

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

**UNIVERSITE CONSTANTINE 1**  
**FACULTE DES SCIENCES EXACTES**  
**DEPARTEMENT DE PHYSIQUE**

N° d'ordre: .....

Série: .....

**MEMOIRE**

Présenté pour obtenir le Diplôme de Magister en Physique  
Spécialité: Energies Renouvelables

**THEME**

**Modélisation par MATLAB de la cellule  
solaire bifaciale à base de silicium  
monocristallin**

**PAR**

**Cherouana Abdelbaki**

Soutenu le : 30/06/2013

**Devant le jury :**

<b>Président :</b>	<b>S. Boudjadar</b>	<b>Prof.</b>	<b>Université Constantine 1</b>
<b>Rapporteur :</b>	<b>R. Labbani</b>	<b>Prof.</b>	<b>Université Constantine 1</b>
<b>Examineurs:</b>	<b>M. Djezzar</b>	<b>Prof.</b>	<b>Université Constantine 1</b>

# *Dédicaces*

*Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots  
qu'il faut...*

*Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour,  
le respect, la reconnaissance.....*

*Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents,  
vous êtes l'air que je respire, la lumière qui éclaire  
ma voie...*

*A mes chers frères*

*A mes chères sœurs*

## Remerciements

*Je remercie ALLAH le clément de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.*

*Je remercie tout particulièrement M<sup>elle</sup> **R. Iabbani**, Professeur au Département de physique, Université de Constantine 1, pour m'avoir guidé tout au long de l'élaboration de ce travail. Je la remercie pour son encadrement, ces expériences, sa disponibilité, son aide, son soutien et ces conseils précieux,*

*Je remercie chaleureusement M<sup>R</sup> **S. Boudjadar**, Professeur au Département de physique, Université de Constantine 1, pour l'honneur qu'il m'a accordé, en acceptant de présider le jury de ce mémoire de magistère.*

*Je tiens à exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance à M<sup>R</sup> **M. djezzar**, Professeur au Département de physique, Université de Constantine 1, qui m'a fait l'honneur de participer au jury et examiner ce travail.*

*Je remercie sincèrement toutes les étudiantes qui m'ont accompagné durant l'année préparatoire, ce fût un honneur d'avoir étudié à avec vous.*

*Je remercie tout les professeurs du Département de physique, Université de Constantine 1 qui ont veillé à ce que notre formation se déroule dans les meilleures conditions possibles.*

# Sommaire

---

## Sommaire

<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre I: Notions générales et présentation d'un système photovoltaïque</b>	
<b>1. Introduction</b> .....	<b>4</b>
<b>2. Historique</b> .....	<b>4</b>
<b>3. Le rayonnement solaire</b> .....	<b>5</b>
<b>3.1. Le soleil</b> .....	<b>5</b>
<b>3.1.1. Caractéristiques générales</b> .....	<b>5</b>
<b>3.1.2. Son énergie</b> .....	<b>5</b>
<b>3.2. L'atmosphère terrestre</b> .....	<b>6</b>
<b>3.3. Constantes d'illumination</b> .....	<b>6</b>
<b>4. La conversion photovoltaïque</b> .....	<b>8</b>
<b>4.1. L'interaction photon semi-conducteur</b> .....	<b>8</b>
<b>4.2. La cellule photovoltaïque</b> .....	<b>9</b>
<b>4.2.1. Structure et principe de fonctionnement</b> .....	<b>9</b>
<b>a. La structure</b> .....	<b>9</b>
<b>b. Principe de fonctionnement</b> .....	<b>12</b>
<b>4.2.2. Facteurs limitant le rendement de la cellule solaire</b> .....	<b>13</b>
<b>4.2.3. Caractéristiques électriques de la cellule solaire</b> .....	<b>14</b>
<b>4.2.4. Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque</b> .....	<b>16</b>
<b>4.2.5. Réponse spectrale de la cellule photovoltaïque (<math>R_s</math>)</b> .....	<b>18</b>
<b>4.2.6. Modélisation mathématique de la cellule photovoltaïque</b> .....	<b>19</b>
<b>5. Cas de la cellule solaire BSF</b> .....	<b>19</b>
<b>5.1. Procédés technologiques de réalisation de la cellule solaire BSF</b> .....	<b>21</b>
<b>5.2. Théorie du champ de surface arrière BSF</b> .....	<b>23</b>
<b>5.3. Détermination de la vitesse de recombinaison effective <math>S_{eff}</math></b> .....	<b>23</b>

# Sommaire

---

5.3.1. $S_{eff}$ pour les homo-structures .....	23
5.3.2. $S_{eff}$ Pour les hétérostructurs .....	26
5.4. Le photo-courant généré par la cellule BSF .....	26
<b>Chapitre II: Modélisation de la cellule solaire bifaciale</b>	
<b>1. Introduction .....</b>	<b>29</b>
<b>2. Historique .....</b>	<b>29</b>
<b>3. Structure et principe de fonctionnement de la cellule solaire bifaciale BSF .....</b>	<b>30</b>
3.1. Structure de la cellule solaire bifaciale BSF .....	30
3.2. Principe de fonctionnement de la cellule solaire bifaciale BSF .....	31
<b>4. Caractéristiques électriques de la cellule solaire bifaciale BSF .....</b>	<b>32</b>
<b>5. La réflexion par albédo .....</b>	<b>36</b>
<b>6. Modélisation électrique de la cellule solaire bifaciale BSF éclairée par sa face avant .....</b>	<b>37</b>
6.1. Le Photocourant généré par une cellule solaire bifaciale BSF .....	38
6.1.1. Le photocourant généré dans la région quasi-neutre P .....	39
6.1.2. Le photocourant dans la région quasi-neutre $N^+$ .....	43
6.1.3. Le photocourant dans la région de charge d'espace ZCE .....	45
6.1.4. Le photocourant dans la région fortement dopée $P^+$ .....	46
<b>7. Modélisation électrique de la cellule solaire bifaciale BSF éclairée par sa face arrière .....</b>	<b>46</b>
7.1. L'efficacité quantique interne (I.Q.E) .....	46
7.2. La vitesse de recombinaison effective à la face arrière .....	47
7.3. Le courant de court circuit $I_{cc}$ .....	48
<b>8. Conclusion .....</b>	<b>49</b>

# Sommaire

---

## Chapitre III: Résultats de la modélisation des cellules solaires conventionnelle et avec BSF

<b>1. Introduction</b> .....	<b>51</b>
<b>2. Résultats de la modélisation des cellules solaires conventionnelle et avec BSF</b> .....	<b>51</b>
<b>2.1. l'organigramme de calcul</b> .....	<b>51</b>
<b>2.2. Caractéristiques I(V) et P(V) des cellules solaires conventionnelle et avec BSF</b> .....	<b>54</b>
<b>3. Influence des différents paramètres sur les caractéristiques I(V) des cellules solaires conventionnelle et avec BSF</b> .....	<b>55</b>
<b>3.1. Influence de la résistance série <math>R_s</math></b> .....	<b>55</b>
<b>3.2. Influence de la résistance parallèle (shunt)</b> .....	<b>56</b>
<b>3.3. Influence du rayonnement solaire</b> .....	<b>57</b>
<b>3.4. Influence de la température</b> .....	<b>58</b>
<b>3.5. Influence du facteur de qualité <math>y</math></b> .....	<b>59</b>
<b>4. Influence des différents paramètres sur les caractéristiques P(v) des cellules solaires conventionnelle et avec BSF</b> .....	<b>60</b>
<b>4.1. Influence de la résistance série</b> .....	<b>60</b>
<b>4.2. Influence de la résistance shunt</b> .....	<b>61</b>
<b>4.3. Influence de la température</b> .....	<b>62</b>
<b>4.4. Influence de l'éclairement</b> .....	<b>63</b>
<b>5. Etude de l'efficacité quantique interne des cellules solaires simple et avec BSF</b> .....	<b>64</b>
<b>6. Prédiction du comportement des cellules conventionnelle et avec BSF pour le site de Constantine</b> .....	<b>67</b>
<b>7. Conclusion</b> .....	<b>69</b>

# Sommaire

---

## Chapitre IV: Résultats de la modélisation des cellules bifaciales BSF

<b>1. Introduction</b> .....	<b>71</b>
<b>2. Résultats de la modélisation des cellules solaires bifaciales BSF</b> .....	<b>71</b>
<b>3. Influence des différents paramètres sur les caractéristiques de la cellule solaire bifaciale</b> .....	<b>73</b>
<b>3.1. Influence des paramètres de l'émetteur sur IQE, <math>V_{co}</math>, <math>I_{cc}</math>, <math>\eta</math></b> .....	<b>73</b>
<b>3.1.1. Influence de la vitesse de recombinaison des trous à la face avant ...</b>	<b>73</b>
<b>3.1.2. L'influence de <math>X_j</math> (l'épaisseur de l'émetteur)</b> .....	<b>74</b>
<b>3.1.3. L'influence de <math>N_d</math> (le dopage de l'émetteur)</b> .....	<b>77</b>
<b>3.2. Influence des paramètres de la base sur IQE, <math>V_{co}</math>, <math>I_{cc}</math> et <math>\eta</math></b> .....	<b>78</b>
<b>3.2.1. L'influence de la vitesse de recombinaison des électrons à la face arrière (<math>S_n</math>)</b> .....	<b>79</b>
<b>3.2.2. L'influence de l'épaisseur de la base</b> .....	<b>79</b>
<b>3.2.3. L'influence de <math>N_a</math> (le dopage de la base)</b> .....	<b>81</b>
<b>3.3. Influence des paramètres de la BSF (la zone p+) sur IQE, <math>V_{co}</math>, <math>I_{cc}</math>, <math>\eta</math> . . . . .</b>	<b>82</b>
<b>3.3.1. L'influence de l'épaisseur de la zone p+ (<math>W_{bsf}</math>)</b> .....	<b>83</b>
<b>3.3.2. L'influence du niveau de dopage de la zone p+ (<math>N_{bsf}</math>)</b> .....	<b>85</b>
<b>4. Caractéristiques I(v) et P(v) de la cellule solaire bifaciale</b> .....	<b>86</b>
<b>5. Prédiction du comportement des cellules monofaciale et bifaciale pour le site de Constantine</b> .....	<b>89</b>
<b>6. Conclusion</b> .....	<b>90</b>
<b>Annexe</b> .....	<b>91</b>
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>93</b>
<b>Bibliographie</b> .....	<b>94</b>

## Introduction générale

La consommation mondiale d'énergie est fortement liée au développement de l'industrie et des moyens de transport. Actuellement ceux sont les sources d'énergies fossiles qui sont les plus exploitées, entraînant plusieurs désavantages : pollutions, réchauffement de la planète, détérioration de la couche d'ozone et un risque d'épuisement de ces ressources dans quelques décennies [1].

Pour palier à ces problèmes, certains pays industrialisés comme les pays de l'union Européenne et l'USA tentent de promouvoir les énergies renouvelables dont fait parti le photovoltaïque [1].

La conversion photovoltaïque utilise le principe de la conversion directe de l'énergie lumineuse en une énergie électrique via les cellules solaires. La première cellule solaire était fabriquée en 1954 aux Laboratoires BELL. Elle était à base de silicium et avait un rendement de 6% [9].

Cependant, pour des raisons techniques et économiques, cette nouvelle source d'énergie électrique n'était exploitée que dans le domaine spatial. Au cours des années 80, la technologie photovoltaïque terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelques mégawatts et même par la fabrication de nombreux produits de faible puissance : montres, calculatrices, pompes et réfrigérateurs solaires.

Actuellement, de nombreuses innovations ont été préconisées par les chercheurs pour trouver la structure optimale de la cellule solaire : c'est-à-dire sous les conditions climatiques du site, trouver le meilleur rendement avec un pris minimum. Ceci explique et justifie les recherches intenses concernant la mise en œuvre des programmes numériques de conception, de modélisation et de simulation. C'est dans ce cadre que s'inscrit notre travail. En effet, nous nous sommes proposé de contribuer dans le domaine photovoltaïque par la mise en œuvre d'un programme informatique pour la modélisation des cellules solaires. Notre programme (sous MATLAB) est conçu pour prévoir le comportement de trois types de photopiles : conventionnelles, avec BSF (champ électrique arrière, de l'anglais Back Surface Field) et bifaciale. Pour mener à bien ce mémoire de Magistère, nous l'avons structuré en quatre chapitres :

➤ Dans le premier chapitre, nous allons définir la notion de rayonnement solaire et expliquer l'absorption de ce dernier par un semi conducteur, Nous présenterons également un système de captage photovoltaïque ainsi que son principe de fonctionnement, en montrant le

schéma de base et les paramètres principaux d'une cellule solaire conventionnelle et celle avec BSF.

➤ Le deuxième chapitre aura pour objet l'étude théorique et la modélisation d'une structure de la cellule solaire plus performante, c'est une cellule solaire bifaciale BSF, qui collecte l'illumination solaire par ses deux faces avant et arrière.

➤ Le troisième chapitre sera consacré à la présentation et l'analyse de résultats de la modélisation obtenus par l'étude de l'influence de différents paramètres sur les caractéristiques  $I(v)$  des cellules simples et avec BSF, à savoir : la résistance série, la résistance parallèle, la température et l'éclairement.

➤ Dans le dernier chapitre nous allons présenter les résultats obtenus, par notre code de calcul, pour la cellule solaire bifaciale.

A la fin de ce travail, nous présenterons une conclusion résumant l'essentiel des résultats obtenus.

# Chapitre I

NOTIONS GENERALES ET  
PRESENTATION D'UN  
SYSTEME  
PHOTOVOLTAÏQUE

## 1. introduction

La conversion directe de la lumière en énergie électrique s'obtient par l'intermédiaire de cellules solaires, selon un processus appelé effet photovoltaïque [1]. Ces cellules sont fabriquées à l'aide de matériaux semi-conducteurs ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants. Le matériau le plus utilisé est le silicium. Selon le procédé d'élaboration mis en œuvre, la couche semi-conductrice obtenue peut présenter une structure amorphe, poly cristalline ou monocristalline. Il faut noter que les performances de la cellule utilisée dépendent fortement de la structure du film semi-conducteur et de son processus de fabrication.

Par ailleurs, le développement, l'optimisation et la caractérisation des cellules photovoltaïques impliquent certaines connaissances sur le soleil, et son application dans le domaine photovoltaïque, qui représente la source d'énergie utilisée.

Dans ce chapitre, nous allons définir la notion de rayonnement solaire et expliquer l'absorption de ce dernier par un semi-conducteur. Nous présenterons également un système de captage photovoltaïque ainsi que son principe de fonctionnement.

## 2. Historique

C'est en 1839 que le physicien français *Edmond Becquerel* découvre que certains matériaux délivraient une petite quantité d'électricité quand ils étaient exposés à la lumière [1]. En 1912, *Albert Einstein* expliqua le phénomène photoélectrique mais ce n'est qu'en 1954 que la première cellule photovoltaïque était mise au point par les laboratoires *Bell* aux *USA* [16]. Cette première cellule photovoltaïque de silicium avait un rendement de conversion de 6% [9]. En 1958, les cellules photovoltaïques trouvent une place dans l'industrie spatiale américaine qui utilisera des cellules (ayant un rendement de 9% [9]). En contre partie la technologie photovoltaïque terrestre a progressé au cours des années 80 par la mise en place de plusieurs centrales de quelques Mégawatts. Actuellement, une recherche intense est mise en place pour diminuer le prix de fabrication et augmenter le rendement du système photovoltaïque.

### 3. Le rayonnement solaire

#### 3.1. Le soleil

##### 3.1.1. Caractéristiques générales

Le Soleil est une « petite » étoile, une boule de gaz, dont le diamètre est de 1 391 000 km, et qui est placée à 150 000 000 km de nous (périhélie : 147,1 millions de km et aphélie : 152,1 millions de km) [4].

Notre Soleil est une énorme boule de gaz composée de 70% d'hydrogène et de 28% d'hélium, les 2% restants représentent la plupart des autres atomes présents dans l'univers [4]. Le soleil ne possède pas de surface proprement dite, mais la température de radiation, si on l'assimile à un corps noir, est de 5 700 K [9].

Pour la structure du soleil, on distingue quatre zones particulières: le noyau, la photosphère, la chromosphère et la couronne [10].

- C'est dans le noyau que se produisent les réactions nucléaires libérant une énergie considérable. L'énergie produite se propage par diffusion radiative puis par convection d'où elle s'échappe sous forme de rayonnement électromagnétique vers l'espace.
- La photosphère est une couche d'environ 300km d'épaisseur. Elle donne l'image visible du soleil. Sa surface apparaît granuleuse.
- La chromosphère est l'atmosphère du soleil. Elle a une épaisseur d'environ 8000 km et une température de 20000 K environ [10].
- La couronne est le prolongement de la photosphère sans limite, elle est formée de gaz peu dense et ionisé. Elle est invisible depuis la terre car son éclat se confond avec celui du ciel bleu. Elle ne peut être observée que pendant une éclipse solaire, sa température est très élevée puisque elle dépasse le million de degrés [10].

##### 3.1.2. Son énergie (Energie « humainement » inépuisable)

C'est une gigantesque bombe thermonucléaire dont la puissance, émise sous forme de photons, représente un chiffre considérable :  $3,8210^{26}$  Watts [10]. C'est le résultat de la combustion de 596 millions de tonnes par seconde d'hydrogène convertis en 592 millions de tonnes par seconde d'hélium. La perte, 4 millions de tonnes/seconde, se traduit sous forme de rayonnement gamma. Chaque  $\text{cm}^2$  de sa surface émet une énergie de 6 kilowatts. Mais il

n'arrive sur Terre que 5 milliardièmes ( $5 \cdot 10^{-9}$ ) de cette puissance. Cette pile thermonucléaire fonctionne grâce à la transformation de 4 noyaux d'atomes d'hydrogène qui fusionnent pour fournir 1 noyau d'atome d'hélium avec la libération d'une énergie de 25 000 mégawatts par gramme et par seconde (100 milliards de bombes à hydrogène de 1 mégatonne) [10].

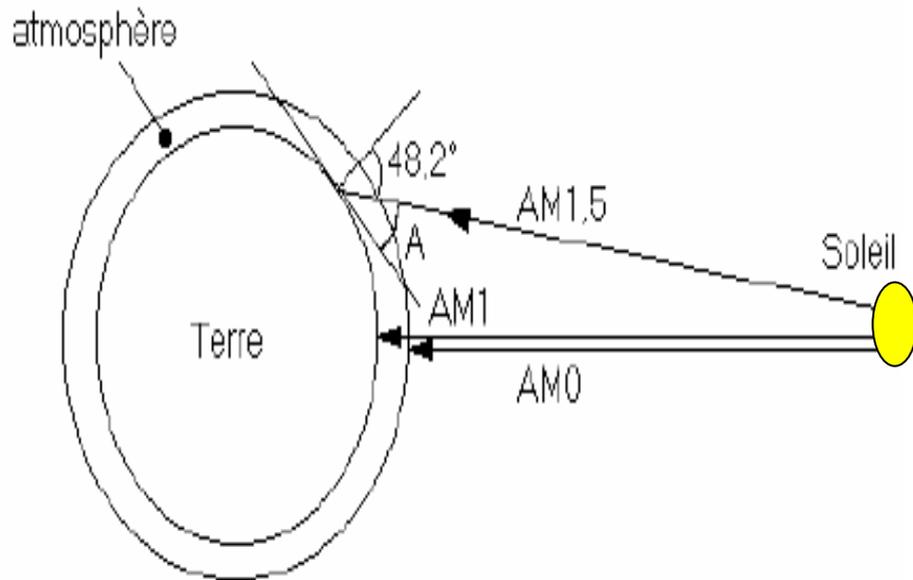
### 3.2. L'atmosphère terrestre

C'est un véritable filtre, car elle permet de modifier profondément le spectre du rayonnement solaire reçu au niveau du sol. Ce filtre est très utile pour la vie terrestre du fait qu'il réduit considérablement le rayonnement ultraviolet et le flux de particules cosmiques qui sont nocifs pour le développement des cellules vivantes [10].

### 3.3. Constantes d'illumination

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

Pour tenir compte de la position relative du soleil qui modifie l'épaisseur d'atmosphère traversée, on introduit un coefficient  $M_A$  appelé masse atmosphérique "masse air" de l'anglais "air mass (AM)", ou nombre d'air masse: C'est la distance parcourue par le rayon lumineux depuis son entrée dans l'atmosphère jusqu'au sol (Fig.1). Partant de cette définition, le spectre solaire est subdivisé en plusieurs « masse air ». La désignation AM0 correspond à une masse d'air nulle pour la lumière arrivant au-dessus de notre atmosphère à incidence normale. Le titre AM1 représente le spectre solaire à la surface de la terre quand le soleil est au zénith. L'appellation AM1.5 désigne la masse d'air rencontrée pour la lumière arrivant à  $48.2^\circ$  sur la surface de la terre, soit une lumière plus faible du fait que l'épaisseur de la couche atmosphérique traversée est plus grande.

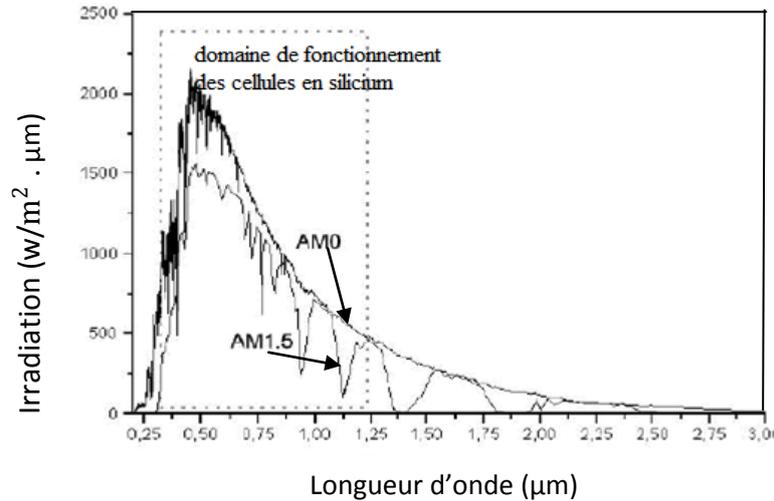


**Figure 1 : Représentation schématique des différentes constantes d'illumination [4]**

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

$$M_A \approx \frac{1}{\sin^2(A)} \quad (1)$$

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



**Figure 2 : Représentation graphique des spectres solaire AM.0 et AM1.5 en fonction de la longueur d'onde [11]. Le domaine spectral utile aux cellules en silicium est situé dans l'intervalle [0,25 1,25] μm.**

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

## 4. La conversion photovoltaïque

### 4.1. L'interaction photon semi-conducteur

L'interaction entre les photons et les semi-conducteurs dépend des caractéristiques du matériau dans le domaine photovoltaïque. Sachant que l'écart entre la bande de valence et de conduction dans le semi-conducteur s'appelle le gap qu'on note  $E_g$ . Par ailleurs, notons que le coefficient d'absorption traduit le nombre de photons absorbés par unité d'épaisseur du matériau en fonction de longueur d'onde [1]. Le photon possède une longueur d'onde  $\lambda$ , celle-ci se traduit par une énergie  $E_\lambda$  telle que :

$$E_\lambda = \frac{hc}{\lambda} \quad (2)$$

Avec :

$h$  : La constante de Planck.

$\lambda$  : La longueur d'onde.

$c$  : La vitesse de la lumière.

Si cette énergie  $E_\lambda$  est inférieure à l'énergie  $E_g$  de la bande interdite du matériau semi-conducteur, le photon ne sera pas absorbé par ce matériau. Ainsi, seulement les photons dont l'énergie est égale ou supérieure à  $E_g$  seront absorbés par ce dernier. Lorsqu'un photon est absorbé par le semi-conducteur, il passe une partie de son énergie par collision à un électron l'arrachant littéralement de la matière. Ce dernier étant précédemment à un niveau d'énergie inférieur où il était dans un état stable. Il passe alors vers un niveau d'énergie supérieur, créant un déséquilibre électrique au sein de la matière se traduisant par une paire électron-trou, de même énergie électrique. Généralement, la paire électron-trou revient rapidement à l'équilibre en transformant son énergie électrique en énergie thermique. Mais pour qu'un électron libéré par l'absorption d'un photon participe à un courant utile, faut-il encore le collecter et le canaliser [1].

## **4.2. La cellule photovoltaïque**

### **4.2.1. Structure et principe de fonctionnement**

#### **a. La structure**

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. L'illumination de la structure génère un courant ainsi qu'une tension, fournissant ainsi une puissance électrique au circuit extérieur. Le matériau utilisé doit donc à la fois permettre le transfert d'énergie du photon absorbé à un électron et la collecte de ce dernier de plus haute énergie par un circuit extérieur. De nombreux matériaux et procédés peuvent potentiellement satisfaire ces conditions pour donner une conversion photovoltaïque. En pratique, les matériaux semi-conducteurs, et plus particulièrement le silicium, sont les plus utilisés, le plus souvent sous la forme d'une homo-jonction p-n. La structure d'une cellule solaire est similaire à celle d'une jonction P-N, le courant sous obscurité dans une telle structure est donné par la formule (3), [9] :

$$I_{obs} = I_s \left\{ \exp \left( \frac{q v_d}{n k T} \right) - 1 \right\} \quad (3)$$

Où :

$n$  : le coefficient d'idéalité de la jonction P-N ( $n = 1.4$ ).

$v_d$  : Tension aux bornes de la jonction (Volt).

$q$  : Charge élémentaire ( $q = 1.6 \times 10^{-19}$  C).

$k$  : Constante de Boltzmann ( $k = 1.38 \times 10^{-23}$  J. K<sup>-1</sup>).

$T$  : Température (K°).

$I_s$  : Appelé courant inverse de la jonction P-N, possède deux composantes :

- le courant de diffusion des porteurs minoritaires, constitué par les électrons de la région P et les trous de la région N qui parviennent à atteindre la zone de charge d'espace par diffusion.
- le courant de génération thermique dû aux paires électrons-trous créées thermiquement dans la zone de charge d'espace.

Le schéma de base d'une cellule solaire est illustré par la figure 3. La cellule solaire se compose de plusieurs couches à savoir:

1-Un contact ohmique avant en forme de grille Le ZnO:Al est utilisé actuellement comme contact avant dans les cellules solaires [1].

2-une couche de passivation avant: la surface des semi-conducteurs contient une densité importante des défauts entraînant des pertes non négligeables liées à la recombinaison en surface. La passivation consiste à améliorer les qualités électroniques de la surface et du volume du matériau en neutralisant les effets de ces défauts électriquement actifs. Diverses couches de passivation sont utilisées en photovoltaïque mais les principales sont l'oxyde thermique du silicium et le nitrure de silicium hydrogéné [1].

