 2008.
- [2] N. Oleksiy, "Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités," Ecole Doctorale Thèse de Doctorat, 2005.
- [3] M. Fahoum, F. Chraïbi, M. Aggour, A. Ennaoui, Ann. Chim. Sci. Mat., 23 (1998).
- [4] A. Labouret, M. Villoz, "Energie solaire photovoltaïque", livre 3e édition, 2006, Dunod, Paris.
- [5] S. NAOUAL, "Modélisation et Extraction Automatique des Paramètres d'un Générateur," Université Ferhat Abbas de Sétif Mémoire de Magister, Département d'électrotechnique 2010.
- [6] Souici Fatma-Zohra, Modélisation d'une cellule solaire en couche mince à base de Cuivre Indium Sélénium(CuInSe₂) ; 2009.Univ-ouragla.dz
- [7] Bailly, « Thermodynamiques : Rayonnement Bordas, 1979.fac.umc.edu.dz.
- [8] S. Arab, D. Toudert, «Etude d'un Système Photovoltaïque » mémoire de master, université mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2017.
- [9] F.Boudjerad, «Amélioration du rendement énergétique de cellules photovoltaïques en couches minces à base de CZTS », Mémoire de master, 2013.Univ-tlemcen.dz
- [10] M. MERAD BOUDIA, «Modélisation électro-optique et optimisation des cellules solaires organiques », thèse de doctorat, 2016.Univ-usto.dz
- [11] Théories photovoltaïque, [http:// www.energieplus-le site.be/energieplus/page .htm](http://www.energieplus-le-site.be/energieplus/page.htm),consulté le 14/08/2020.
- [12] BENHADDOUCHE NESRINE FATIMA « Commande d'un système photovoltaïque d'un satellite ». Mémoire de Master. Université ABOU BEKR BELKAID-TLEMCEM, 2013
- [13] Angel Cid Pastor « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques ». Thèse de Docteur. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006.
- [14] Henry. Mathieu, « Physique des semiconducteurs et des composants électroniques», 2èmeEdition, Masson, France, 1990.
- [15] <https://dspace.univouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/15243/1/Belalem-Sandali.pdf>

- [16] MECHALIKH M.Nadjib,HAMADA Charaf Eddine « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau » Thème de Magister, Université KASDI MERBAH – OUARGLA 2013.
- [17] Vighetti Stéphane «Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau: Choix et dimensionnement des étages de conversion». Thèse de doctorat, Université Grenoble, Institut polytechnique de Grenoble, 2010.
- [18] A. Ahmaha, A. Silla, « Étude et modélisation des paramètres électriques D'une cellule photovoltaïque », mémoire de master, Université kasdi mer bah ouargla, 2019.
- [19] S. Mekliche, «Etude et Simulation des paramètres électriques d'une cellule solaire photovoltaïque à base de Silicium» mémoire de master, université mouloud Mammeri TiziOuzou, 2017.
- [20] 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.
- [21] Souici Fatma-Zohra, Modélisation d'une cellule solaire en couche mince à base de Cuivre Indium Sélénium(CuInSe2) ; 2009.Univ-ouragla.d
- [22] R. Legros, « les semi-conducteurs, Physique des semi-conducteurs Technologie Diodes », Eyrolles 1974
- [23] Mallem, «Simulation des cellules solaire hétérojonction Si-Sigean SILVACO», mémoire de magister, 2014.thesis univ-biskra.dz.
- [24] Nahe Romain,Caractérisations de couches minces de CuGaSe2 Obtenues Par MOCVD, le 16 decembre 1999.Univ-stif.dz
- [25] J. Royer, T. Djiako, « Le Pompe Photovoltaïque », Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, université d'Ottawa/EIER /CREPA, 1998.
- [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.

- [31] A. Zerga “Effets de l’ajout d’une couche de SiO₂ à l’interface arrière. métal/semi-conducteur sur les performances d’une cellule solaire conventionnelle à 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] Kränzle et R. Kopeck, «Bifacial Solar cells On Multi-crystalline Silicon With Boron BSF And Open Rear Contact» IEEE, International Solar Energy Research Centre, Allemande. (2006) 968-971
- [34] Nahe Romain, Caractérisations de couches minces de CuGaSe₂ Obtenues Par MOCVD, le 16 decembre 1999.tel.archives-ouvertes.fr
- [35] T. Uematsu. Tsutsui, «Development of Bifacial Pv Cells For New Applications of the 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 Systems, Freiburg, Germany, (1998).
- [38] 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).
- [39] Moualkia, «Simulation D’une Cellule Solaire En Couches Minces A Base d’Oxyde De Zinc». Thèse de Magister, Université de Constantine. Algérie, (2010).
- [40] S. BRIGAND « Les Principes de l’énergie solaire photovoltaïque », www.le moniteur.fr
- [41] Lev Kreinin, «A Novel Method for Determining Bulk Diffusion Length in Bifacial Silicon Solar Cells» IEEE, University of Jerusalem, (2000) 248-251.
- [42] I. Bouchama, "Contribution à l’amélioration des performances des cellules solaires CuIn_{1-x}Ga_xSe₂ ", Thèse de doctorat, Université de Sétif (2012).
- [43] T. Nakada, Y. Hirabayashi, T. Tokado, D. Ohmori, T. Mise, Sol. Energy 77 (2004) 739.
- [44] M. Gloeckler, A. L. Fahrenbruch, ET J. R. Sites, in Proc. 3rd World Conf. Photovoltaic Energy Conversion, vol. 1, (2003) pp. 491–494.
- [45] Characterization of 19.9%-Efficient CIGS Absorbers Conference Paper NREL/CP- 520-42539 May 2008.
- [46] B. Lakehal, « Etude des propriétés électriques d’une photopile à base d’une structure Schottky », mémoire de magister, 2009.Univ-batna.dz

