



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

Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem

Faculté des Sciences Exactes et Informatique

Département de Physique

Domaine : Sciences de la Matière

Filière : Physique

Spécialité : Modélisation et Caractérisation des Matériaux

**Projet de Fin d'Etudes**

**Pour l'obtention du Master en Physique**

Présenté par :

**DJELIL Noura**

Sujet :

**« Optimisation des paramètres photovoltaïques de cellules solaires bifaciales au silicium à base de type N et leur comparaison avec celles de type P »**

Soutenu le **22/05/2017**

**Devant le jury composé de :**

Mme RAHAL Wassila Leila,  
M. BOUATTOU *Bezine*,  
M. BEGHADAD Mohammed,

M.C.B., Université de Mostaganem,  
M.A.A., Université de Mostaganem,  
M.C.A., Université de Mostaganem,

Présidente,  
Examineur,  
Encadreur.

Année universitaire : 2016-2017

## *Remerciements*

- *Nous adressons nos remerciements premièrement à **ALLAH** tout puissant pour la santé et la patience, qu'il nous a donnés durant tous ces longues années d'études et de recherche.*
  
- *Je tiens remercier Monsieur Mohammed BEGHADAD, Maître de Conférences classe A, mon encadreur, pour m'avoir guidée lors de l'élaboration de ce travail, pour son aide, ses orientations, ses conseils et ses encouragements.*
  
- *Je tiens également à remercier chaleureusement Madame Wassila Leila RAHAL à l'université de Mostaganem pour l'honneur qu'elle me fait en présidant le jury de mon mémoire.*
  
- *J'exprime ma profonde reconnaissance à Monsieur Bezine BOUATTOU pour l'honneur qu'il me fait d'être examinateur de ce mémoire.*
  
- *Que toutes les personnes qui ont contribué à ma formation soient remerciées pour tous les efforts qu'ils ont fournis.*
  
- *Enfin, je suis particulièrement reconnaissante à mes parents, mes sœurs, mes frères surtout mon frère Abdelkader et Mokhtar fils de ma sœur, et toute ma famille qui n'ont ménagé aucun effort pour me soutenir.*

## *Dédicaces*

***Je dédie ce modeste travail :***

*A mes très chers parents, pour leurs sacrifices, et qui n'ont jamais cessé de m'encourager que Dieu me les garde.*

*A mes très chers frères.*

*A mes très chères sœurs.*

*A tout ma famille.*

*Aux étudiants de la promotion 2<sup>ème</sup> année Master physique 2016/2017 et à tous mes amis sans exception.*

## Table des matières

<b>Introduction générale</b> .....	1
------------------------------------	---

### *Chapitre I : L'ensoleillement*

<b>I.1 Le soleil</b> .....	4
<b>I.2 Le spectre solaire</b> .....	4
a    Le rayonnement direct .....	4
b    Le rayonnement diffus .....	5
c    L'Albédo .....	5
d    Le rayonnement global .....	5
<b>I.3 La masse d'air</b> .....	6
<b>I.4 Zone utile du spectre solaire</b> .....	8

### *Chapitre II : Physique des cellules solaires*

<b>II.1 Les semi-conducteurs</b> .....	10
<b>II.2 Les types de semi-conducteurs</b> .....	11
II.2.1 Les semi-conducteurs intrinsèques .....	11
II.2.2 Les semi-conducteurs extrinsèques .....	12
II.2.2.1 Les semi-conducteurs de type N .....	13
II.2.2.2 Les semi-conducteurs de type P .....	14
<b>II.3 La génération et la recombinaison des paires électron-trou</b> .....	15
II.3.1 La génération .....	15
II.3.2 La recombinaison .....	16
a    La recombinaison radiative ou « bande à bande » .....	17
b    La recombinaisons RSH (Read-Schokley-Hall) .....	17
c    La recombinaisons Auger .....	18
d    La recombinaisons en surface (superficielle) .....	18

<b>II.4 Le courant dans les semi-conducteurs .....</b>	<b>18</b>
<b>II.5 La jonction P-N .....</b>	<b>20</b>
<b>II.6 La jonction polarisée par une tension continue .....</b>	<b>23</b>
a) La polarisation directe .....	23
b) La polarisation inverse .....	24
<b>II.7 La description du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque</b>	<b>25</b>
<b>II.8 La modélisation électrique .....</b>	<b>26</b>
<b>II.9 Les paramètres caractéristiques d'une cellule photovoltaïque .....</b>	<b>28</b>
II.9.1 Le courant de court-circuit .....	29
II.9.2 La tension de circuit ouvert .....	29
II.9.3 La puissance maximale .....	30
II.9.4 Le facteur de forme .....	30
II.9.5 Le rendement de conversion d'énergie .....	30
<b>II.10 La réponse spectrale et rendements quantiques de la cellule photovoltaïque .....</b>	<b>30</b>
<b>II.11 Les pertes fondamentales limitant le rendement .....</b>	<b>32</b>
II.11.1 Les pertes extrinsèques .....	32
II.11.2 Les pertes intrinsèques .....	32
<b>II.12 L'influence de la résistance série .....</b>	<b>33</b>
<b>II.13 L'influence de la résistance shunt .....</b>	<b>34</b>
<b>II.14 Association des cellules .....</b>	<b>35</b>
II.14.1 Association en série .....	35
II.14.2 Association en parallèle .....	35
<b><i>Chapitre III : La cellule solaire bifaciale.</i></b>	
<b>III.1 Historique .....</b>	<b>37</b>

<b>III.2 Structure et principe de fonctionnement de la cellule bifaciale ...</b>	38
III.2.1 Structure de la cellule solaire bifaciale BSF .....	38
III.2.2 Principe de fonctionnement de la cellule bifaciale BSF .....	39
<b>III.3 Caractéristiques électriques de la cellule solaire bifaciale BSF .....</b>	39
Le courant de court-circuit $I_{cc}$ .....	39
La tension de circuit ouvert $V_{co}$ .....	40
Le facteur de forme FF .....	40
Le rendement de conversion de l'énergie $\eta$ .....	40
La puissance délivrée par la cellule bifaciale .....	41
<b>III.4 Modélisation de la cellule solaire bifaciale BSF éclairée par sa face avant .....</b>	41
III.4.1 Le Photo-courant généré par une cellule solaire bifaciale BSF .....	42
III.4.1.1 Le photo-courant généré dans la région quasi-neutre P (la base) .....	42
III.4.1.2 Le photo-courant dans la région quasi-neutre $N^+$ (l'émetteur).....	44
III.4.1.3 Le photo-courant dans la région de charge d'espace ZCE .....	45
III.4.1.4 Le photo-courant dans la région fortement dopée $P^+$ .....	46
<b>III.5 Modélisation électrique de la cellule solaire bifaciale BSF éclairée par sa face arrière .....</b>	46
III.5.1.L'efficacité quantique interne (IQE) .....	46
III.5.2 La vitesse de recombinaison effective à la face arrière . .....	47
III.5.3 Le courant de court-circuit $I_{cc}$ .....	47

### **III.6.Procédés standards de réalisation d'une cellule photovoltaïque bifaciale avec un BSF** .....

a) Traitement de la surface des plaquettes et texturation .....	48
b) Formation de la jonction N <sup>+</sup> /p ou de la structure N <sup>+</sup> /P/P <sup>+</sup> .....	48
c) Isolation de la jonction parasite (PP <sup>+</sup> ) .....	48
d) Passivation de la surface .....	48
e) Métallisation : Dépôt de la grille collectrice et du contact de base .....	48
e.1) Dépôt de la grille collectrice .....	49
e.2) Dépôt du contact arrière .....	49
f) Dépôt de la couche antireflet .....	49

## ***Chapitre IV : Résultats de simulation et discussions***

### **IV.1 Le logiciel PC1D** .....

### **IV.2 Le fonctionnement du PC1D** .....

IV.2.1 Les paramètres du dispositif .....	54
IV.2.2 Les paramètres des régions .....	55
IV.2.3 Les paramètres d'excitation .....	55
IV.2.4 Les résultats .....	55

### **IV.3 Etude et optimisation par simulation de la cellule solaire** .....

#### **IV.3.1 Paramètres de la simulation** .....

#### **IV.3.2 Etude et validation des résultats de la cellule bifaciale de substrat de type P** .....

##### **IV.3.2.1 Effet du dopage de l'émetteur (N<sup>+</sup>)** .....

1. Etude du courant de court-circuit I <sub>cc</sub> .....	57
2. Etude de la tension de circuit ouvert V <sub>co</sub> .....	57
3. Etude du facteur de forme FF .....	58
4. Etude du rendement $\eta$ .....	58
5. Etude la bifacialité B .....	59

IV.3.2.2 Effet de l'épaisseur de la base .....	60
1. Etude du Rendement du front de la cellule.....	60
2. Etude du Rendement de l'arrière de la cellule ..	61
3. Etude la bifacialité de la cellule .....	62
IV.3.2.3 Effet de la vitesse de recombinaison couplée à la variation de l'épaisseur de la base .....	63
1. Etude du Rendement du front de la cellule .....	63
2. Etude du Rendement de l'arrière de la cellule...	64
3. Etude la bifacialité de la cellule .....	65
IV.3.3 Etude la cellule bifaciale de type N .....	66
IV.3.3.1 Effet du dopage de l'émetteur (P+) .....	82
1. Etude du courant de court-circuit $I_{cc}$ .....	68
2. Etude de la tension de circuit ouvert $V_{co}$ .....	68
3. Etude du facteur de forme FF .....	69
4. Etude du rendement $\eta$ .....	69
5. Etude la bifacialité B .....	70
IV.3.3.2 Effet de l'épaisseur de la base .....	70
1. Etude du Rendement du front de la cellule .....	70
2. Etude du Rendement de l'arrière de la cellule ..	71
3. Etude la bifacialité de la cellule .....	72
IV.3.3.3 Effet de la vitesse de recombinaison couplée à la variation de l'épaisseur de la base .....	73
1. Etude du Rendement du front de la cellule .....	73
2. Etude du Rendement de l'arrière de la cellule ..	74
3. Etude la bifacialité de la cellule .....	75
<b>Conclusion générale</b> .....	77
<b>Bibliographie</b> .....	81

## Introduction générale :

L'énergie est un des principaux défis du XXI<sup>ème</sup> siècle. Jusqu'ici les sources d'énergie que l'on emploie le plus régulièrement nous paraissaient infinies, inépuisables et sans conséquences. Heureusement, depuis une vingtaine d'années, ces idées sont remises en cause et même révolues. Aujourd'hui, un intérêt grandissant est porté aux ressources énergétiques renouvelables. Parmi ces ressources, la lumière du soleil et sa conversion en électricité par effet photovoltaïque. C'est une des voies énergétiques les plus séduisantes pour la production de l'énergie.

Le développement des énergies renouvelables apparaît comme une technologie prometteuse et répond à l'exigence d'utiliser des énergies compatibles avec l'environnement. Notamment, l'énergie solaire par son abondance, son aspect inépuisable sur le globe terrestre, offre une solution véritable au problème fondamental de l'humanité qui est l'approvisionnement en énergie.

L'énergie photovoltaïque, reposant sur la transformation directe des rayons lumineux provenant du soleil en électricité, est la plus jeune des énergies renouvelables. La première cellule solaire a été fabriquée aux Etats Unis par les chercheurs des laboratoires Bells vers la fin des années 50, et a été destinée à des applications spatiales. Cette cellule était à base de silicium.

Le matériau le plus utilisé et industrialisé depuis 50 ans pour la fabrication de cellules photovoltaïques est le silicium cristallin (80 % de la production mondiale). Ce dernier présente en effet de nombreux avantages (abondance sur terre, bas prix, non toxicité, dopage facile...).

Actuellement, les cellules produites industriellement atteignent des rendements de conversion de 16 % en moyenne pour des cellules conventionnelles au silicium polycristallin et de 18% pour des cellules au silicium monocristallin. Au laboratoire, les meilleurs rendements atteints sont de l'ordre de 24 % avec du silicium monocristallin mais avec des technologies très avancées (Cellules PERC, PERL, etc...).

L'objectif de ce travail est l'étude d'une cellule solaire bifaciale ( $N^+/P/P^+$ ) à émetteur de type  $N^+$ , de substrat de type P et d'une couche de type  $P^+$  sur la face arrière et dont les paramètres utilisés sont prises de la littérature. L'étude est faite à l'aide du logiciel PC1D. La première partie est de valider les résultats en comparaison avec ceux trouvés pour la cellule prise en référence. Les paramètres concernés en fonction du dopage de l'émetteur et pour les deux faces (front et arrière) sont le courant de circuit de la cellule  $I_{cc}$ , sa tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , son facteur de forme FF et enfin son rendement énergétique  $\eta$ . Nous avons également l'intention de confronter les résultats obtenus avec ceux trouvés dans le papier en question.

Nous nous intéressons ensuite à l'optimisation des paramètres ( $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ , FF et  $\eta$ ) de la cellule en fonction la variation d'autres paramètres tels que l'épaisseur de la cellule, la durée de vie des porteurs dans le substrat, le dopage de la couche arrière et finalement les vitesses de recombinaison des faces avant et arrière.

Ensuite, nous avons étudié une autre cellule bifaciale mais en inversant les types des 3 régions (émetteur, base et région arrière) ( $P^+/N/N^+$ ) tout en gardant les mêmes paramètres géométriques, électriques et optiques de la cellule référentielle ( $N^+/P/P^+$ ) pour chacune des couches.

Pour mener à bien ce mémoire de Master, nous avons structuré ce travail en quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous définissons la notion de rayonnement solaire et expliquons l'absorption de ce dernier par un semi-conducteur.
- Le deuxième chapitre concerne également des notions fondamentales sur les semi-conducteurs et la jonction P-N, le principe de la conversion photovoltaïque, ainsi que les paramètres de sortie caractérisant une cellule solaire conventionnelle.
- Le troisième chapitre fait l'objet de l'étude théorique et de la modélisation d'une structure de la cellule solaire bifaciale, qui collecte l'illumination solaire par ses deux faces avant et arrière.
- Dans le quatrième et dernier chapitre, nous décrivons le logiciel de simulation PC1D et son utilisation pour effectuer les calculs correspondants. Enfin nous présentons les résultats obtenus dans cette étude pour les cellules solaires bifaciales ( $N^+/P/P^+$ ) et ( $P^+/N/N^+$ ) sous les conditions standards (spectre AM1.5, éclairement de  $1000\text{W/m}^2$  et  $T=25\text{ °C}$ ), avec leur comparaison globale.

Nous présentons ce travail par une conclusion générale résumant le sujet et l'essentiel des résultats obtenus.

# **Chapitre I :**

# **L'ensoleillement**

## **I.1. Le soleil :**

Le soleil émet constamment de l'énergie depuis plus de cinq milliards d'années. Le rayonnement solaire qui atteint la terre peut être utilisé pour produire de la chaleur, de l'eau chaude et de l'électricité pour les maisons.

Pour exploiter l'énergie du soleil de manière efficace, il est nécessaire de comprendre sa forme et sa nature. Le soleil est une sphère de matière gazeuse intensément chaude avec un diamètre de  $1,39.10^9$  m.

Approximativement, la masse du soleil est constituée de 74 % d'hydrogène et de 25 % d'hélium.

La température à sa surface avoisine 5500 K. L'énergie radiative du soleil provient d'une réaction de fusion nucléaire dans le soleil. A chaque seconde, environ  $6.10^{11}$  kg d'hydrogène sont convertis en hélium avec un défaut de masse de  $4.10^3$  kg. La masse perdue est convertie, selon la relation d'Einstein ( $E = mc^2$ ), en énergie d'une valeur de  $4.10^{20}$  J. Cette énergie est émise, à l'origine, comme une radiation électromagnétique dans la région allant de l'ultraviolet à l'infrarouge [ $0.2 \mu\text{m}$ ,  $3 \mu\text{m}$ ]. Toutes les radiations électromagnétiques se composent d'un élément essentiel qui s'appelle le photon ([Abderrezek, 2015](#)).

La terre reçoit environ  $7,45.10^{17}$  kWh d'énergie solaire par année sous forme de lumière.

## **I.2. Le spectre solaire :**

Le rayonnement solaire reçu au sommet de l'atmosphère, dans un plan perpendiculaire aux rayons solaires et pour une distance terre-soleil égale à sa valeur moyenne, est appelée la constante solaire et vaut  $1367 \text{ W/m}^2$ . Lorsque ce rayonnement traverse l'atmosphère pour atteindre la surface terrestre, il est fortement atténué en raison des phénomènes d'absorption et de diffusion par les différents constituants.

L'air sec est composé de 78% d'azote, de 21% d'oxygène, de 1% d'argon et de 0,033 de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), avec de la vapeur d'eau dans la troposphère et une mince couche dont le rôle est si important dans l'absorption des rayons ultraviolets les plus durs. On rajoute à cela les aérosols qui sont des particules d'origine naturelle, tels que le sable, la suie, les cristaux de glace ou les poussières volcaniques, soit d'origine artificielle telle que celles produites par l'industrie l'automobile ou le chauffage.

L'atmosphère modifie le spectre du rayonnement solaire à travers les processus d'absorption par les différents gaz, la diffusion par les molécules d'air, les aérosols et les nuages, on distingue plusieurs composantes ([Meziani, 2010](#)) :

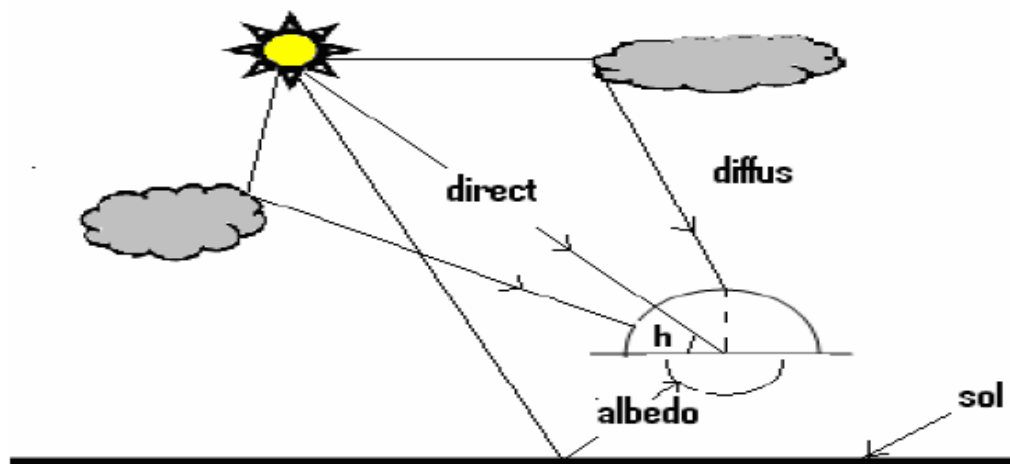
- a. Le rayonnement direct :** Rayonnement direct est le rayonnement reçu directement du soleil. Il peut être mesuré par pyréliomètre, sachant qu'il est instrument destiné à mesurer l'irradiance solaire directe. Il est généralement constitué par une thermopile peinte en noir, donc très absorbante.