3-la couche antireflet (C.A.R): pour minimiser la réflexion de la lumière. Le principe d'action des couches A.R est basé sur l'interférence des faisceaux lumineux dans les couches diélectriques minces. Cette couche est texturée pour augmenter la part de photons absorbés

par la cellule, généralement de forme pyramidale. La longueur d'onde de la lumière incidente étant inférieure aux dimensions des structures ainsi réalisés, les rayons incidents suivent les lois de l'optique [1].

4- une couche de type N avec des charges négatives (l'émetteur).

5- une couche de type P avec des charges positives (la base).

6- la zone de charge d'espace (ZCE) est créée entre ces deux couches, c'est-à-dire la base et l'émetteur.

7- un contact arrière métallique qui couvre la surface arrière pour la collecte des porteurs et la protection contre les influences extérieures.

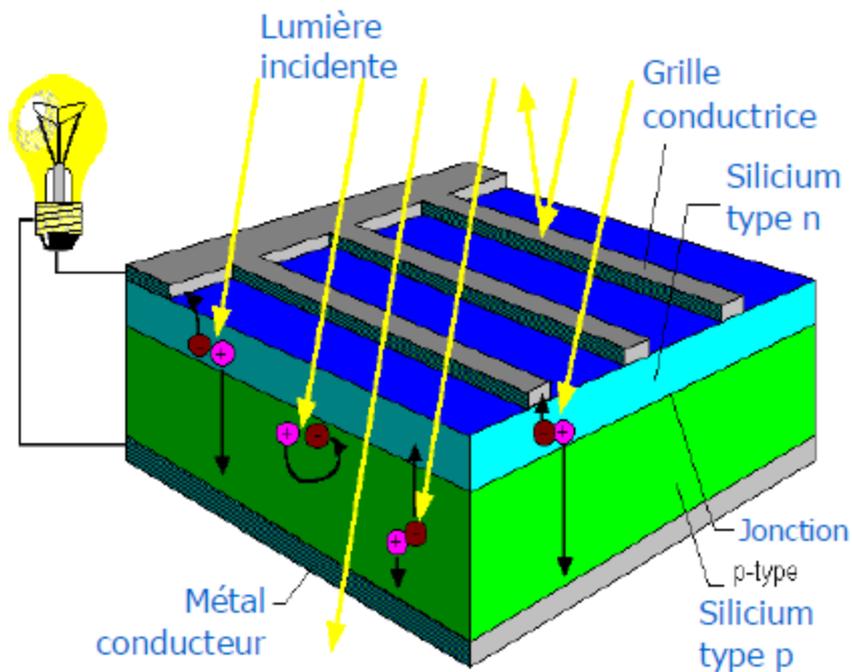


Figure 3 : Représentation du schéma de base d'une cellule solaire [6]

## b. Principe de fonctionnement

Sous l'éclairement les photons incidents créent des porteurs dans chacune des régions P, N et la ZCE de la diode (fig.4). Le comportement de ces porteurs diffère suivant le lieu de leur création. Dans les zones électriquement neutres P ou N, les photos porteurs minoritaires diffusent, ceux qui atteignent la région de charge d'espace sont propulsés par le champ électrique vers la région où ils deviennent majoritaires. Ces porteurs contribuent donc au courant par leur diffusion: C'est le photo-courant de diffusion. Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons-trous créées par les photons, sont dissociées par le champ électrique, l'électron est propulsé vers la région de type n et le trou vers la région de type p. Ces porteurs donnent naissance à un photo-courant de génération. Ces deux contributions s'ajoutent pour créer un photo courant résultant  $I_{ph}$  [5]. Ce processus engendre une tension photovoltaïque car le domaine N du semi-conducteur devient chargé de façon négative et le domaine P de façon positive. La présence de contact ohmique assure la collecte des porteurs d'où la création d'un courant photo-généré  $I_{ph}$ , somme des deux contributions précédentes, Le photo courant  $I_{ph}$  contribue au courant de la diode  $I_d$ , appelé courant d'obscurité  $I_{obs}$ , qui résulte de la polarisation du composant. Le courant résultant est:

$$I = I_{ph} - I_d \quad (4)$$

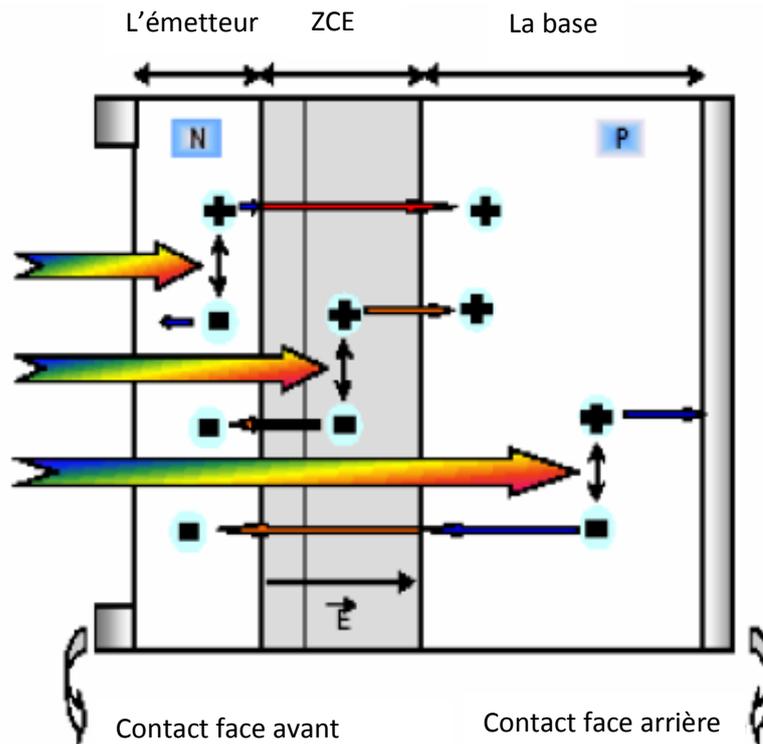


Figure 4 : Structure et principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque [5]

#### 4.2.2. Facteurs limitant le rendement de la cellule solaire

En pratique, la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique n'est pas totale car différentes pertes viennent influencer le rendement de la cellule solaire. Elles sont dans la plus part des cas dûes à la nature du matériau et à la technologie utilisée. Ces pertes sont résumées comme suit :

- les photons ayant des énergies inférieures au gap du matériau ne peuvent pas générer de paire électron-trou et sont donc perdus [1].
- les photons d'énergie supérieure au gap ne pouvant générer qu'une seule paire électron/trou. Sous un éclairement de AM1.5, cette perte est évaluée à 33% dans le cas du silicium [1].
- le facteur de forme FF, même dans le cas d'une cellule idéale, ne peut dépasser 0.89 puisque les équations courant-tension sont régies par l'équation de Boltzmann sous forme exponentielle ( $e^{\frac{qv}{kT}}$ ). Il ne pourra donc exister de courbe I(v) rectangulaire (voir la courbe I(V), Fig.5). Notons que ce paramètre dépend de la conception de la cellule, de la qualité de la jonction, du matériau utilisé et de la résistivité des contacts métalliques, ... [1].

- le rendement d'une cellule solaire dépend aussi du nombre de photons pénétrant qui est limité par le coefficient de réflexion à la surface de la cellule. Afin de diminuer ces phénomènes de réflexion, la surface de la cellule est généralement texturée et recouverte d'une couche antireflet [1].

- en contre partie, le taux d'ombrage tient compte de la couverture partielle de la surface de la cellule qui sont opaques, nécessaires pour la collecte des charges photo-générées entraînent une réduction de la surface de la face éclairée (une zone d'ombrage), donc une partie du flux lumineux arrivant sur cette zone ne sera pas absorbée et considéré donc comme perdue pour la conversion photovoltaïque [1].

- le rendement de collecte correspond au rapport entre le nombre de porteurs de charge effectivement collectés et le nombre total photo-générés. Ce terme tient compte des recombinaisons de porteurs survenant dans le volume et en surface de la cellule, et il dépend directement de la durée de vie des porteurs minoritaires (c'est-à-dire le temps moyen entre la génération et la recombinaison d'un porteur minoritaire) [1].

#### 4.2.3. Caractéristiques électriques de la cellule solaire

Les différents paramètres caractéristiques de la cellule sont les suivants :

➤ **Le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )**

Il définit la quantité  $G$  des paires électron-trou créés et qui traverse la jonction sans recombinaison, ou bien c'est le courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule [9].

Il est donné par la relation suivante :

$$I_{ph} = qG(L_n + L_p) \quad (5)$$

Où :  $L_n$  et  $L_p$  sont les longueurs de diffusion des électrons et des trous respectivement.

Pour une diode idéale  $I_{cc} = I_{ph}$

➤ **La tension en circuit ouvert ( $V_{CO}$ )**

C'est la tension pour laquelle la cellule ne fournit aucun courant [9]. Elle est obtenue à partir de l'équation :

$$V_{CO} = \frac{KT}{q} \ln \left( \frac{I_{CC}}{I_s} + 1 \right) \quad (6)$$

➤ **Le facteur de forme (FF)**

Il définit l'efficacité de la cellule solaire, c'est le rapport entre la puissance maximale débitée ( $P_M = V_M \times I_M$ ) et la puissance idéale ( $V_{CO} \times I_{CC}$ ) [9]. Il est obtenu par la formule (7), (voire Fig.5):

$$FF = \frac{V_M I_M}{V_{CO} I_{CC}} \quad (7)$$

Avec :

$V_M$  : Tension correspondant à la puissance maximale fournie par la cellule.

$I_M$  : Courant correspondant à la puissance maximale fournie par la cellule.

et

$$P_M = V_M I_M \quad (8)$$

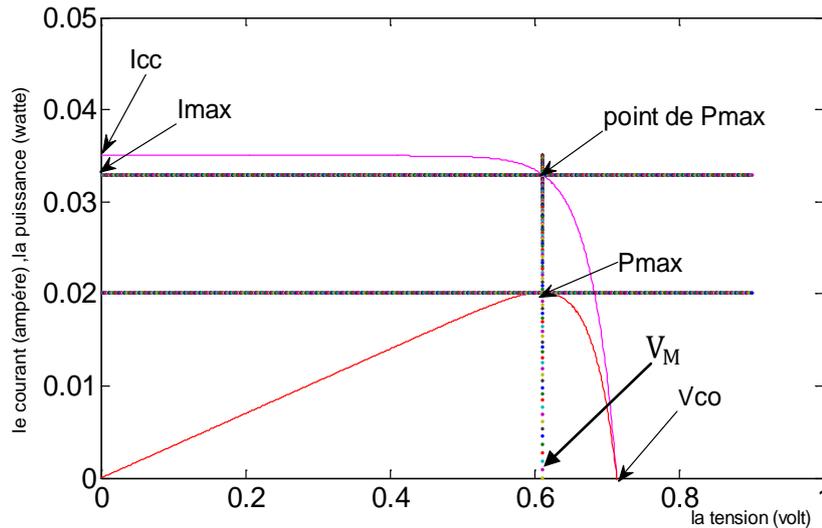
$P_M$ : La puissance maximale.

➤ **Le rendement de conversion d'énergie ( $\eta$ )**

C'est le rapport entre la puissance maximale générée et la puissance du rayonnement solaire incident ( $P_0$ ) [9].

$$\eta = FF \frac{V_{CO} I_{CC}}{P_0} = \frac{V_M I_M}{P_0} \quad (9)$$

Pour illustration, les paramètres ( $V_{CO}$ ,  $I_{CC}$ ,  $I_M$ ,  $V_M$ ,  $P_M$ ) sont reportés sur la figure 5.



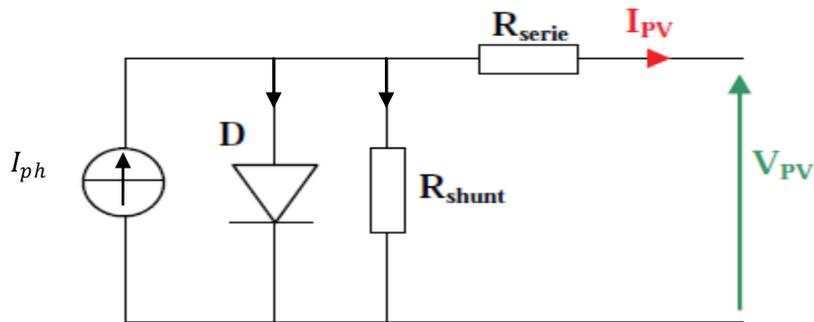
**Figure 5 : Points et valeurs remarquables des caractéristiques  $I=f(v)$  et  $P=f(v)$  d'une cellule solaire conventionnelle. Ces courbes sont obtenues dans le cadre de ce travail en utilisant l'outil de programmation MATLAB.**

#### 4.2.4. Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque

En pratique, la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique n'est pas totale car différentes pertes viennent influencer le rendement de la cellule (voir §4.3). Pour développer un circuit équivalent à une cellule photovoltaïque, tout en tenant compte des différentes limitations de ce dispositif photovoltaïque, on utilise un Modèle à exponentielle simple. Ce dernier, est le plus courant et est utilisé par de nombreux auteurs pour obtenir des valeurs de certains paramètres de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire. Cette caractéristique est définie par l'équation suivante [26] :

$$I(v) = I_{ph} - \frac{(v + R_s * I)}{R_{sh}} - I_s * \left\{ \exp\left(\frac{q(v + R_s * I)}{nkt}\right) - 1 \right\} \quad (10)$$

Le circuit électrique équivalent est schématisé sur la figure 6.



**Figure 6 : Le circuit électrique équivalent de la cellule solaire conventionnelle à exponentielle simple [26]**

Les différents paramètres de ce modèle sont [5,2] :

- Le générateur de courant : il délivre le courant  $I_{ph}$  correspondant au courant photo-généré.
- La résistance série: elle prend en compte la résistivité propre aux contacts entre les différentes régions constitutives de la cellule, à savoir l'émetteur, la base et les contacts métalliques.
- La résistance parallèle: également connue sous le nom de résistance shunt, elle traduit l'existence de shunts à travers l'émetteur, causé par un défaut. Ceci est le cas lorsque la diffusion des contacts métalliques à haute température perce l'émetteur par des particules d'impuretés. Elle peut aussi être due à un court-circuit sur les bords de la cellule. Cette valeur devra être la plus élevée possible [9].
- $I_s$ : le courant de saturation de la diode.

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

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

$$I_{ph} = J_n + J_p + J_{dr} \quad (11)$$

Où :

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

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

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

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

La réponse spectrale, appelée aussi rendement de collection, est définie comme étant le rapport entre la densité de courant collectée et la densité de puissance pour chaque longueur d'onde du rayonnement lumineux.

Elle est donnée par la relation suivante [16] :

$$R_s = \frac{q}{h\nu \times EQE(\lambda)} \quad (12)$$

$EQE$  : représente le rendement quantique externe (rendement de collection externe) de la cellule, c'est-à-dire le rapport du nombre de porteurs générés sur le nombre de photons incidents. Pour une longueur d'onde donnée, le rendement quantique externe est égal à 1 si chaque photon génère un électron.

Si l'on prend en compte la réflectivité de la surface de la cellule photovoltaïque, on détermine son rendement quantique interne (The internal quantum efficiency)  $IQE(\lambda)$  de la cellule solaire par.

$$IQE(\lambda) = EQE(\lambda) \times (1 - R(\lambda)) \quad (13)$$

Avec.

$$IQE(\lambda) = \frac{J(\lambda)}{\phi(\lambda) \times q(1 - R(\lambda))} \quad (14)$$

$J(\lambda)$  : est la densité de courant collectée à la longueur d'onde  $\lambda$ .

$\phi(\lambda) \times (1 - R(\lambda))$  : est la partie transmise du flux de photons incidents, dans le matériau.

#### 4.2.6. Modélisation mathématique de la cellule photovoltaïque

Pour résoudre numériquement l'équation de la caractéristique I(V) de la cellule solaire éclairée, on utilise la méthode itérative de Newton qui est décrite dans l'annexe. Dans le code de ce mémoire de Magister, nous avons utilisé le langage de programmation MATLAB pour exécuter la fonction itérative obtenue.

### 5. Cas de la cellule solaire BSF

La surface arrière (métallisation totale) de la cellule solaire conventionnelle est caractérisée par une vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires très élevée [7]. Cette vitesse peut être réduite par l'ajout d'une couche fortement dopée entre la base et le contact métallique. On obtient alors une jonction p+/p ou n+/n, qui donne naissance à un champ électrique arrière (de l'anglais Back Surface Field, BSF) et d'une barrière de potentiel entre la base et la couche fortement dopée. Cette structure entraîne une amélioration sur le photo-courant, la tension de circuit ouvert ainsi que sur le rendement de conversion photovoltaïque [7]. Le diagramme énergétique de la cellule solaire BSF ainsi que sa structure sont illustrés par les figures (7) et (8) respectivement. La barrière de potentiel pour la jonction n+/p est entre 0.7 et 0.8 eV, quand à la jonction p/p+, elle est entre 0.14 et 0.19 eV [14].

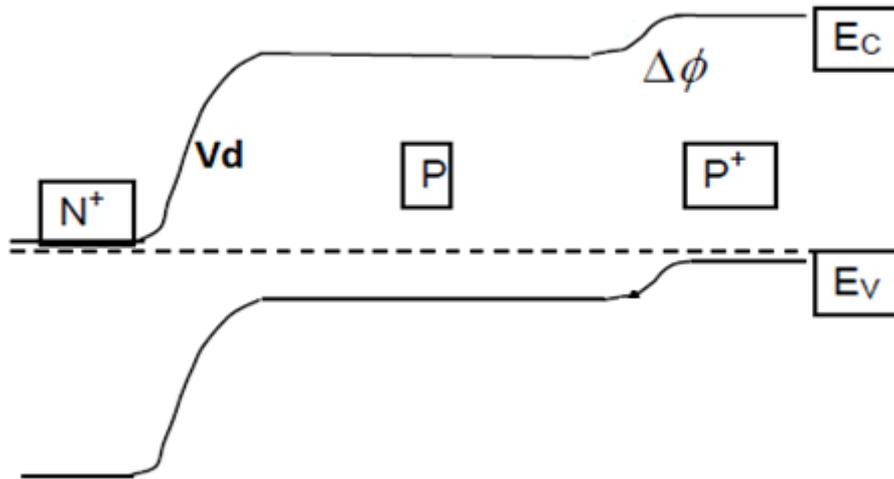


Figure 7: Représentation du diagramme énergétique de la cellule solaire BSF [14].

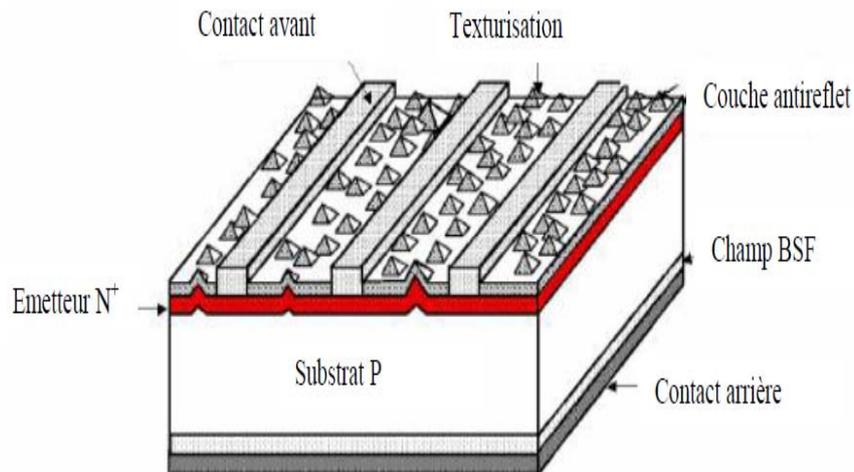


Figure 8: Représentation schématique de la structure d'une cellule solaire BSF [18]

### **5.1. Procédés technologiques de réalisation de la cellule solaire BSF**

Les principales étapes technologiques du procédé de réalisation de la photopile sont les suivantes [15] :

- a. Traitement de la surface des plaquettes et texturation.
- b. Formation de la jonction n+/p ou de la structure n+/pp+.
- c. Isolation de la jonction parasite (pp+).
- d. Passivation de la surface et des joints de grains.
- e. Métallisation : dépôt de la grille collectrice de la face avant et du contact de base de la face arrière.
- f. Dépôt de la couche antireflet (C.A.R).

#### **a. Traitement de la surface des plaquettes et texturation**

En général, les plaquettes de silicium utilisées pour la fabrication des photopiles sont de type P (dopées au bore). Le traitement de la surface est fait pour l'amincissement de la plaquette et la croissance de micro-pyramides sur la surface (pour diminuer la réflectivité), c'est la texturation [15].

#### **b. Formation de la jonction n+/p et de la structure n+/pp+**

C'est l'étape la plus importante dans la technologie de fabrication des photopiles au silicium cristallin. Les procédés technologiques utilisés pour la formation de la jonction sont: la sérigraphie, la pulvérisation chimique (spray) et la technique de rotation (spin-on) [15].

#### **c. Isolation de la jonction parasite**

Cette étape a une incidence directe sur les performances électriques du dispositif. Pour éviter la formation d'une jonction parasite, il faut protéger la face arrière de la plaquette par une épaisse couche d'oxyde [15].

#### **d. Passivation de la surface**

Cette opération est utilisée couramment pour améliorer la qualité électronique du matériau, en diminuant la vitesse de recombinaison des porteurs de charges à la surface causée par les liaisons pendantes [1].

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

Dans la technologie de réalisation des cellules solaires, la métallisation est l'étape principale après celle de la formation de la jonction. Elle permet d'établir la liaison entre la structure et le circuit extérieur lors de l'assemblage des photopiles dans un cadre rigide (ou encapsulation) [15].

#### **e.1. Dépôt de la grille collectrice**

Les configurations des grilles collectrices sont définies à partir de plusieurs paramètres tel que la surface active ( $< 10\%$ ) et une faible résistance de contact pour limiter les pertes par effet joule, tout en diminuant la consommation de matière. Son dépôt, peut être effectué, par l'alliage Ti/Pd/Ag. La sérigraphie est souvent utilisée pour cette étape [15].

#### **e.2. Dépôt du contact arrière**

Le procédé retenu, pour son dépôt, est celui de grille collectrice. Il présente moins de difficultés que celles rencontrées pour le dépôt de la grille collectrice. Il consiste à couvrir toute la surface jusqu'à 2 mm du bord de la plaquette [15].

### **f. Dépôt de la couche antireflet**

La forte réflectivité à la surface des cellules solaires est due à la grande discontinuité dans l'indice de réfraction qui existe au niveau de l'interface air-cellule. Le rayonnement solaire incident perd une quantité relativement importante de son énergie par réflexion en surface. Afin de diminuer la réflectivité, l'utilisation d'une couche antireflet (CAR) s'est imposée.

Dans une cellule solaire, le but est de capter la plus grande partie des photons utiles du spectre solaire, en minimisant la réflexion à la surface de la plaquette par un traitement chimique appelé texturation. Dans le cas du silicium, on peut déposer une couche d'oxyde avec un indice de réflexion  $n_c$  adapté à celui du silicium pour la longueur d'onde à laquelle on désire obtenir une réflexion minimale ( $\lambda_0$ ) [15]. Les oxydes déposés sur le silicium cristallin possèdent des indices de réfraction compris entre 1,5 et 2,3. Pour illustration, Les oxydes Les plus adaptés sont: SiO ( $n = 1,9$ ), SiO<sub>2</sub> ( $n = 1,9$ ), Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ( $n = 2,1$ ), TiO<sub>2</sub> ( $n = 2,3$ ) [15].

## 5.2. Théorie du champ de surface arrière BSF

La cellule solaire BSF est constituée essentiellement de quatre régions : l'émetteur, la zone de charge d'espace (Z C E), la base et la région surdopée au voisinage du contact ohmique arrière (qui doit être de même type de dopage que la base). Cette structure contient une autre jonction entre la base et la région sur-dopée par rapport à la cellule solaire conventionnelle. Si les deux régions (p et p+) ont la même nature de semi-conducteur, on forme une homo-jonction et on dit que le BSF est homo-jonction (ou homo-structure). Par contre si la nature des deux semi-conducteurs est différente, le BSF est dit hétérojonction (ou hétérostructures).

La structure BSF entraîne deux conséquences importantes à savoir la création d'une petite barrière supplémentaire d'énergie et le confinement des porteurs minoritaires dans la base [7]. Ainsi, on récupère les porteurs de charge créés à l'arrière de la base au voisinage du contact ohmique qui sont normalement perdus dans les simples cellules. La perte des porteurs minoritaires à la surface arrière est quantifiée par le courant de recombinaison à la surface du contact ohmique arrière [7].

## 5.3. Détermination de la vitesse de recombinaison effective $S_{eff}$

La région fortement dopée de la surface arrière p+ (BSF) est souvent modélisée par une vitesse de recombinaison effective ( $S_{eff}$ ) qui est définie à la limite de la région quasi neutre de la base et du BSF. Dans cette approche, on suppose que la région fortement dopée est remplacée par une quasi surface de vitesse de recombinaison  $S_{eff}$  d'épaisseur  $W_{bsf}$  [12].

### 5.3.1. $S_{eff}$ pour les homo-structures

Dans le cas des homo-structures, la vitesse de recombinaison  $S_{eff}$  est donnée par la relation ci-dessous, [14]:

$$S_{eff} = \frac{D_{bsf}}{L_{bsf}} \exp\left(\frac{-q\Delta\phi}{kT}\right) \frac{\frac{S_n L_{bsf}}{D_{bsf}} + th\left(\frac{W_{bsf}}{L_{bsf}}\right)}{1 + \frac{S_n L_{bsf}}{D_{bsf}} th\left(\frac{W_{bsf}}{L_{bsf}}\right)} \quad (15)$$

Où :

$S_n$  : la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires au contact arrière.

$L_{bsf}$  et  $D_{bsf}$  : sont respectivement la longueur de diffusion et le coefficient de diffusion, des porteurs minoritaires dans la région du BSF.

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

$\Delta\phi$  : la barrière de potentielle entre la base et la région fortement dopée.

$N_{bsf}$  : la concentration des porteurs dans la région de BSF.