- [47] F.Boudjerad, « Amélioration du rendement énergétique de cellules photovoltaïques en couches minces à base de CZTS », Mémoire de master, 2013.Univ-tlemcen.dz

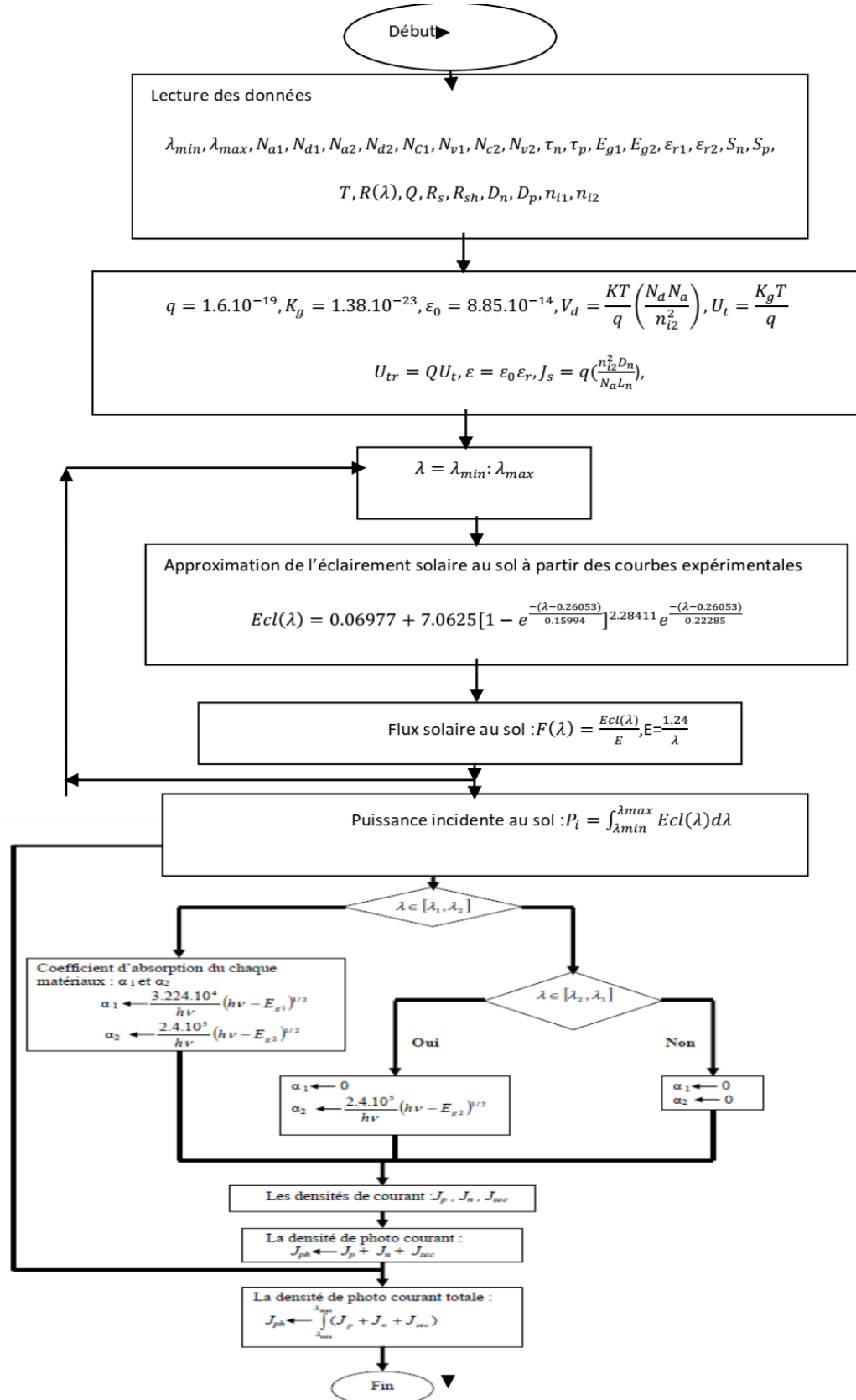
An orange scroll graphic with a dark orange border and a lighter orange fill. The scroll is unrolled, showing the word "Annexe" in the center. The top and bottom edges of the scroll are slightly curved, and the left edge has a small circular detail suggesting a binding or a fold.