**b. Le rayonnement diffus :** le Rayonnement diffus résulte de la diffraction de la lumière par les molécules atmosphériques, il parvient de toute la voûte céleste. Le Rayonnement diffus est le Rayonnement émis par des obstacles (nuages, bâtiment) et provient de toutes les directions.

**c. L'albédo ou le rayonnement réfléchi:** c'est la fraction d'un rayonnement incident diffusée ou réfléchi par un obstacle. Ce terme étant généralement réservé au sol et aux nuages, c'est la valeur moyenne de leur réflecteur pour le rayonnement considéré, et pour tous les angles d'incidences possibles.

$$L' \text{albédo (Albe)} = \frac{\text{énergie réfléchi}}{\text{énergie reçue}}$$

**d. Le rayonnement global :** le rayonnement global au sol est donc fonction de l'épaisseur de l'atmosphère traversée par les rayons lumineux au cours de la journée. Il se décompose en rayonnement direct et rayonnement diffus comme le montre la figure suivante ([Hilali, 2012](#)) :



**Figure I-1 :** composantes du rayonnement solaire au sol.

Les photons, grains de lumière qui composent ce rayonnement, sont porteurs d'une énergie qui est reliée à leur fréquence (longueur d'onde) par la relation :

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (\text{I-1})$$

$h$  : la constante de Planck ( $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  J.s).

$c$  : la vitesse de lumière ( $c = 3 \cdot 10^8$  m/s).

$\nu$  : la fréquence de la longueur d'onde associée au photon ( $s^{-1}$ ).

$\lambda$  : la longueur d'onde correspondante à  $\nu$  (m)

$$\text{Tel que : } E(\text{J}) = \frac{h(\text{J.s}) \cdot c(\text{m.s}^{-1})}{\lambda(\text{m})} \rightarrow E(\text{eV}) = \frac{h(\text{eV.s}) \cdot c(\mu\text{m.s}^{-1})}{\lambda(\mu\text{m})}$$

Avec :  $1\text{ev}=1,602.10^{-19}\text{ J}$ .

$$h=6,62.10^{-34} \cdot \frac{1}{1,602.10^{-19}} \text{ (eV.s)}, c=3.10^8.10^6=3.10^{14} \text{ (\mu m.s}^{-1}\text{)}.$$

$$E \text{ (eV)}=\frac{6,62.10^{-34}}{1,602.10^{-19}} \rightarrow E \text{ (eV)}=\frac{1,24}{\lambda(\mu\text{m})}$$

La relation reliant la bande interdite et la longueur d'onde est :

$$\lambda \text{ (\mu m)}=\frac{1,24}{Eg(\text{eV})} \quad (\text{I-2})$$

Exemple : à  $T=300\text{ °K}$ ,  $Eg(\text{Si})=1,12\text{ eV}$  correspond à  $\lambda(\text{Si})=1,1\text{ }\mu\text{m}$ .

### I.3. La masse d'air :

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10  $\mu\text{m}$ . L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi pour AM0.

- 9 % dans la bande des ultraviolets ( $< 0.4\text{ }\mu\text{m}$ )
- 47 % dans la bande visible ( $0.4\text{ à }0.8\text{ }\mu\text{m}$ )
- 44 % dans la bande des infrarouges ( $>0.8\text{ }\mu\text{m}$ )

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de 1,367  $\text{KW/m}^2$  avec un spectre centré au voisinage de  $\lambda=0.48\text{ }\mu\text{m}$ , A la surface du sol la densité de puissance n'est plus que de 0,9  $\text{kW/m}^2$ , en raison de l'absorption essentielle par l'ozone, l'eau et le gaz carbonique.

La puissance incidente par unité de surface est l'air correspondante au nombre d'air masse convenable. Ce nombre est défini par [\(Helali, 2012\)](#) :

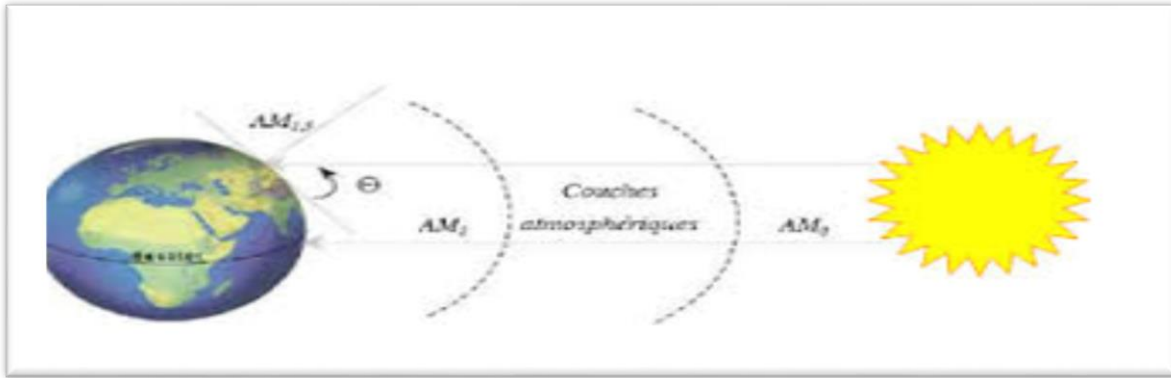
$$m = \frac{p}{1013} \frac{1}{\sinh} \exp\left(-\frac{z}{7,8}\right) \quad (\text{I.3})$$

Où :

$p$  : une pression différente de 1013 mbar.

$z$  : altitude exprimé en km.

$h=\theta$  : distance zénithale du soleil par rapport à l'horizontale, exprimée en degrés.



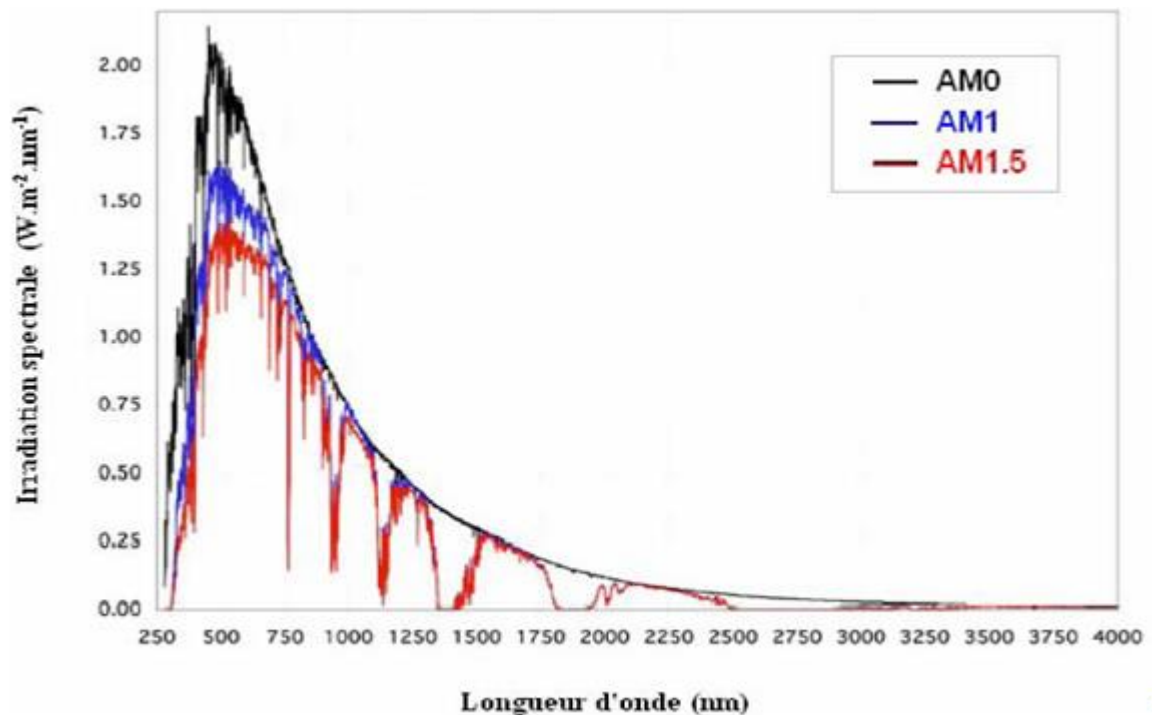
**Figure I-2 :** Différentes constantes d'illumination.

AM0 : représente le spectre solaire en dehors de l'atmosphère.

AM1 : correspond au soleil à la verticale ( $h=90^\circ$ ) avec une puissance d'incidence de  $925 \text{ W/m}^2$ .

AM 1.5 : défini par l'angle ( $h=41.8^\circ$ ) au-dessus de l'horizon, d'une intensité de  $693 \text{ W/m}^2$  est approprié pour les applications terrestres.

AM2 : est obtenu pour un angle de ( $h=30^\circ$ ) et à une puissance d'environ  $691 \text{ W/m}^2$ .



**Figure I-3 :** Représentation graphique des spectres AM0, AM1 et AM1.5.

Hauteur	Position de soleil par rapport à l'horizontale (hauteur zénithale)	Position de soleil par rapport à la verticale	Irradiance (constante solaire) ( $\text{W/m}^2$ )	Distribution spectrale
En dehors de l'atmosphère	-	-	1367	AM0
En surface	$h=90^\circ$	$\alpha=0$	925	AM1
En surface	$h=41,8^\circ$	$\alpha=48.2^\circ$	693	AM1.5
En surface	$h=30^\circ$	$\alpha=60^\circ$	691	AM2

Tableau I.1 : Résumé des différentes distributions spectrales.

#### I.4. Zone utile du spectre solaire :

En règle générale, les cellules solaires sont produites pour être exposées à la lumière du soleil. L'optimisation de l'efficacité de la conversion photovoltaïque se base donc sur le spectre solaire.

Les photons du spectre solaire ne sont pas tous utilisables pour la génération des paires électrons-trous.

- Si  $h\nu < E_g$  ( $E_g$  est l'énergie du gap du semi-conducteur) le photon n'est pas absorbé par le semi-conducteur qui est donc transparent pour cette longueur d'onde.
- Si pour  $h\nu > E_g$ , les photons seront alors absorbés.

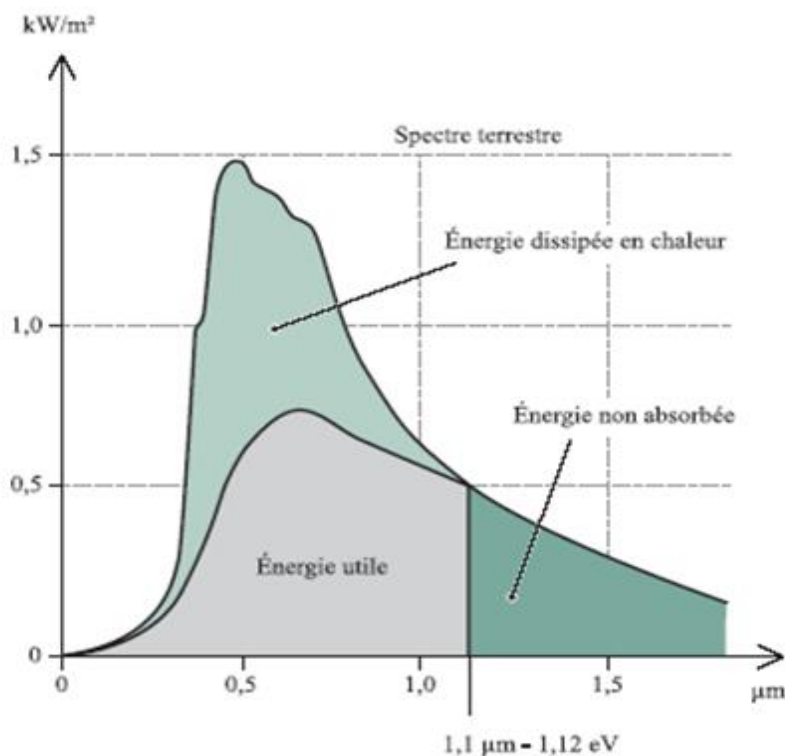


Figure I-4 : Zone utile du spectre solaire pour le silicium.

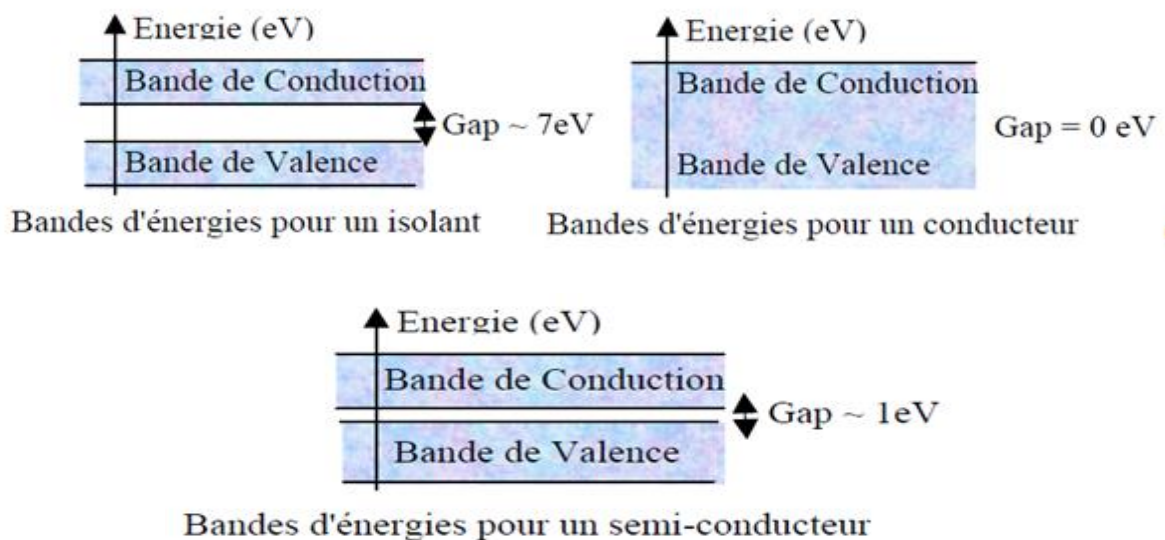
# **Chapitre II :**

# **Physique des cellules solaires**

## II.1 Les semi-conducteurs [\(Mathieu et Fanet, 2009\)](#) :

Ce sont des corps dont la résistivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants, les électrons ont des énergies distinctes qui appartiennent à certains ensembles de valeurs appelées bandes d'énergies. Les bandes de faible énergie correspondent à des électrons participant au maintien de la structure cristalline, ce sont les électrons dits de valence.

Les bandes de hautes énergies correspondent à des électrons quasi «libre» de se détacher de la structure et qui par conséquent peuvent participer à une conduction électronique. On distingue isolants et conducteurs par la différence d'énergie qu'il existe entre ces bandes, appelée le «gap».



**Figure II-1** : présentation des bandes énergies.

-Dans les isolants, la bande de conduction est habituellement vide.

-Dans les conducteurs, la conductivité diminue avec la température puisque l'agitation thermique pénalise le mouvement organisé des porteurs libres.

-Dans les semi-conducteurs, le gap assez faible permet à des porteurs de passer dans la bande de conduction (BC) simplement grâce à leur énergie d'agitation thermique.

Le tableau suivant regroupe la valeur du gap de quelques semi-conducteurs.

Semi-conducteur	$E_g$ (eV) à 300 K	$E_g$ (eV) à 0 K
GaAs	1,42	1,52
Si	1,12	1,16
Ge	0,66	0,75

**Tableau II-1** : La valeur du gap de quelques semi-conducteurs à 300 K et à 0 K.

## II.2 Les types de semi-conducteurs :

Il existe deux types de semi-conducteurs :

- Le semi-conducteur intrinsèque (pur).
- Le semi-conducteur extrinsèque (dopé par une impureté).

### II.2.1 Les semi-conducteurs intrinsèques :

Un semi-conducteur intrinsèque est un semi-conducteur dépourvu de toute impureté susceptible de modifier la densité de porteurs. Les électrons de la bande de conduction sont créés par l'agitation thermique d'électrons liés de la bande de valence. Il vient alors:

$$n = p = n_i \quad (\text{II.1})$$

Donc 
$$np = n_i^2 \quad (\text{II.2})$$

Avec :

$$\begin{cases} n \approx N_c e^{-(E_c - E_{Fi})/K_B T} \\ p \approx N_v e^{E_v - E_{Fi}/K_B T} \end{cases} \quad (\text{II.3}) \quad \text{et} \quad \begin{cases} N_c = 2 \left( \frac{2\pi m_n^* K_B T}{h^2} \right)^{3/2} \\ N_v = 2 \left( \frac{2\pi m_p^* K_B T}{h^2} \right)^{3/2} \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

Où :

$n_i$  : est appelé la densité des porteurs intrinsèques, c'est une caractéristique du semi-conducteur à une température donnée.

$N_c$  : La densité effective d'état dans la bande de conduction ( $2,82 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  à  $300 \text{ }^\circ\text{K}$  pour Si).

$N_v$  : La densité effective d'état dans la bande de valence ( $1,83 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  à  $300 \text{ }^\circ\text{K}$  pour Si).

$E_c$  : Le niveau énergétique du bas de la bande de conduction du semi-conducteur.

$E_v$  : Le niveau énergétique du haut de la bande de valence du semi-conducteur.

$E_{Fi}$  : Le niveau de fermi intrinsèque.

$E_g$  : L'énergie du gap.

$K_B$  : La constante de Boltzmann.

T : La température absolue de matériau (en  $^\circ\text{K}$ ).

$m_n^*$ ,  $m_p^*$  : sont respectivement les masses effectives des électrons et des trous.

	Si	Ge	GaAs
$m_n^*$	1,06 $m_0$	0,55 $m_0$	0,067 $m_0$
$m_p^*$	0,59 $m_0$	0,36 $m_0$	0,64 $m_0$

**Tableau II-2** : les masses effectives des électrons et des trous de quelques semi-conducteurs.

Avec  $m_0$  : la masse de l'électron au repos, soit  $9,1 \cdot 10^{-31} \text{ Kg}$ .

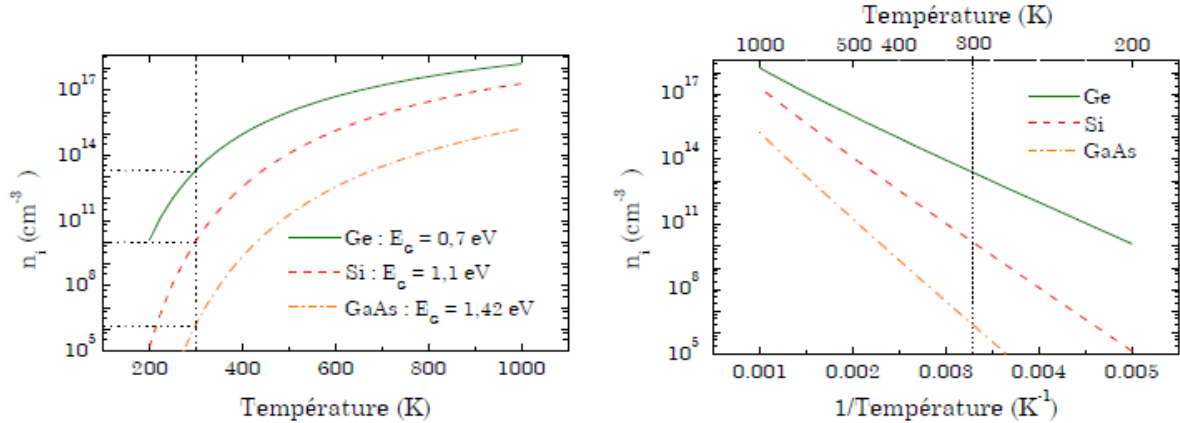
Il résulte que la densité des porteurs intrinsèques s'écrit :

$$n_i = (N_c N_v)^{1/2} e^{\frac{-E_g}{2K_B T}} \quad (\text{II.5})$$

$$n_i(T) = AT^{3/2} e^{\frac{-E_g}{2k_B T}} \quad (\text{II.6})$$

Où : A est une constante spécifique du matériau.