La barrière de potentielle entre la base et la région fortement dopée  $\Delta\phi$  est donnée par la relation suivante [14] :

$$\Delta\phi = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_p}{N_p^+}\right) \quad (16)$$

Si on remplace l'équation (16) dans l'équation (15) on obtient la relation suivante :

$$S_{eff} = \frac{N_p^+ D_{bsf}}{N_p L_{bsf}} \frac{\frac{S_n L_{bsf}}{D_{bsf}} + \tanh\left(\frac{W_{bsf}}{L_{bsf}}\right)}{1 + \frac{S_n L_{bsf}}{D_{bsf}} \tanh\left(\frac{W_{bsf}}{L_{bsf}}\right)} \quad (17)$$

Dans le cas d'un régime à faible niveau d'injection, le rapport  $\frac{N_a}{N_{bsf}}$  est égal à  $\frac{N_p^+}{N_p}$ , c'est à dire :

$$\frac{N_a}{N_{bsf}} = \frac{N_p^+}{N_p} \quad (18)$$

Ainsi, l'expression de  $S_{eff}$  sera donnée par la relation (19):

$$S_{eff} = \left( \frac{N_a}{N_{bsf}} \right) \left( \frac{D_{bsf}}{L_{bsf}} \right) \left\{ \frac{\frac{S_n L_{bsf}}{D_{bsf}} + th \left( \frac{W_{bsf}}{L_{bsf}} \right)}{1 + \frac{S_n L_{bsf}}{D_{bsf}} th \left( \frac{W_{bsf}}{L_{bsf}} \right)} \right\} \quad (19)$$

Où :

$N_a$ : la concentration des trous dans la base.

$N_p^+$ : la concentration des trous dans la région de BSF.

$N_p$ : la concentration des porteurs majoritaires dans la base.

Dans le cas d'une vitesse recombinaison  $S_n$  infinie, la vitesse de recombinaison effective est exprimée par :

$$S_{eff} = \left( \frac{N_a}{N_{bsf}} \right) \left( \frac{D_{bsf}}{L_{bsf}} \right) \left\{ coth \left( \frac{W_{bsf}}{L_{bsf}} \right) \right\} \quad (20)$$

D'après la relation (19), il est clair que la vitesse de recombinaison effective  $S_{eff}$  dépend fortement des propriétés de la région p+. Le premier terme de l'équation est dû essentiellement à l'action du fort dopage de la région p+. Il contrôle la valeur de la recombinaison en surface. Le fort dopage de la région arrière de la base réduit la barrière de potentiel p/p+ à cause du phénomène de l'étranglement de la bande interdite (Band Gap Narrowing) BGN. Par conséquent, le dopage ne peut être augmenté considérablement afin d'éviter la dégradation de  $V_{co}$ .

### 5.3.2. $S_{eff}$ Pour les hétérostructures

L'idée des hétérostructures est introduite dans le but est de diminuer la valeur de  $S_{eff}$ . Ceci est obtenu grâce à la différence des bandes interdites des deux semi-conducteurs (par exemple APxGa1-xAs/GaAs) [7].

Le courant de recombinaison à l'interface  $I_n$  est sous la forme suivante [7] :

$$I_n = qN_{bsf} \left( \frac{D_{bsf}}{L_{bsf}} \right) \left\{ \coth \left( \frac{W_{bsf}}{L_{bsf}} \right) \right\} \quad (21)$$

La vitesse de recombinaison  $S_{eff}$  pour les cellules solaires BSF hétérostructures peut s'écrire par l'équation [7]:

$$S_{eff} = \left( \frac{N_a}{N_{bsf}} \right) \left( \frac{D_{bsf}}{L_{bsf}} \right) \left( \frac{n_i^+}{n_i^-} \right)^2 \left\{ \coth \left( \frac{W_{bsf}}{L_{bsf}} \right) \right\} \quad (22)$$

Avec :

$n_i^-$  : La concentration intrinsèque dans la base.

$n_i^+$  : La concentration intrinsèque dans la zone fortement dopée.

La différence pour l'hétéro-structure et l'homostructure est la présence du facteur  $\left( \frac{n_i^+}{n_i^-} \right)^2$  dans l'expression de  $S_{eff}$ . Ce facteur réduit la valeur de  $S_{eff}$  dans les hétérostructures, à cause de la différence entre les énergies du gap des deux matériaux. La présence de barrière du potentiel ne repousse que les porteurs minoritaires [7].

### 5.4. Le photo-courant généré par la cellule BSF

Le photocourant généré par la cellule BSF est obtenu via la relation (23). La méthode de calcul de cette quantité est expliquée dans le deuxième chapitre.

$$I_{ph} = J_n + J_{p.bsf} + J_{dr} \quad (23)$$

Avec:

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

$J_{p.bsf}$  : Le courant photo-généré dans base pour la cellule BSF.

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

## 6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases essentielles à la compréhension d'un système photovoltaïque.

Nous avons rappelé quelques notions liées au rayonnement solaire et son application dans le domaine photovoltaïque. Nous avons expliqué le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque conventionnelle et ses caractéristiques principales ainsi que les facteurs limitant le rendement de conversion. Nous avons également expliqué le modèle mathématique mis en oeuvre pour résoudre numériquement l'équation  $I(v)$ . Par la suite nous avons présenté la cellule BSF, sa structure et l'intérêt de la création du champ arrière (BSF : Back Surface Field).

Dans le prochain chapitre, nous présenterons l'étude théorique de la cellule bifaciale BSF pour optimiser le dispositif de captage photovoltaïque.

# Chapitre II

MODELISATION DE LA  
CELLULE SOLAIRE  
BIFACIALE

### 1. INTRODUCTION

Quelque soit la structure de la cellule solaire, l'optimisation des Performances est nécessaire pour aboutir à un bon rendement avec une réduction du coût de réalisation. Habituellement, les paramètres à optimiser sont : l'épaisseur de la cellule, le niveau et les profils de dopage, la configuration des contacts, le confinement optique et la collection de la lumière [1]. Les valeurs des paramètres optimaux dépendent de la structure de la cellule solaire, de la qualité des matériaux utilisés (les différentes couches et les contacts métalliques) et de la vitesse de recombinaison en surface (face avant et arrière) [1].

Dans ce chapitre nous allons faire un tour d'horizon sur les concepts théoriques (la modélisation électrique et mathématique) d'un nouveau type de cellules solaires (plus performant que la cellule conventionnelle) à savoir la cellule solaire bifaciale munie d'un champ de surface arrière BSF qui collecte l'illumination solaire par ses deux faces avant et arrière.

### 2. Historique

En 1977, deux groupes de recherche en Mexique et en Espagne ont présenté pour la première fois des travaux, à la première conférence européenne de l'énergie solaire photovoltaïque, sur les piles solaire bifaciales. A cette époque, ces dispositifs expérimentaux présentaient une efficacité de 7% [20].

Les cellules solaires bifaciales sont classées en trois types selon le nombre de jonctions qui forment ses structures [20]:

- cellule solaire bifaciale à double jonction p/n.
- cellule solaire bifaciale à une seule jonction p/n et une passivation diélectrique.
- cellules solaires bifaciale BSF (back surface Field) à une hétérojonction p/n et une homojonction p /p+ ou n/n+.

La première cellule BSF était en réalité une cellule bifaciale qui a été brevetée en Russie en 1970 puis en Allemagne et aux USA en 1975. A cette époque, on a publié les premiers résultats expérimentaux avec l'explication théorique du rôle du BSF.

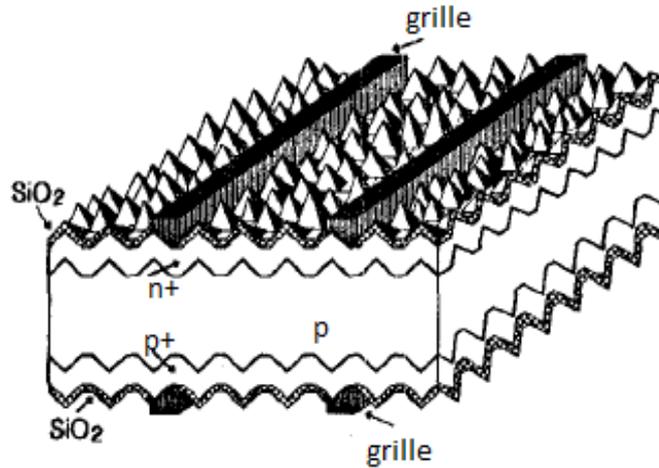
Dans les années 1980-1984 les cellules BSF étaient utilisées pour des applications spatiales par « SOLAREX » et « AEG-ELEFUNKEN » respectivement. Les derniers résultats, obtenus à l'université de Madrid pour un dispositif de cellule BSF ont révélé une efficacité de 19.1% en arrière et 18.1% en avant. La cellule proposée était réalisée par incorporation de la texturation pyramidale avec un émetteur optimisé de phosphore. Plus récemment, une technologie avancée a produit des efficacités avant et arrière de 18,6% et 16,2%, respectivement [20].

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

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

La structure de la cellule solaire bifaciale BSF est illustrée par la Figure 9. Elle se compose de plusieurs couches, à savoir [15]:

- un contact ohmique sur les deux faces avant et arrière sous forme de grille.
- une couche texturisée à la face avant et à la face arrière généralement de forme pyramidale dont les dimensions sont supérieures à la longueur d'onde de la lumière incidente. Cette couche texturisée est formée par deux sous couches :
  - a) une couche de passivation pour l'amélioration de la qualité électronique de la surface. Elle est généralement réalisée à base d'oxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ) ou de nitrure de silicium hydrogéné ( $\text{SiN}_x:\text{H}$ ) [15].
  - b) une couche antireflet pour minimiser la réflexion de la lumière à la surface texturisée. Elle est obtenue par dépôt d'une couche d'oxyde avec un indice de réflexion  $n_c$  adapté à celui du silicium. On note que les oxydes déposés sur le silicium cristallin ont un indice de réfraction qui varie entre 1,5 et 2,3 [15].
- l'émetteur de type N formé par la diffusion homogène de phosphore [21].
- une zone de charge d'espace Z.C.E qui se forme entre l'émetteur et la base.
- la base de type P : est formée par la diffusion du bore [21].
- Une couche fortement dopée  $P^+$ , formée par les mêmes procédés que ceux de la jonction  $N^+/p$ , permettant la création d'un champ électrique arrière appelé BSF (Back Surface Field) [15].



**figure 9 : Représentation schématique de la structure d'une cellule solaire bifaciale BSF [32].**

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

Le principe de fonctionnement de la cellule solaire bifaciale BSF est pareille que celui de la cellule solaire conventionnelle. Cependant, la cellule bifaciale collecte la lumière par ses deux faces avant et arrière. Ainsi, le courant photogénéré total est constitué par la somme des deux courants photogénérés, qui sont dûs à l'éclairement de la cellule par la face avant (l'émetteur) et par la face arrière (la base) [22].

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

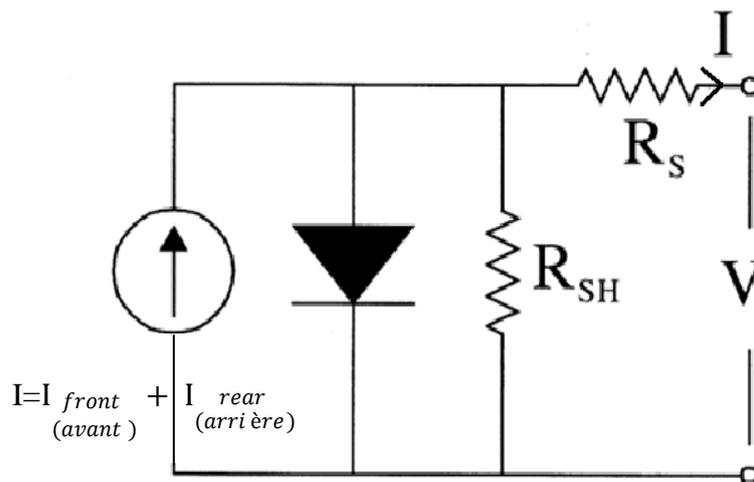


Figure 10 : Le circuit électrique équivalent de la cellule solaire bifaciale [22].

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

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

➤ **Le courant de court-circuit  $I_{cc}$  :**

C'est le courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule solaire bifaciale. Il est égal à la somme du courant photogénéré dû à l'absorption de la lumière par la face avant et du courant photogénéré dû à l'absorption de la lumière par la face arrière [22].

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

$$I_{cc} = I_{ph} = I_{ph1} + I_{ph2} \quad (24)$$

Où:

$I_{ph1} = I_{cc.front}$  : le photocourant produit par la cellule solaire bifaciale éclairée par sa face avant.

$I_{ph2} = I_{cc.rear}$  : le photocourant produit par la cellule solaire bifaciale éclairée par sa face arrière.

$I_{ph}$  : le photocourant total produit par la cellule solaire bifaciale.

➤ **La tension de circuit ouvert :**

C'est la tension pour laquelle la cellule bifaciale ne fournit aucun courant. On peut calculer la tension de circuit ouvert ( $V_{co.bif}$ ) de la cellule solaire bifaciale à partir de son circuit électrique équivalent (Fig10), [22].

$$V_{co.bif} = \left(\frac{KT}{q}\right) \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad (25)$$

Où:

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

➤ **Le facteur de forme FF :**

Il définit l'efficacité de la cellule solaire [26]. C'est le rapport entre la puissance maximale débitée et la puissance idéale [9], il est obtenu comme suit:

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

$$FF = \frac{I_{M.front} \times V_{M.front}}{I_{cc.front} \times V_{co.front}} \quad (26)$$

Avec:

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

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

$$FF = \frac{I_{M.rear} \times V_{M.rear}}{I_{cc.rear} \times V_{co.rear}} \quad (27)$$

Avec:

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

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

C'est le rapport entre la puissance maximale générée et la puissance du rayonnement solaire incident sur la surface l'illuminée [9].

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

$$\eta_{front} = \frac{I_{M.front} * V_{M.front}}{P0_{front}} \quad (28)$$

Avec:

$P0_{front}$  : La puissance du rayonnement solaire incident sur la face avant de la cellule solaire bifaciale.

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

$$\eta_{rear} = \frac{I_{M.rear} \times V_{M.rear}}{P0_{rear}} \quad (29)$$

Avec:

$P0_{rear}$  : 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 10 et de l'équation (24), 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:

$$PM_{front} = I_{M.front} \times V_{M.front} \quad (30)$$

Avec:

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

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

$$PM_{rear} = I_{M.rear} \times V_{M.rear} \quad (31)$$

Avec:

$PM_{rear}$  : La puissance maximale générée par la cellule solaire bifaciale éclairée par sa face arrière.

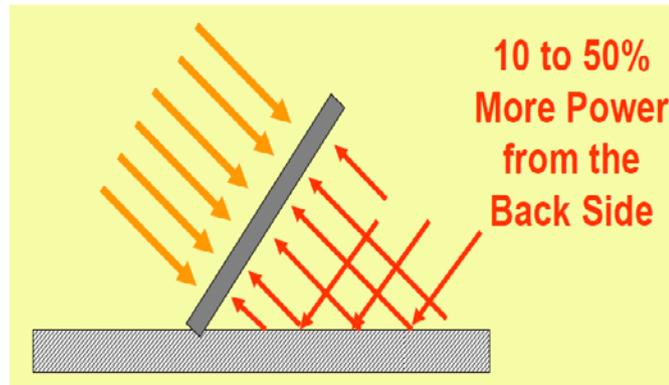
Ainsi, la puissance maximale totale générée par la cellule bifaciale BSF, illuminée par les deux faces avant et arrière ( $PM_{tot}$ ) est calculée par l'équation suivante:

$$PM_{tot} = PM_{front} + PM_{rear} \quad (32)$$

## 5. La réflexion par albédo

On peut augmenter la puissance lumineuse incidente sur la face arrière de la cellule solaire bifaciale jusqu'à 50% [23], lorsqu'on utilise le rayonnement qui est réfléchi sur la surface arrière de la photopile, c'est la réflexion par albédo. Il est dépend de la surface du

milieu qui réfléchit le rayonnement solaire incident. Le principe de cette réflexion est représenté sur la Figure 11.



**Figure 11 : Représentation schématique du principe de la réflexion par albédo [23].**

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

Pour modéliser la cellule solaire bifaciale, on utilise le modèle à une dimension basé sur quatre régions : la zone  $N^+$  (l'émetteur), la zone P (la base), la zone de charge d'espace (ZCE) et la zone fortement dopée ( $P^+$ ) (voir la Figure12) [19].

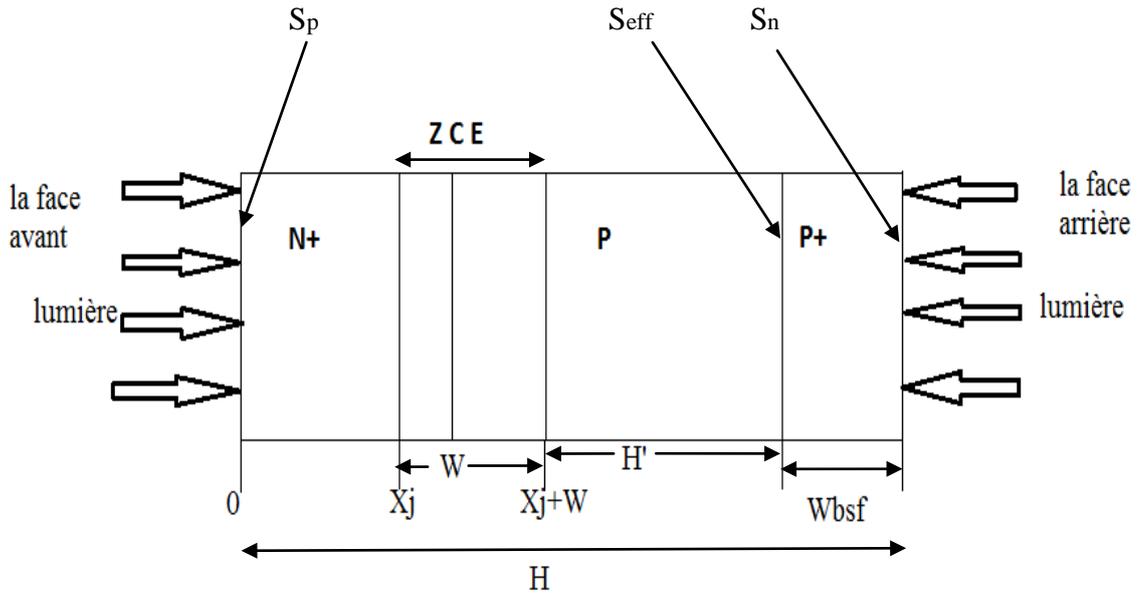


Figure 12 : Représentation schématique d'un modèle à une dimension de la cellule solaire bifaciale BSF [19].

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

Lorsqu'une lumière monochromatique de longueur d'onde incidente normalement par rapport à la surface d'un semi-conducteur, on admet que le dopage est uniforme. Le champ électronique devient nul le long des régions neutre (hors la zone de charge d'espace) et un photocourant 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 photocourants générés dans chaque région de la cellule:

$$J_{ph} = J_n + J_p + J_{dr} + J_{bsf} \quad (33)$$

Avec :

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

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

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

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

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

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

$$G_n - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} + \frac{1}{q} \frac{dJ_n}{dx} = 0 \quad (34)$$

Avec:

$G_n$ : Le taux de génération des paires électron-trou à une distance  $x$  de la surface,  $G_n(x)$  est donné par la relation suivante [9]:

$$G_n(x) = \alpha \phi (1 - R) \exp(-\alpha x) \quad (35)$$

La densité du courant des électrons dans la base est donnée par l'équation suivante [9]:

$$J_n = q\mu_n n_p E + qD_n \frac{dn_p}{dx} \quad (36)$$

Avec :

$\alpha$  : Le coefficient d'absorption de la lumière dans le semiconducteur.

$\phi$  : Le flux des photons sur la surface du semiconducteur.

$R$  : Le coefficient de réflexion sur la surface du semiconducteur.

$\tau_n, J_n$  : durées de vie et densités du courant d'électrons dans la base, respectivement.

$n_p$  : la densité des porteurs minoritaires dans la base.

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

$E$  : le champ électrique interne.

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

La combinaison des équations (34), (35) et (36) permet d'aboutir à l'expression suivante :

$$D_n \frac{d^2 n_p}{dx^2} + \alpha \phi (1 - R) \exp(-\alpha x) - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} = 0 \quad (37)$$

La solution générale est obtenue via la relation (38), [9] :

$$n_p - n_{p0} = A \cosh\left(\frac{x}{L_n}\right) + B \sinh\left(\frac{x}{L_n}\right) - \frac{\alpha \phi (1-R) \tau_n}{\alpha^2 L_n^2 - 1} \exp(-\alpha x) \quad (38)$$

Où

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

A et B : constantes.

Les deux conditions aux limites sont obtenues :

➤ Pour  $x = X_j + w$

$$n_p - n_{p0} \approx 0 \quad (39)$$

➤ pour  $x = H - W_{bsf}$

$$S_{eff} (n_p - n_{p0}) = -D_n \frac{d(n_p - n_{p0})}{dx} \quad (40)$$

Où :

W: est la largeur de la zone de déplétion.

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

H: l'épaisseur totale de la cellule.

$S_{eff}$ : est la vitesse de recombinaison effective (voir paragraphe 5.3 du premier chapitre), elle se calcule via la formule suivante:

$$S_{eff} = \frac{N_a}{N_{bsf}} \frac{D_{bsf}}{L_{bsf}} \frac{\frac{S_n L_{bsf}}{D_{bsf}} + th\left(\frac{W_{bsf}}{L_{bsf}}\right)}{1 + \frac{S_n L_{bsf}}{D_{bsf}} - th\left(\frac{W_{bsf}}{L_{bsf}}\right)} \quad (41)$$

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

$$n_p - n_{p0} = \frac{\alpha\phi(1-R)\tau_n}{\alpha^2 L^2 - 1} e^{-\alpha(x_j+w)} \left[ \cosh\left(\frac{x-x_j-w}{L_n}\right) - e^{-\alpha(x-x_j-w)} \right]$$

$$- \frac{\left(\frac{S_{eff} L_n}{D_n}\right) \left[ \cos\left(\frac{H'}{L_n}\right) - e^{-\alpha H'} \right] + \sinh\left(\frac{H'}{L_n}\right) + \alpha L_n e^{-\alpha H}}{\frac{S_{eff} L_n}{D_n} \sinh\left(\frac{H'}{L_n}\right) + \cosh\left(\frac{H'}{L_n}\right)} \sinh\left(\frac{x-x_j-w}{L_n}\right) \quad (42)$$

À partir de l'équation (42), on peut calculer le photocourant dû aux électrons collectés à la limite de la zone de charge d'espace :

à  $x = x_j + w$

$$J_n = qD_n \left( \frac{dn_p}{dx} \right)_{x_j+w} = \frac{q\phi(1-R)\alpha L_n}{\alpha^2 L_n^2 - 1} e^{-\alpha(x_j+w)} \times \left[ \alpha L_n - \frac{S_{eff} L_n D_n \cosh H' L_n - e^{-\alpha H'} + \sinh H' L_n + \alpha L_n e^{-\alpha H'} S_{eff} L_n D_n \sin h H' L_n + \cosh H' L_n}{\alpha^2 L_n^2 - 1} \right] \quad (43)$$

Où, H' est la partie neutre de la région de la base telle qu'il est montré par la figure 12. L'équation (43) est obtenue en supposant que la durée de vie, la mobilité et le dopage dans la région de base sont constants.

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

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

$$D_p \frac{d^2 p_n}{dx^2} + \alpha\phi(1-R) \exp(-\alpha x) - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} = 0 \quad (44)$$

La solution générale est exprimée par:

$$p_n - p_{n0} = A \cosh \left( \frac{x}{L_p} \right) + B \sinh \left( \frac{x}{L_p} \right) - \frac{\alpha\phi(1-R)\tau_p}{\alpha^2 L_p^2 - 1} \exp(-\alpha x) \quad (45)$$

Où

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

A et B: constantes.

Les deux conditions aux limites sont :

- pour  $x = 0$ , à la surface ( $x = 0$ ) où il se produit une recombinaison superficielle de vitesse  $S_p$  (dûe à la présence de défauts):

$$D_p \frac{d(p_n - p_{n0})}{dx} = S_p (p_n - p_{n0}) \quad (46)$$

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

Donc :

$$p_n - p_{n0} \approx 0 \quad (47)$$

En utilisant ces conditions aux limites dans l'équation (45), on peut calculer la densité des trous dans la région  $N^+$ :

$$p_n - p_{n0} = \left[ \frac{\alpha\phi(1-R)\tau_p}{(\alpha^2 L_p^2 - 1)} \right] \times \left[ \frac{\left( \frac{S_p L_p}{D_p} + \alpha L_p \right) \sinh\left(\frac{x_j - x}{L_p}\right) + e^{-\alpha x_j} \left( \frac{S_p L_p}{D_p} \sinh\frac{x}{L_p} + \cosh\frac{x}{L_p} \right)}{\left( \frac{S_p L_p}{D_p} \sinh\frac{x_j}{L_p} + \cosh\frac{x_j}{L_p} \right)} - e^{-\alpha x} \right] \quad (48)$$

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

$$J_p = -qD_p \left( \frac{dp_n}{dx} \right)_{x_j} = \left[ \frac{q\phi(1-R)\alpha L_p}{(\alpha^2 L_p^2 - 1)} \right] \times \left[ \frac{\left( \frac{S_p L_p}{D_p} + \alpha L_p \right) - e^{-\alpha x_j} \left( \frac{S_p L_p}{D_p} \cosh\frac{x_j}{L_p} + \sinh\frac{x_j}{L_p} \right)}{\left( \frac{S_p L_p}{D_p} \sinh\frac{x_j}{L_p} + \cosh\frac{x_j}{L_p} \right)} - \alpha L_p e^{-\alpha x_j} \right] \quad (49)$$

### 6.1.3. Le photocourant dans la région de charge d'espace ZCE

La génération du photo-courant à lieu également dans la région de charge d'espace. Etant donné que le champ électrique dans cette région soit assez élevé, il se trouve que les porteurs excédentaires générés sont drainés hors de la zone de déplétion avant qu'ils ne puissent se recombiner. Ainsi, on peut dire que la densité du photocourant ne dépend que du nombre de photons absorbés. Le photocourant généré dans la ZCE est exprimé par [9] :

$$J_{dr} = q\phi(1 - R) \exp(-\alpha x_j) [1 - \exp(-\alpha w)] \quad (50)$$

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

Le photocourant généré dans la région  $P^+$  est donné par la relation suivante [13]:

$$J_{bsf} = - \left( \frac{qD_{bsf}}{L_{bsf}} \right) \left[ \frac{N_a + Ne}{n_{bsf}} - n_p \right] + \cosh \left( \frac{W_{bsf}}{L_{bsf}} \right) \quad (51)$$

Avec :

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

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

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

## 7. Modélisation électrique de la cellule solaire bifaciale BSF éclairée par sa face arrière

Pour modéliser électriquement la cellule solaire bifaciale ( $n^+/pp^+$ ), quand celle à est illuminée par sa face arrière, on utilise toujours le modèle présenté par la Figure (12). Le courant de court circuit, la vitesse de recombinaison effective à la face arrière et le rendement quantique interne (I.Q.E) sont calculés en prenant en considération la génération dans la couche  $P^+$ .