Annexe

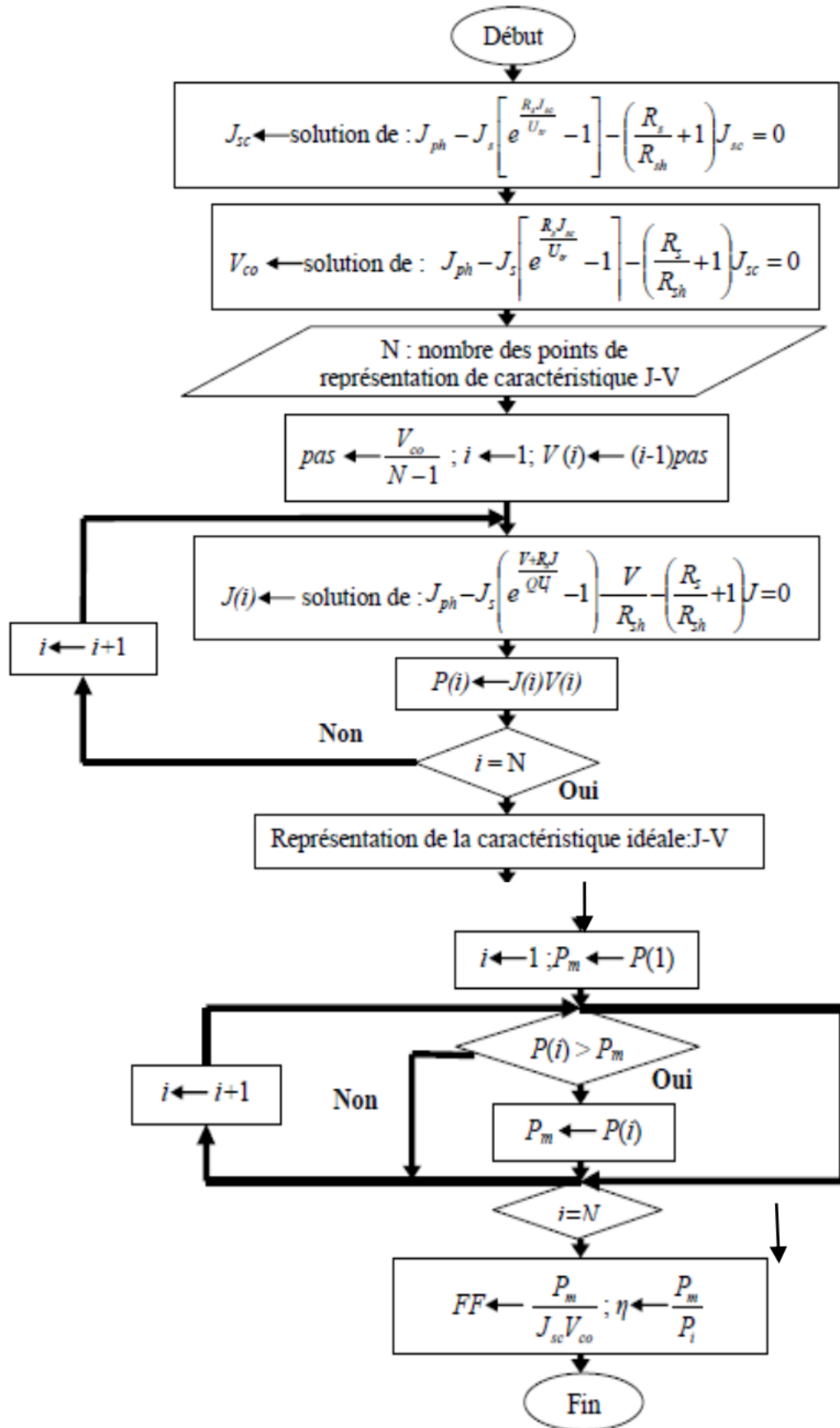
Annexe

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] :



An orange scroll graphic with a gradient, featuring a rolled-up top edge and a small circular detail on the left side.

الملخص

Résumé

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 22.9 % 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^+).

Mots-clés: Rayonnement solaire, la cellule solaire bifaciale, conversion, simulation, Modélisation.

المخلص

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 22.9% بعدما كانت 19.31%، وذلك بسبب إضافة مجال كهربائي إلى السطح الخلفي في محيط التلامس الأومي (تأثير طبقة P^+ المحقونة بشدة).

الكلمات الرئيسية: الإشعاع الشمسي، الخلية الشمسية ثنائية الوجه، التحويل، المحاكاة، النمذجة.