La figure II-2 (a et b) montre que  $\ln(n_i)$  en fonction de  $1/T$  est une droite de pente  $-E_g/2k_B$  ce qui donne la possibilité de déduire  $E_g$ .



**Figure II-2** : Evolution de la concentration intrinsèque pour le Si, le Ge et le GaAs.

**a.** En fonction de la Température. **b.** En fonction de l'inverse de la température.

La densité des porteurs intrinsèques est une fonction exponentielle du gap du matériau et de la température. Le tableau suivant donne les valeurs des densités de porteurs de quelques semi-conducteurs à la température ambiante.

	Si	Ge	GaAs	InP
$n_i \text{ (cm}^{-3}\text{)}$	$10^{10}$	$2.10^{13}$	$3.10^{16}$	$3.10^7$

**Tableau II-3** : La densité des porteurs intrinsèques de quelques semi-conducteurs.

On obtient la position du niveau de fermi en écrivant que :

$$n = p, \text{ soit } N_c e^{-\frac{(E_c - E_{Fi})}{k_B T}} = N_v e^{\frac{E_v - E_{Fi}}{k_B T}} \quad (\text{II.7})$$

$$\text{Soit } E_{Fi} = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{1}{2} k_B T \ln \frac{N_v}{N_c} \quad (\text{II.8})$$

Le niveau de fermi d'un semi-conducteur intrinsèque est très voisin du milieu du gap à la température ambiante. Soit :

$$E_{Fi} \approx \frac{E_c + E_v}{2} \quad (\text{II.9})$$

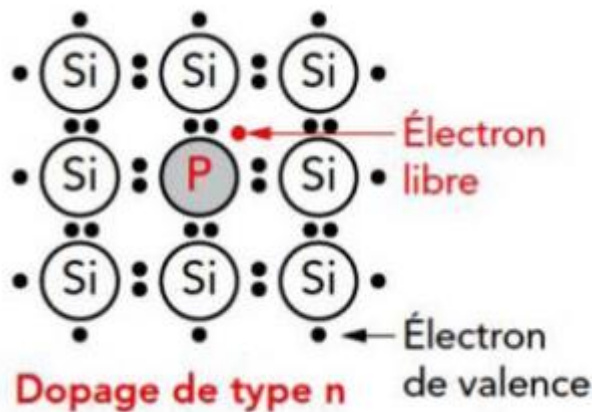
## II.2.2 Les semi-conducteurs extrinsèques :

On modifie considérablement les propriétés électroniques d'un semi-conducteur en le dopant de manière contrôlée avec des atomes spécifiques.

Il existe aussi deux types de semi-conducteurs extrinsèques, de type N et de type P.

### II.2.2.1. Les semi-conducteurs de type N :

Considérons par exemple un semi-conducteur de la colonne IV du tableau périodique des éléments comme le silicium, dans lequel on introduit un atome de la colonne V tel que le phosphore ou l'Arsenic. Dans le réseau cristallin, l'atome de phosphore remplace un atome de silicium, l'atome de phosphore ayant cinq électrons de valence, il établit des liaisons avec ses quatre voisins du silicium, il reste donc un électron libre. A la température ambiante, cet électron est donc libéré dans le réseau par l'agitation thermique et occupe un état de la bande de conduction. Parallèlement le phosphore a une charge positive excédentaire et devient un ion  $P^+ = Na^+$ . On dit que le phosphore dans le silicium est un donneur en raison du fait qu'il donne un électron de conduction au réseau.



**Figure II-3 :** Silicium dopé au phosphore, libération d'un électron.

Dans ce cas, on peut dire que la densité des électrons plus élevée que la densité des trous (faible) soit  $n > p$ .

Donc, la densité des électrons ( $n$ ) est proche de celle du dopant donneur.

$$n = N_d \quad (\text{II.10}) \quad (\text{Les électrons sont les porteurs majoritaires}).$$

D'autre part, comme on a toujours  $np = n_i^2$ .

On en déduit la densité des porteurs minoritaires dans un semi-conducteur dopé N :

$$p_n = \frac{n_i^2}{N_d} \quad (\text{II.11})$$

#### Le niveau fermi $E_{Fn}$ :

Les densités des porteurs sont données par :

$$n = N_d = N_c e^{-(E_c - E_{Fn}) / K_B T} \quad (\text{II.12})$$

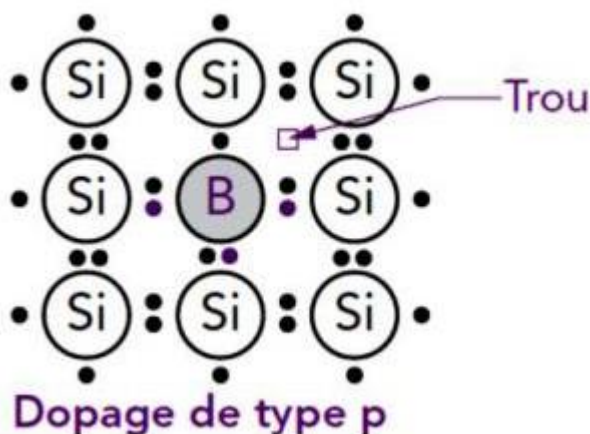
En conséquence, le niveau de fermi  $E_{Fn}$  se déplace du milieu de la bande interdite ( $E_{Fi}$ ) vers la bande de conduction.

$$E_{Fn} - E_{Fi} = KT \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) \quad (\text{II.13})$$

$$E_{Fn} = E_{Fi} - KT \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) \quad (\text{II.14})$$

### II.2.2.2 Les semi-conducteurs de type P :

Remplaçons un atome de silicium par un atome de la colonne III, tel que le bore. L'atome de bore possédant trois électrons de valence, il apparaît un déficit d'électrons. L'électron manquant est alors facilement remplacé par un électron provenant d'une liaison voisine. Le passage d'un électron depuis une liaison intrinsèque du cristal vers l'atome de bore entraîne d'une part la création d'un trou dans la bande de valence et d'autre part l'apparition d'une charge négative excédentaire au voisinage de l'atome de bore. L'atome de bore, qui est appelé accepteur, devient alors un ion négatif  $B^- = N_a^+$ .



**Figure II-4 :** Silicium dopé au bore, libération d'un trou.

Dans ce cas, on peut dire que la densité des trous plus élevée que la densité des électrons soit  $p > n$ .

Donc, la densité des trous ( $p$ ) est proche de celle du dopant accepteur.

$$P = N_a = N_a^- \quad (\text{II.15}) \quad (\text{les trous sont les porteurs majoritaires}).$$

La relation toujours est vérifiée :  $np = n_i^2$

Alors la densité des porteurs minoritaires dans un semi-conducteur dopé p :

$$n_p = \frac{n_i^2}{N_a} \quad (\text{II.16})$$

### Le niveau fermi $E_{Fp}$ :

Les densités des porteurs sont données par :

$$n_i = N_c e^{\left(\frac{E_c - E_{Fi}}{K_B T}\right)} = N_v e^{\left(\frac{E_v - E_{Fi}}{K_B T}\right)} = (N_c N_v)^{1/2} e^{\left(\frac{-E_g}{2K_B T}\right)} \quad (\text{II.17})$$

$$\begin{cases} n = n_i e^{\left(\frac{E_F - E_{Fi}}{K_B T}\right)} \\ p = n_i e^{\left(\frac{-E_F - E_{Fi}}{K_B T}\right)} \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

Par conséquent, le niveau de fermi  $E_{Fp}$  se déplace du milieu de la bande interdite ( $E_{Fi}$ ) vers la bande de valence :

$$E_{Fi} - E_{Fp} = K_B T \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right) \quad (\text{II.19})$$

$$E_{Fp} = E_{Fi} - K_B T \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right) \quad (\text{II.20})$$

## II.3 La génération et la recombinaison des paires électron-trou :

On caractérise la création de porteurs dans les semi-conducteurs par un paramètre qui mesure le nombre de porteurs créés par unité de volume et unité de temps, G ( $\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ ). On caractérise la recombinaison des porteurs par un paramètre qui mesure le nombre de porteurs qui disparaissent par unité de volume et unité de temps, R ( $\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ ).

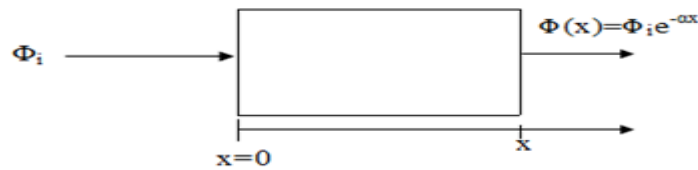
### II.3.1 La génération :

Le paramètre G résulte de la contribution de deux types de génération de porteurs. Il existe d'une part les générations spontanées dues à l'agitation thermique, que l'on caractérisera par un paramètre que nous appellerons taux de génération thermique. Il existe d'autre part les générations résultant de l'excitation du semi-conducteur par une source extérieure, qui est spécifique du processus mis en jeu.

Soit  $\phi_i(\lambda)$ , la densité du flux de photons incidents (photons/unité de temps) pour chaque longueur d'onde  $\lambda$ , arrivant sur le semi-conducteur à sa surface en  $x=0$ .

$$\phi(\lambda)_{(x=0)} = \phi_i(\lambda) = \frac{P_i(\lambda)}{h\nu} = \frac{P_i(\lambda)}{h\frac{c}{\lambda}} \quad (\text{II.21})$$

Où  $p_i(\lambda)$  est la puissance incidente du rayonnement à la longueur d'onde correspondante.



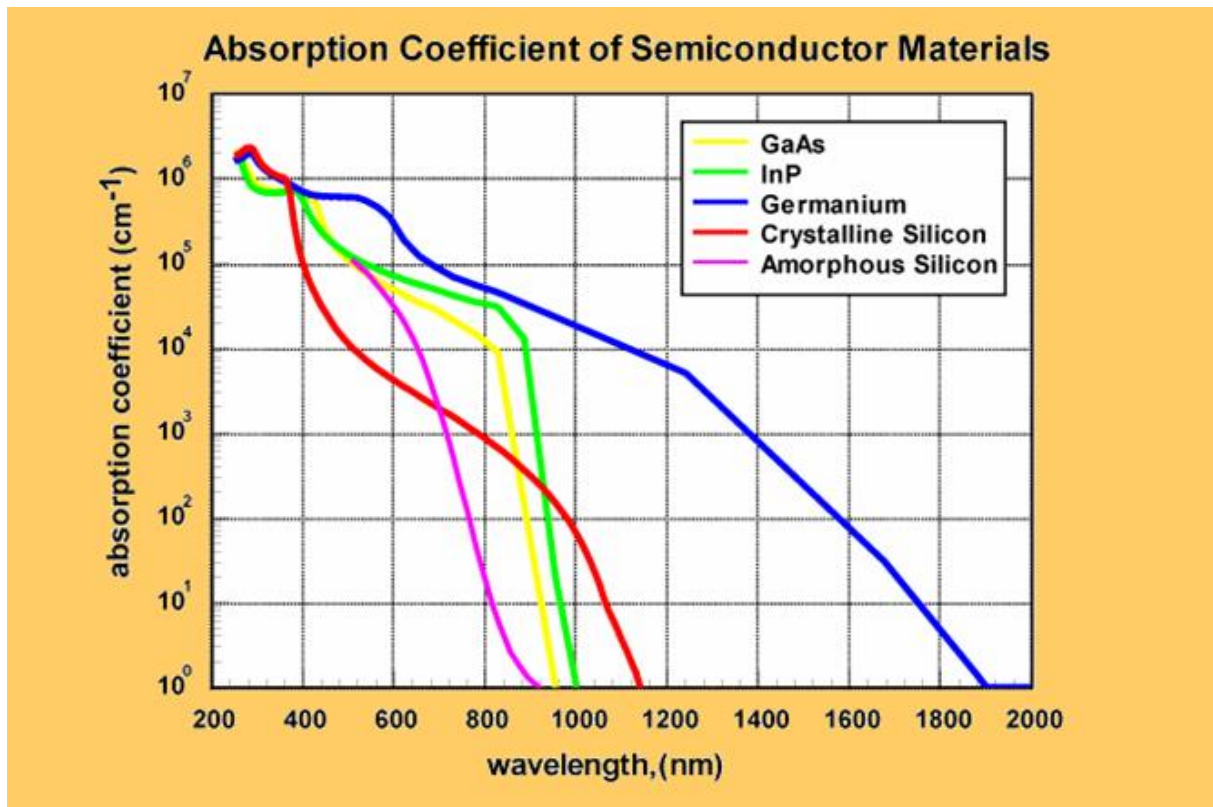
**Figure II-5 :** La loi de Beer-Lambert.

Selon la loi de Beer-lambert, le flux de photons à la position X est exprimé par :

$$\phi(x) = \phi_i(\lambda)e^{(-\alpha x)} \quad (\text{II.22})$$

Avec  $\alpha$  le coefficient d'absorption (en  $\text{cm}^{-1}$ ) dépend de la longueur d'onde des photons incidents, ainsi que du coefficient d'extinction  $k$ , selon la relation [\(Desrués, 2009\)](#) :

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (\text{II.23})$$



**Figure II-6 :** Variation du coefficient de quelques matériaux en fonction de la longueur d'onde du rayonnement.

### II.3.2 La recombinaison :

La recombinaison est définie comme le mécanisme inverse de la génération. Elle engage une perte d'énergie; les porteurs en excès disparaissent en rétablissant leur équilibre thermodynamique. Les mécanismes possibles sont :

- ✓ La recombinaison radiative ou «bande à bande»,
- ✓ La recombinaison RSH (Read-Schokley-Hall),
- ✓ La recombinaison Auger,
- ✓ La recombinaison en surface.

**a. La recombinaison radiative ou «bande à bande» :**

Ce mécanisme est dominant dans les semi-conducteurs purs, dotés d'une structure à gap direct tel que le GaAs. Un électron de la bande de conduction se recombine avec un trou dans la bande de valence. L'énergie du photon émis correspondra à l'énergie du gap de la bande interdite du matériau, ce phénomène se caractérise par la courte durée de vie des porteurs minoritaires. Le taux de recombinaison total est donné par l'expression :

$$R = B (np - n_i^2) \quad (\text{II.24})$$

Où B est une constante qui dépend du semi-conducteur utilisé.

Le taux de recombinaison s'écrit alors sous les formes suivantes :

Pour le semi-conducteur de type P :  $R_p = \frac{\Delta p}{\tau_p}$

Pour le semi-conducteur de type N  $R_n = \frac{\Delta n}{\tau_n}$

$\tau_n$  et  $\tau_p$  Sont les durées de vie des électrons et des trous minoritaires respectivement.

**b. La recombinaison SRH (Schokley-Read-Hall) :**

A l'inverse du premier mécanisme, la recombinaison assistée se produit dans les semi-conducteurs à gap indirect comme le Si. Ce mécanisme introduit une étape dans la transition entre les bandes de conduction et de valence sous forme d'un piège situé à un niveau dans la bande interdite.

Le taux de recombinaison indirect pour une concentration de défaut  $N_R$  située dans un niveau d'énergie  $E_R$  dans la bande interdite est représenté par la formule :

$$R = \frac{C_n C_p N_R (np - n_i^2)}{C_n (n + n_1) + C_p (p + p_1)} \quad (\text{II.25})$$

Où :  $n_1 = n_i e^{\frac{E_R - E_i}{K_B T}}$  et  $p_1 = p_i e^{\frac{E_R - E_i}{K_B T}}$

$N_R$  : la concentration des défauts.

$C_n$  et  $C_p$  : les probabilités respectives de capture par le trou et l'électron.

$E_i$  : le niveau de fermi intrinsèque.

R est donné en porteurs libres par  $\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ .

### c. La recombinaison Auger :

C'est le mécanisme qui intervient lors d'une forte concentration de porteurs libres, comme les semi-conducteurs à gap indirect. L'énergie libérée par la recombinaison transfère un électron à niveau supérieur de la bande de conduction, ou un trou à un niveau plus profond de la bande de valence.

Le taux de recombinaison totale est calculé selon la formule suivante :

$$R = (A_n n + A_p p) (pn - n_i^2) \quad (\text{II.26})$$

Où  $A_n$  et  $A_p$  sont respectivement les probabilités de capture des électrons et des trous.

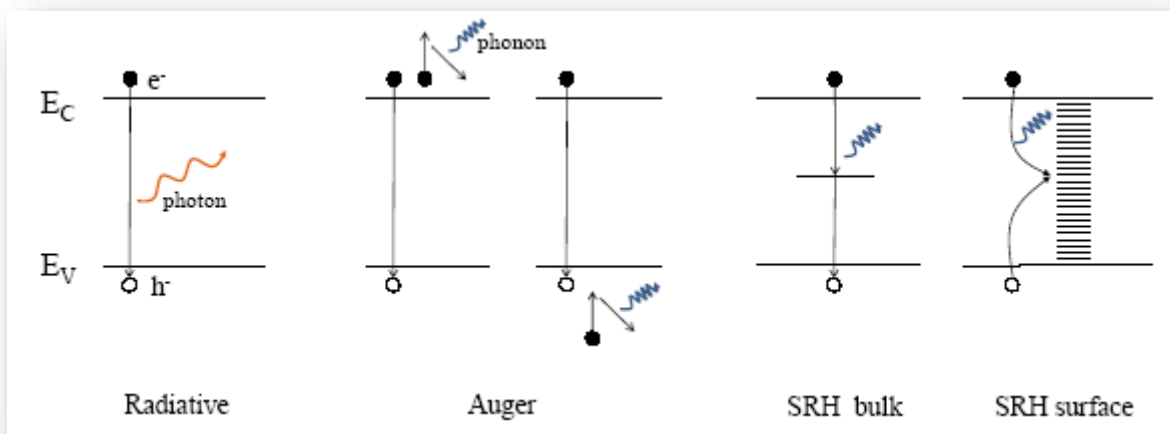
### d. La recombinaison en surface (superficielle) :

La surface d'un semi-conducteur, où on peut trouver de nombreux niveaux électroniques (états de surface), constitue souvent un site privilégié pour la recombinaison ([Chovet & Masson, 2004/2005](#)).

Le taux de recombinaison en surface  $R_S$  est proportionnel à la concentration volumique de porteurs en excès  $\delta_n$  juste sous la surface. Le coefficient de proportionnalité  $S$  est défini par :

$$R_S = S \delta_n \quad (\text{II.27})$$

$S$  :  $S$  s'exprime en cm/S, pour cela, on l'appelle «vitesse de recombinaison en surface».