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

L'efficacité quantique interne de la cellule solaire bifaciale, quand elle est illuminée par sa face arrière, est donné par la relation suivante [24]:

$$\begin{aligned}
 Q(\lambda) = & \frac{\alpha L_{bsf}}{(\alpha^2 L_{bsf}^2 - 1) \left( \frac{S_{eff} L_n}{D_n} \sinh\left(\frac{H'}{L_n}\right) + \cosh\left(\frac{H'}{L_n}\right) \right)} \left[ \right. \\
 & \frac{\alpha L_{bsf} + \frac{S_n L_{bsf}}{D_{bsf}}}{\left( \frac{S_n L_{bsf}}{D_{bsf}} \right) \sinh\left(\frac{W_{bsf}}{L_{bsf}}\right) + \cosh\left(\frac{W_{bsf}}{L_{bsf}}\right)} - [\alpha L_{bsf} + \\
 & \left. \frac{\sinh\left(\frac{W_{bsf}}{L_{bsf}}\right) + \frac{S_n L_{bsf}}{D_{bsf}} \cosh\left(\frac{W_{bsf}}{L_{bsf}}\right)}{\left( \frac{S_n L_{bsf}}{D_{bsf}} \right) \sinh\left(\frac{W_{bsf}}{L_{bsf}}\right) + \cosh\left(\frac{W_{bsf}}{L_{bsf}}\right)} \right] e^{-\alpha W_{bsf}} \left. \right] + \frac{\alpha L_n}{\alpha^2 L_n^2 - 1} \times \left[ \right. \\
 & \frac{\alpha L_n + \frac{S_{eff} L_n}{D_n}}{\frac{S_{eff} L_n}{D_n} \sinh\left(\frac{H'}{L_n}\right) + \cosh\left(\frac{H'}{L_n}\right)} - \\
 & \left. \left[ \alpha L_n + \frac{\sinh\left(\frac{H'}{L_n}\right) + \frac{S_{eff} L_n}{D_n} \cosh\left(\frac{H'}{L_n}\right)}{\frac{S_{eff} L_n}{D_n} \sinh\left(\frac{H'}{L_n}\right) + \cosh\left(\frac{H'}{L_n}\right)} \right] e^{-\alpha H'} \right] e^{-\alpha W_{bsf}} \quad (52)
 \end{aligned}$$

## 7.2. 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 [24]:

$$S_{eff} = \frac{N_a}{N_{bsf}} \frac{D_{bsf}}{L_{bsf}} \frac{\frac{S_n L_{bsf}}{D_{bsf}} + \text{th}\left(\frac{W_{bsf}}{L_{bsf}}\right)}{1 + \frac{S_n L_{bsf}}{D_{bsf}} \text{th}\left(\frac{W_{bsf}}{L_{bsf}}\right)} \quad (53)$$

### 7.3. Le courant de court circuit $I_{cc}$

Le courant de court circuit  $I_{cc}$  de la cellule solaire bifaciale, illuminée par sa face arrière, est donné par la relation suivante [24]:

$$I_{cc} = S * q * \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \phi(\lambda) * Q(\lambda) * (1 - R) d\lambda \quad (54)$$

Avec :

$\phi(\lambda)$  : Le flux des photons incidents

$\phi(\lambda) * (1 - R)$  : le flux des photons transmis.

$I_{cc}$  : Le courant de court circuit.

$q$  : la charge de l'électron.

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

$\lambda$  : La longueur d'onde

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

### 8. Conclusion

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

Nous avons présenté la structure de la cellule solaire bifaciale BSF ainsi que son principe de fonctionnement. Par la suite, nous avons expliqué la modélisation de cette cellule en explicitant les démarches de calcul des différents courants photogénérés dans chaque région (l'émetteur, la base, la ZCE et la couche surdopée p+). Nous avons également expliqué la démarche relative à l'estimation de l'efficacité quantique interne (The internal quantum efficiency, IQE) et la puissance délivrée avec un éclairage par les deux faces.

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

# Chapitre III

RESULTATS DE LA  
MODELISATION DES CELLULES  
SOLAIRES CONVENTIONNELLE  
ET AVEC BSF

## 1. Introduction

La modélisation est couramment utilisée pour l'optimisation des cellules solaires. Elle présente des avantages tels que : elle permet de ne pas fabriquer plusieurs prototypes de cellules, elle est indépendante de la technologie utilisée et permet de varier largement les différents paramètres.

Dans ce chapitre, nous allons appliquer les modèles physiques pour décrire les cellules solaires présentées dans le premier chapitre : la cellule solaire conventionnelle et la cellule solaire BSF. Nous chercherons les paramètres physiques et géométriques optimaux qui assureront les meilleures caractéristiques de sortie de la photopile à savoir : le rendement de conversion, la puissance délivrée, le courant de court circuit  $I_{cc}$ , la tension du circuit ouvert  $V_{co}$  et le facteur de forme FF.

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

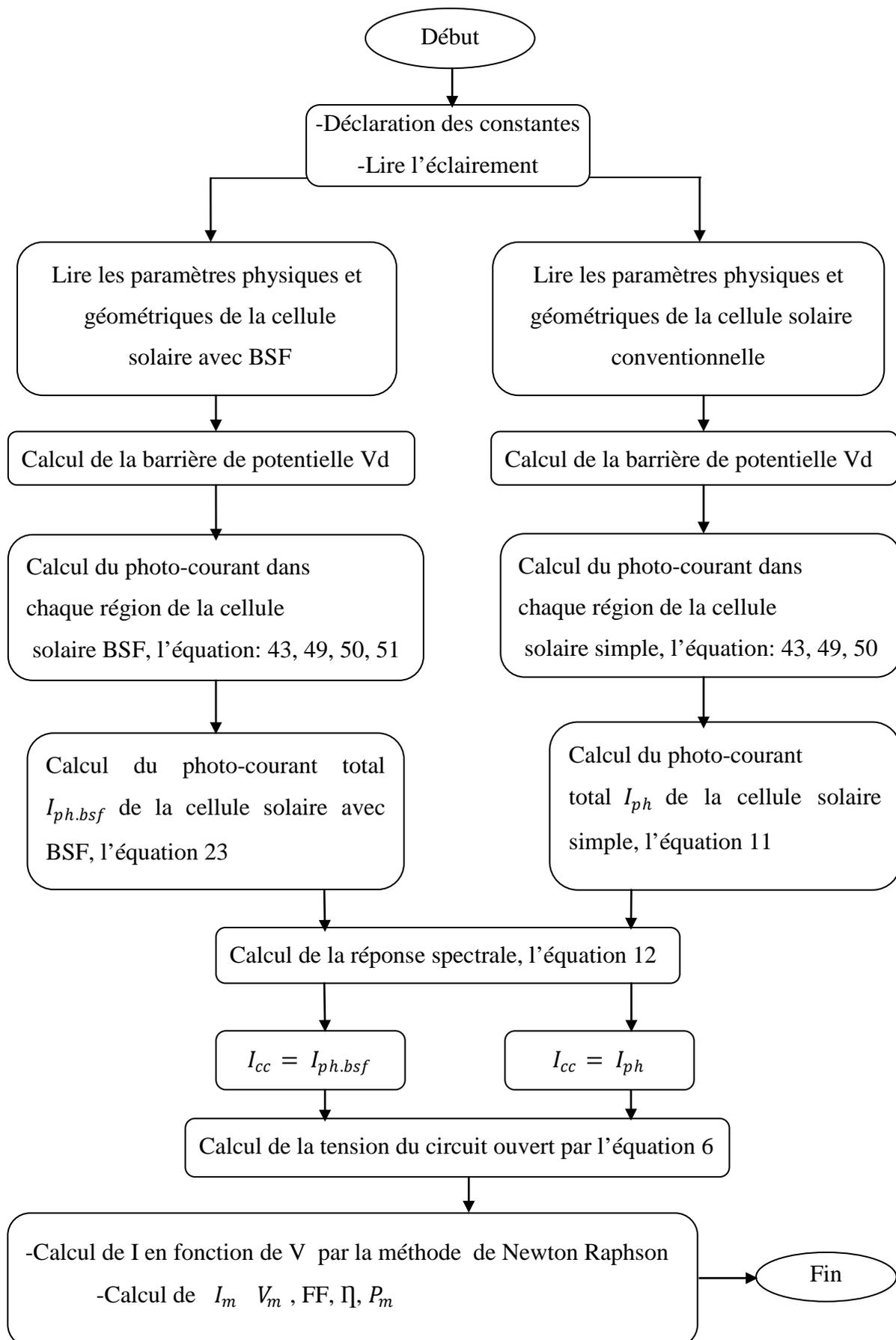
### 2.1. L'organigramme de calcul

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

Les paramètres mis en œuvre dans notre code de calcul sont issus des références [6, 9, 12, 19, 24]. Les valeurs utilisées sont les suivantes :

- La température de référence :  $tr = 298 \text{ k}$
- La constante de Boltzmann :  $kb = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J. K}^{-1}$
- La charge d'électron :  $q = 1.60 \times 10^{-19} \text{ Cb}$
- La résistance série :  $rs = 0.012 \text{ ohm}$
- La résistance parallèle :  $rh = 10^6 \text{ ohm}$
- Le facteur de qualité :  $y = 1.4$
- Le gap pour le silicium :  $eg = 1.12 \text{ ev}$
- L'éclairement de référence :  $gr = 1000 \text{ watt/m}^2$
- la vitesse de recombinaison des trous à la surface avant :  $sp = 10^4 \text{ m/s}$

- la vitesse de recombinaison des électrons à la surface arrière :  $s_n = 10^4 \text{ m/s}$
- La permittivité relative du semi-conducteur :  $\epsilon_{ps} = (8.85 * 11.8) \times 10^{-12}$
- la durée de vie des trous dans l'émetteur :  $t_p = 1 * 1E - 3 \text{ s}$
- la durée de vie des électrons dans la base :  $t_n = 83.8 * 1E - 6 \text{ s}$
- l'épaisseur de la cellule :  $h = 290 * 1E - 6 \text{ m}$
- la mobilité des trous dans l'émetteur :  $\mu_p = 50 * 1E - 4 \text{ m}^2 / \text{V.s}$
- la mobilité des électrons dans la base :  $\mu_n = 1500 * 1E - 4 \text{ m}^2 / \text{V.s}$
- Le dopage dans la base :  $N_a = 7 * 1E20 \text{ m}^{-3}$
- le dopage dans l'émetteur :  $N_d = 3 * 1E24 \text{ m}^{-3}$
- le dopage dans la BSF :  $N_{bsf} = 8 * 1E25 \text{ m}^{-3}$
- l'épaisseur de la BSF :  $w_{bsf} = 0.7 * 10^0 - 6 \text{ m}$
- la concentration intrinsèque :  $N_i = 4.29 * 1E16 \text{ m}^{-3}$



Dans un premier temps, nous avons validé notre code de calcul via une cellule solaire commercialisée [25]. Les résultats de notre programme sont comparés avec les données du fabricant dans les conditions standard (la température,  $T=25\text{ C}^\circ$ , l'éclairement AM1.5, 1000 watt/m<sup>2</sup>), (voir Tableau 1).

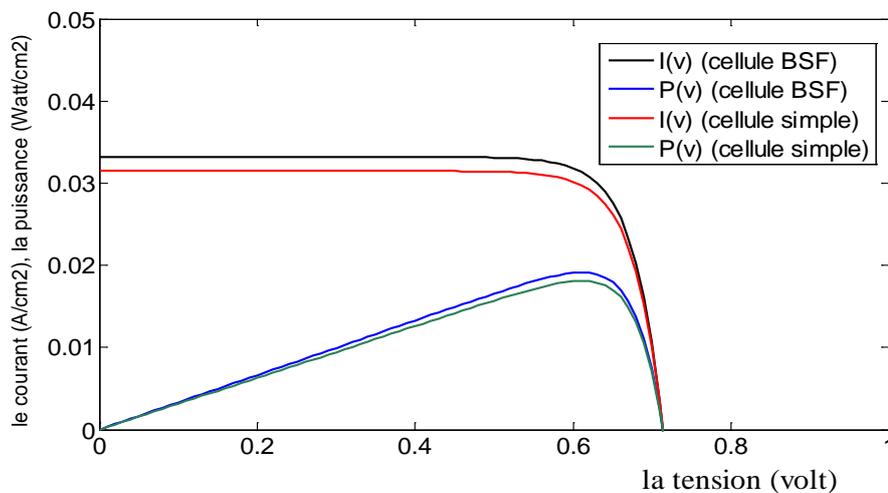
Paramètres	$I_{cc}$ (A)	$I_{Max}$ (A)	$V_{co}$ (V)	$V_{Max}$ (V)	Rendement %	Puissance (W)
Les données de fabricant	8.6200	8.1000	0.626	0.5250	17.4 à 17.59	4.23 à 4.28
Résultats de ce travail	8.6200	7.8225	0.626	0.5400	17.3576	4.2498

**Tableau 1 : Comparaison entre les résultats obtenus par le programme sous MATLAB et les données du fabricant.**

D'après les résultats mentionnés dans le tableau 1, il est clair que les valeurs fournies par notre code de calcul sont en bon accord avec les données de référence. Ceci témoigne de la fiabilité de notre programme informatique.

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

Pour obtenir les caractéristiques I(V) et P(V), nous avons utilisé le circuit électrique équivalent représenté par la figure 6, les résultats obtenus sont représentés sur la figure 13.



**Figure 13: caractéristiques I(V) et P(V) de la cellule solaire sans et avec BSF**

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

Paramètres	$I_{sc}$ (A/cm <sup>2</sup> )	$V_{co}$ (V)	Rendement %	Puissance (W/cm <sup>2</sup> )	FF
La cellule BSF	0.0332	0.7141	19.1196	0.0191	80.6422
La cellule sans BSF	0.0315	0.7141	18.1313	0.0181	80.6447

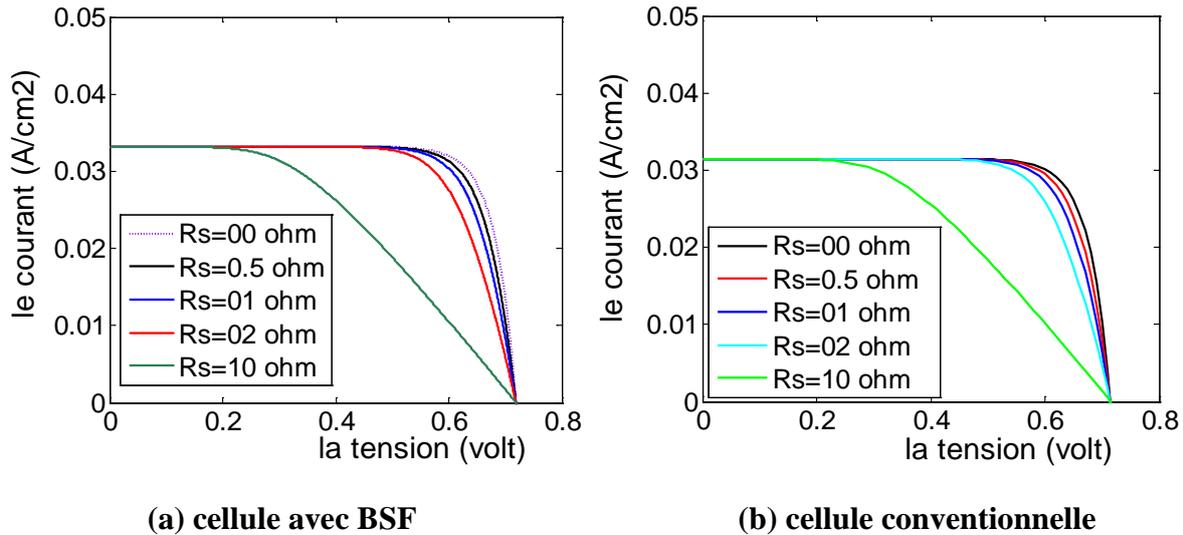
**Tableau 2: Paramètres obtenus par modélisation électrique des cellules BSF et conventionnelle.**

D'après La figure 13 et les paramètres mentionnés dans le tableau 2, il est clair que la cellule solaire BSF donne de meilleurs résultats que la cellule conventionnelle. En effet, les valeurs obtenues pour le courant de court circuit, la puissance et le rendement sont toutes plus élevées pour la cellule BSF que la cellule simple. Ceci est attribué à la réduction de la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires à la face arrière de la cellule [7]. Comme nous l'avons mentionné dans le premier chapitre, la réduction de la vitesse de recombinaison augmente le courant photogénéré et par conséquent améliore la puissance et le rendement.

### **3. Influence des différents paramètres sur les caractéristiques I(V) des cellules solaires conventionnelle et avec BSF**

#### **3.1. Influence de la résistance série $R_s$**

La figure 14 représente les caractéristiques I(V) des cellules solaires en fonction de différentes valeurs de la résistance série : ( $R_s = 00 \text{ ohm}, 0.5 \text{ ohm}, 1 \text{ ohm}, 2 \text{ ohm}, 10 \text{ ohm}$ ). Nous rappelons que tous les autres paramètres des cellules sont maintenus fixes afin de voir l'influence de la résistance série ( $R_{sh} = 10^6 \text{ ohm}$ , la température  $T = 25 \text{ C}^\circ$ , l'éclairement  $G = 1000 \text{ watt/m}^2$ , le facteur de qualité  $Y = 1.4$ ).



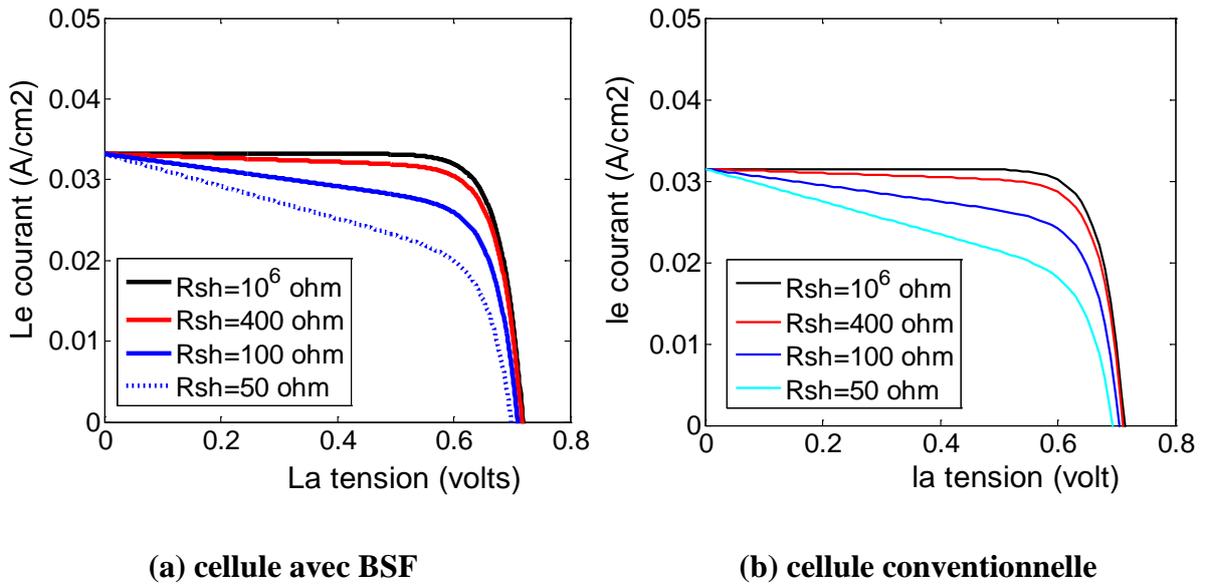
**Figure 14 : Caractéristiques I (V) des cellules solaires en fonction de la résistance série**

La figure 14 montre que la résistance série agit sur la pente de la caractéristique I(V) dans la zone où la photodiode se comporte comme un générateur de tension [6]. Elle ne modifie pas la tension de circuit ouvert, mais lorsqu'elle est élevée, elle peut diminuer les valeurs du courant de court circuit, le rendement et le facteur de forme de la cellule.

Ainsi, on constate que la résistance série est l'un des paramètres qui influe sur les caractéristiques I(V) de la cellule solaire. En d'autres termes, pour obtenir de bons résultats, il faut minimiser la valeur de cette résistance.

### 3.2. Influence de la résistance parallèle (shunt)

La figure 15 représente les caractéristiques I(V) des cellules solaires en fonction de différentes valeurs de la résistance shunt : ( $R_{sh} = 10^6 \text{ ohm}, 400 \text{ ohm}, 100 \text{ ohm}, 50 \text{ ohm}$ ). Nous rappelons que tous les autres paramètres des cellules sont maintenus fixes ( $R_s = 0.012 \text{ ohm}$ , la température  $T = 25 \text{ C}^\circ$ , l'éclairement  $G = 1000 \text{ watt/m}^2$ , le facteur de qualité  $Y = 1.4$ ).

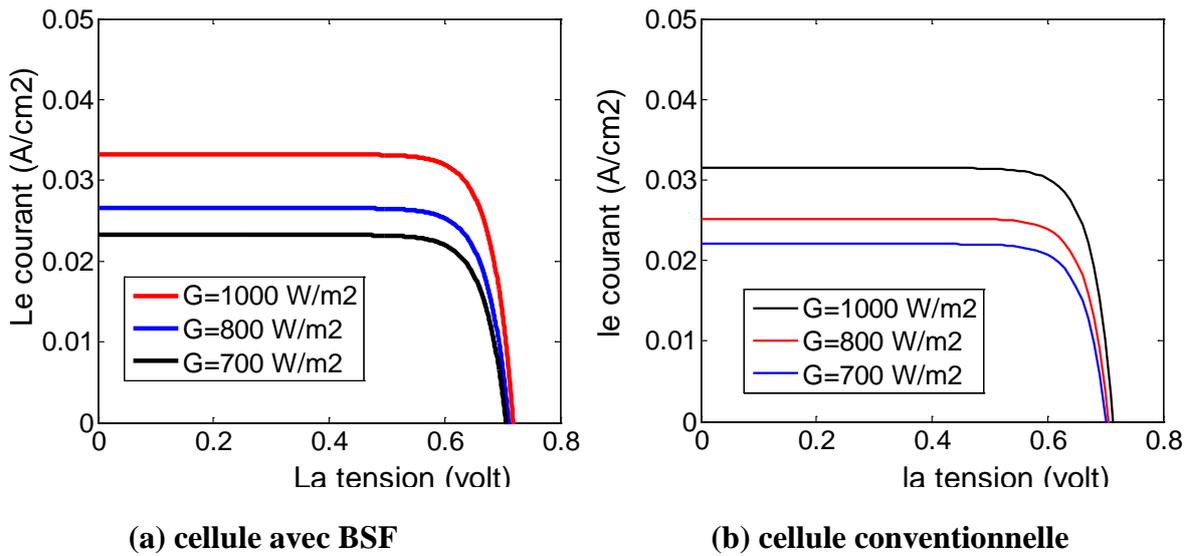


**Figure 15: Caractéristiques I (V) des cellules solaires en fonction de la résistance shunt**

On observe que la résistance shunt agit sur la pente de la caractéristique I(V) au voisinage du point de courant de court circuit. Une résistance shunt trop faible aura un impact sur la tension de circuit ouvert de la photopile. À cause de cela, une photopile dont la résistance shunt trop faible, ne donnera plus de tension sous faible éclairement [6]. Ainsi, la résistance shunt est en général prise très élevée.

### 3.3. Influence du rayonnement solaire

La figure 16 représente les caractéristiques I(V) des cellules solaires en fonction de différentes valeurs de l'éclairement : ( $G = 1000 \text{ w/m}^2, G = 800 \text{ w/m}^2, G = 700 \text{ w/m}^2$ ). Nous rappelons que tous les autres paramètres des cellules sont maintenus fixes ( $R_{sh} = 10^6 \text{ ohm}, R_s = 0.012 \text{ ohm}$ , la température  $T = 25 \text{ C}^\circ$ , le facteur de qualité  $Y = 1.4$ ).

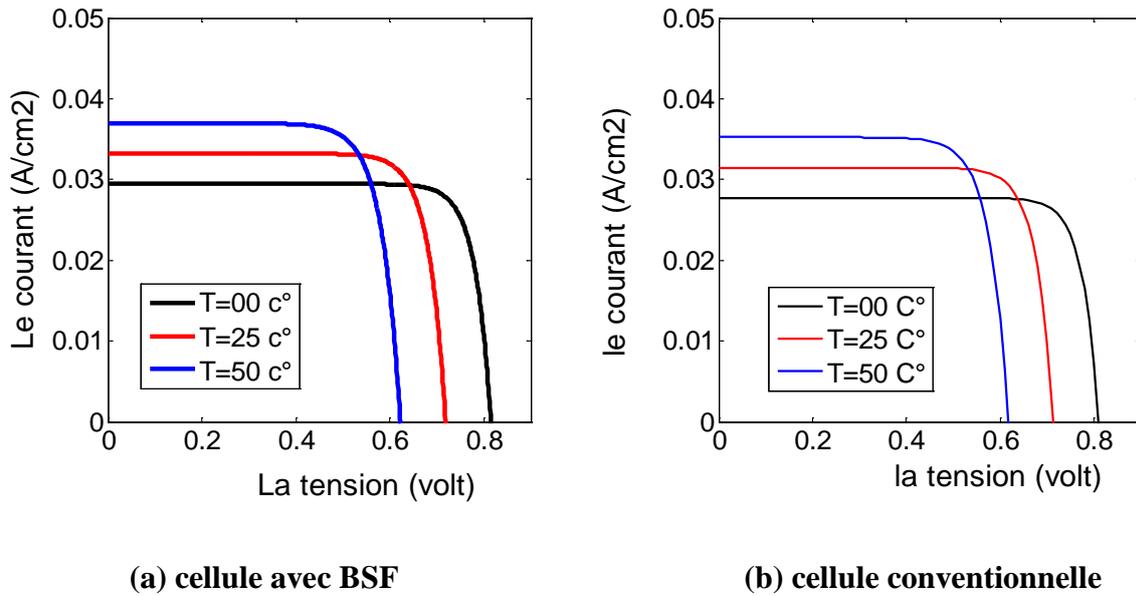


**Figure 16: Caractéristiques I (V) des cellules solaires en fonction du rayonnement solaire**

La figure 16 montre que l'augmentation du rayonnement solaire entraîne une augmentation sur le courant de court circuit. À partir de cette figure, on remarque qu'une augmentation de la puissance lumineuse de  $300 \text{ w/m}^2$  donne une élévation très importante du courant de court circuit (soit  $10 \text{ mA/cm}^2$ ). Notons enfin que les observations mentionnées sont en accord avec la littérature [30].

### 3.4. Influence de la température

La figure 17 représente les caractéristiques I(V) des cellules solaires en fonction de différentes valeurs de la température : ( $T=00 \text{ C}^\circ$ ,  $T=25 \text{ C}^\circ$ ,  $T=50 \text{ C}^\circ$ ). Les autres paramètres des cellules sont maintenus fixes ( $R_{sh} = 10^6 \text{ ohm}$ ,  $R_s = 0.012 \text{ ohm}$ , l'éclairement  $G = 1000 \text{ watt/m}^2$ , le facteur de qualité  $Y = 1.4$ ).

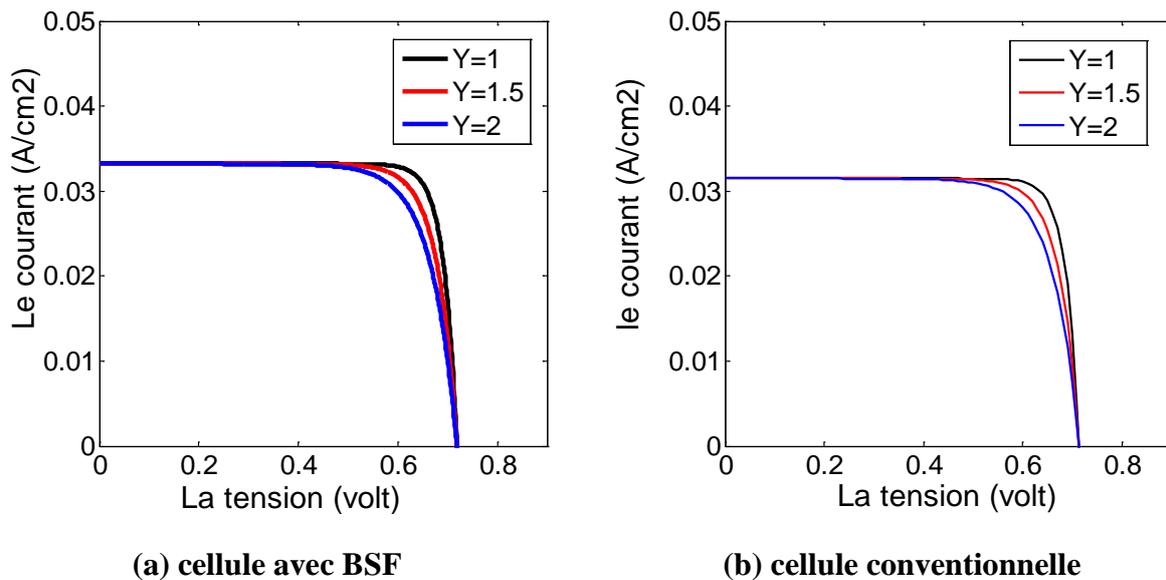


**Figure 17: Caractéristiques I (V) des cellules solaires en fonction de la température**

La température est un paramètre important dans le comportement des photopiles. La figure 17 montre l'influence de la température sur les caractéristiques I(V). Elle influe inversement sur la tension et proportionnellement sur le courant. En effet, lorsqu'elle augmente, on observe une augmentation du courant de court circuit et une diminution de la tension de circuit ouvert. Ainsi, si la photopile n'est pas correctement ventilée, elle peut chauffer considérablement ce qui entraîne une dégradation de ses performances électriques. Notre résultat est en accord avec la littérature [6.]

### 3.5. Influence du facteur de qualité $y$

La figure 18 représente les caractéristiques I(V) des cellules solaires en fonction de différentes valeurs du facteur de qualité : ( $y=1$ ,  $y=1.5$ ,  $y=2$ ). Les autres paramètres des cellules sont maintenus fixes ( $R_{sh} = 10^6 \text{ ohm}$ ,  $R_s = 0.012 \text{ ohm}$ , la température  $T = 25 \text{ C}^\circ$ , l'éclairement  $G = 1000 \text{ watt/m}^2$ ).



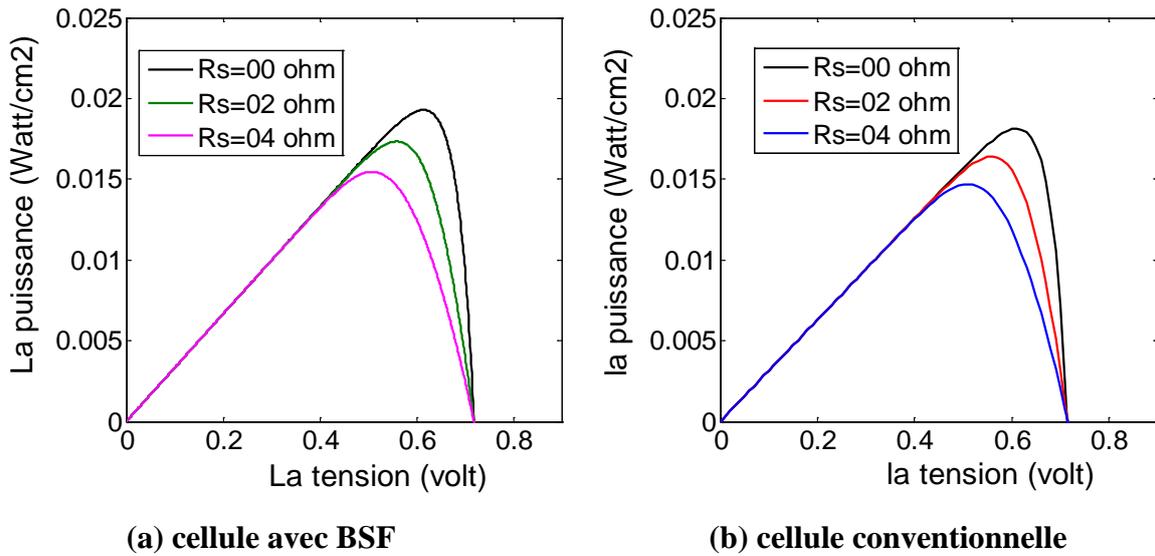
**Figure 18: Caractéristiques I (V) des cellules solaires en fonction du facteur de qualité  $y$**

La figure 18 montre que l'augmentation du facteur de qualité influe inversement sur le point de puissance maximale. Lorsqu'il augmente, le point de puissance maximale est dégradé. Les résultats de notre programme sont en accord avec la littérature où il est rapporté que les valeurs les plus élevées du facteur de qualité ramollissent le genou de la courbe [8].

#### **4. Influence des différents paramètres sur les caractéristiques P(v) des cellules solaires conventionnelle et avec BSF**

##### **4.1. Influence de la résistance série**

La figure 19 représente les caractéristiques P(V) des cellules solaires en fonction de différentes valeurs de la résistance série : ( $R_s = 00\ ohm, 2\ ohm, 4\ ohm$ ). Nous rappelons que tous les autres paramètres des cellules sont maintenus fixes ( $R_{sh} = 10^6\ ohm$ , la température  $T = 25\ C^\circ$ , l'éclairement  $G = 1000\ watt/m^2$ , le facteur de qualité  $Y = 1.4$ ).

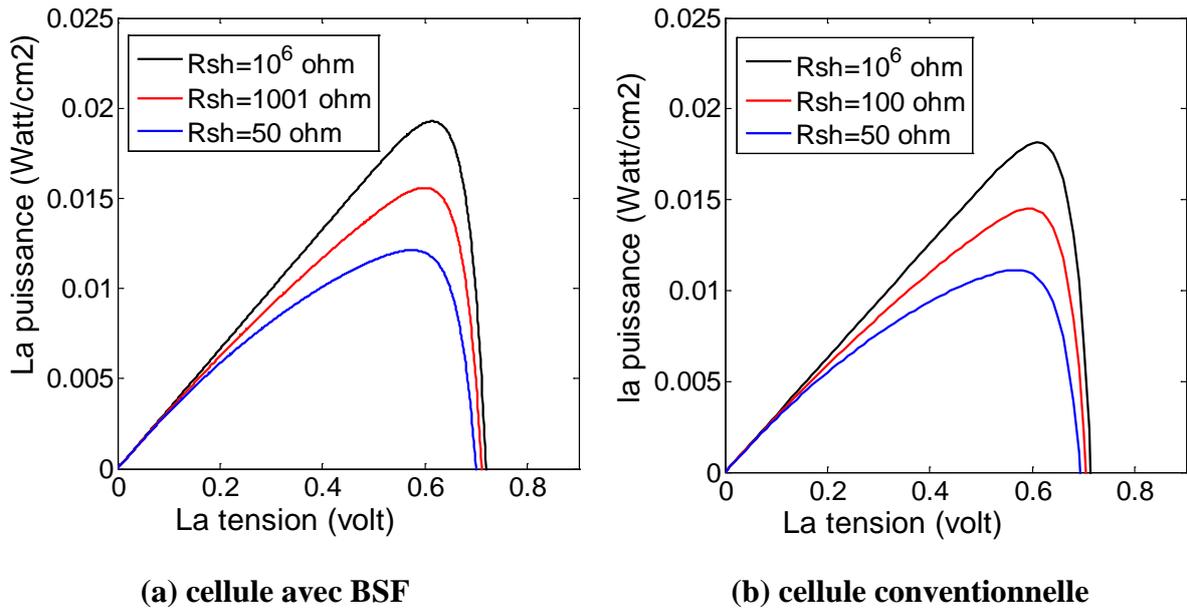


**Figure 19: Caractéristiques P (V) des cellules solaires en fonction de la résistance série**

La figure 19 montre que la résistance série n'influe pas sur la tension de circuit ouvert, mais lorsqu'elle est élevée elle diminue la valeur de la puissance maximale, cela revient aux pertes par effet Joule [6].

#### 4.2. Influence de la résistance shunt

La figure 20 représente les caractéristiques P(V) des cellules solaires en fonction de différentes valeurs de la résistance shunt : ( $R_{sh} = 10^6 \text{ ohm}, 100 \text{ ohm}, 50 \text{ ohm}$ ). Les autres paramètres des cellules sont maintenus fixes ( $R_s = 0.012 \text{ ohm}$ , la température  $T = 25 \text{ C}^\circ$ , l'éclairement  $G = 1000 \text{ watt/m}^2$ , le facteur de qualité  $Y = 1.4$ ).

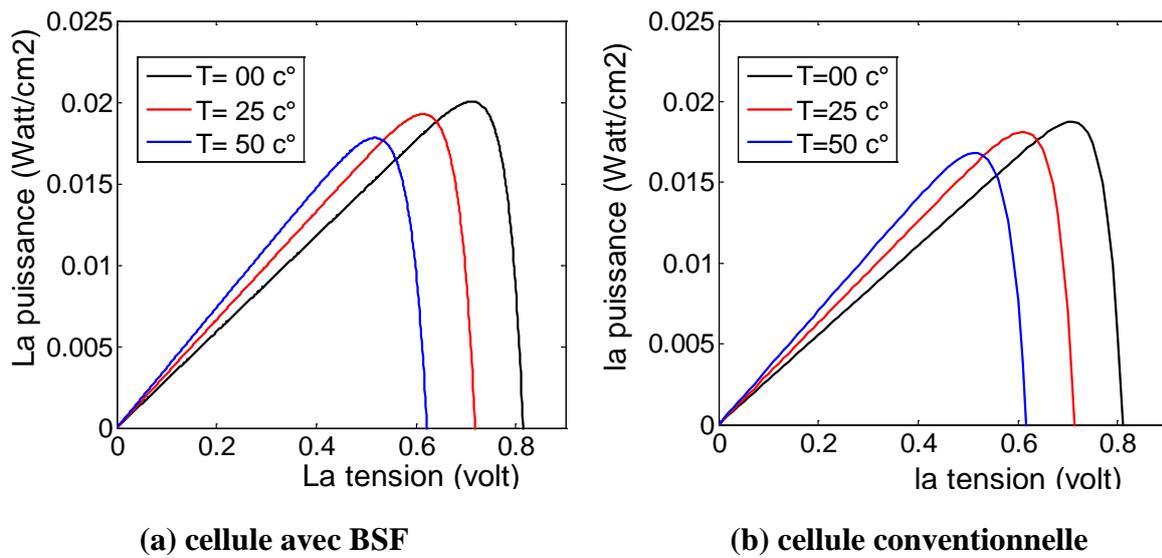


**Figure 20: Caractéristiques P (V) des cellules solaires en fonction de la résistance shunt**

L'influence de la résistance shunt est très remarquable, comme le montre la figure 20. Lorsqu'elle décroît, la puissance maximale est significativement diminuée, En effet, lorsque la résistance shunt est petite, la cellule délivre peu de puissance, et ne peut donc pas alimenter le récepteur extérieur.

#### 4.3. Influence de la température

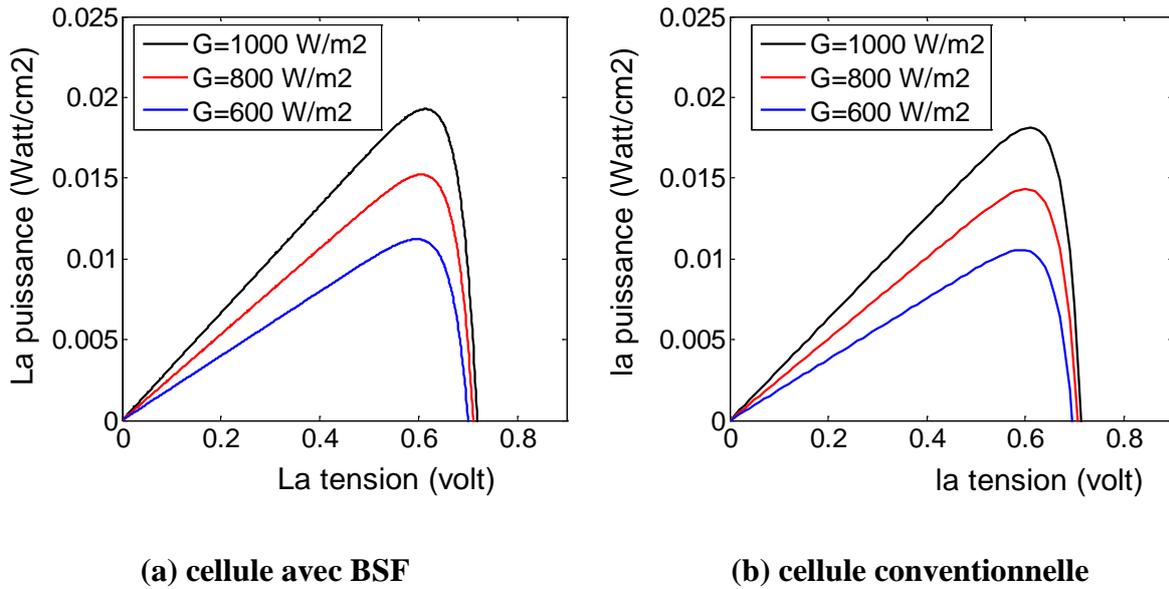
La figure 21 représente les caractéristiques P(V) des cellules solaires en fonction de différentes valeurs de la température : ( $T=00$  C°,  $T=25$  C°,  $T=50$  C°). Les autres paramètres sont maintenus fixes ( $R_{sh} = 10^6$  ohm,  $R_s = 0.012$  ohm, l'éclairement  $G = 1000$  watt/m<sup>2</sup>, le facteur de qualité  $Y = 1.4$ ). La figure 21 montre que l'augmentation de la température se traduit par une baisse relative de la puissance disponible.



**Figure 21: Caractéristiques P (V) des cellules solaires en fonction de la température**

#### 4.4. Influence de l'éclairement

La figure 22 représente les caractéristiques I(V) des cellules solaires en fonction de différentes valeurs de l'éclairement : ( $G = 1000 \text{ w/m}^2, G = 800 \text{ w/m}^2, G = 600 \text{ w/m}^2$ ). Les autres paramètres des cellules sont maintenus fixes ( $R_{sh} = 10^6 \text{ ohm}, R_s = 0.012 \text{ ohm}$ , la température  $T = 25 \text{ C}^\circ$ , le facteur de qualité  $Y = 1.4$ ).

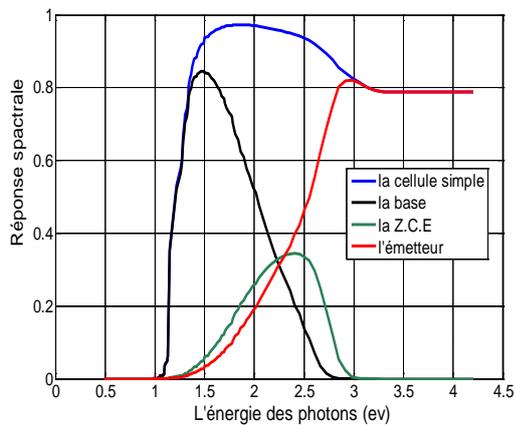


**Figure 22: Caractéristiques P (V) des cellules solaires en fonction de l'éclairement**

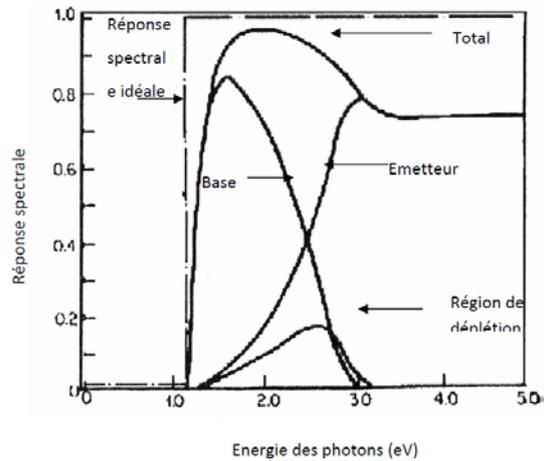
La figure 22 montre que la puissance maximale produite par la cellule est proportionnelle au rayonnement solaire. C'est un paramètre extrêmement influant sur le point de fonctionnement de la cellule solaire. En effet, il est reporté que si l'ensoleillement augmente, l'intensité du courant croît, d'où production de puissance électrique plus importante [8].

## **5. Etude de l'efficacité quantique interne des cellules solaires simple et avec BSF**

La figure 23 (a) représente la réponse spectrale de la cellule solaire conventionnelle, que nous avons obtenus dans les différentes zones : l'émetteur, la base et la zone de charge d'espace ZCE. Les résultats que nous avons obtenus sont comparables avec ceux fournis par la littérature (Figure 23 (b), [27]). Cependant, on doit tout de même signaler qu'un petit écart est observé. Ceci est probablement dû à certains phénomènes physiques qui ont été omis dans le cadre du modèle mis en œuvre.



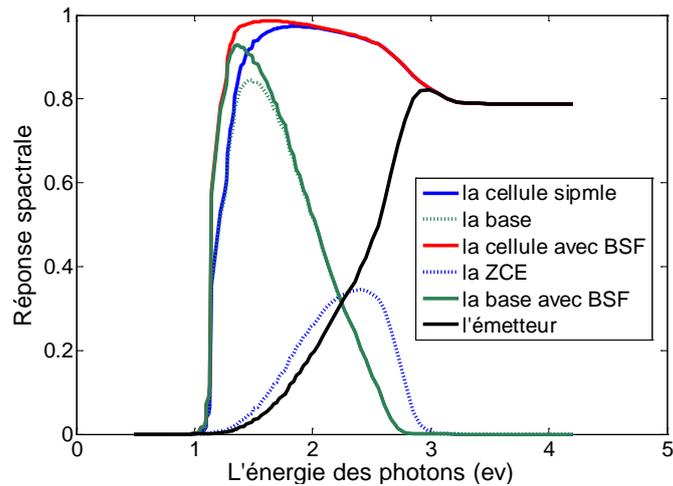
(a)



(b)

**Figure 23: Caractéristiques des réponses spectrales totale et partielle obtenues par notre code de calcul dans le cas de la cellule solaire conventionnelle (a) et par la littérature [27], (b).**

La figure 24 représente la réponse spectrale que nous avons obtenus, pour des cellules solaires BSF, dans les différentes zones : l'émetteur, la base, la zone de charge d'espace ZCE et la zone fortement dopée  $P^+$ .



**Figure 24 : Caractéristiques de réponses spectrales totale et partielle des cellules solaires avec BSF obtenues par notre code de calcul**

Dans le tableau 3 on reporte les paramètres obtenus par la modélisation des deux cellules solaires étudiées dans ce chapitre.

Paramètres	$J_{ph}$ (Amp/cm <sup>2</sup> )	Le rendement %	La vitesse de recombinaison à la face arrière cm/s
La cellule BSF	0.0332	19.1196	4.20
La cellule simple	0.0314	18.1313	10 <sup>6</sup>

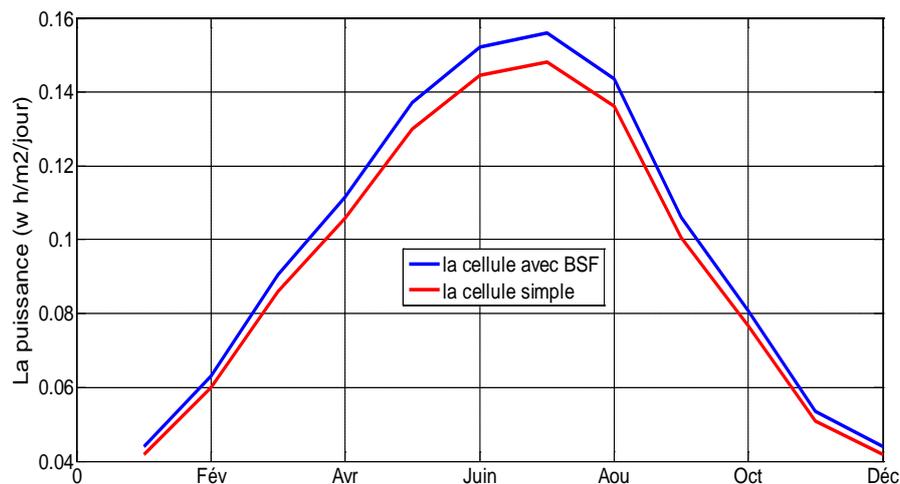
**Tableau 3: principaux résultats obtenus pour les cellules simple et avec BSF**

D'après les figures : 23 (a) et 24 et le tableau (4), nous déduisons que la cellule BSF est effectivement plus prometteuse. Ceci est dû à l'ajout du champ électrique sur la face arrière de la cellule [7]. En effet, ce dernier permet l'augmentation de l'efficacité quantique de la base qui est dû à la réduction de la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires à la face arrière du composant.

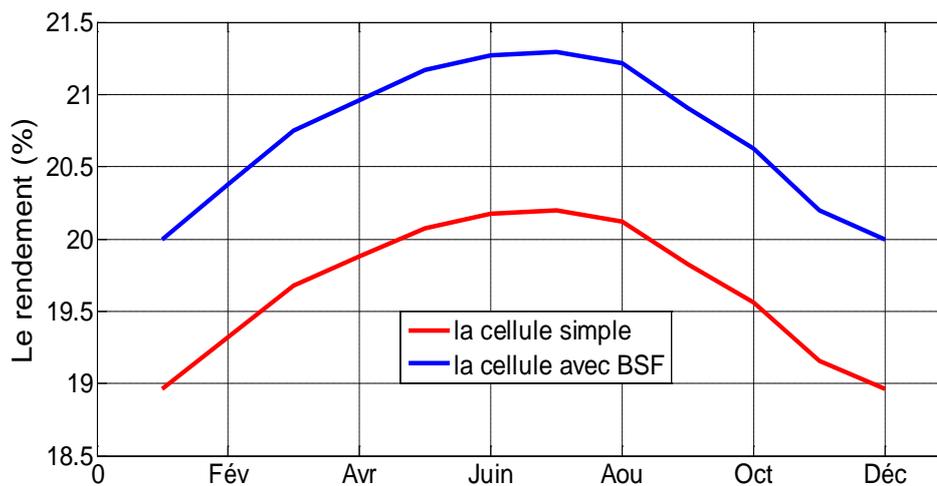
## 6. Prédiction du comportement des cellules conventionnelle et avec BSF pour le site de Constantine

Pour mener à bien notre travail de modélisation, nous avons exécuté le code de calcul dans les conditions climatiques de la ville de Constantine (Latitude: 36°21'33" Nord, Longitude: 6°38'28" East) [31]. Une attention particulière était accordée pour l'estimation du rendement de conversion et la puissance délivrée par les deux types de cellules.

Sur la figure 25, on représente l'évolution de la puissance journalière, délivrée par les deux cellules, pendant toute l'année. Quand à la figure 26, elle correspond aux différents rendements obtenus.



**Figure 25 : Prédiction de la puissance délivrée, par les deux cellules, par le programme élaboré**



**Figure 26 : Prédiction des rendements de conversion, des deux cellules, dans les conditions climatiques de la ville de Constantine**

Comme nous pouvons le constater, la cellule solaire avec BSF est mieux adaptée, pour le site de Constantine, que la cellule conventionnelle. Ceci est dû à la réduction de la vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires à la face arrière du composant. De plus, il est clair que la puissance délivrée est décrite par une forme gaussienne d'amplitude maximale égale à 0.1678 Watt/m<sup>2</sup>/jour et 0.1756 Watt/m<sup>2</sup>/jour pour les cellules simple et avec BSF respectivement. De plus, ces courbes gaussiennes peuvent être assimilées à des filtres passe bande. Elles présentent des bandes passantes égales à 105 jours, et 120 jours, pour la cellule simple et la cellule avec BSF. La même allure est remarquée pour les courbes correspondant aux rendements de conversion. Finalement, on doit noter que les meilleures réponses (c.-à-d, la plus grande puissance et le plus haut rendement) sont obtenus pendant la saison d'été (i-e la période la plus ensoleillée).

## **7. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons utilisé le langage de programmation MATLAB pour modéliser deux types de cellules solaires (conventionnelle et avec BSF). Dans un premier temps, nous avons validé notre programme par une photopile commercialisée. Par la suite, nous avons exécuté notre code de calcul pour voir les influences de plusieurs paramètres sur les performances des deux cellules en question. Finalement, nous avons tenté de prévoir les réponses des deux photopiles, dans les conditions climatiques de la ville de Constantine.