**Figure II-7** : Schéma des principaux processus de recombinaison dans un semi-conducteur.

## II.4 Le courant dans les semi-conducteurs :

Le déplacement des porteurs de charges (électrons et trous) résultent les courants dans les semi-conducteurs, soit par l'application d'un champ électrique  $\vec{E}$  ou par l'existence d'un gradient de concentration.

- Le courant de conduction  $\vec{J}_c$  est donné par la loi d'ohm :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II.28})$$

Avec :

$\sigma$  : La conductivité du semi-conducteur (égale à l'inverse de la résistivité  $\rho$ ) et est donnée par

la relation : 
$$\sigma = \frac{1}{\rho} = q(n\mu_n + p\mu_p) \quad (\text{II.29})$$

Donc :

$$\vec{J}_n = qn\mu_n \vec{E} \quad \text{Pour les électrons.}$$

$$\vec{J}_p = qp\mu_p \vec{E} \quad \text{Pour les trous.}$$

Où :

$n$  et  $p$  sont respectivement la concentration des électrons et des trous.

$\mu_n$  et  $\mu_p$  sont respectivement la mobilité des électrons et des trous.

	Si	Ge	GaP	GaAs	GaSb	InP	InAs	InSb
$\mu_n \left( \frac{cm^2}{V.s} \right)$	1350	3600	300	8000	5000	4500	30000	80000
$\mu_p \left( \frac{cm^2}{V.s} \right)$	480	1800	150	300	1000	100	450	450

**Tableau II-4 :** mobilités des électrons et des trous de quelques semi-conducteurs à température ambiante.

Le courant total de conduction s'écrit :

$$\vec{J}_c = \vec{J}_n + \vec{J}_p = q(n\mu_n + p\mu_p) \vec{E} \quad (\text{II.30})$$

- Le courant de diffusion  $\vec{J}_D$  est donné par loi de Fick :

$$\vec{J}_n = qD_n \overrightarrow{\text{grad}} n \quad \rightarrow \text{Pour les électrons.}$$

$$\vec{J}_p = -qD_p \overrightarrow{\text{grad}} p \quad \rightarrow \text{Pour les trous.}$$

Où :  $D_n$  et  $D_p$  sont les coefficients de diffusion respectivement des électrons et des trous.

Donc, le courant total de diffusion s'écrit :

$$\vec{J}_d = qD_n \overrightarrow{\nabla} n - qD_p \overrightarrow{\text{grad}} p \quad (\text{II.31})$$

Les courants des électrons et des trous s'écrivent :

$$\begin{cases} \vec{J}_n = qn\mu_n \vec{E} + qD_n \overrightarrow{\text{grad}} n \\ \vec{J}_p = qp\mu_p \vec{E} - qD_p \overrightarrow{\text{grad}} p \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

Si on considère le modèle de type linéaire (à une dimension), les dernières équations deviennent alors :

$$\begin{cases} \vec{J}_n(x) = qn(x)\mu_n\vec{E}(x) + qD_n\frac{dn(x)}{dx}\vec{i} \\ \vec{J}_p(x) = qp(x)\mu_p\vec{E}(x) - qD_p\frac{dp(x)}{dx}\vec{i} \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

Pour un semi-conducteur non dégénéré, ce qui est souvent le cas des cellules solaires, les mobilités des porteurs sont liées à leurs coefficients de diffusion par la relation d'Einstein :

$$D_{n,p} = \frac{K_B T}{q} \mu_{n,p} \quad (\text{II.34})$$

Sachant que le champ électrostatique résulte du gradient du potentiel : ( $\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V$ ). Selon x, il est donnée algébriquement par :

$$E(x) = -\frac{dV(x)}{dx} \quad (\text{II.35})$$

Hors l'équilibre, la variation du nombre de porteurs par seconde est donnée par les équations de continuité des électrons et des trous sous la forme :

$$\begin{cases} \frac{\partial n}{\partial t} = G_n - R_n + \frac{1}{q} \text{div} \vec{J}_n \\ \frac{\partial p}{\partial t} = G_p - R_p + \frac{1}{q} \text{div} \vec{J}_p \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

$G_n$  et  $G_p$  sont les taux de génération des électrons et des trous.

$R_n$  et  $R_p$  sont les taux de recombinaison des électrons et des trous.

L'étude d'un dispositif à semi-conducteur consiste à résoudre ce système d'équations, avec celui des équations de courant (II.32).

Sachant que l'équation de poisson ( $\text{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon}$ ) :

$$\text{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon} = \frac{p-n+N_d-N_a}{\varepsilon} \quad (\text{II.37})$$

Où :

$\rho$  : est la charge d'espace et  $\varepsilon$  la permittivité du semi-conducteur ( $\varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r$ ) avec  $\varepsilon_0$ , la permittivité du vide et  $\varepsilon_r$  la permittivité relative du semi-conducteur (pour Si,  $\varepsilon_r=11,7$ ). En

régime permanent :  $\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial t} = 0$

## II.5 La jonction P-N :

Une jonction P-N est constituée de deux zones respectivement dopées P et N et juxtaposées d'une façon que nous supposerons abrupte pour la simplification des calculs, montrée dans la

figure II-8, c'est-à-dire que la transition de la zone P à la zone n se fait brusquement. Lorsque l'on assemble les deux régions, la différence de concentration entre les porteurs des régions P et n va provoquer la circulation d'un courant de diffusion tendant à égaliser la concentration en porteurs d'une région à l'autre. Les trous de la région P vont diffuser vers la région N laissant derrière eux des atomes dopants ionisés, qui constituent autant de charges négatives fixes. Il en est de même pour les électrons de la région N qui diffusent vers la région P laissant derrière eux des charges positives. Il apparaît aussi au niveau de la jonction une zone contenant des charges fixes positives et négatives. Ces charges créent un champ électrique E qui s'oppose à la diffusion des porteurs de façon à ce qu'un équilibre électrique s'établisse. Cette région dépeuplée de porteurs mobiles est appelée zone de charge d'espace (ZCE). La densité de charge, le champ électrique, le potentiel et les bandes de valence et de conduction sont représentées sur la figure (II-8) ([Colinge et Van De Wiele, 1996](#)).

On peut déduire aisément la forme du champ électrique ainsi que du potentiel par application des équations de l'électrostatique. Le potentiel électrostatique  $V(x)$  est donné par l'équation de Poisson :

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon} \quad (\text{II.38})$$

Avec :  $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$

On définit la variation de la densité de charge selon l'équation,  $q$  est la charge électrique élémentaire,  $N_a$  la concentration d'accepteurs dans la zone P,  $N_d$  la concentration de donneurs dans la zone,  $x_p$  et  $x_n$  les largeurs désertées des zones P et N respectivement.

$$\begin{cases} \rho(x) = 0 & \text{pour } x_p \leq x \text{ et } x \geq x_n \\ \rho(x) = -qN_a & \text{pour } x_p \leq x \leq 0 \text{ (avec } x_p < 0) \\ \rho(x) = qN_d & \text{pour } 0 \leq x \leq x_n \end{cases} \quad (\text{II.39})$$

On trouve le champ électrique avec l'équation :

$$E(x) = \int \frac{\rho(x)}{\varepsilon} dx \quad (\text{II.40})$$

Le champ électrique doit être nul aux extrémités, on obtient la forme du champ de l'équation :

$$\begin{cases} E(x) = \frac{-qN_a}{\varepsilon} (x - x_p) & \text{pour } x_p \leq x \leq 0 \\ E(x) = \frac{qN_d}{\varepsilon} (x - x_n) & \text{pour } 0 \leq x \leq x_n \end{cases} \quad (\text{II.41})$$

A la jonction le champ doit être continu, on trouve la relation entre les concentrations des porteurs et les régions désertées.

$$N_a x_p = N_d x_n \quad (\text{II.42})$$

On obtient le potentiel électrostatique en intégrant le champ électrique.

$$\begin{cases} V(x) = \frac{qN_a}{\varepsilon} (x - x_p)^2 + V_p & \text{pour } x_p \leq x \leq 0 \\ V(x) = -\frac{qN_d}{\varepsilon} (x - x_n)^2 + V_n & \text{pour } 0 \leq x \leq x_n \end{cases} \quad (\text{II.43})$$

$V_p$  et  $V_n$  sont les potentiels électrostatiques en  $x=x_p$  et  $x = x_n$ , respectivement. Il existe une barrière de potentiel qui constitue le potentiel de diffusion de la jonction, il s'écrit comme suit :

$$V_d = -\int E(x)dx = V_n - V_p = \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right) \quad (\text{II.44})$$

Cette relation est valable si l'on considère que tous les atomes dopants sont ionisés et que la concentration en porteurs de charge libres est équivalente à la concentration en sites dopants. L'épaisseur de la zone de déplétion peut être obtenue en imposant la continuité du potentiel en  $x = 0$  et en utilisant l'équation :

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \left[ \frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right] V_d} \quad (\text{II.45})$$

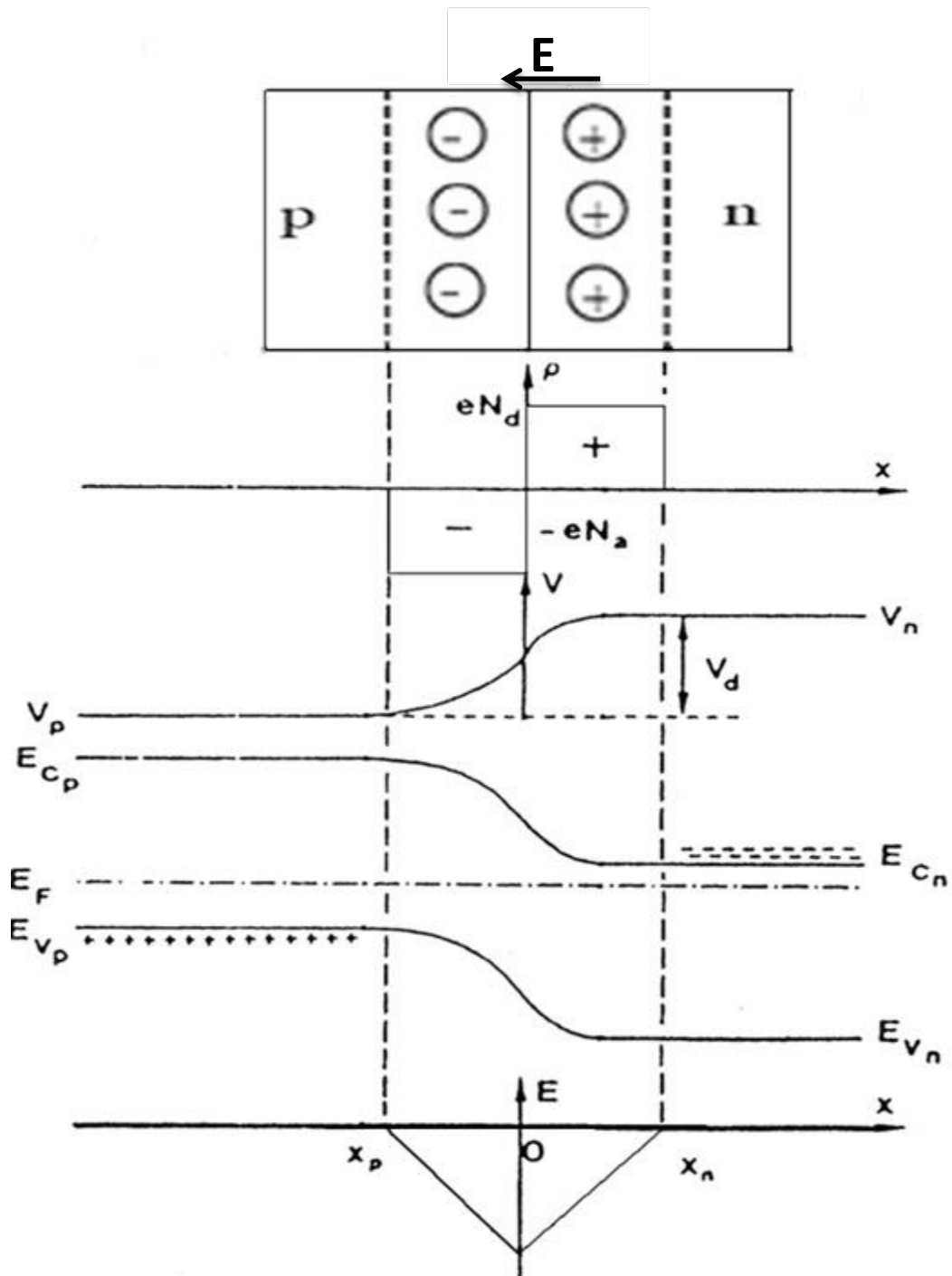


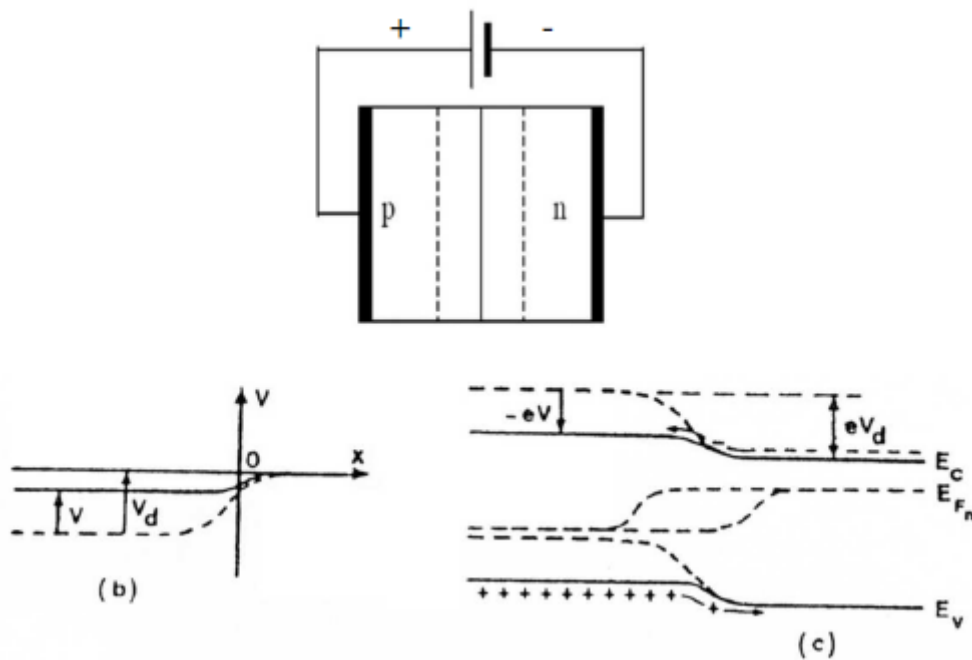
Figure II-8 : La jonction P-N à l'équilibre thermodynamique.

## II.6 La jonction polarisée par une tension continue :

### a). La polarisation directe :

On polarise la jonction P-N en direct, c'est-à-dire la tension la plus positive est connectée au côté P et la tension négative est relié au côté N. La différence de potentiel entre les régions N et P au niveau de la jonction devient  $V_n - V_p = V_d - V$  et la hauteur de la barrière de potentiel

devient  $e(V_d - V)$  et favorise ainsi la diffusion des porteurs majoritaires de chaque région vers l'autre et donc donner naissance à un courant direct (de diffusion).



**Figure II-9** : La jonction P-N en polarisation direct.

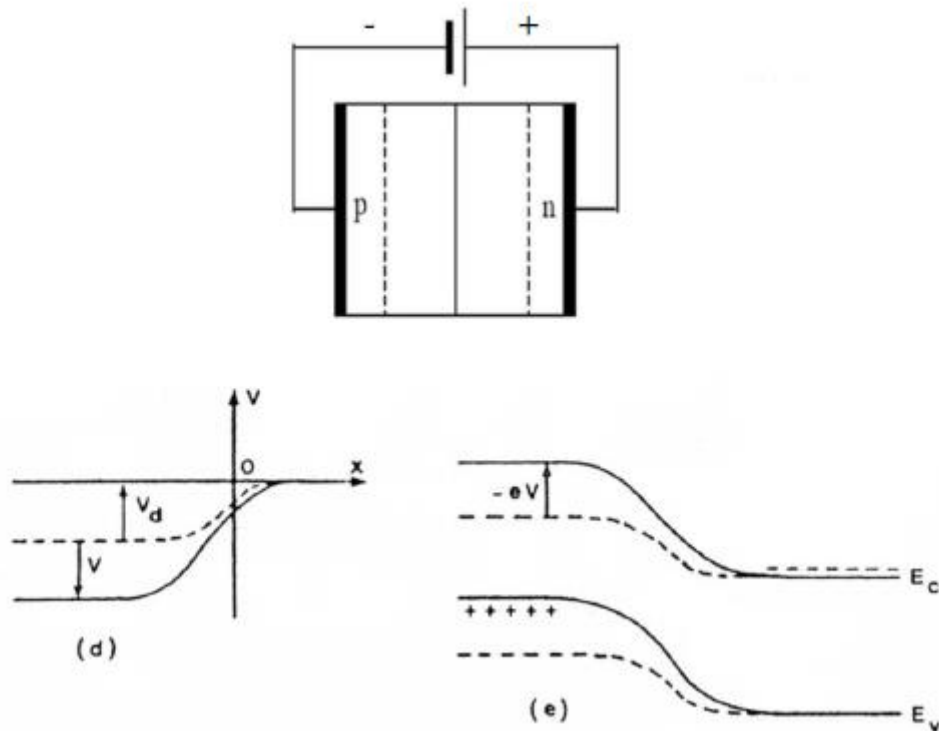
Les équations de l'épaisseur de la zone de charge d'espace est donnée comme suivant :

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \left[ \frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right] (V_d - V)} \quad (\text{II.46})$$

L'abaissement de la barrière est accompagné d'un rétrécissement de la zone de déplétion.

### **b).La polarisation inverse :**

On polarise la jonction P-N en inverse, c'est-à-dire la tension la plus négative est reliée au côté P et la tension la plus positive est reliée au côté N. La différence de potentiel aux bornes de la zone de charge d'espace est augmentée  $V_n - V_p = (V_d + |V|)$  et la hauteur de barrière de potentiel devient  $e(V_d + |V|)$  et peut annuler le courant de diffusion, il reste alors le seul courant inverse (ou courant de saturation  $I_s$ ).



**Figure II-10** : La jonction P-N en polarisation inverse.

L'équation de l'épaisseur de la zone de charge d'espace est donnée comme suivant :

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \left[ \frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right] (V_d + |V|)} \quad (\text{II.47})$$

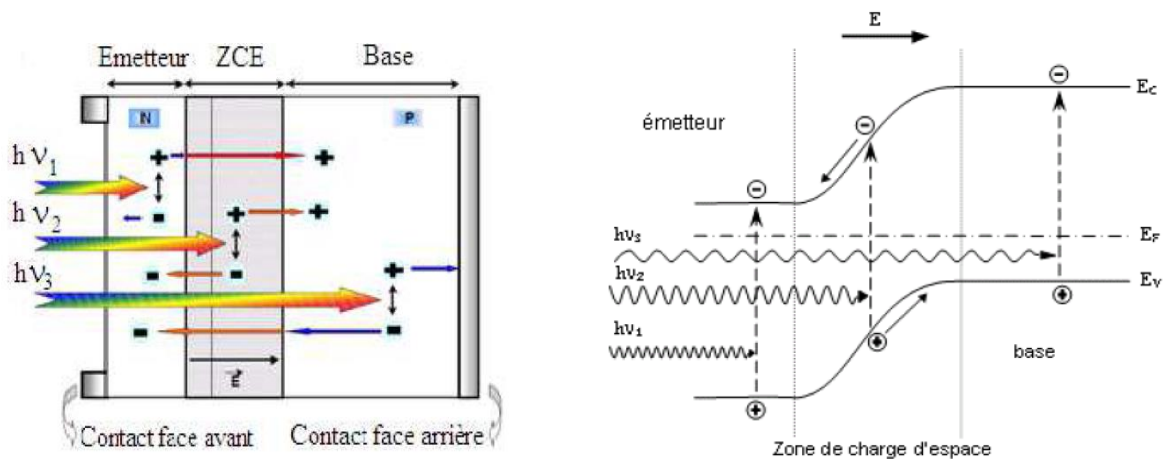
L'évolution de la barrière est accompagnée d'un élargissement de la zone de déplétion.

## II.7 La description du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

Une cellule solaire est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants [\(Krou, 2014\)](#) :

- L'absorption des photons dont l'énergie est supérieure au gap du matériau absorbant de la cellule ( $h\nu > E_g$ ),
- La conversion de l'énergie du photon en énergie électrique qui correspond à la création des paires électron-trou,
- La collecte des porteurs générés dans le dispositif.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électron-trou créées est nécessaire.



**Figure II-11** : structure d'une cellule solaire.

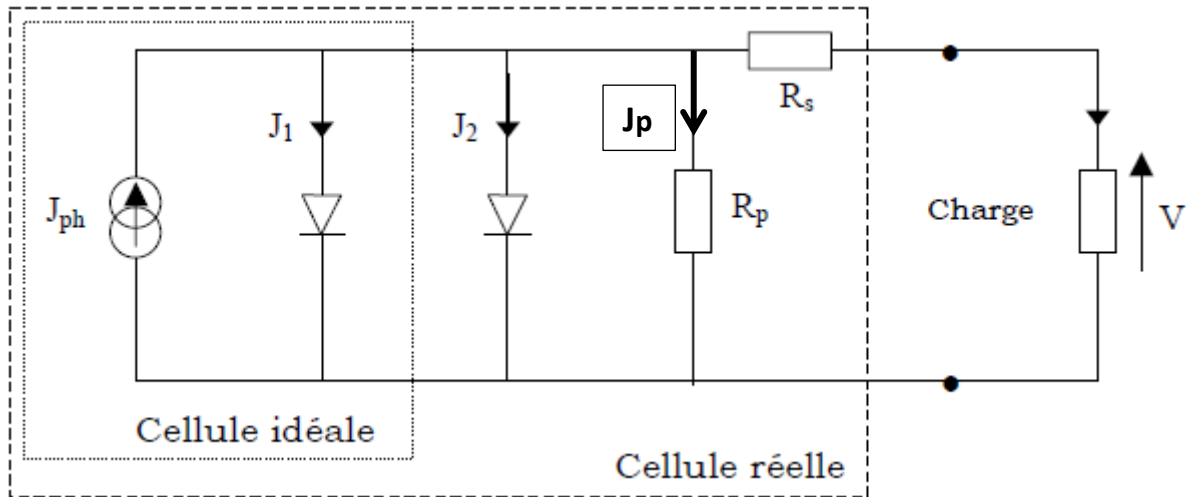
Les photons incidents créent des porteurs dans les zones N et P et dans la ZCE. Les photons porteurs auront un comportement différent suivant la région :

Dans la zone N ou P : les porteurs minoritaires qui atteignent la ZCE sont envoyés par le champ électrique dans la zone P pour les trous et dans la zone N pour les électrons où ils seront majoritaires. On obtient ainsi un **photo-courant de diffusion**.

Dans la ZCE : les paires électrons-trous créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région N, les trous vers la région P. On aura un **photo-courant de génération**. Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un photo-courant résultant  $I_{ph}$ . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse.

## II.8 La modélisation électrique :

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électrique équivalent ci-dessous (figure II-12). Nous pouvons considérer le cas d'une cellule solaire idéale comprenant une source de courant et deux diodes montées en parallèle. La source de courant  $J_{ph}$  modélise le courant photo-généré. Les branches de chacune des diodes représentent respectivement le courant de diffusion dans la base et l'émetteur ( $J_1$ ) et le courant de génération-recombinaison ( $J_2$ ) dans la zone de charge d'espace de la jonction (ZCE) ([Thuillier, 2001](#)).



**Figure II-12 :** Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire.

Pour envisager le cas d'une cellule solaire réelle, le circuit équivalent doit intégrer :

- Une résistance série  $R_s$ , qui modélise les pertes résistives au sein de la photopile et donc les métallisations,
- Une résistance parallèle  $R_p$  modélisant les courants de fuite qui court-circuitent la jonction (fuites par les bords de la cellule et au niveau de la jonction).

Le courant délivré par une cellule photovoltaïque éclairée sur une charge s'écrit :

$$J(V) = J_{ph} - J_{obs}(V) \quad (\text{II.48})$$

Où :

$J_{ph}$  : La densité de courant photonique.

$J_{obs}(V)$  : La densité de courant d'obscurité qui sera la somme des courants passants par les deux diodes et la résistance parallèle.

Soit :

$$J = J_{ph} - J_1 - J_2 - J_p \quad (\text{II.49})$$

$$J = J_{ph} - J_{01} \left[ \exp\left(\frac{q(V+JR_s)}{n_1 k_B T}\right) - 1 \right] - J_{02} \left[ \exp\left(\frac{q(V+JR_s)}{n_2 k_B T}\right) - 1 \right] - \frac{V+JR_s}{R_p} \quad (\text{II.50})$$

Dans cette expression,  $J_{01}$  est la densité du courant de saturation de la première diode qui résulte de la densité de courant de diffusion ;  $J_{02}$  La densité de courant de saturation de la seconde diode qui résulte du courant de génération-recombinaison dans la zone de charge d'espace de la jonction.

$q$  : La charge d'électron ( $1,602 \cdot 10^{-19} \text{C}$ ),

$K_B$  : La constante de Boltzmann ( $8,62 \cdot 10^{-5} \text{ eV} \cdot \text{K}^{-1}$ ),

T : La température en degrés Kelvin,

V : La tension aux bornes de la jonction (Volt),

$n_1$  et  $n_2$  : Les coefficients d'idéalité des diodes  $D_1$  et  $D_2$ . ;  $n_1 = 1$  et  $n_2 = 2$ .

Pour une cellule photovoltaïque idéale, l'équation (II.50) peut être écrite sous la forme suivante :

$$J(V) = J_{ph} - J_{01} \left[ \exp\left(\frac{qV}{n_1 K_B T}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.51})$$

Avec :

$$J_{01} = \frac{q n_i^2 D_p}{N_a L_p \text{th}\left(\frac{d_n}{L_p}\right)} + \frac{q n_i^2 D_n}{N_a L_n \text{th}\left(\frac{d_p}{L_n}\right)} \quad (\text{II.52})$$

Où :

$J_{01}$  : Le courant de saturation de la jonction dans les zones neutres,

$n_i$  : La concentration intrinsèque ( $\text{cm}^{-3}$ ).

$N_d$  et  $N_a$  : sont respectivement la densité de porteur donneur et d'accepteur ( $\text{cm}^{-3}$ ).

$L_n$  et  $L_p$  : sont respectivement la longueur de diffusion des électrons et des trous.

$D_n$  et  $D_p$  : sont respectivement les coefficients de diffusion des électrons et des trous.

La mesure J-V à l'obscurité est également utile pour analyser le fonctionnement d'une cellule solaire.

Cette caractéristique sous obscurité est identique à celle d'une diode.

A partir de la caractéristique J(V) de la cellule photovoltaïque, on déduit les paramètres électriques essentiels à la cellule.

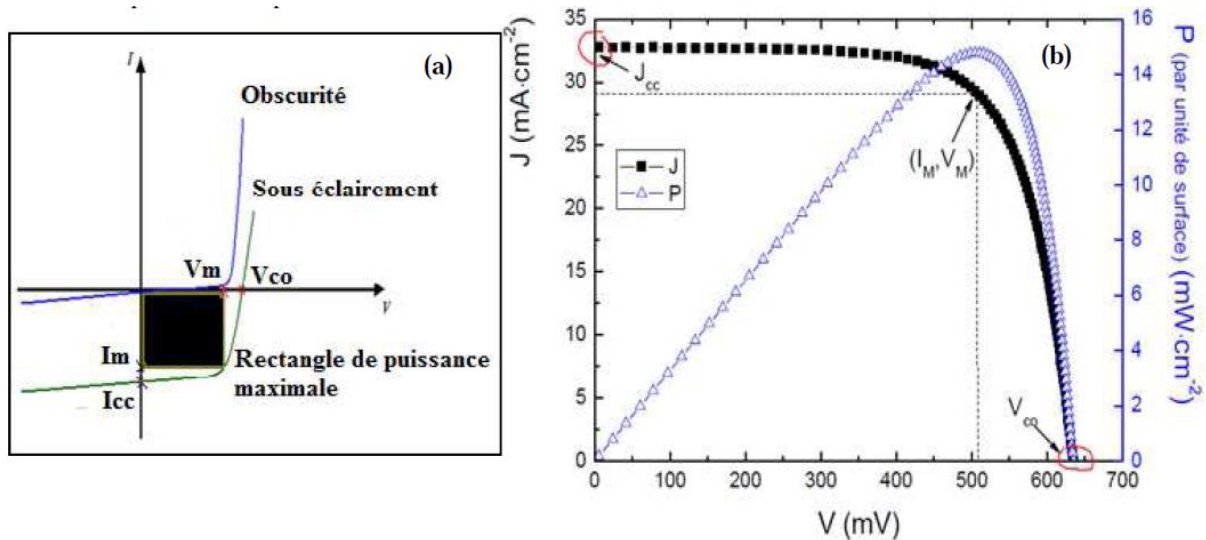
## II.9 Les paramètres caractéristiques d'une cellule photovoltaïque :

La caractéristique J-V de la cellule photovoltaïque permet la détermination des paramètres suivants, propres à la cellule :

$J_{cc}$  : Courant de court-circuit mesuré sous éclairage (pour  $V=0$ ),

$V_{co}$  : Tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule sous éclairage (pour  $J=0$ ),

$I_m$  et  $V_m$  : Courant et tension qui correspondent à la puissance maximale  $P_m$  fournie par la cellule photovoltaïque.



**Figure II-13 :** (a) Caractéristique courant-tension de la cellule photovoltaïque sous éclaircissement et sous obscurité. (b) Représentation conventionnelle de la courbe  $J(V)$  et  $P(V)$ .

### II.9.1 Le courant de court-circuit [\(Bedda, 2011\)](#) :

Si les deux électrodes sont en court-circuit à travers un ampèremètre, les électrons drainés par un champ interne de la jonction vont donner naissance à un courant de court-circuit  $J_{cc}$  qui correspond au photo-courant  $J_{ph}$  généré par le rayonnement et ce pour une cellule idéale. Pour une distribution spectrale donnée, ce photo-courant est proportionnel à l'irradiation du rayonnement incident et à la surface active de captation. Il définit la quantité de paires électron-trou générées  $G$  qui traverse la jonction sans recombinaison entre les longueurs de diffusion  $L_n$  et  $L_p$ , donné par la relation :

$$J_{cc} = J_{ph} = q \cdot G \cdot (L_n + L_p) \quad (\text{II.53})$$

### II.9.2 La tension de circuit-ouvert :

Si la cellule est laissée en circuit-ouvert, les porteurs générés par le rayonnement et séparés par le champ interne vont s'accumuler de part et d'autre de la jonction, induisant une autopolarisation de la jonction dans le sens passant. Cette autopolarisation induit un courant de diode dans le sens direct égale et opposé au photo-courant. La tension alors mesurée aux bornes des électrodes est appelée tension de circuit ouvert  $V_{co}$ . C'est la tension qu'il faudrait appliquer à la diode dans le sens passant pour générer un courant égal au photo-courant, elle est donnée par la relation :

$$V_{co} = \left( \frac{K_B T}{q} \right) \cdot \ln \left[ \left( \frac{J_{cc}}{J_0} \right) + 1 \right] \quad (\text{II.54})$$

### II.9.3 la puissance maximale ( $P_m$ ) :

La puissance maximale produite par une cellule sous éclairage est égale au produit de l'intensité du courant délivrée et de la tension à ses bornes. Il faut ainsi adapter la charge aux bornes du dispositif afin de faire fonctionner au point de puissance maximale  $P_m$ .

$$P_m = V_m \cdot I_m \quad (\text{II.55})$$

### II.9.4 Le facteur de forme (FF) :

Le facteur de forme de la courbe J-V exprime le rapport entre la puissance réelle débitée par la cellule et sa puissance idéale égale au produit  $J_{cc} \cdot V_{co}$ .

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} \cdot J_{cc}} \quad (\text{II.56})$$

### II.9.5 Le rendement de conversion d'énergie ( $\eta$ ) :

Le rendement de conversion d'énergie est le paramètre le plus important dans la cellule solaire. Il exprime la capacité de la cellule à convertir efficacement les photons de la lumière incidente en courant électrique. Il est calculé par le rapport entre la puissance de sortie  $P_m$  et la puissance d'entrée de la cellule  $P_{in}$  (puissance d'éclairage solaire incident). Dans les applications terrestres, on utilise le spectre solaire AM1.5 G avec une puissance totale incidente normalisée égale à 1000 W/m<sup>2</sup>.

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{V_{co} \cdot J_{cc} \cdot FF}{P_{in}} \quad (\text{II.57})$$

### II.10 La réponse spectrale et rendements quantiques de la cellule photovoltaïque $R_s$ :

La réponse spectrale, appelé aussi sensibilité spectrale, est définie comme étant le rapport entre la densité de courant collectée et la densité de puissance incidente  $P_{inc}(\lambda)$ , pour chaque longueur d'onde de rayonnement lumineux ([Nadia, 2006](#)).

$$R_s = \frac{J(\lambda)}{P_{inc}(\lambda)} = \frac{J(\lambda)}{\phi(\lambda) \cdot S} \quad (\text{A/W}) \quad (\text{II.58})$$

S : surface frontale de la cellule

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 est notée EQE (En anglais, (External Quantique Efficiency). Il est égal à 1 si chaque photon génère un électron.

Il est défini, pour une longueur d'onde donnée, par la relation suivante :

$$EQE(\lambda) = \frac{J_{ph}(\lambda)}{\phi(\lambda) \cdot q} \quad (\%) \quad (\text{II.59})$$

$J_{ph}(\lambda)$  : est la densité de courant collectée à la longueur d'onde  $\lambda$  (A/cm<sup>2</sup>).

$\phi(\lambda)$  : est le flux des photons incidents pour chaque longueur d'onde (cm<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>)

q : la charge électronique

Si l'on prend en compte la réflectivité de la surface de la cellule photovoltaïque, on détermine le rendement quantique interne IQE( $\lambda$ ) de la cellule solaire par :

$$EQE(\lambda) = IQE(1 - R(\lambda)) \quad (\%) \quad (\text{II.60})$$

Avec :

$$IQE(\lambda) = \frac{J_{ph}(\lambda)}{\phi(\lambda).q.(1-R(\lambda))} \quad (\%) \quad (\text{II.61})$$

$R(\lambda)$  : le coefficient de la réflexion associé à chaque longueur d'onde

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

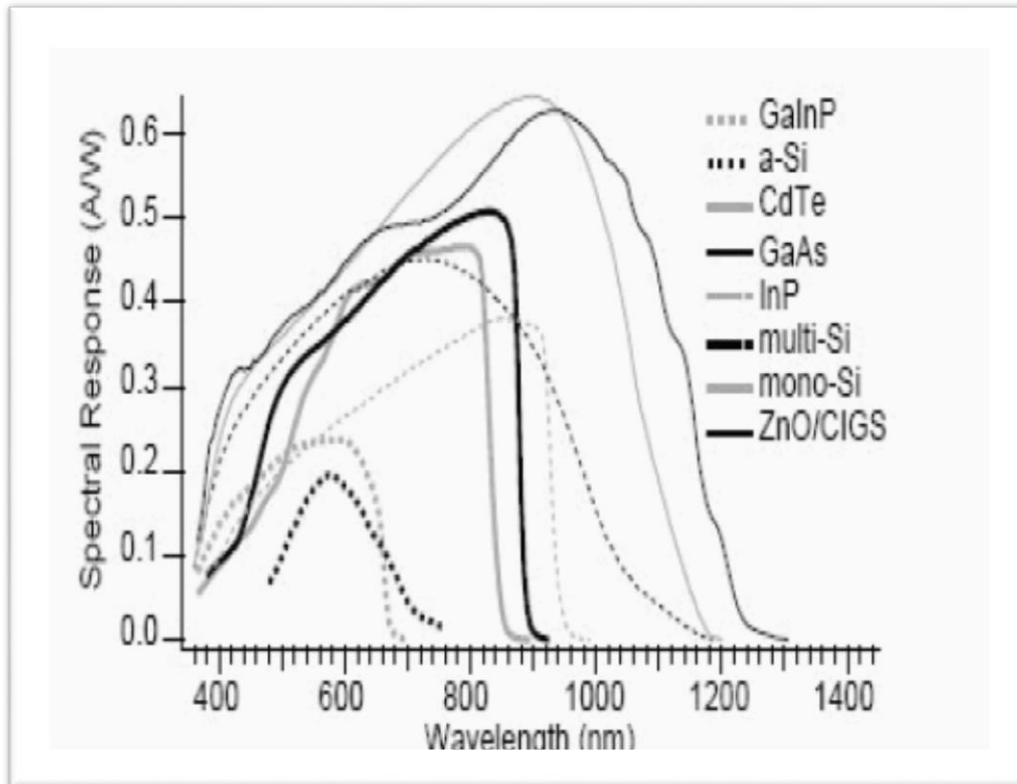
Par ailleurs, On définit :

La Réponse Spectrale Externe qui est reliée aux rendements quantiques externe et interne par la relation suivante

$$R_{se} = \frac{q\lambda}{hc} EQE(\lambda) = \frac{q\lambda}{hc} IQE(1 - R(\lambda)) = \frac{\lambda}{hc} \frac{J_{ph}(\lambda)}{\phi(\lambda)} \quad (\text{II.62})$$

Et la Réponse Spectrale Interne par l'expression suivante :

$$R_{si} = \frac{q\lambda}{hc} \frac{EQE(\lambda)}{(1-R(\lambda))} = \frac{q\lambda}{hc} IQE = \frac{\lambda}{hc} \frac{J_{ph}(\lambda)}{\phi(\lambda)(1-R(\lambda))} \quad (\text{II.63})$$



**Figure II-14 :** Réponses spectrales des différents types de cellules solaires.

## II.11 Les pertes fondamentales limitant le rendement [\(Abderrezek, 2015\)](#) :

Le rendement d'une cellule solaire est limité par différents types des pertes. Ces pertes peuvent être classées selon les pertes intrinsèque et extrinsèque ou selon les pertes optiques et électriques.