# Chapitre IV

RESULTATS DE LA  
MODELISATION DES CELLULES  
SOLAIRES BIFACIALE BSF

## 1. Introduction

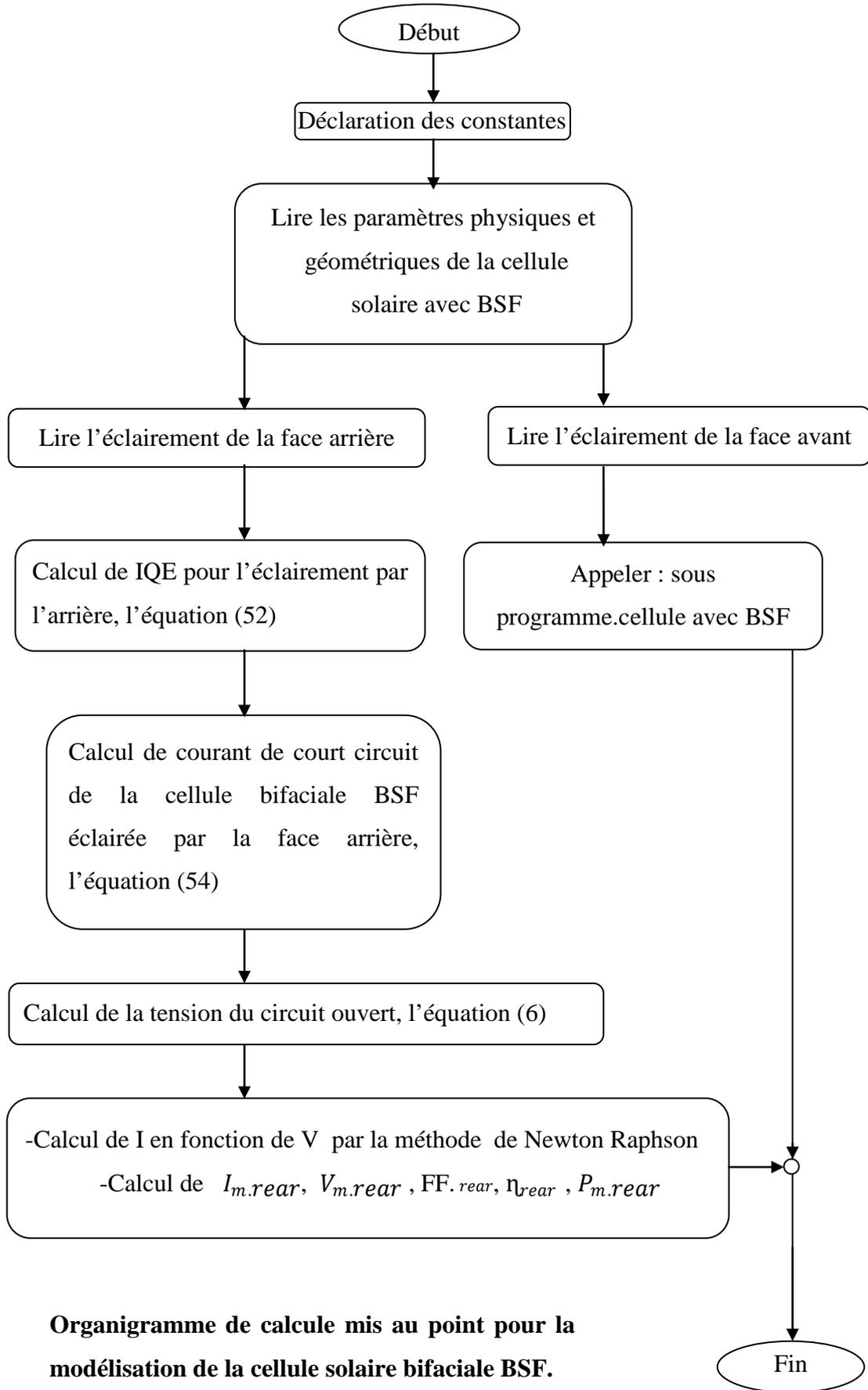
L'objectif de ce chapitre sera destiné à l'optimisation des performances de la cellule solaire bifaciale BSF dont le fond théorique a été présenté dans le deuxième chapitre. Nous allons, par le biais de notre code de modélisation, chercher les paramètres physiques et géométriques optimaux qui assureront les meilleures caractéristiques de la cellule, à savoir : l'efficacité quantique interne (IQE), le rendement de conversion  $\eta$ , la puissance maximale  $P_{max}$ , le courant de court circuit  $I_{cc}$  et la tension du circuit ouvert  $V_{co}$ .

## 2. Résultats de la modélisation des cellules solaires bifaciales BSF

Le but de ce chapitre est d'optimiser les performances de la cellule solaire bifaciale pour les deux types d'éclairage (l'éclairage par la face avant et l'éclairage par la face arrière). Nous allons étudier l'effet de différents paramètres physiques et géométriques de chaque région de la cellule à savoir : l'émetteur, la base, la zone de charge d'espace et la zone fortement dopée. L'idée est de trouver les paramètres qui assurent les meilleures caractéristiques de sortie.

L'organigramme de calcul mis au point pour prévoir les caractéristiques de la cellule solaire étudiée (cellule solaire bifaciale BSF) est représenté ci-dessous :

Les paramètres mis en œuvre dans notre code de calcul sont donnés dans le troisième chapitre.



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

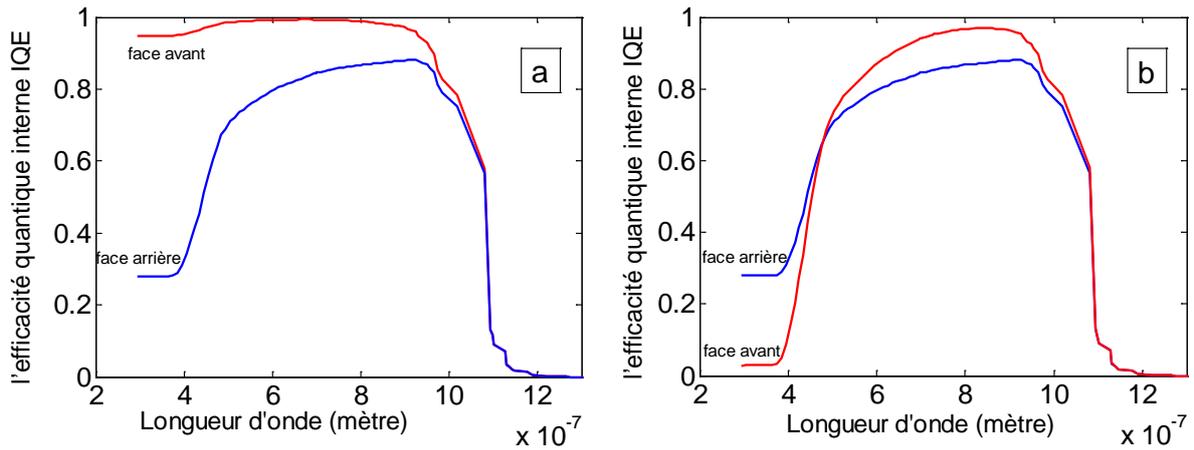
Dans cette partie de la modélisation, nous avons étudié l'effet du dopage, de l'épaisseur et de la vitesse de recombinaison (des porteurs minoritaires) sur les caractéristiques de la cellule solaire bifaciale. La cellule modélisée est à base de silicium monocristallin d'épaisseur égale à  $290 \mu m$ . L'émetteur (dopé type n,  $N_D = 3 \times 10^{18} cm^{-3}$ ) est d'épaisseur égale à  $0.7 \mu m$ . La base est dopée type p ( $N_A = 7 \times 10^{14} cm^{-3}$ ) et la BSF (fortement dopée,  $N_{bsf} = 8 \times 10^{19} cm^{-3}$ ) est d'épaisseur égale à  $0.7 \mu m$ . Les vitesses de recombinaison à la surface avant et à la surface arrière sont respectivement égales à  $S_p = \frac{10^6 cm}{s}$  et  $S_n = \frac{10^6 cm}{s}$ . L'ordre de grandeur de ces paramètres a été choisi sur la base de la littérature [7, 12, 24].

Nous rappelons que tous les autres paramètres de la cellule sont maintenus fixes, c'est-à-dire égales aux valeurs données dans le troisième chapitre.

#### 3.1. Influence des paramètres de l'émetteur sur IQE, $V_{co}$ , $I_{cc}$ , $\eta$

##### 3.1.1. Influence de la vitesse de recombinaison des trous à la face avant ( $S_p$ )

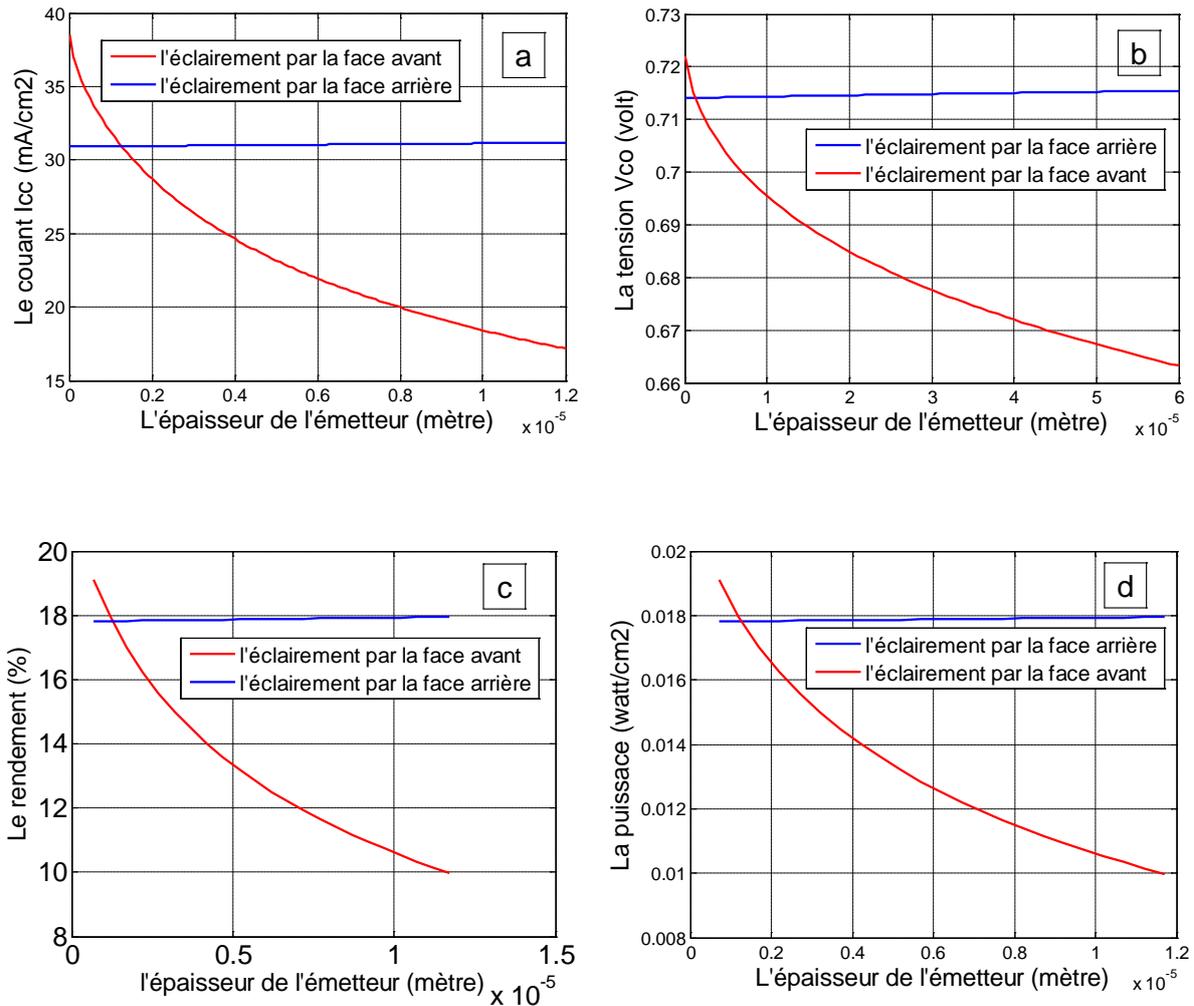
Sur la figure 27, on représente les résultats, de notre code de calcul, concernant l'influence de la vitesse de recombinaison (des porteurs minoritaires) sur le rendement quantique interne. La gamme des longueurs d'onde est supposée variable de  $0.3 \mu m$  à  $1.3 \mu m$ . On voit que la vitesse de recombinaison (des porteurs minoritaires)  $S_p$  influe inversement sur l'efficacité quantique interne (IQE) quand la cellule est illuminée par la face avant. Cependant, il est clair qu'elle n'influe pas sur IQE lorsque la cellule est illuminée par la face arrière.



**Figure 27 : Résultats du programme, sous MATLAB, montrant l'influence de  $Sp$  sur l'efficacité quantique interne (IQE) de la cellule solaire bifaciale, (a)  $Sp = 10 \text{ cm/s}$  ;  
(b)  $Sp = 10^4 \text{ cm/s}$**

### 3.1.2. 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, lorsque la cellule est éclairée par une seule face (*i.e.* par la face avant ou par la face arrière), nous avons fixé les épaisseurs de la base et de la BSF et nous avons fait varier celle de l'émetteur. La figure 28 montre la variation des caractéristiques de la cellule solaire bifaciale en fonction de  $X_j$ .



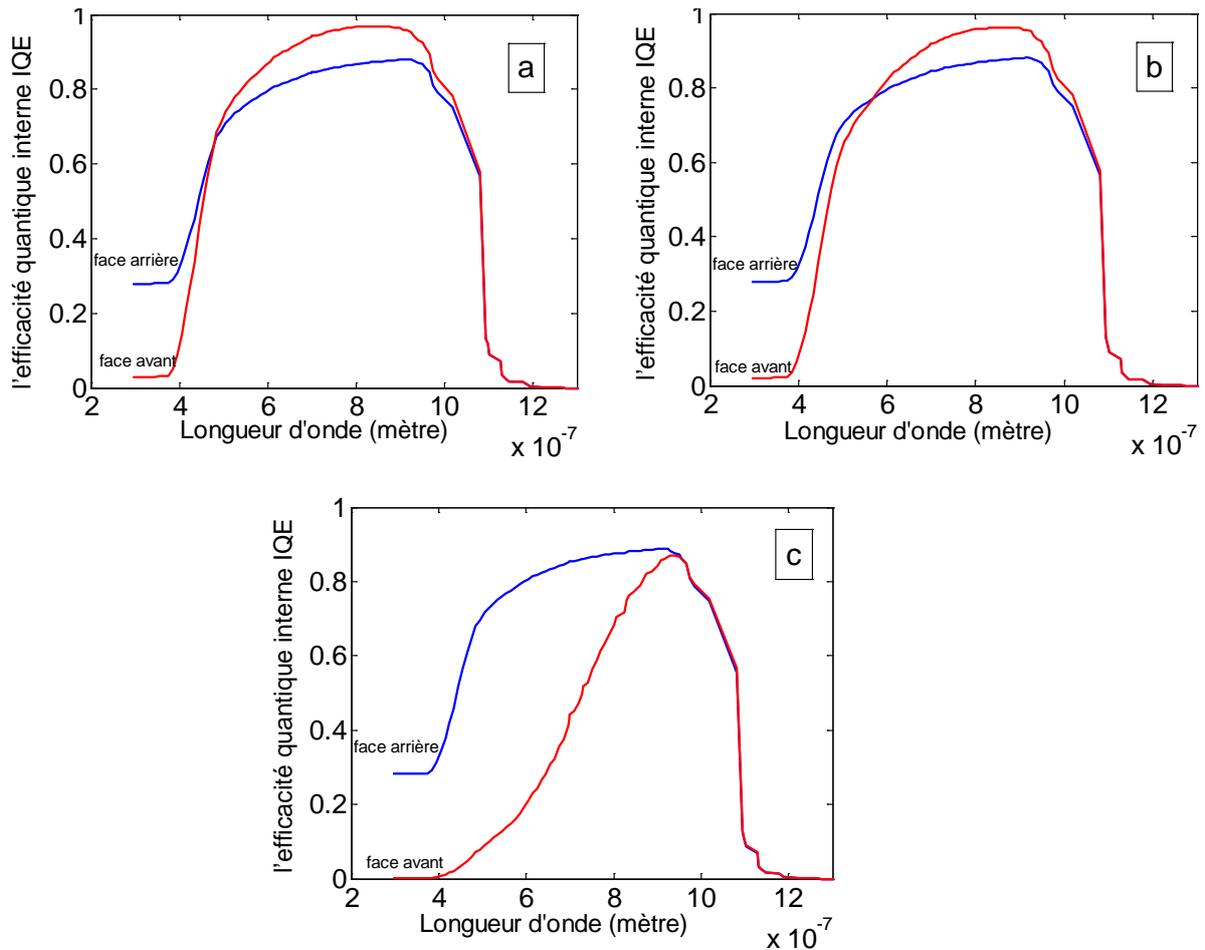
**Figure 28: Résultats du programme, sous MATLAB, montrant l'influence de l'épaisseur de l'émetteur ( $X_j$ ) sur : (a) Le courant de court-circuit; (b) La tension de circuit ouvert ; (c) Le rendement de conversion et (d) La puissance délivrée.**

Les figures 28 (a) et 28 (b) montrent que le courant de court circuit et la tension du circuit ouvert diminuent en augmentant l'épaisseur de l'émetteur, quand la cellule est éclairée par la face avant. Cette diminution est liée au fait que l'augmentation de l'épaisseur de la couche émettrice l'opacifie (la couche devient opaque par rapport à la lumière incidente), c'est-à-dire que la pénétration de la lumière dans la base sera de plus en plus faible. Ceci diminue le nombre de porteurs créés dans la base. Cependant pour les grandes épaisseurs de l'émetteur, les paires générées près de la surface par des photons de faibles longueurs d'onde ne seront pas utilisables, ce qui limite la réponse de la cellule photovoltaïque et par conséquent la diminution du rendement et de la puissance délivrée par la cellule. Ceci est

montré par les figures 28 (c) et 28 (d). Par contre ces caractéristiques sont indépendantes de l'épaisseur de l'émetteur lorsque la cellule est éclairée par la face arrière (Fig.28, (a), (b), (c), (d), (—)).

La figure 29 représente l'influence de l'épaisseur de l'émetteur ( $X_j$ ) sur le rendement quantique interne. Elle confirme les résultats, de notre code de calcul, représentés par la figure 28. Cependant, si la jonction est près de la surface (courte épaisseur) la cellule sera efficace pour convertir les faibles longueurs d'onde [12].

Nous pouvons conclure que les cellules qui donnent les meilleures caractéristiques sont celles dont les épaisseurs de l'émetteur sont faibles, Pour cela, on considère que  $0.5 \mu\text{m}$  est la valeur de  $X_j$  correspondant à épaisseur optimale de l'émetteur.



**Figure 29: Résultats du programme, sous MATLAB, montrant l'influence de l'épaisseur de l'émetteur ( $X_j$ ) sur l'efficacité quantique interne IQE de la cellule solaire bifaciale, (a)  $X_j = 0.5 \mu\text{m}$ ; (b)  $X_j = 1 \mu\text{m}$  et (c)  $X_j = 12 \mu\text{m}$ .**

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

Pour étudier l'influence du dopage de l'émetteur sur les différents paramètres de la cellule solaire bifaciale, lorsqu'elle est éclairée par une seule face (*i.e.* par la face avant ou par la face arrière), nous avons varié le niveau du dopage et nous avons fixé ceux de la base et de la BSF. Les résultats obtenus, par notre code de calcul sont montrés par le tableau ci-dessous.

Nd ( $m^{-3}$ )	$10^{22}$	$10^{23}$	$10^{24}$	$10^{25}$
$I_{cc}$ (m A/cm <sup>2</sup> ) Éclairement par : la face avant / la face arrière	34.6/30.92	34.25/30.92	34.22/30.92	34.21/30.92
$V_{co}$ (Volt) Éclairement par : la face avant / la face arrière	0.7156/0.7116	0.7152/0.7116	0.7152/0.7116	0.7152/0.7116
La puissance max (m watt/cm <sup>2</sup> ) Éclairement par : la face avant / la face arrière	19.98/17.74	19.96/17.74	19.74/17.74	19.74/17.74
Le rendement (%) Éclairement par : la face avant / la face arrière	19.98/17.73	19.76/17.74	19.74/17.74	19.74/17.74

**Tableau 4 : Représentation des résultats du programme, sous MATLAB, montrant l'effet de dopage de l'émetteur sur les caractéristiques de la cellule solaire bifaciale.**

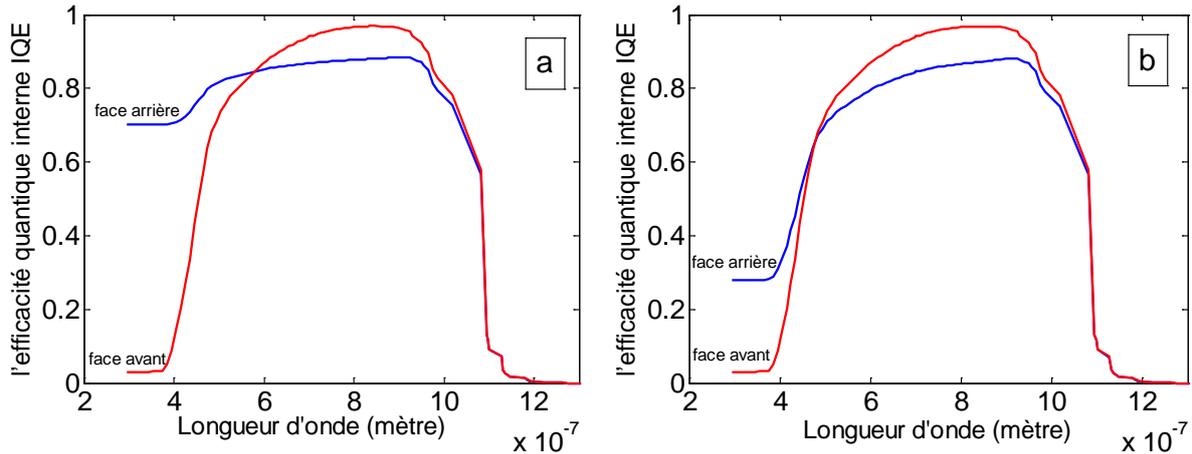
Le tableau 4 montre que, pour un émetteur d'épaisseur mince de l'ordre de  $0.5 \mu m$ , le dopage de la couche émettrice n'a aucune influence sur les caractéristiques de sorties de la cellule solaire. Cela revient à la faible épaisseur de l'émetteur. De ce fait, l'utilisation d'un niveau de dopage de l'émetteur assez élevé ne dégrade pas les performances de la cellule, car les longueurs de diffusion des porteurs minoritaires sont supérieures à l'épaisseur de l'émetteur. Il faut noter que le dopage de l'émetteur est limité par le courant de saturation à la valeur  $< 2 \times 10^{25} (m^{-3})$  [9]. On peut choisir la valeur optimale de dopage de l'émetteur égale à  $3 \times 10^{24} (m^{-3})$ .

### 3.2. Influence des paramètres de la base sur IQE, $V_{co}$ , $I_{cc}$ et $\eta$

Après avoir optimisé les paramètres de l'émetteur, nous avons étudié l'influence des paramètres de la base (le dopage, la vitesse de recombinaison et la géométrie) sur les caractéristiques de sortie de la photopile bifaciale. Nous rappelons que les paramètres de l'émetteur sont maintenus fixes c'est-à-dire égales aux valeurs optimales retenues en §3.1 ( $X_j=0.5 \mu m, Nd = 3 \times 10^{24} (m^{-3})$ ).

### 3.2.1. L'influence de la vitesse de recombinaison des électrons à la face arrière ( $S_n$ )

La figure 30 représente l'influence de la vitesse de recombinaison  $S_n$  (des porteurs minoritaires), à la face arrière, sur l'efficacité quantique interne (IQE) de la cellule solaire bifaciale.

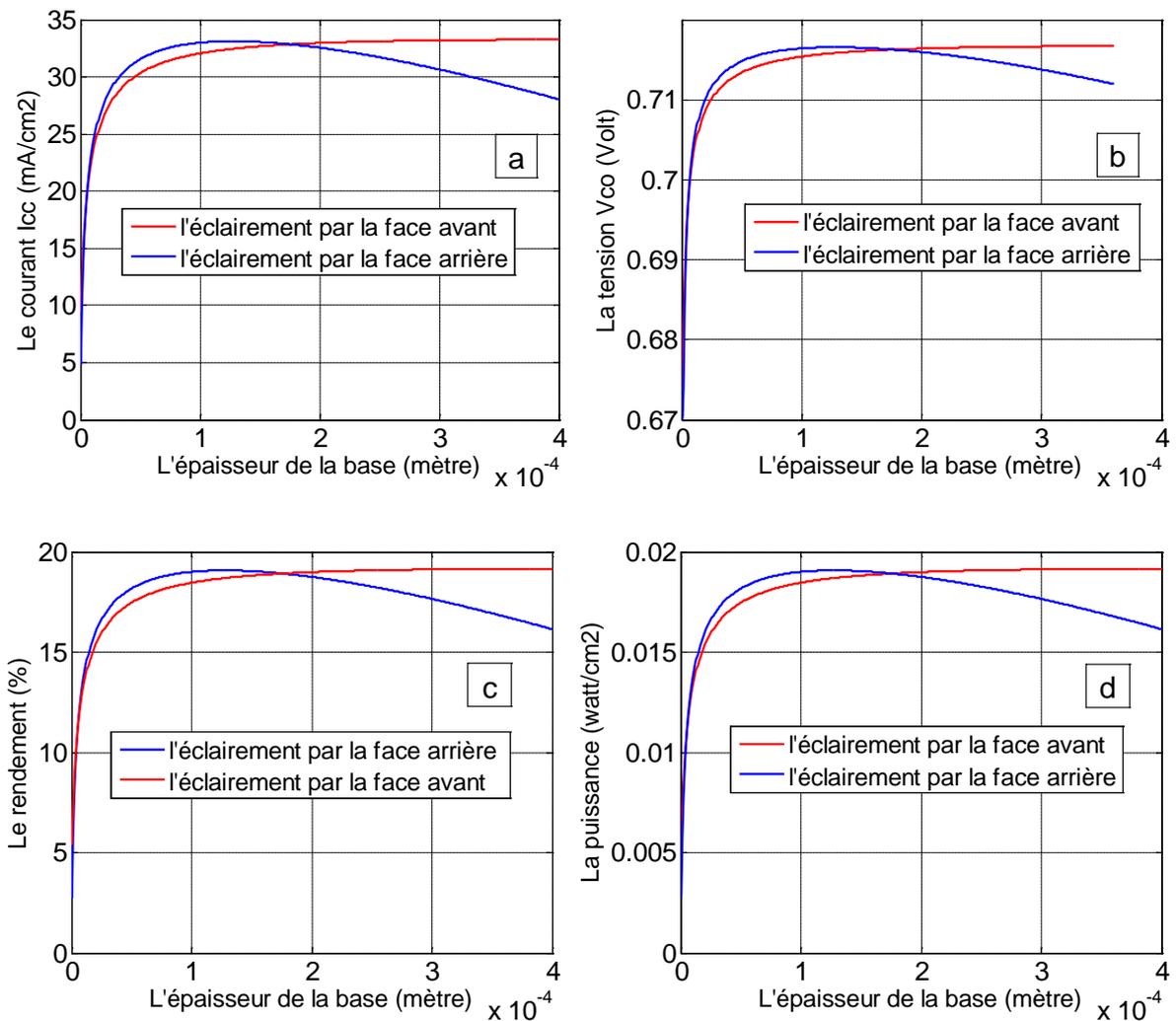


**Figure 30 : Résultats du programme, sous MATLAB, montrant l'influence de  $S_n$  sur l'efficacité quantique interne IQE de la cellule solaire bifaciale, (a)  $S_n = 10^5 \frac{cm}{s}$  ; (b)  $S_n = 10^4 \frac{cm}{s}$  .**

La Figures 30 montre que la vitesse de recombinaison (des porteurs minoritaires)  $S_n$  influe inversement sur l'efficacité quantique interne (IQE). En effet, quand la cellule est éclairée par la face arrière, on s'aperçoit que IQE augmente lorsque  $S_n$  diminue. Cependant, il est clair que, la vitesse de recombinaison  $S_n$  n'influe pas sur l'efficacité quantique interne lorsque la cellule est illuminée par la face avant.