### II.11.1 Les pertes extrinsèques :

Ce sont les pertes qu'on peut éliminer.

Il s'agit notamment des pertes dues à la réflexion, l'ombrage dû aux contacts, la résistance série, la collecte incomplète des porteurs photo générés, l'absorption dans la couche fenêtre et la recombinaison non radiative.

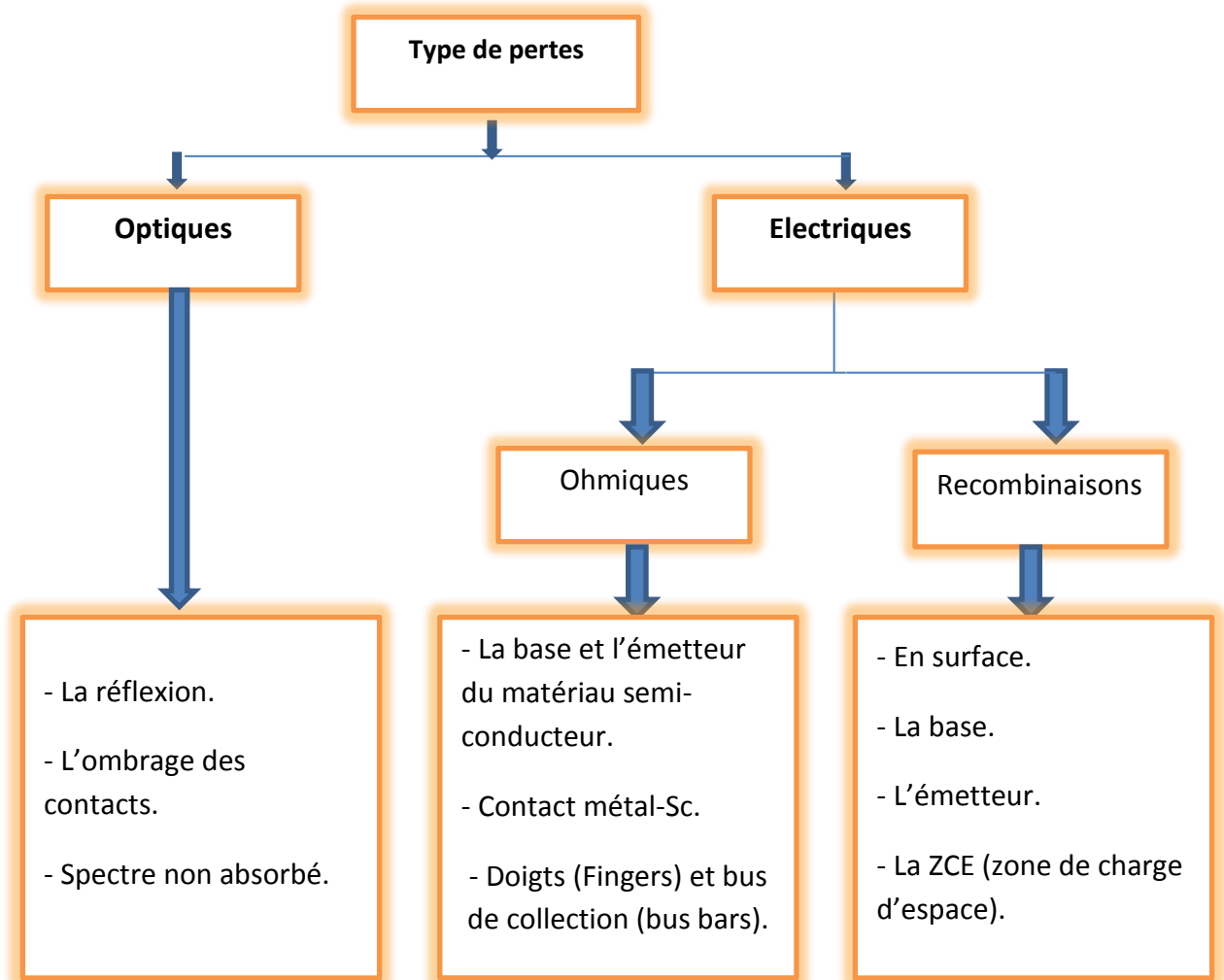
### II.11.2 Les pertes intrinsèques :

Ce type de pertes est dû aux deux raisons suivantes :

1/ L'incapacité de la cellule solaire mono jonction à répondre efficacement à toutes les longueurs d'ondes du spectre. La cellule solaire devient transparente pour les photons dont leur énergie est inférieure à l'énergie de la bande interdite du semi-conducteur  $E_{ph} < E_g$ .

D'autre part, si les photons ont une énergie supérieure à la bande interdite  $E_{ph} > E_g$ , le supplément d'énergie est dissipé sous forme de chaleur.

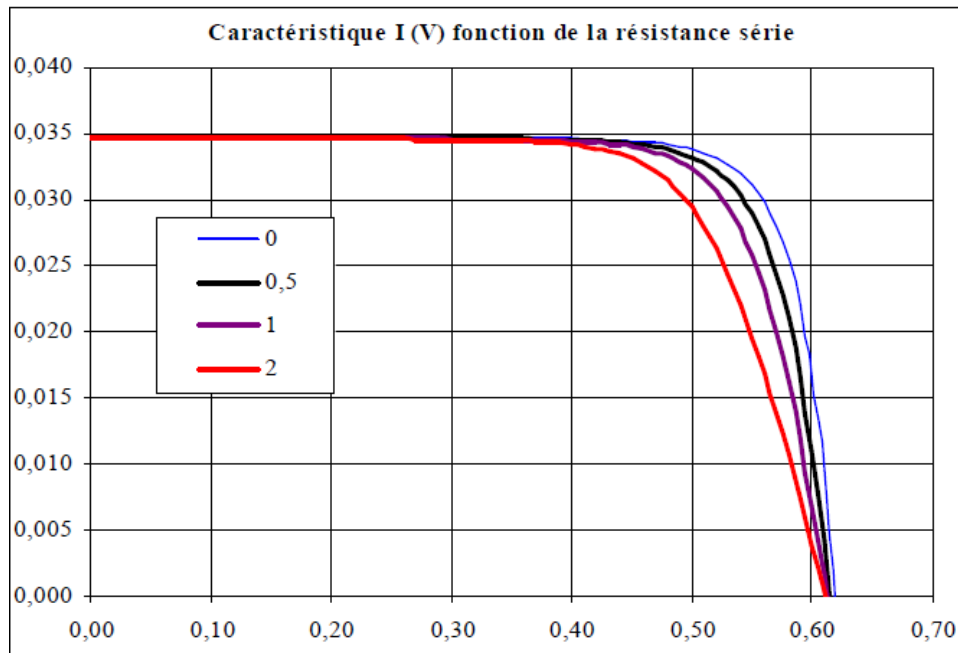
2/ Le deuxième type est dû à la recombinaison radiative dans la cellule.



**Figure II-15 :** Différentes types de pertes électriques et optiques existant dans une cellule solaire.

### II.12 L'influence de la résistance série :

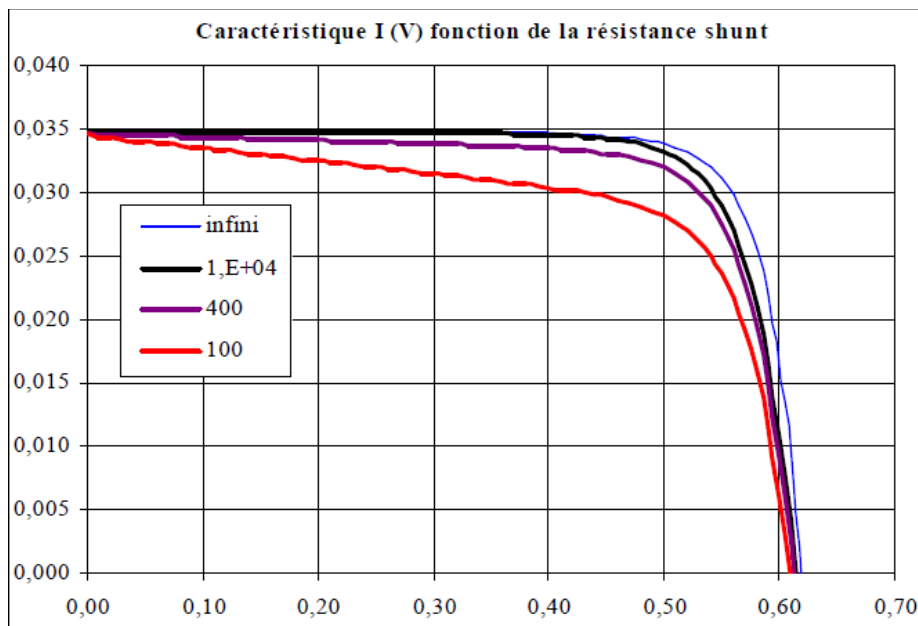
La résistance série est gouvernée par les résistivités des matériaux, par les résistances de contact des électrodes et par la grille collectrice. Elle agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la cellule se comporte comme un générateur de tension. Elle ne modifie pas la  $V_{co}$  mais elle peut diminuer notablement la valeur du courant de court-circuit ([Zouache, 2009](#)).



**Figure II-16** : Effet de la résistance série sur la caractéristique J(V).

### II.13 L'influence de la résistance shunt :

Elle est considérée comme une conductance de fuite. Son effet se fait sentir surtout dans la partie génération du courant, elle agit comme si on devait soustraire au photo-courant utile, outre le courant de diode, un courant supplémentaire proportionnel à la tension développée. Elle est généralement très élevée et elle est constatée sur la caractéristique J(V) par la présence d'une légère pente au voisinage du point de courant de court-circuit.



**Figure II-17** : Effet de la résistance parallèle sur la caractéristique J(V).

## II.14 Association des cellules :

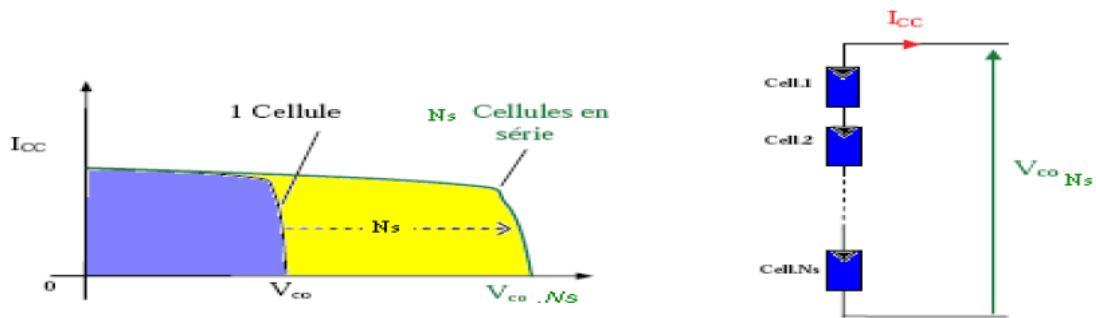
Dans la pratique, les cellules solaires ne sont pas utilisées seules mais elles sont regroupées entre elles pour former un module photovoltaïque. Les modules sont regroupés à leur tour pour former un panneau solaire. Généralement, dans le module les cellules sont groupées en série alors que dans le panneau les modules sont groupés en parallèle ou en série parallèle ([Ricaud, 1997](#)).

### II.14.1 Association en série :

Dans un montage en série, le même courant traverse toutes les cellules ce qui permet d'augmenter la tension de sortie. Pour un groupement de  $N_s$  cellules montées en série, la tension de sortie  $V_s$  a pour expression générale :

$$V_s = N_s \cdot V_i \quad (\text{II.64})$$

Avec  $V_i$  : la tension fournie par une cellule.



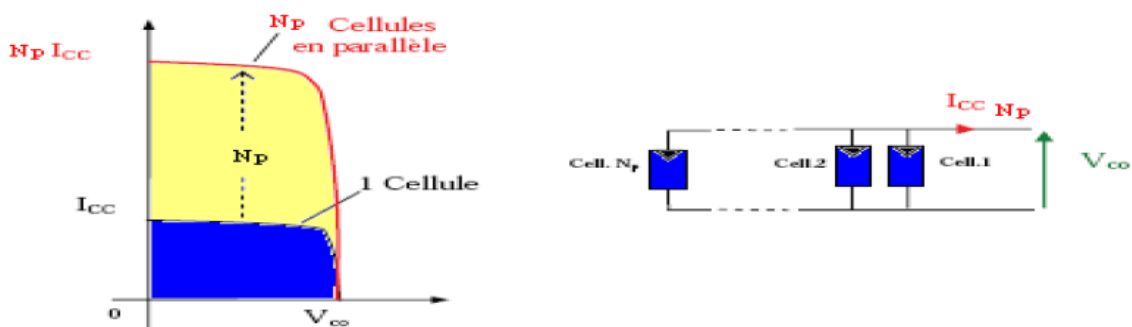
**Figure II-18 :** Caractéristiques résultantes d'un groupement de  $N_s$  cellules en série.

### II.14.2 Association en parallèle :

Dans un tel montage, les cellules sont soumises à la même tension ce qui permet d'augmenter le courant de sortie. Pour un groupement de  $N_p$  cellules montées en parallèle, le courant de sortie  $I_s$  a pour expression générale :

$$I_s = N_p \cdot I_i \quad (\text{II.65})$$

Avec  $I_i$  : courant fourni par une cellule.



**Figure II-19 :** Caractéristiques résultantes d'un groupement de  $N_p$  cellules en parallèle.

# **Chapitre III :**

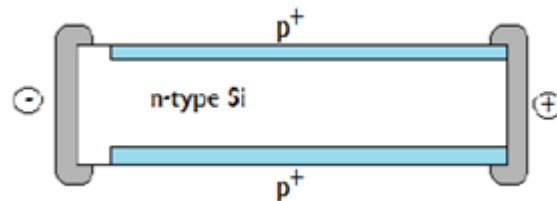
## **La cellule solaire bifaciale**

### III.1 Historique :

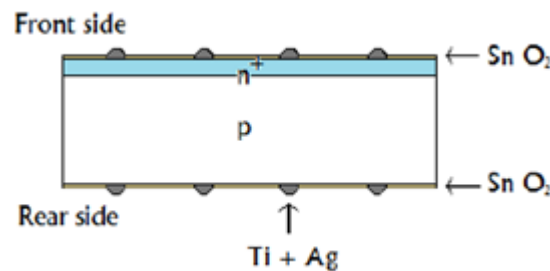
En 1977, deux groupes de recherche en Mexique et en Espagne ont présenté pour la première fois des travaux, à la première conférence européenne de l'énergie solaire photovoltaïque, sur les piles solaire bifaciales. A cette époque, ces dispositifs expérimentaux présentaient une efficacité de 7% ([Cherouna, 2013](#)).

Les cellules solaires bifaciales sont classées en trois types selon le nombre de jonctions qui forment ses structures ([Cherouna, 2013](#)).

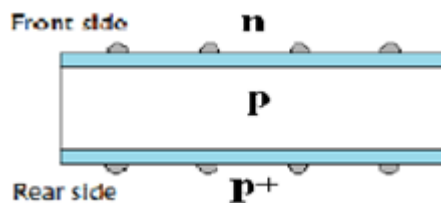
- ✓ Cellule solaire bifaciale à double jonction P/N.



- ✓ 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 homo-jonction P/P<sup>+</sup> ou N/N<sup>+</sup>.



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. 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 ([Cherouna, 2013](#)). 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 ([Cherouna, 2013](#)).

## II.2 Structure et principe de fonctionnement de la cellule solaire bifaciale :

### II.2.1 Structure de la cellule solaire bifaciale BSF :

La structure de la cellule solaire bifaciale BSF ( $N^+/P/P^+$ ) est illustrée par la Figure (III-1). Elle se compose de plusieurs couches, à savoir [\(Mouhoub, 2001\)](#) :

- ✓ 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 :
  - Une couche de passivation pour l'amélioration de la qualité électronique de la surface. Elle est généralement réalisée à base d'oxyde de silicium ( $SiO_2$ ) ou de nitrure de silicium hydrogéné ( $SiN_x : H$ ) [\(Mouhoub, 2001\)](#) :
  - 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.
- ✓ L'émetteur de type N formé par la diffusion homogène de phosphore,
- ✓ Une zone de charge d'espace Z.C.E qui se forme entre l'émetteur et la base,
- ✓ La base de type P : est formée par la diffusion du bore,
- ✓ Une couche fortement dopée  $P^+$ , formée par les mêmes procédés que ceux de la jonction  $N^+/P$ , permettant la création d'un champ électrique arrière appelé BSF (Back Surface Field).

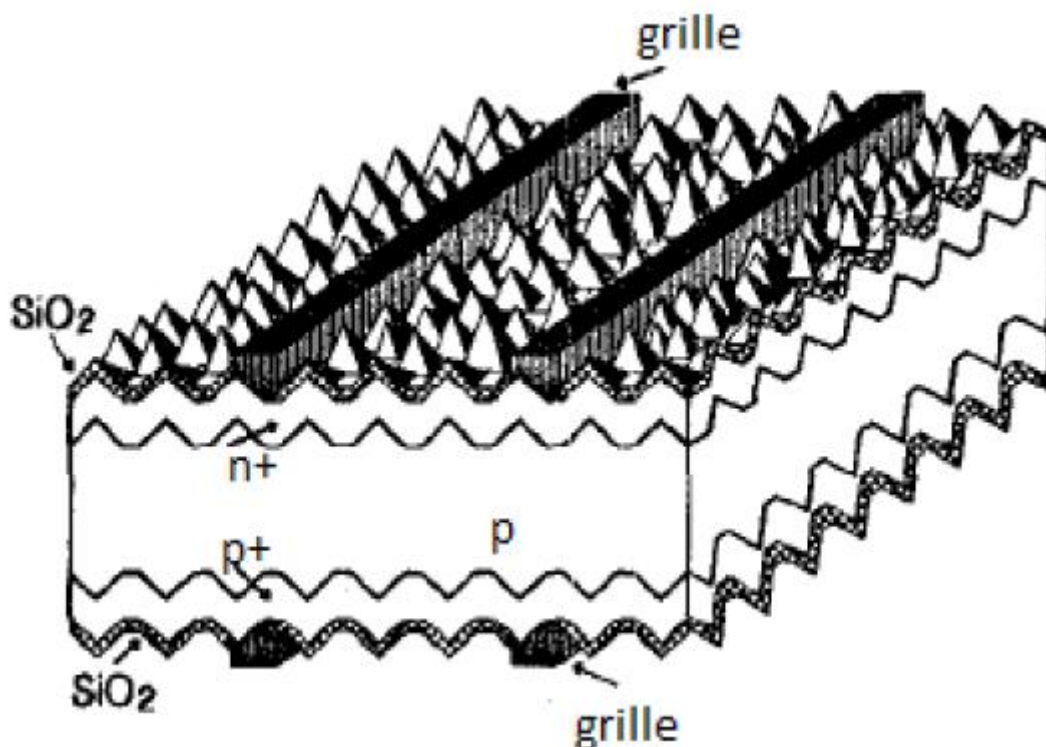


Figure III.1 : Présentation schématique de la structure d'une cellule solaire bifaciale BSF.