### 3.2.2. L'influence de l'épaisseur de la base

L'optimisation de la géométrie de la base est un facteur important qui permet de définir les meilleures caractéristiques de la photopile. Pour cette raison nous avons varié l'épaisseur de la base et nous avons fixé les épaisseurs de l'émetteur (à la valeur optimisée) et de la BSF. La figure 31 représente les variations des caractéristiques de la cellule solaire bifaciale en fonction de ce paramètre (l'épaisseur de la base).



**Figure 31 : Résultats du programme, sous MATLAB, montrant l'influence de l'épaisseur de la base sur : (a) Le courant de court-circuit; (b) La tension de circuit ouvert ; (c) Le rendement de conversion et (d) La puissance délivrée.**

Les figures 31 (a), (b), (c) et (d) montrent les variations du courant de court circuit, la tension du circuit ouvert, le rendement et la puissance respectivement. Elles montrent, pour un éclairage par la face avant, que tous ces paramètres augmentent avec l'augmentation de l'épaisseur de la base (jusqu'à  $200 \mu\text{m}$ ). Ceci peut être expliqué par l'élévation du nombre de porteurs de charges générés dans cette région, car les photons qui ont des énergies importantes seront absorbés près de la surface de la cellule pour des faibles longueurs d'ondes. Cependant, les photons qui ont des énergies moins importantes (longueur d'onde plus importante) seront absorbés loin de la surface (*i.e.* en volume ou dans la profondeur de la base). Ainsi, plus

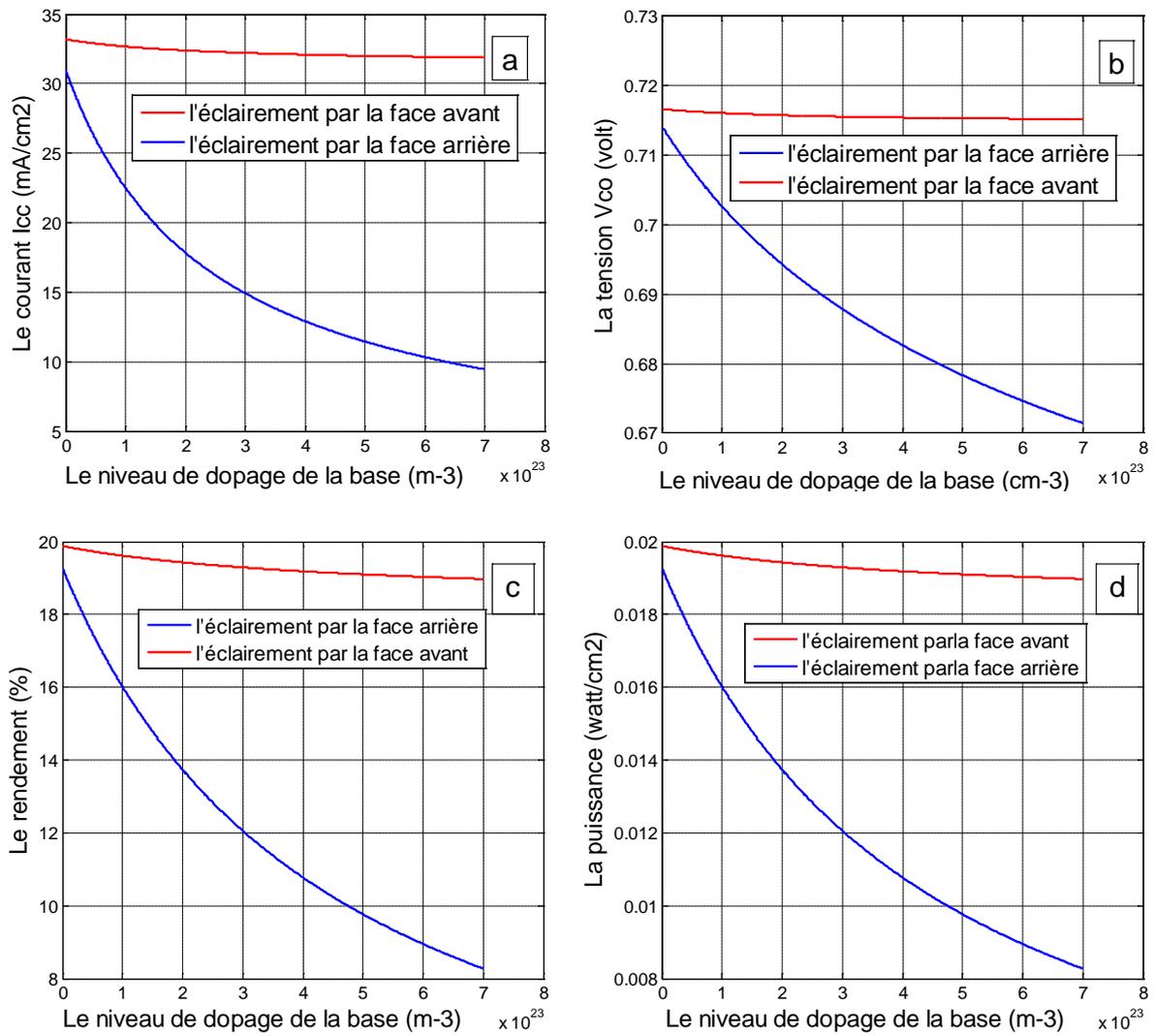
l'épaisseur de la base est épaisse plus on aura la possibilité de générer des porteurs qui participent à l'amélioration du photocourant. Cependant, quand la cellule est éclairée par la face arrière, le courant de court circuit, la tension du circuit ouvert, le rendement et la puissance augmentent avec des valeurs croissantes de l'épaisseur de la base pour atteindre un sommet aux environs de  $188 \mu\text{m}$ . Au delà de cette frontière, les paramètres en question ( $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ ,  $\eta$ , P) diminuent avec l'augmentation de l'épaisseur. Ceci est dû à la diminution du nombre des photons pénétrant la base d'où la dégradation des performances des paramètres de la cellule.

D'autre part, on note que la tension du circuit ouvert est liée au courant de court circuit par une relation logarithmique. C'est la raison pour laquelle l'augmentation de la tension du circuit ouvert sera moins rapide que celle du courant de court circuit [6].

D'après les résultats obtenus par la figure 31, la valeur optimale qu'on peut choisir pour l'épaisseur de la base est  $188 \mu\text{m}$  (indépendamment de l'éclairage de la photopile).

### 3.2.3. L'influence de $N_a$ (le dopage de la base)

Pour étudier l'influence du dopage de la base, sur les différents paramètres de la cellule solaire bifaciale, nous avons fixé celui de l'émetteur (à la valeur optimisée) et de la BSF (à  $8 \times 10^{25} \text{m}^{-3}$ ). Les figures 32 (d) et 32 (c) représentent la variation de la puissance et du rendement, respectivement. Elles montrent, pour un éclairage par la face avant, que le rendement de conversion et la puissance délivrée diminuent avec l'augmentation des valeurs du dopage de la base. Cela revient à la diminution du courant de court circuit et de la tension du circuit ouvert, comme il est révélé par les figures 32 (a) et 32 (b). En effet, la figure 32 (a) montre que le courant de court circuit diminue légèrement par rapport aux valeurs croissantes du dopage de la base. Ceci est dû à la diminution de la durée de vie des porteurs minoritaires (électrons) [9]. Quand la tension du circuit ouvert (figure 32(b)), elle reste presque invariable. Par contre, quand la photopile est éclairée par la face arrière, tous les paramètres de la cellule diminuent rapidement en fonction des valeurs croissantes du niveau de dopage de la base.



**Figure 32 : Résultats du programme, sous MATLAB, montrant l'influence de dopage de la base sur : (a) Le courant de court-circuit; (b) La tension de circuit ouvert ; (c) Le rendement de conversion et (d) La puissance délivrée.**

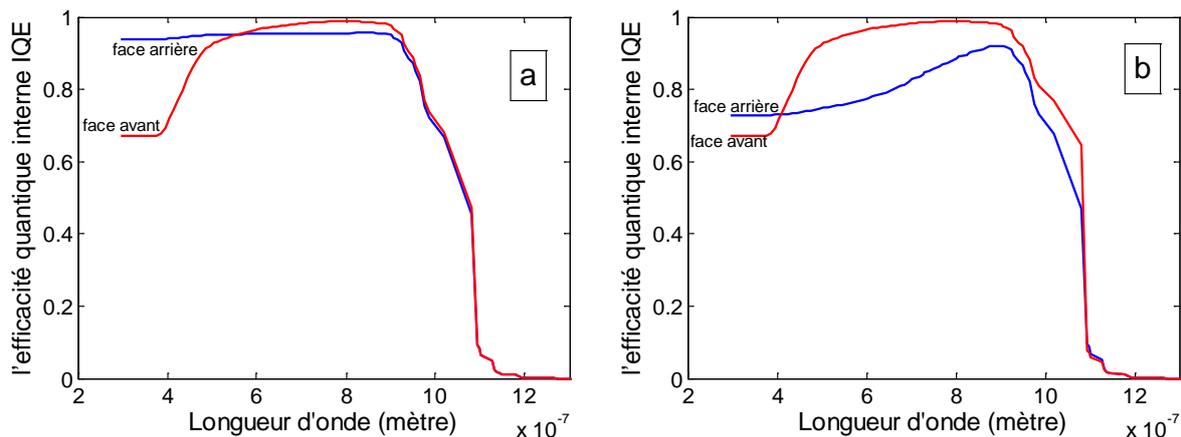
### 3.3 Influence des paramètres de la BSF (la zone p+) sur IQE, $V_{co}$ , $I_{cc}$ , $\eta$

Pour savoir optimiser les paramètres technologiques de la couche BSF, nous avons fixé les paramètres de la base et de l'émetteur (égales aux valeurs optimisés) et nous avons varié les paramètres de la couche fortement dopée BSF. Nous rappelons que tous les autres

paramètres de la cellule sont maintenus fixes c'est-à-dire égales aux valeurs données dans le troisième chapitre.

### 3.3.1. L'influence de l'épaisseur de la zone p+ ( $W_{bsf}$ )

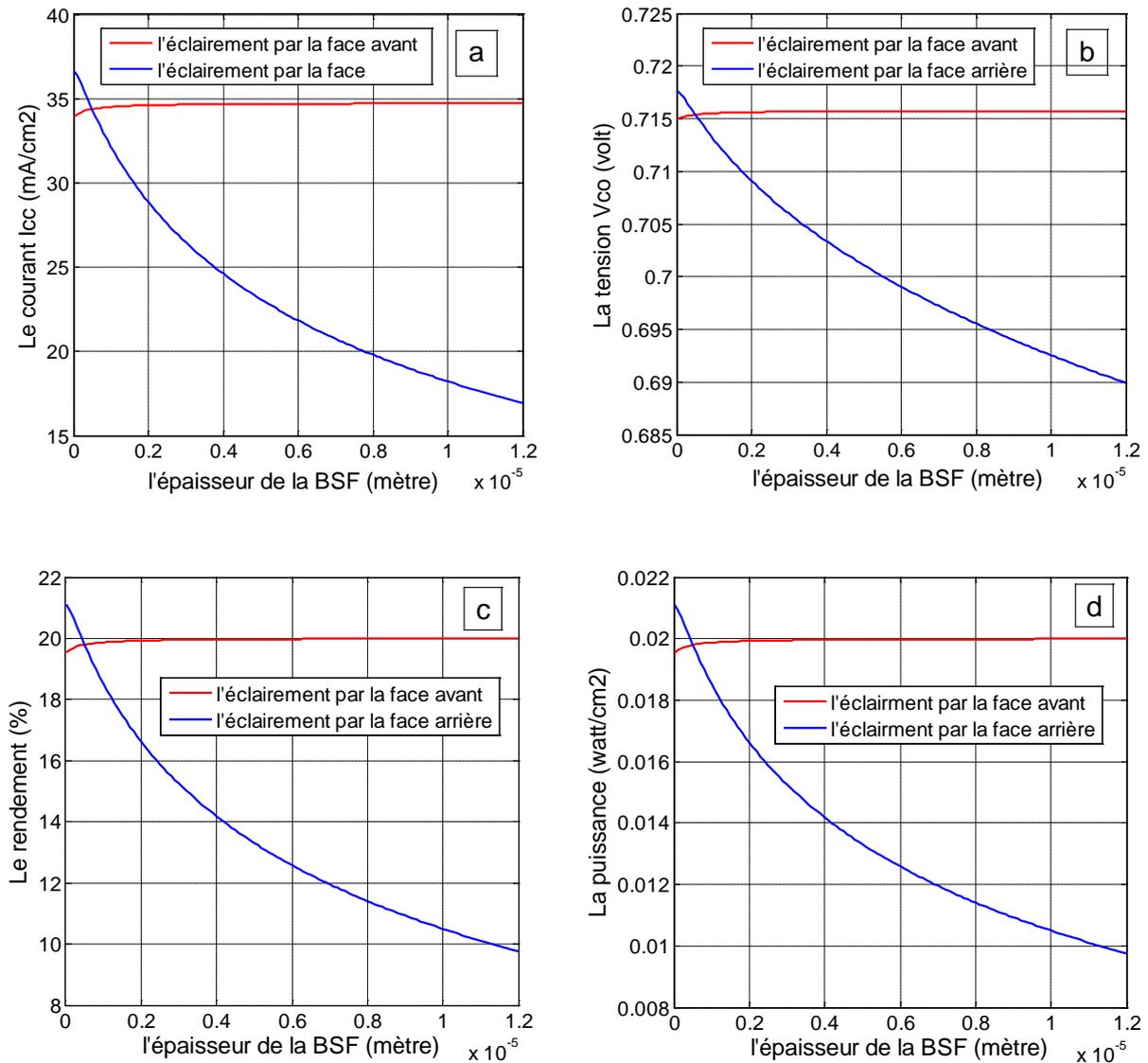
L'épaisseur de la BSF est un paramètre extrêmement influant sur l'efficacité quantique interne (IQE) des cellules solaires munies d'une couche BSF. La figure 33 représente les variations de cette efficacité par rapport à l'épaisseur de la BSF. Elle montre que  $IQE$  varie légèrement en fonction des valeurs croissantes de l'épaisseur de la BSF (quand la cellule est éclairée par la face avant). On note que ce résultat est en accord avec la littérature [19]. Par contre, lorsque la cellule est éclairée par la face arrière, le paramètre  $IQE$  varie inversement par rapport à l'épaisseur de la BSF. On outre, on note que, plus la zone de la BSF est mince plus la photopile est efficace.



**Figure 33 : Résultats du programme, sous MATLAB, montrant l'influence de  $W_{bsf}$  sur l'efficacité quantique interne IQE de la cellule solaire bifaciale, (a)  $W_{bsf}=0.7\mu\text{m}$ ; (b)  $W_{bsf}=12\mu\text{m}$ .**

Les figures 34 (a), (b), (c) et (d) montrent les variations du courant de court circuit, de la tension de circuit ouvert, du rendement et de la puissance respectivement (en fonction de l'épaisseur de la BSF). Elles confirment les résultats obtenus et représentés par la figure 33. Par ailleurs, on remarque que tous ces paramètres augmentent légèrement en fonction des valeurs croissantes de  $W_{bsf}$  (lorsque la cellule est éclairée par la face avant). Par contre,

lorsque la photopile est éclairée par la face arrière, il est clair que ces paramètres diminuent rapidement en fonction de valeurs croissantes de l'épaisseur de la couche fortement dopée  $P^+$ .

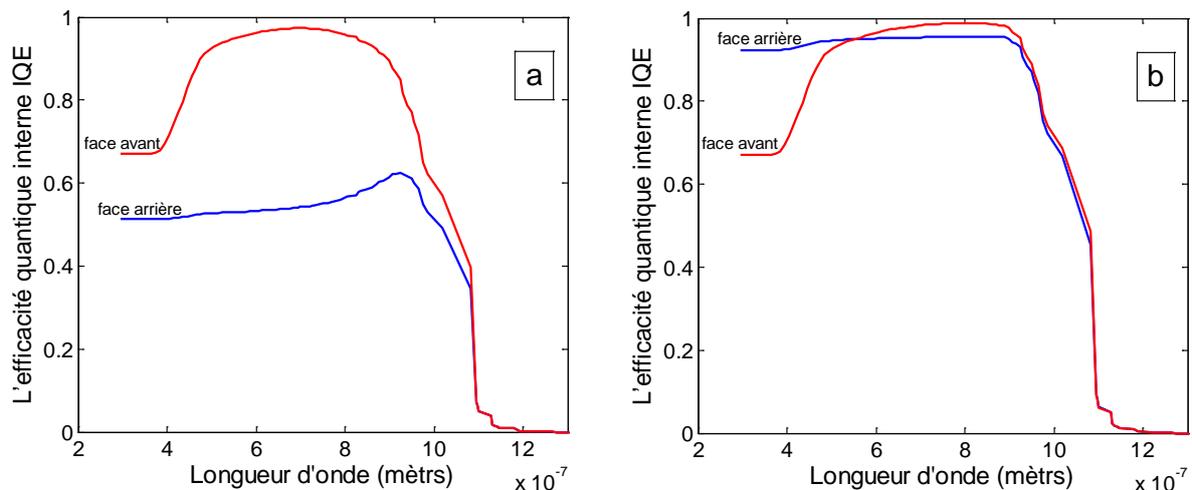


**Figure 34: Résultats du programme, sous MATLAB, montrant l'influence de l'épaisseur de la BSF sur : (a) Le courant de court-circuit; (b) La tension de circuit ouvert ; (c) Le rendement de conversion et (d) La puissance délivrée.**

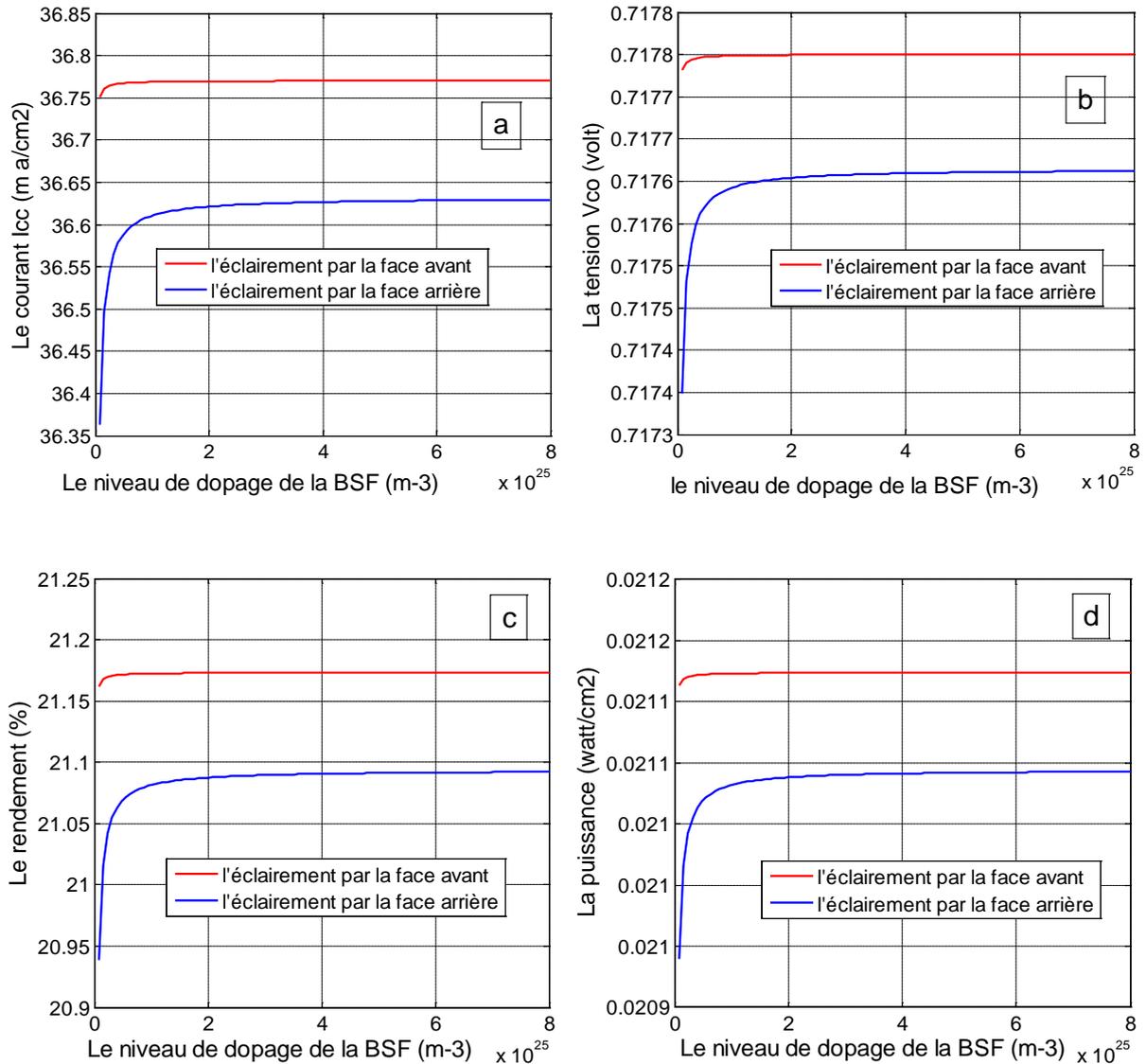
### 3.3.2. L'influence du niveau de dopage de la zone p+ ( $N_{bsf}$ )

La figure 35 représente les variations de l'efficacité quantique interne IQE de la cellule en fonction du niveau de dopage de la BSF. Sur cette figure, il est évident que la photopile est plus performante pour le niveau du dopage est élevé. Ceci est en accord avec les résultats de la figure 36. En effet, cette dernière que les paramètres de la cellule solaire bifaciale sont meilleurs pour les dopages élevés de la BSF. Ce comportement est valable aussi bien pour l'éclairement par la face avant que pour l'éclairement par la face arrière. Ceci peut être expliqué par la réduction de la vitesse de recombinaison effective ( $S_{eff}$ ) qui est elle même contrôlée par le niveau de dopage de BSF [7].

Notons enfin que la valeur optimale du dopage du BSF (correspondent au maximum d'efficacité de la cellule solaire bifaciale) est trouvée égale à  $5 * 10^{25} m^{-3}$ .



**Figure 35 : Résultats du programme, sous MATLAB, montrant l'influence de  $N_{bsf}$  sur l'efficacité quantique interne IQE de la cellule solaire bifaciale, (a)  $N_{bsf} = 8 \times 10^{21} m^{-3}$ ; (b)  $N_{bsf} = 8 \times 10^{25} m^{-3}$ .**



**Figure 36 : Résultats du programme, sous MATLAB, montrant l'influence de dopage de la BSF sur : (a) Le courant de court-circuit; (b) La tension de circuit ouvert ; (c) Le rendement de conversion et (d) La puissance délivrée.**

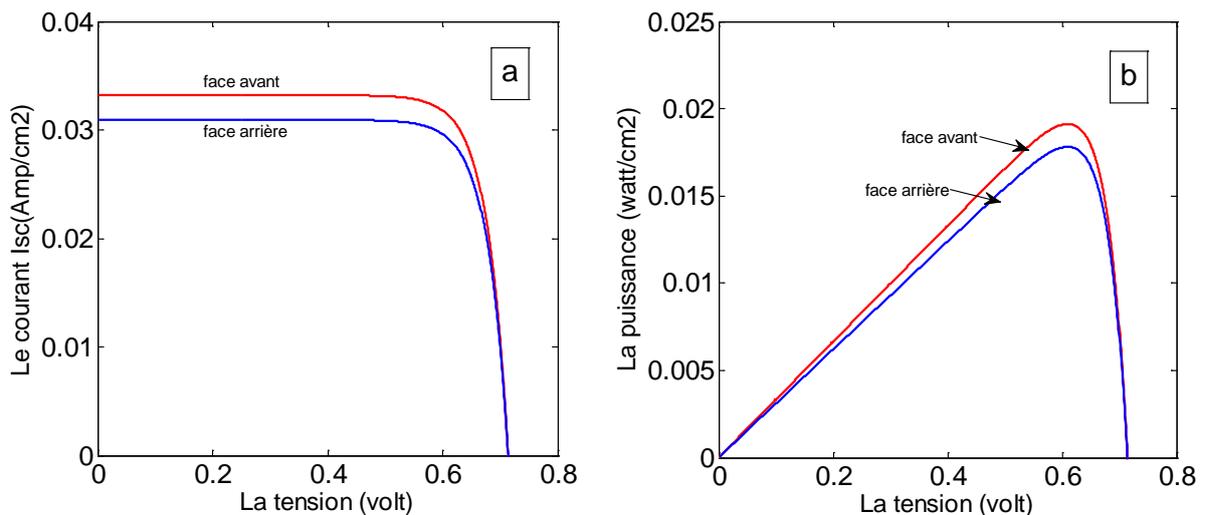
#### 4. Caractéristiques I(v) et P(v) de la cellule solaire bifaciale

L'étude de l'influence de différents paramètres nous a permis d'optimiser les paramètres physiques et géométriques de la cellule solaire bifaciale BSF à base du silicium monocristallin. Les valeurs optimales retenues dans le cadre de calcul de ce travail sont regroupées sur le tableau suivant:

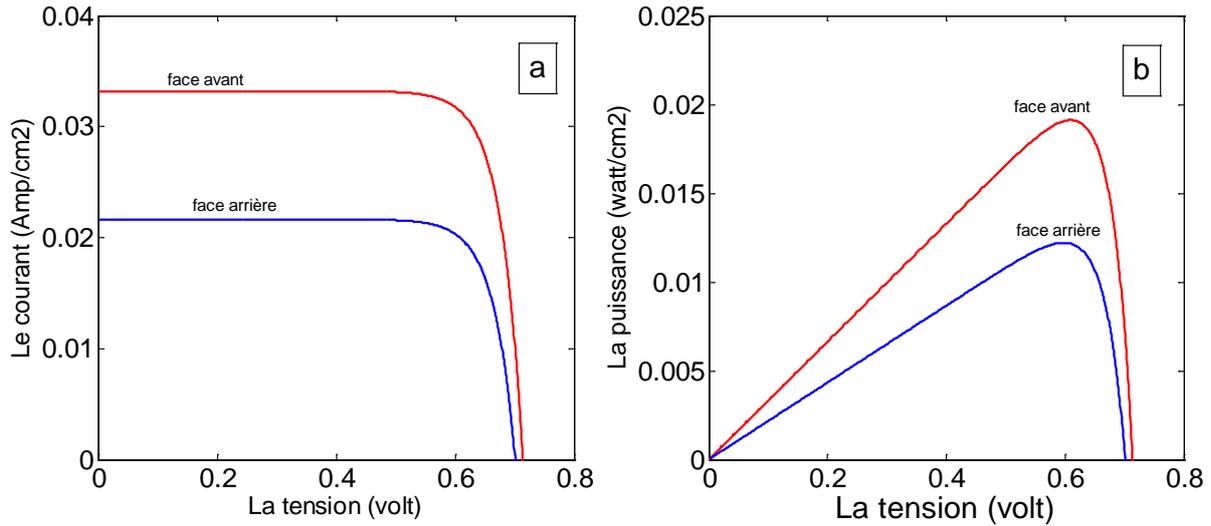
L'épaisseur de l'émetteur ( $\mu m$ )	0.5
Le dopage de l'émetteur ( $m^{-3}$ )	$3 * 10^{24}$
L'épaisseur de la base ( $\mu m$ )	188
Le dopage de la base ( $m^{-3}$ )	$7 * 10^{20}$
L'épaisseur du BSF ( $\mu m$ )	0.7
Le dopage du BSF ( $m^{-3}$ )	$5 * 10^{25}$

**Tableau 5 : Paramètres physiques et géométriques optimisés, de la cellule solaire bifaciale BSF, obtenus par notre code de calcul.**

Après avoir étudié l'influence de différents paramètres sur les caractéristiques de la cellule solaire bifaciale, nous avons jugé nécessaire de prévoir le comportement de la photopile bifaciale dans les conditions optimales mentionnées dans le tableau 5. Sur la figure 37, on représente les caractéristiques I(V) et P(V) de la cellule solaire bifaciale lorsqu'elle est éclairée uniquement par une seule face (c'est-à-dire par la face avant puis par la face arrière). Quand à la figure 38, elle correspond aux caractéristiques I(V) et P(V) prévues, par notre programme, si la photopile est éclairée par les deux faces avant et arrière simultanément. En d'autre terme, sur la figure 38, on prend en considération les éclairagements direct et par albédo.