### III.2.2 : Principe de fonctionnement de la cellule solaire bifaciale BSF :

Le principe de fonctionnement de la cellule solaire bifaciale BSF est pareil que celui de la cellule solaire conventionnelle. Cependant, la cellule bifaciale collecte la lumière par ses deux faces avant et arrière. Ainsi, le courant photo-généré total est constitué par la somme des deux courants photo-générés, qui sont dus à l'éclairement de la cellule par la face avant (l'émetteur) et par la face arrière (la base) ([Uematsu et Sutsui, 2003](#)).

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

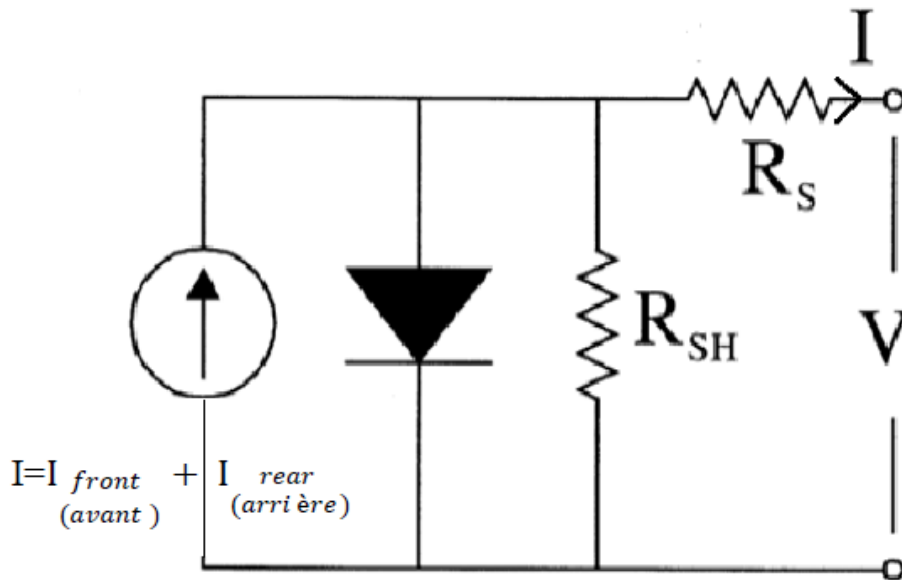


Figure III-2 : Le circuit électrique équivalent de la cellule solaire bifaciale.

### III.3 Caractéristiques électriques de la cellule solaire bifaciale BSF :

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

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

C'est le courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule solaire bifaciale. Il est égal à la somme du courant photo-généré dû à l'absorption de la lumière par la face avant et du courant photo-généré dû à l'absorption de la lumière par la face arrière ([Uematsu et Sutsui, 2003](#)).

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

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

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 photo-courant produit par la cellule solaire bifaciale éclairée par sa face arrière.

$I_{ph}$  : Le photo-courant total produit par la cellule solaire bifaciale.

➤ **La tension de circuit ouvert :**

C'est la tension pour laquelle la cellule bifaciale ne fournit aucun courant. On peut calculer la tension de circuit ouvert ( $V_{co.bif}$ ) de la cellule solaire bifaciale à partir de son circuit électrique équivalent (Figure III-2), ([Uematsu et Sutsui, 2003](#))

$$V_{co.bif} = \left(\frac{KT}{q}\right) \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad (III.2)$$

Où :

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

➤ **Le facteur de forme FF :**

Il définit l'efficacité de la cellule solaire. C'est le rapport entre la puissance maximale débitée et la puissance idéale, il est obtenu comme suit ([Benmoussa et al, 2007](#)) :

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

$$FF = \frac{I_{M.front} \times V_{M.front}}{I_{cc.front} \times V_{co.front}} \quad (III.3)$$

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 :

$$FF = \frac{I_{M.rear} \times V_{M.rear}}{I_{cc.rear} \times V_{co.rear}} \quad (III.4)$$

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 ([Adolf et al, 1998](#)).

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

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

Avec :

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

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

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

Avec :

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

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

La puissance totale générée par la cellule solaire bifaciale est égale à la somme des deux puissances produites, c'est-à-dire la puissance délivrée par l'éclairement de la face avant et la puissance délivrée par l'éclairement de la face arrière.

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

$$P_{M.front} = I_{M.front} \times V_{M.front} \quad (III.7)$$

Avec :

$P_{M.front}$  : 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 :

$$P_{M.rear} = I_{M.rear} \times V_{M.rear} \quad (III.8)$$

Avec :

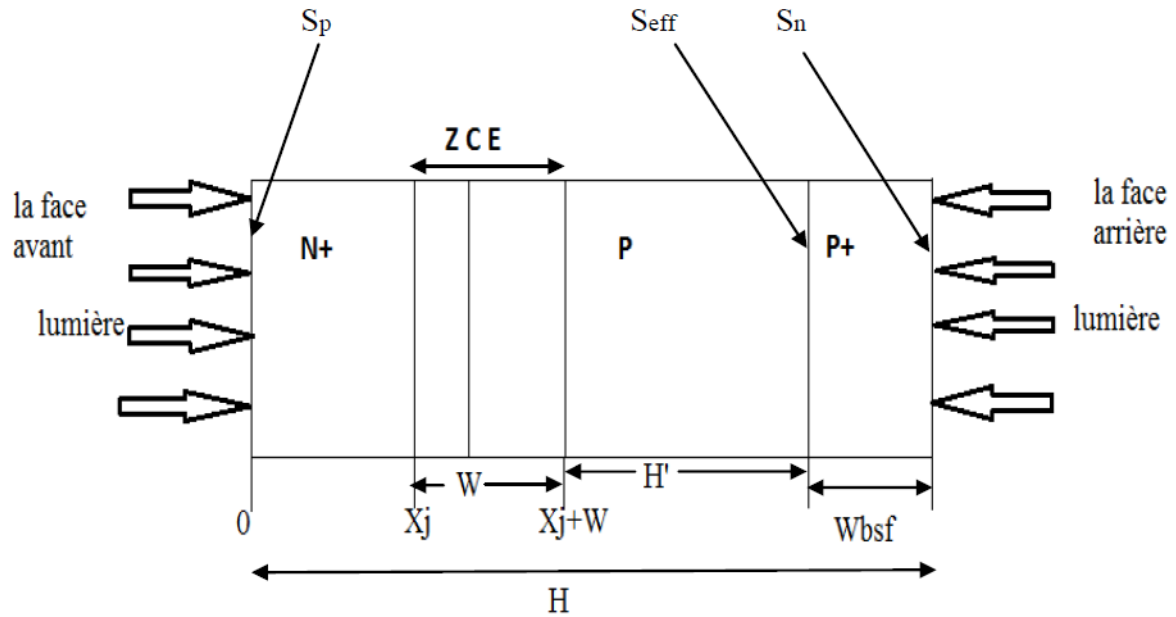
$P_{M.rear}$  : La puissance maximale générée par la cellule bifaciale éclairée par sa face arrière.

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

$$P_{M.tot} = P_{M.front} + P_{M.rear} \quad (III.9)$$

## III.4 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 ( $P^+$ ) ([salhi et al, 2010](#)).



**Figure III-3 :** Représentation schématique d'un modèle à une dimension de la cellule solaire bifaciale.

### III.4.1 Le photo-courant généré par une cellule solaire bifaciale BSF :

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

$$J_{ph} = J_n + J_p + J_{dr} + J_{bsf} \quad (III.10)$$

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+).

#### III.4.1.1 Le photo-courant généré dans la région quasi-neutre p (la base) :

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

$$G_n - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} + \frac{1}{q} \frac{dJ_n}{dx} = 0 \quad (III.11)$$

Avec :

$G_n$  : Le taux de génération des paires électron-trou à une distance  $x$  de la surface,  $G_n(x)$  est donné par la relation suivante [\(Adolf et al, 1998\)](#) :

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

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

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

Avec :

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

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

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

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

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

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

$E$  : Le champ électrique interne,

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

La combinaison des équations (III.11), (III.12) et (III.13) permet d'aboutir à l'expression suivante :

$$D_n \frac{d^2 n_p}{dx^2} + \alpha\phi(1 - R)\exp(-\alpha x) - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} = 0 \quad (\text{III.14})$$

La relation générale est obtenue via la relation (III.15) :

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

Où :

$L_n = \sqrt{\tau_n D_n}$  : est la longueur de diffusion d'électrons. A et B : Constantes.

Les deux conditions aux limites sont obtenues :

$$\begin{aligned} & \text{➤ Pour } x = X_{j+w} \\ n_p - n_{p0} & \approx 0 \end{aligned} \quad (\text{III.16})$$

$$\text{➤ Pour } x = H - W_{bsf}$$

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

Où :

W : Est la largeur de la zone de déplétion.

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

H : L'épaisseur totale de la cellule.

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

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

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

$$n_p - n_{p0} = \frac{\alpha \phi (1-R) \tau_n}{\alpha^2 L_n^2 - 1} e^{-\alpha(x_j+W)} \left[ \cosh\left(\frac{x-x_j-W}{L_n}\right) - e^{-\alpha(x-x_j-W)} \right] - \frac{\left(\frac{S_{eff} L_n}{D_n}\right) \left[ \cos\left(\frac{H'}{L_n}\right) - e^{-\alpha H'} \right] + \sinh\left(\frac{H'}{L_n}\right) + \alpha L_n e^{-\alpha H'}}{\left(\frac{S_{eff} L_n}{D_n}\right) \sinh\left(\frac{H'}{L_n}\right) + \cosh\left(\frac{H'}{L_n}\right)} \sinh\left(\frac{x-x_j-W}{L_n}\right) \quad (III.19)$$

À Partir de l'équation (III.19), on peut calculer le photo-courant du aux électrons collectés à la limite de la zone de charge d'espace :

$$x = x_j + W$$

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

Où :

$H'$  : Est la partie neutre de la région de la base telle qu'il est montré par la figure (III-3).

L'équation (III.20) est obtenue en supposant que la durée de vie, la mobilité et le dopage dans la région de base sont constants.

### III.4.1.2 Le photo-courant dans la région quasi-neutre $N^+$ (l'émetteur):

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 :

$$D_p \frac{d^2 p_n}{dx^2} + \alpha \phi (1 - R) \exp(-\alpha x) - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} = 0 \quad (\text{III.21})$$

La solution générale est exprimée par :

$$p_n - p_{n0} = A \cosh\left(\frac{x}{L_p}\right) + B \sinh\left(\frac{x}{L_p}\right) - \frac{\alpha \phi (1 - R) \tau_p}{\alpha^2 L_p^2 - 1} \exp(-\alpha x) \quad (\text{III.22})$$

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

A et B : Constantes.

Les deux conditions aux limites sont :

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

$$D_p \frac{d(p_n - p_{n0})}{dx} = S_p (p_n - p_{n0}) \quad (\text{III.23})$$

- 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 :

$$p_n - p_{n0} \approx 0 \quad (\text{III.24})$$

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

$$p_n - p_{n0} = \left[ \frac{\alpha \phi (1 - R) \tau_p}{(\alpha^2 L_p^2 - 1)} \right] \times \left[ \frac{\left( \frac{S_p L_p}{D_p} + \alpha L_p \right) \sinh\left(\frac{x_j - x}{L_p}\right) + e^{-\alpha x_j} \left( \frac{S_p L_p}{D_p} \sinh\frac{x}{L_p} + \cosh\frac{x}{L_p} \right)}{\left( \frac{S_p L_p}{D_p} \sinh\frac{x_j}{L_p} + \cosh\frac{x_j}{L_p} \right)} - e^{-\alpha x} \right] \quad (\text{III.25})$$

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

$$J_p = -q D_p \left( \frac{dp_n}{dx} \right)_{x_j} = \left[ \frac{q \phi (1 - R) \alpha L_p}{(\alpha^2 L_p^2 - 1)} \right] \times \left[ \frac{\left( \frac{S_p L_p}{D_p} + \alpha L_p \right) - e^{-\alpha x_j} \left( \frac{S_p L_p}{D_p} \cosh\frac{x_j}{L_p} + \sinh\frac{x_j}{L_p} \right)}{\left( \frac{S_p L_p}{D_p} \sinh\frac{x_j}{L_p} + \cosh\frac{x_j}{L_p} \right)} - \alpha L_p e^{-\alpha x_j} \right] \quad (\text{III.26})$$

### III.4.1.3 Le photo-courant dans la région de charge d'espace ZCE :

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

recombinaison. Ainsi, on peut dire que la densité du photo-courant ne dépend que du nombre de photons absorbés. Le photo-courant généré dans la ZCE est exprimé par [\(Adolf et al, 1998\)](#) :

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

#### III.4.1.4 Le photo-courant dans la région fortement dopée P<sup>+</sup> :

Le photo-courant généré dans la région P<sup>+</sup> est donné par la relation suivante [\(Singh and Singh, 1991\)](#).

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

Avec :

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

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

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

### III.5 Modélisation électrique de la cellule solaire bifaciale BSF éclairée par sa face arrière :

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

#### III.5.1 L'efficacité quantique interne (I.Q.E) :

Le Rendement quantique interne de la cellule solaire bifaciale, quand elle est illuminée par sa face arrière, est donné par la relation suivante [\(Kreinin, 2000\)](#) :

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

### III.5.2 La vitesse de recombinaison effective à la face arrière :

La vitesse de recombinaison effective à la face arrière de la cellule solaire bifaciale BSF, illuminée par sa face arrière,  $S_{eff}$  est donnée par l'équation suivante ([Kreinin, 2000](#)) :

$$S_{eff} = \frac{N_a}{N_{bsf}} \frac{D_{bsf}}{L_{bsf}} \frac{\frac{S_n L_{bsf}}{D_{bsf}} + th\left(\frac{W_{bsf}}{L_{bsf}}\right)}{1 + \frac{S_n L_{bsf}}{D_{bsf}} th\left(\frac{W_{bsf}}{L_{bsf}}\right)} \quad (III.30)$$

### III.5.3 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 ([Kreinin, 2000](#)) :

$$I_{cc} = S \times q \times \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \phi(\lambda) \times Q(\lambda) \times (1 - R) d\lambda \quad (III.31)$$

Avec :

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

$Q(\lambda) \times (1 - R)$  : 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 photo-généré par la cellule bifaciale est égal à la somme des deux courants générés, c'est-à-dire le courant généré par l'éclairement de la face avant et le courant généré par l'éclairement de la face arrière.

### **III.6 Procédés technologiques de réalisation de la cellule photovoltaïque bifaciale :**

Les principales étapes technologiques du procédé de réalisation de la photopile sont les suivantes ([Mouhoub, 2001](#)) :

- a) Traitement de la surface des plaquettes et texturation.
- b) Formation de la jonction N<sup>+</sup>/P ou de la structure N<sup>+</sup>/PP<sup>+</sup>.
- c) Isolation de la jonction parasite (PP<sup>+</sup>).
- 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 par l'amincissement de la plaquette et la croissance de micro-pyramides sur la surface (pour diminuer la réflectivité), c'est la texturation ([Mouhoub, 2001](#)).

#### **b. Formation de la jonction N<sup>+</sup>/P ou de la structure N<sup>+</sup>/PP<sup>+</sup> :**

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) ([Mouhoub, 2001](#))

#### **c. Isolation de la jonction parasite (PP<sup>+</sup>) :**

Cette étape a une incidence directe sur les performances électriques du dispositif. Pour la formation d'une jonction parasite, il faut protéger la face arrière de la plaquette par une épaisse couche d'oxyde ([Mouhoub, 2001](#)).

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

Cette étape 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 ([Oleksiv, 2005](#)).

#### **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) ([Mouhoub, 2001](#)).

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

Les configurations des grilles collectrices sont définies à partir de plusieurs paramètres tels 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 ([Mouhoub, 2001](#)).

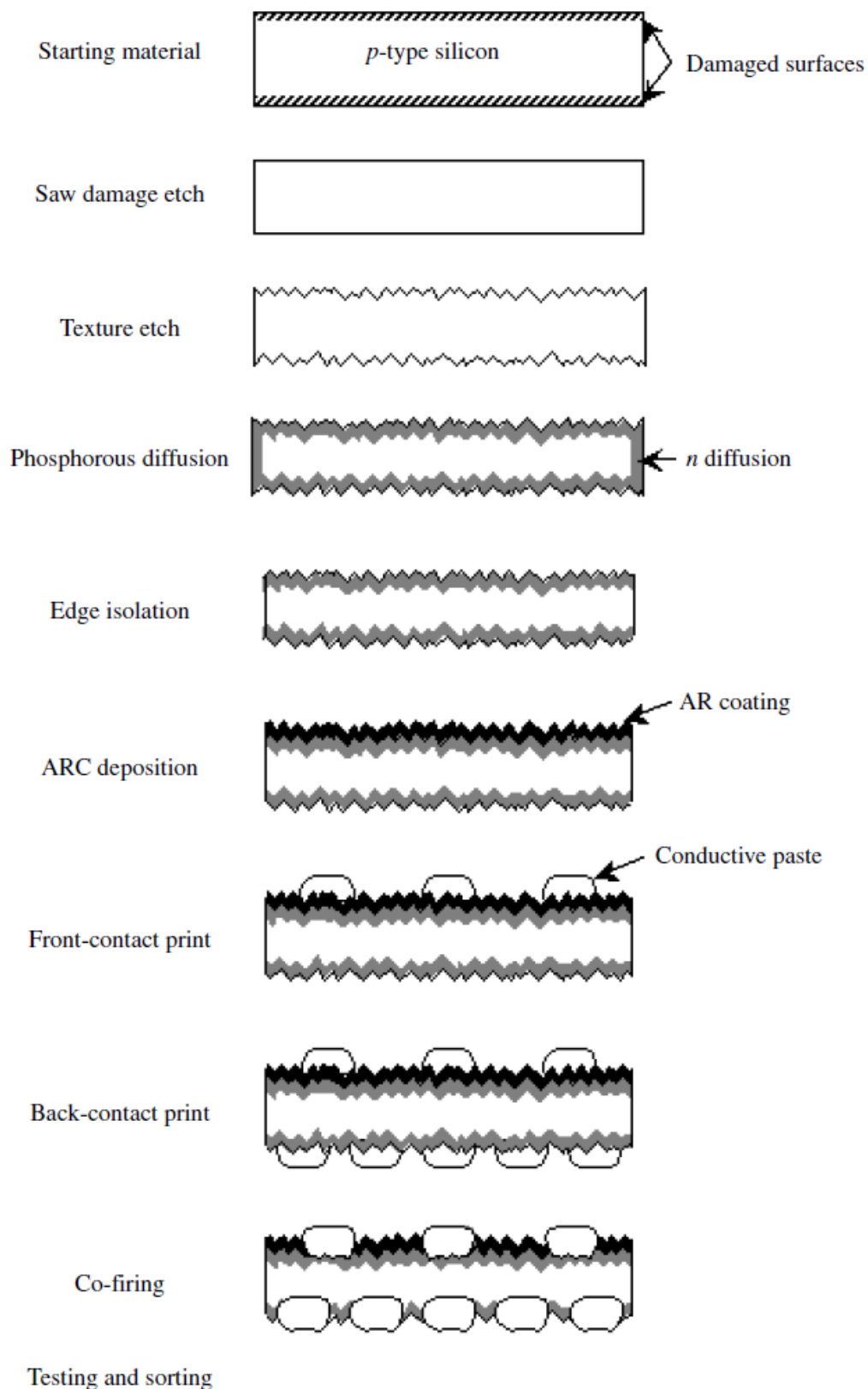
### **e.2. Dépôt du contact arrière :**

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 ([Mouhoub, 2001](#)).