**Figure 37 : Résultats du programme, sous MATLAB, représentent les caractéristiques de la cellule BSF par une seule face (i.e. avant ou arrière): (a) I(V) ; (b) P(V).**



**Figure 38 : Résultats du programme, sous MATLAB, représentent les caractéristiques de la cellule BSF éclairée par les deux faces en même temps (*i.e.* simultanément): (a) I(V) ; (b) P(V).**

Sur le tableau ci-dessous, on représente les résultats essentiels obtenus par le programme de modélisation que nous avons élaboré :

paramètres	P (Watt/cm <sup>2</sup> )	Le rendement (%)	I <sub>cc</sub> (A/cm <sup>2</sup> )
La face avant : éclairage simultané	0.0198	19.836	0.0344
La face arrière : éclairage simultané	0.0149	21.37	0.0233
Eclairage par la face avant seulement	0.0198	19.836	0.0344
Eclairage par la face arrière seulement	0.0192	19.230	0.0333

**Tableau 6 : résumé des résultats obtenus par notre code de calcul.**

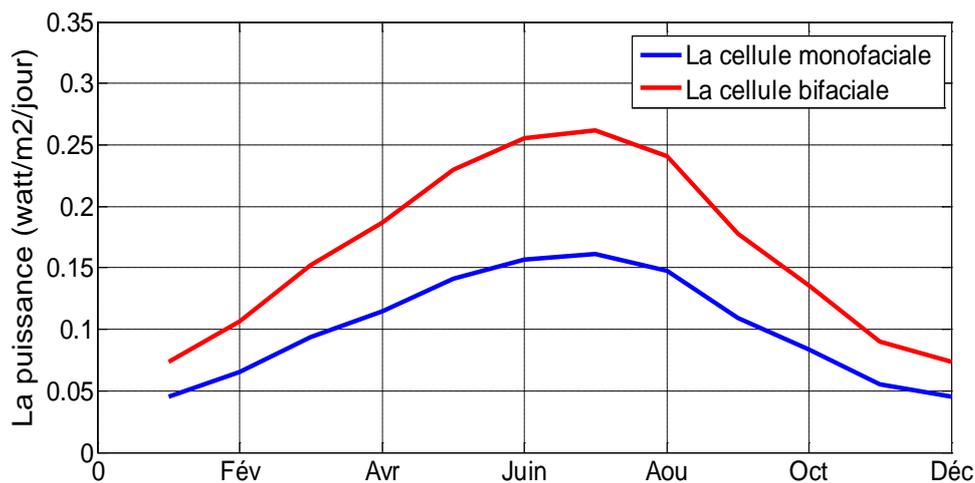
D'après les Figures 37 et 38 et le tableau 6, nous déduisons que la cellule bifaciale est plus efficace lorsqu'elle est illuminée par la face avant. Ceci est dû à la durée de vie (des porteurs minoritaires) dans la région *P* (durée de vie des électrons) qui est très importante que celle dans la région *N* (durée de vie des trous), En effet, cette dernière permet l'augmentation

de la recombinaison des porteurs minoritaires à la surface du composant et par conséquent la dégradation des performances de la cellule [32].

## 5. Prédiction du comportement des cellules monofaciale et bifaciale pour le site de Constantine

Sur la figure 39, on représente l'évolution de la puissance journalière, délivrée par les deux cellules; la cellule avec BSF (cellule monofaciale) et la cellule bifaciale.

La figure 39 est obtenue par le programme sous MATLAB, élaboré et exécuté pour le site de Constantine pendant toute l'année. L'idée est de comparer des deux cellules pouvant être l'élément de base de tous types de panneaux solaires.



**Figure 39 : Prédiction de la puissance délivrée par la cellule BSF et par la cellule bifaciale.**

Nous pouvons constater que la cellule solaire bifaciale est mieux adaptée, pour le site de Constantine, que la cellule monofaciale (la cellule avec BSF). Ceci est dû à l'absorption de la lumière par les deux faces de la photopile. En effet, l'éclairement par la face arrière permet l'augmentation du courant photogénéré. Ce dernier contribue à l'amélioration du photocourant total par un taux de 67%. On doit noter que la plus grande puissance délivrée est obtenue pendant la saison d'été (i-e la période la plus ensoleillée).

## **6. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons utilisé le langage de programmation MATLAB pour modéliser et optimiser les performances de la cellule solaire bifaciale BSF, en l'occurrence les paramètres physiques et géométriques donnant les meilleures caractéristiques de sorties. Puis nous avons tenté de prévoir la puissance délivrée par notre photopile optimisée, dans les conditions climatiques de la ville de Constantine.

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.

### Conclusion générale

Actuellement l'industrie photovoltaïque envisage particulièrement l'utilisation du silicium cristallin. En effet, les cellules solaires à base de silicium monocristallin présentent un rendement de conversion relativement élevé. Cependant, ce type de matériaux est très coûteux et le défi majeur est l'amélioration du rapport puissance/coûts. Ainsi, l'orientation actuelle des recherches et développements, est basée sur la réalisation de nouvelles structures de conversion photovoltaïques à haut rendement et à bas coût.

Le cadre de l'étude menée dans ce mémoire était la mise au point d'un code de calcul élaboré par un outil de programmation MATLAB qui effectue l'optimisation des paramètres technologiques et géométriques d'une cellule solaire à base de silicium monocristallin. Deux cas particuliers étaient étudiés, à savoir : la cellule conventionnelle avec BSF et la cellule solaire bifaciale BSF.

Nous avons étudié en premier lieu la cellule photovoltaïque conventionnelle et ses caractéristiques principales. Par la suite, nous avons présenté la cellule BSF, sa structure et l'intérêt de la création du champ arrière (BSF : Back Surface Field). Puis, nous avons présenté la cellule solaire bifaciale BSF, sa structure et l'intérêt des illuminations directe et par albédo. Grace au programme que nous avons élaboré, nous avons réussi de déterminer les meilleurs paramètres des cellules solaires prise en compte, à savoir:

- L'émetteur :  $Nd = 3 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ , l'épaisseur  $We = 0.5 \mu\text{m}$
- La base :  $Na = 7 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ , l'épaisseur  $Wb = 188 \mu\text{m}$
- La BSF :  $Nbsf = 8 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ , l'épaisseur  $Wbsf = 0.7 \mu\text{m}$

En utilisant ces paramètres optimaux, nous avons pu prévoir le comportement de la cellule solaire bifaciale pour le site de Constantine. Le travail de modélisation que nous avons mené a montré une augmentation en puissance et en photo courant jusqu'à 67%.

Pour conclure, nous admettons que les objectives que nous avons visés pour ce travail, ont été atteints, c'est-à-dire l'amélioration du rendement de conversion et de la puissance délivrée.

Comme perspective, l'application de la nanotechnologie, dans le domaine photovoltaïque avec, la structure multicouches pourra contribuer à une amélioration significative du rendement de conversion des photopiles.

### BIBLIOGRAPHIE

- [1] **N. Oleksiy**, «*Simulation, Fabrication Et Analyse De Cellules Photovoltaïques A Contacts Arrières Interdigités*». Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. France, (2005).
- [2] **A. Nouar**, «*Etude Et Modélisation Des Différents Modèles De La Cellule Photovoltaïque Etablis Sur Base De Valeurs Nominales*». Thèse de Magister, Université de Constantine. Algérie, (2010).
- [3] **H. Moualkia**, «*Simulation D'une Cellule Solaire En Couches Minces A Base d'Oxyde De Zinc*». Thèse de Magister, Université de Constantine. Algérie, (2010).
- [4] **B. Benoit**, «*Réalisation Et Caractérisation De Cellules Photovoltaïques Organiques Obtenues Par Dépôt Physique*». Thèse de Doctorat, Université de Limoge, France, (2004).
- [5] **M. Madani**, «*Réalisation Des Couches Antireflets Dans Les Cellules Solaires a Couches Minces*». Thèse de Magister, Abou-Bakr Belkaid De Tlemcen. Algérie, (2006).
- [6] **R. Alain**, «*Convertisseurs photovoltaïques*». Site Web : [http://www.cythelia.fr/images/file/Convertisseurs%20photovoltaïques\\_Alain%20Ricau\\_d\\_Nov-07.pdf](http://www.cythelia.fr/images/file/Convertisseurs%20photovoltaïques_Alain%20Ricau_d_Nov-07.pdf).
- [7] **A. Helmaoui, A. Belghachi et B. Bellali**, «*Amélioration Du Rendement De Collecte Et La Tension  $V_{co}$  D'une Cellule Solaire Avec Couche BSF*». Revue des Energies Renouvelables CER 07 Oujda, (2007) 153-156.
- [8] **R. Merahil, R. Chenni2, M. Houbes**, «*Modélisation et Simulation d'un Module PV par MatLab*». 10ème Séminaire International sur la Physique Energétique, *Journal of Scientific Research N° 0 vol. 1*, (2010).
- [9] **G. Adolf, K. Joachim, V. Bernhard**, «*Crystalline Silicon Solar Cells*». Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Freiburg, Germany, (1998).
- [10] **J. Barnard** «*Energie Solaire Calcul Et Optimisation* ». Ellipses édition, Paris, France, 2004.
- [11] **P. Stéphane**, «*Nouvelles Architectures Distribuées De Gestion Et De Conversion De L'énergie Pour Les Applications Photovoltaïques*». Thèse de Doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, France, (2009).
- [12] **A. Zerga, A. Oulebsir, M. Zitouni-Amini**, «*Modélisation, Simulation et Optimisation des Performances d'une Cellule Solaire Conventiennelle au Silicium*». Rev. Energ. Ren. Valorisation (1999) 279-285.
- [13] **S. N. Singh and P. K. Singh** «*Modeling of Minority -Carrier Surface Recombination Velocity at Low-High Junction of an n+-p-p+ Silicon Diode*». IEEE transactions on electron devices. vol. 38. no. 2, (1991).

## Bibliographie

---

- [14] **J. Hovel, P. De Souza, D. Marshall**, «*Comparison Of Back Interface Structure Alternatives Using Two Sided Optical Excitation*». IEEE. 978-1-4244-5892-9 (2010), 3173-3178.
- [15] **A. Mouhoub**, «*Procédés Technologiques Alternatifs de Réalisation des Photopiles Solaires au Silicium Cristallin*». Rev. Energ. Ren. Vol. 4 (2001), 11-22.
- [16] **B.B. Nadia**, «*Propriétés physiques des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et Simulation des cellules solaires à base de Si et SiGe*». Mémoire de Magister, Université Abou-Bakr Belkaïd de Tlemcen, Algérie (2006).
- [17] **Z. Benmohamed**, «*Caractérisation et Analyse Des Cellules Solaires A Base De Silicium Multicristallin*» Thèse de Doctorat, Université de Constantine, Algérie (2009).
- [18] **M .A. Green**, «*Crystalline Silicon Solar Cells*». Ch.4 Green ed MA2.doc, University of New South Wales Australia (2001).
- [19] **H. Salhi, H. Samet, M. Ben Amar**, «*Effect of BSF Layer On The Performance of A Monocrystalline Solar Cell*». International Renewable Energy Congress, Sousse, Tunisia, (2010).
- [20] Site web : [www.Docstoc.com/docs/The Early History of Bifacial Solar cells-Andr](http://www.Docstoc.com/docs/The_Early_History_of_Bifacial_Solar_cells-Andr)
- [21] **Kränzlet R. Kopecek**, «*Bifacial Solar cells On Multi-crystalline Silicon With Boron Bsf And Open Rear Contact*» IEEE, International Solar Energy Research Center, Allemagne. (2006) 968-971.
- [22] **T. Uematsu. Tsutsui**, «*Development of Bifacial Pv Cells For New Applications of Flat-Plate Modules*» Solar Energy Materials & Solar Cells 75 (2003) 557–566 .
- [23] Site web: [www.GAMMASOLAR.COM](http://www.GAMMASOLAR.COM).
- [24] **Lev Kreinin**, «*A Novel Method For Determining Bulk Diffusion Length In Bifacial Silicon Solar Cells*» IEEE, Université de Jerusalem, (2000) 248-251.
- [25] Site web: [www.french.alibaba.com/product-gs/156x156-monocrystalline-solar-cell-4watt](http://www.french.alibaba.com/product-gs/156x156-monocrystalline-solar-cell-4watt)
- [26] **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 ICRESO-07 Tlemcen, Algérie, (2007), 301 – 306.
- [27] **S.M. Sze**, «*Physics of semi-conductors devices*», Wiley – Inter science publication, Jhon Wiley & Sons, Inc, 1981.p.722.
- [28] Site web : [www.el-cat.com/silicon-properties.htm](http://www.el-cat.com/silicon-properties.htm)
- [29] **A. Kränz, R. Kopecek**, «*Bifacial Solar Cells On Multi-Crystalline Silicon With Boron BSF And Open Rear Contact* », IEEE, université de Konstanz , Allemagne. (2006).

## Bibliographie

---

- [30] **S. BRIGAND** « *Les Principes de l'énergie solaire photovoltaïque* », Site Web: [www.editionsdumoniteur.com](http://www.editionsdumoniteur.com)
- [31] Site Web: [www.PVGIS](http://www.PVGIS.com) (c) European Communities.com
- [32] **A. Moehlecke, I. Zanesco**, « *PRACTICAL HIGH EFFICIENCY BIFACIAL SOLAR CELLS* », IEEE, Instituto de Energia Solar, Espagne,(1994), 1663-1666.
- [33] Site Web: <http://oer.avu.org/bitstream/handle/123456789/224/Methodes%20Numeriques>

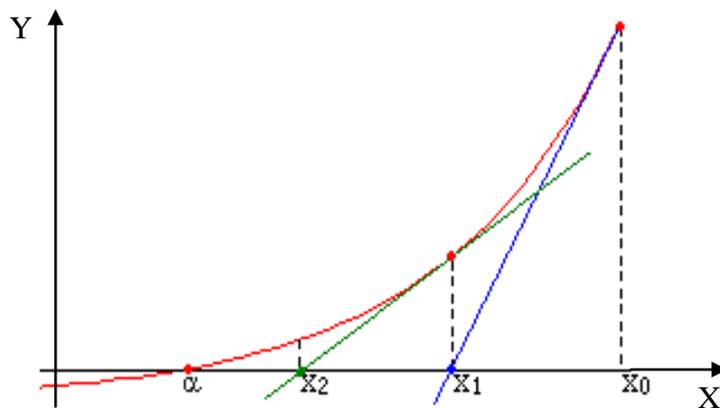
## Annexe

### La méthode de Newton Raphson

La méthode des tangentes porte le nom des mathématiciens anglais Isaac Newton et Joseph Raphson, qui furent les premiers à la décrire pour l'appliquer à la recherche des zéros d'une équation non linéaire.

La méthode de Newton-Raphson est de loin la méthode numérique la plus utilisée pour approximer les fonctions. Cette méthode suppose que la fonction  $f$  est dérivable dans l'entourage de la fonction et que la dérivée, peu importe où dans l'entourage, n'est pas zéro [33].

En supposant que  $x_0$  est un point suffisamment près de la racine de la fonction, le graphe de la fonction  $y = f(x)$  est approximé par la tangente de la courbe au point [33].



**Figure. Illustration de la méthode de Newton [33].**

L'équation de la tangente à partir du point  $(x_0, f(x_0))$  dans la courbe  $y = f(x)$  est:

$$y \cong f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0)$$

Cette tangente coupe l'axe des  $x$  au point  $x_1$  dont la valeur est:

$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)}$$

Le point  $x_1$  en général a de bonnes chances d'être plus proche du vrai zéro de  $f$  que le point  $x_0$  précédent. La valeur  $x_1$  est alors admise comme une nouvelle valeur de la fonction.

Le point  $(x_1, f(x_1))$  peut être utilisé comme un nouveau point servant à dessiner une tangente [33].

Son intersection avec l'axe des  $x$  en  $x_2$ , est décrite comme suit:

$$x_2 = x_1 - \frac{f(x_1)}{f'(x_1)}$$

$x_2$  est également admise comme une nouvelle approximation de la racine. Ce procédé peut être répété maintes fois, et mène à la méthode d'itération donnée par la formule de Newton-Raphson [33]:

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)}$$

On note que la méthode de Newton Raphson converge très rapidement vers la racine [33].

## Nomenclature

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

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

- $D_p$ : Coefficient de diffusion des trous ( $cm^2 /s$ ).
- 
- $p_{n0}$  : densités des porteurs minoritaires (trous) dans l'émetteur à l'équilibre ( $m^{-3}$ ).
- $p_n$  : densité des porteurs minoritaires dans l'émetteur ( $m^{-3}$ ).
- $\tau_p$  : la durée de vie des trous (s).
- $D_p$  : Coefficient de diffusion des trous ( $m^2 /V.s$ )
- $L_p$  : longueur de diffusion des trous (m).
- $S_p$  : La vitesse de recombinaison des trous à la face avant (m/s).
- $N_a$ : concentration d'accepteurs dans la région P ( $m^{-3}$ ).
- $n_p$  : la concentration d'électrons dans la région P ( $m^{-3}$ ).
- $S$ : la surface photo-active de la cellule solaire (m).
- $ZCE$  : zone de charge d'espace.
- EQE : le rendement quantique externe.
- $n$  : facteur d'idéalité de la diode.
- EQI : le rendement quantique interne.

# Modélisation par MATLAB de la cellule solaire bifaciale à base de silicium monocristallin

## Résumé

Actuellement l'industrie photovoltaïque envisage particulièrement l'utilisation du silicium cristallin. En effet, les cellules solaires à base de silicium monocristallin présentent un rendement de conversion relativement élevé. Cependant, ce type de matériaux est très coûteux et le défi majeur est l'amélioration du rapport puissance/coûts. Ainsi, l'orientation actuelle des recherches et développements, est basée sur la réalisation de nouvelles structures de conversion photovoltaïques à haut rendement et à bas coût.

Dans ce Mémoire de Magister, intitulé « Modélisation par MATLAB de la cellule solaire bifaciale à base de silicium monocristallin », à l'objectif principal d'améliorer la puissance et le rendement de conversion des cellules solaires. Nous avons élaboré un programme informatique, sous MATLAB, qui effectue l'optimisation des paramètres technologiques et géométriques d'une cellule solaire à base de silicium monocristallin. Trois types de photopiles étaient étudiés, à savoir : conventionnelle, conventionnelle avec un champ électrique arrière (Back Surface Field, BSF) et bifaciale avec BSF (où la première servait de référence). Nous avons réussi de déterminer les meilleurs paramètres physiques et géométriques qui assurent les meilleures caractéristiques des cellules en question.

Les paramètres optimaux dans le cas de la cellule bifaciale sont les suivants:

- L'émetteur :  $Nd = 3 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ , l'épaisseur  $Xj = 0.5 \mu\text{m}$
- La base :  $Na = 7 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ , l'épaisseur  $Wb = 188 \mu\text{m}$
- La BSF :  $Nbsf = 5 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ , l'épaisseur  $Wbsf = 0.7 \mu\text{m}$

En utilisant ces paramètres optimaux, nous avons pu prévoir le comportement de la cellule solaire bifaciale pour le site de Constantine. Grâce à ce travail, nous avons montré que la cellule bifaciale était la plus performante et permettait une augmentation en puissance jusqu'à 67%.

**Mots clés** – cellule solaire bifaciale, modélisation, optimisation.

# Modeling by MATLAB of single-crystal silicon bifacial solar cells

## *Abstract*

Currently photovoltaic industry considers the uses of crystalline silicon. Indeed, the single-crystal silicon solar cells present a relatively a high conversion efficiency. However, this type of materials is very expensive and the major challenge is the improvement of the ratio power/costs. Thus, the current orientation of research and developments, are based on the realization of new photovoltaic structures with high efficiency and low costs. This dissertation entitled "Modeling by MATLAB of single-crystal silicon bifacial solar cells" is aimed to improve the power and the conversion efficiency of solar cells. We elaborated a program, under MATLAB, which carries out the optimization of the technological and geometrical parameters of single-crystal silicon solar cell. To model three types of photovoltaic cells: conventional (as reference), conventional with a Back Surface Field (BSF) and bifacial with BSF. Thanks to our program, we succeeded to determine the physical and geometrical parameters corresponding to the best characteristics of the cells.

For instance, the optimal parameters found for the bifacial cell are as follows:

- the emitter :  $Nd = 3 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ , thickness,  $Xj = 0.5 \mu\text{m}$
- the base :  $Na = 7 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ , thickness,  $Wb = 188 \mu\text{m}$
- the BSF :  $Nbsf = 5 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ , thickness,  $Wbsf = 0.7 \mu\text{m}$

By using these optimal parameters, we could envisage the behavior of the bifacial solar cell for the site of Constantine. According to our results, we found that the bifacial cell was best compound since it allowed a power increase of 67%.

**Key words** – bifacial solar cell, modeling, optimization.

## نموذجة خلية شمسية ثنائية الواجهة من السليكون أحادي البلورة باستعمال MATLAB

### ملخص

في هذه المذكرة نتناول نموذجة خلية شمسية ثنائية الواجهة من السليكون أحادي البلورة باستعمال MATLAB. هدفنا الرئيسي هو الزيادة في الاستطاعة و رفع المردود لهذه الخلايا الشمسية. من اجل ذلك و باستعمال برنامج حساب في MATLAB قمنا بنموذجة ثلاثة أصناف من الخلايا:

عادية, عادية مع BSF وثنائية الواجهة مع BSF . بعد المحاكاة بهذا البرنامج استطعنا تحديد أفضل الوسائط الفيزيائية و الهندسية التي تضمن أحسن خصائص خروج الخلايا موضوع البحث وهي كالتالي:

- الباعث :  $Nd = 3 \times 10^{24} m^{-3}$ , السمك  $Xj = 0.5 \mu m$
- القاعدة :  $Na = 7 \times 10^{20} m^{-3}$ , السمك  $Wb = 188 \mu m$
- La BSF :  $Nbsf = 5 \times 10^{25} m^{-3}$ , السمك  $Wbsf = 0.7 \mu m$

و من خلال هذا العمل تبين لنا أن الخلية ثنائية الواجهة كانت الأحسن مردودا و تسمح برفع الاستطاعة بقيمة تقدر 67 %

**الكلمات الرئيسية :** خلية شمسية ثنائية الواجهة, نموذجة, التحسين.

## ***Résumé***

Ce Mémoire de Magister intitulé « Modélisation par MATLAB de la cellule solaire bifaciale à base de silicium monocristallin », à l'objectif principal d'améliorer la puissance et le rendement de conversion des cellules solaires. Nous avons élaboré un programme informatique, sous MATLAB, pour modéliser trois types de photopiles : conventionnelle, conventionnelle avec un champ électrique arrière (Back Surface Field, BSF) et bifaciale avec BSF (où la première servait de référence). Nous avons réussi de déterminer les meilleurs paramètres physiques et géométriques qui assurent les meilleures caractéristiques des cellules en question.

Grace à ce travail, nous avons montré que la cellule bifaciale était la plus performante et permettait une augmentation en puissance jusqu'à 67%.

**Mots clés** – cellule solaire bifaciale, modélisation, optimisation.

## ***Abstract***

This dissertation entitled "Modeling by MATLAB of single-crystal silicon bifacial solar cells" is aimed to improve the power and the conversion efficiency of solar cells. We elaborated a program, under MATLAB, to model three types of photovoltaic cells: conventional (as reference), conventional with a Back Surface Field (BSF) and bifacial with BSF. Thanks to our program, we succeeded to determine the physical and geometrical parameters corresponding to the best characteristics of the cells.

According to our results, we found that the bifacial cell was best compound since it allowed a power increase of 67%.

**Key words** – bifacial solar cell, modeling, optimization.

## ***ملخص***

في هذه المذكرة نتناول نمودجة خلية شمسية ثنائية الواجهة من السليكون أحادي البلورة باستعمال MATLAB. هدفنا الرئيسي هو الزيادة في الاستطاعة و رفع المردود لهذه الخلايا الشمسية. من اجل ذلك و باستعمال برنامج حساب في MATLAB قمنا بنمودجة ثلاثة أصناف من الخلايا: عادية، عادية مع BSF وثنائية الواجهة مع BSF. بعد المحاكاة بهذا البرنامج استطعنا تحديد أفضل الوسائط الفيزيائية و الهندسية التي تضمن أحسن خصائص خروج الخلايا موضوع البحث و من خلال هذا العمل تبين لنا أن الخلية ثنائية الواجهة كانت الأحسن مردودا و تسمح برفع الاستطاعة بقيمة تقدر 67%.  
**الكلمات الرئيسية :** خلية شمسية ثنائية الواجهة, نمودجة, التحسين.