### **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 ( $\lambda_0$ ). 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> ( $n = 1,9$ ), TiO<sub>2</sub> ( $n = 2,3$ ) ([Mouhoub, 2001](#)).



A typical processing sequence with schematic illustrations of the resulting structures

**Figure III-4 :** Procédés de fabrication type d'une cellule solaire bifaciale avec BSF.

**Chapitre IV :**  
**Résultats de simulation et**  
**discussions.**

## **IV.1 Le logiciel PC1D (Personal Computer One Dimension) :**

Le PC1D est un simulateur solaire unidimensionnel sous Windows, créé initialement au laboratoire de Sandia National par Dr. Paul Basore et son équipe, puis développé par Dr Don Clugston à l'Université de New South Wales (UNSW) en Australie. La première version a été publiée en décembre 1985. Le programme est devenu populaire grâce à son interface simple et souple, ce qui le rend facile à utiliser. Durant son exécution, seul le fichier PD1D.EXE est nécessaire pour les calculs. La base de données du PC1D contient un fichier help PC1D.HELP et quelques fichiers additionnels des paramètres physiques de quelques matériaux tels que le Silicium (Si), le Germanium (Ge), l'InP et le GaAs. Il contient les spectres solaires standards terrestres, spatiaux et diffus (AM0, AM1.5G et AM1.5D).

Typiquement, le PC1D est utilisé pour modéliser les cellules solaires à base de semi-conducteurs ([Abderrezek, 2015](#)).

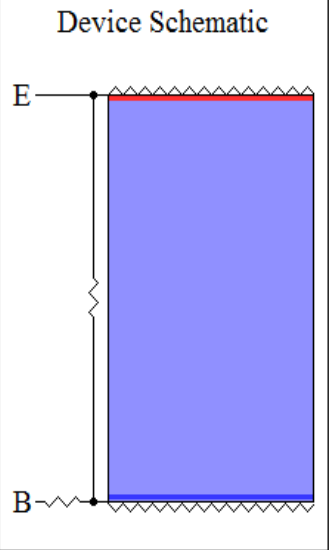
## **IV.2 Le fonctionnement du PC1D :**

L'interface proposée par le simulateur PC1D permet de bien présenter la structure solaire à étudier, qui peut être représentée au maximum par cinq couches. Chaque couche est prise en charge par le simulateur à travers les paramètres de la figure (IV-1).

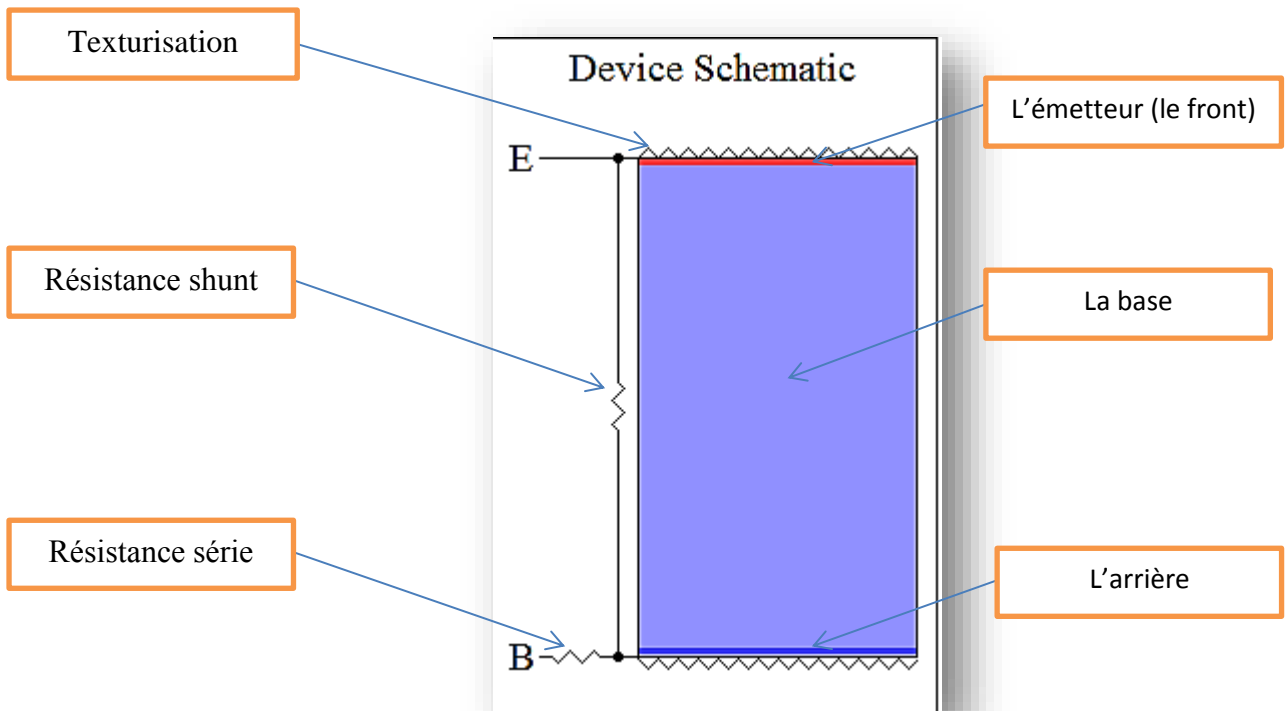
Pour chaque couche, une liste de paramètres s'affiche sur la fenêtre principale. En cliquant sur le paramètre, on introduit la nouvelle valeur.

Après l'introduction de toutes les données nécessaires du matériau, le PC1D peut maintenant fonctionner.

Un schéma descriptif de la structure étudiée est généré systématiquement du côté droit du panneau principal du simulateur. Pour spécifier l'étude à faire sous PC1D, deux fichiers externes sont nécessaires pour son exécution. Ces fichiers spécifient l'étude à faire, soit en obscurité (Dark-4.EXC), soit sous éclairage (One-Sun.EXC, Scan-Qe.EXC). Le fichier (One Sun.EXC) permet le calcul des caractéristiques (I-V, P-V), ainsi que le rendement  $\eta$  et le facteur de forme FF, alors que le fichier (Scan-Qe.EXC) permet le calcul des rendements quantiques externe et interne.

<p><b>DEVICE</b></p> <p>Device area: 100 cm<sup>2</sup>          Front surface texture depth: 3 μm          Rear surface texture depth: 3 μm  <i>No surface charge</i>          Exterior Front Reflectance: 10%          Exterior Rear Reflectance: 10%          Internal optical reflectance enabled            Front surface optically rough          Emitter contact enabled          Base contact: 0.015 Ω          Internal conductor: 0.3 S</p> <p><b>REGION 1</b></p> <p>Thickness: 200 μm          Material modified from si.mat            Carrier mobilities from internal model            Dielectric constant: 11.9            Band gap: 1.124 eV            Intrinsic conc. at 300 K: 1×10<sup>10</sup> cm<sup>-3</sup>            Refractive index from si.inr            Absorption coeff. from si300.abs            Free carrier absorption enabled          P-type background doping: 1.513×10<sup>15</sup> cm<sup>-3</sup>            1st front diff.: N-type, 2.87×10<sup>20</sup> cm<sup>-3</sup> peak            <i>No 2nd front diffusion</i>            1st rear diff.: P-type, 1×10<sup>20</sup> cm<sup>-3</sup> peak            <i>No 2nd rear diffusion</i>          Bulk recombination: τ<sub>n</sub> = τ<sub>p</sub> = 1000 μs          Front-surface recom.: S model. S<sub>n</sub> = S<sub>p</sub> = 1×10<sup>5</sup> cm/s</p>	<p style="text-align: center;">Device Schematic</p> 
--	--

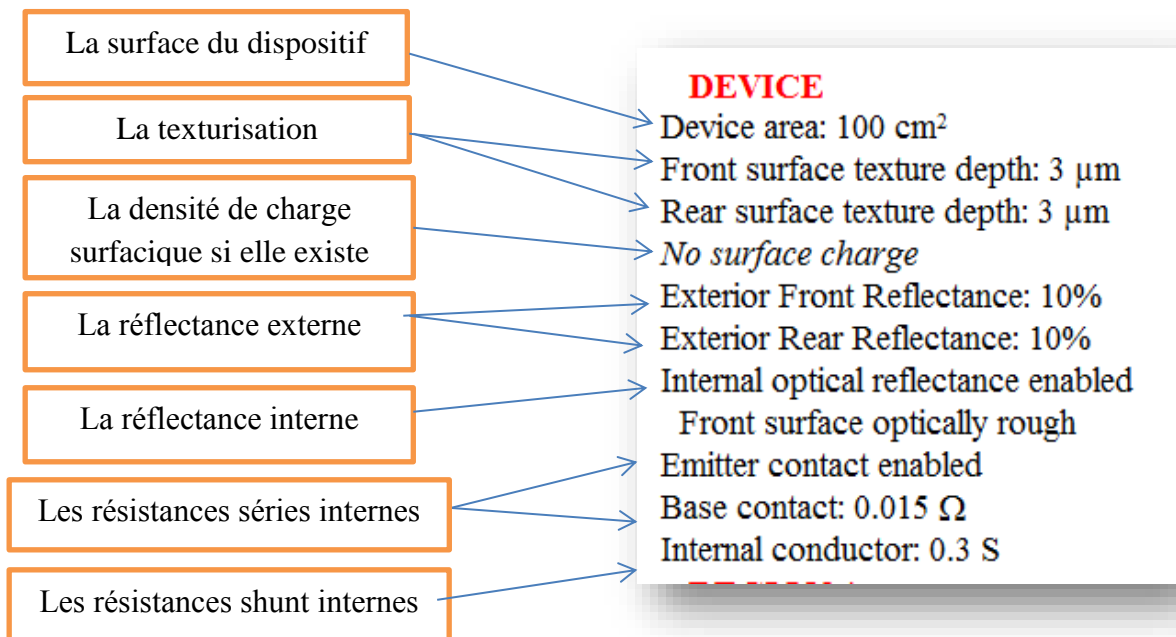
**Figure IV-1** : Fenêtre du logiciel PC1D.



**figureIV-2** : schéma global de dispositif d'une cellule solaire.

Pour visualiser les résultats de la simulation, il faut d'abord introduire les paramètres du dispositif, des régions et de l'excitation, et ensuite exécuter le programme de la simulation, ce qui permet de visualiser les résultats sous forme de données ou de graphes.

#### IV.2.1 Les paramètre du dispositif :



## IV.2.2 Les paramètre des régions :

- L'épaisseur de l'émetteur.
- Le matériau utilisant les paramètres qui le décrivent, sont stockés dans des fichiers d'extension (\*.mat), ils sont fournis avec le logiciel. Les paramètres stockés dans ce fichier sont :
  - ✓ -La mobilité : le modèle utilisé est le modèle de Thuber et al 1981.
  - ✓ -La constante diélectrique.
  - ✓ -L'énergie du gap (eV).
  - ✓ -La concentration intrinsèque ( $\text{cm}^{-3}$ ).
  - ✓ -L'indice de réfraction
  - ✓ -Coefficient d'absorption  $\alpha$ .
  - ✓ -Absorption des porteurs libres.
- Type et concentration de dopage : de type n ou p, Ce logiciel présente quatre profils de dopages : le profil uniforme, le profil exponentiel, le profil gaussien et le profil erfc (fonction erreur complémentaire correspondant à la diffusion thermique).
- Les recombinaisons face avant et arrière.

## IV.2.3 Les paramètre d'excitation :

- -Deux fichiers intégrés dans le logiciel permettent de simuler la caractéristique courant-tension et autres caractéristiques en utilisant le fichier « One-Sun.exc », ou les rendements quantiques en utilisant le fichier « Scan-qe.exc ».
- -Le mode d'excitation : Il y a trois modes d'excitation (en équilibre, stationnaire et transitoire). Pour une bonne simulation numérique, le mode transitoire est recommandé.
- Dans la plupart des cas, on choisit la température ambiante,  $T=25$  C.

## IV.2.4 Les résultats :

Les résultats que nous pouvons visualiser en utilisant le fichier d'excitation « One-Sun.exc » du PC1D sont :

- -La valeur du courant de court-circuit.
- -La valeur de la puissance maximale et le rendement énergétique.
- -La valeur de la tension en circuit ouvert.
- -La courbe de la caractéristique  $I(V)$ .

## IV.3 Etude et optimisation par simulation de la cellule solaire :

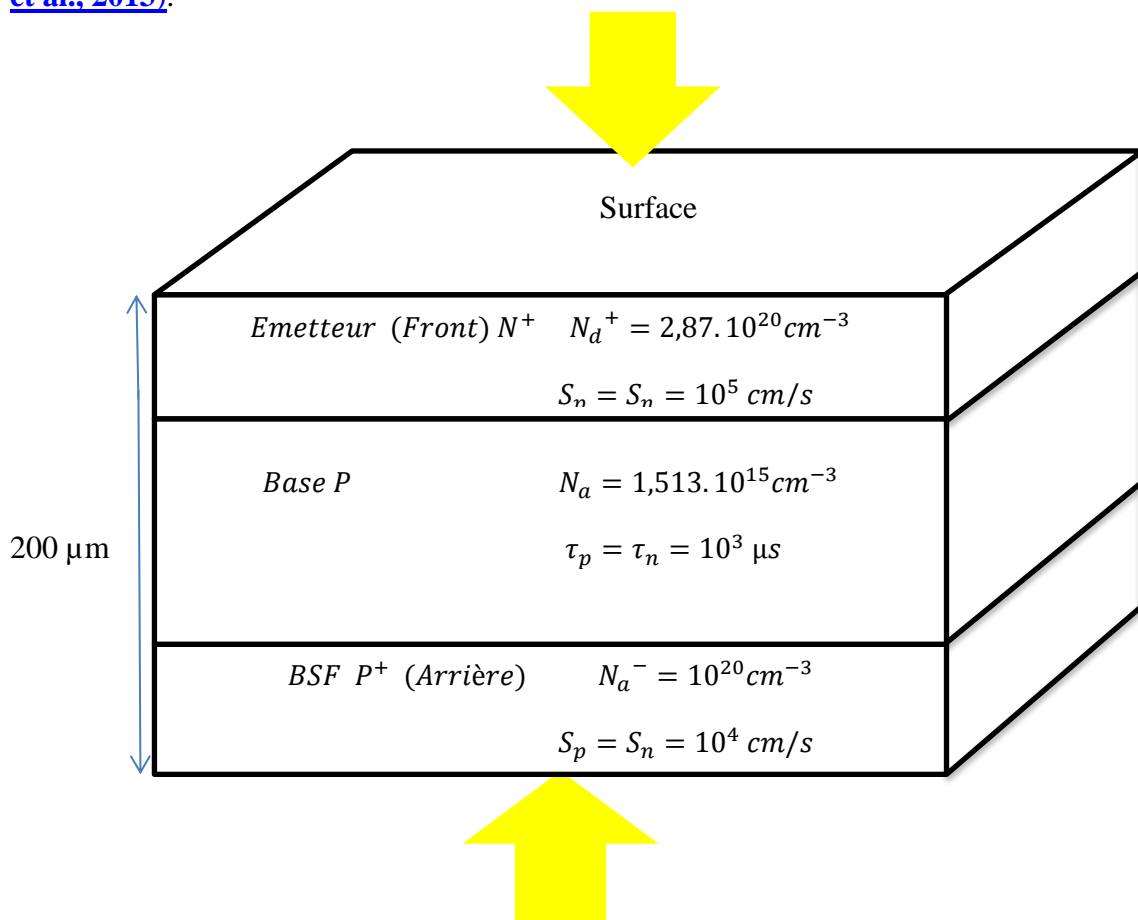
Dans un premier temps, nous avons choisi les paramètres d'une cellule solaire de substrat de type P que nous avons trouvé dans la littérature et que nous avons validé ses résultats pour pouvoir ensuite l'utiliser comme référence dans l'étude d'une cellule solaire de substrat de type N.

### IV.3.1 Paramètres de la simulation :

Les paramètres que nous avons utilisés ([Sepeai et al, 2013](#)) pour le calcul par PC1D sont représentés dans le tableau (IV-1).

Régions	Paramètres	Valeurs initiales retenues dans PC1D
	La surface de la cellule solaire	100 cm <sup>2</sup>
	La texturisation (ou texturation)	-Angle de pyramide: 54,74° -Épaisseur de pyramide: 3 μm
<b>Base de type P</b>	L'épaisseur de la base (la cellule)	200 μm
	Le dopage de la base	1,513.10 <sup>15</sup> cm <sup>-3</sup>
	La durée de vie des électrons et des trous (τ <sub>n</sub> et τ <sub>p</sub> ) dans le volume (base)	1000 μs
<b>Emetteur de type N<sup>+</sup></b>	Le dopage de l'émetteur (par diffusion thermique)	2,87.10 <sup>20</sup> cm <sup>-3</sup>
	Les vitesses de recombinaison des électrons S <sub>n</sub> et des trous S <sub>p</sub> à la surface de l'émetteur	10 <sup>5</sup> cm/s
<b>BSF de type P<sup>+</sup></b>	Le dopage de l'arrière de la cellule (par diffusion thermique) (BSF)	1.10 <sup>20</sup> cm <sup>-3</sup>
	Les vitesses de recombinaison des électrons S <sub>n</sub> et des trous S <sub>p</sub> dans la surface arrière de la cellule	10 <sup>4</sup> cm/s

**Tableau IV-1** : Les différents paramètres initiaux de simulation de la cellule étudiée ([Sepeai et al., 2013](#)).



**Figure IV-3** : Schéma de la structure avec les paramètres initiaux de la cellule solaire étudiée.

Dans ce travail, nous avons varié quelques paramètres parmi les plus importants de cette cellule afin d'optimiser ses caractéristiques qui sont le courant de court-circuit  $I_{cc}$ , la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , la puissance maximale  $P_m$ , le facteur de forme FF, le rendement énergétique  $\eta$  et la bifacialité de la cellule B.

Donc, à partir de la cellule solaire de référence, nous avons varié l'épaisseur, le dopage de l'émetteur et la base de la cellule, puis on a comparé le rendement énergétique entre les deux types des cellules solaires en question.

### IV.3.2 Etude et validation des résultats de la cellule bifaciale de substrat de type P :

#### IV.3.2.1 Effet du dopage de l'émetteur (N+) :

##### 1. Etude du courant de court-circuit $I_{cc}$ :

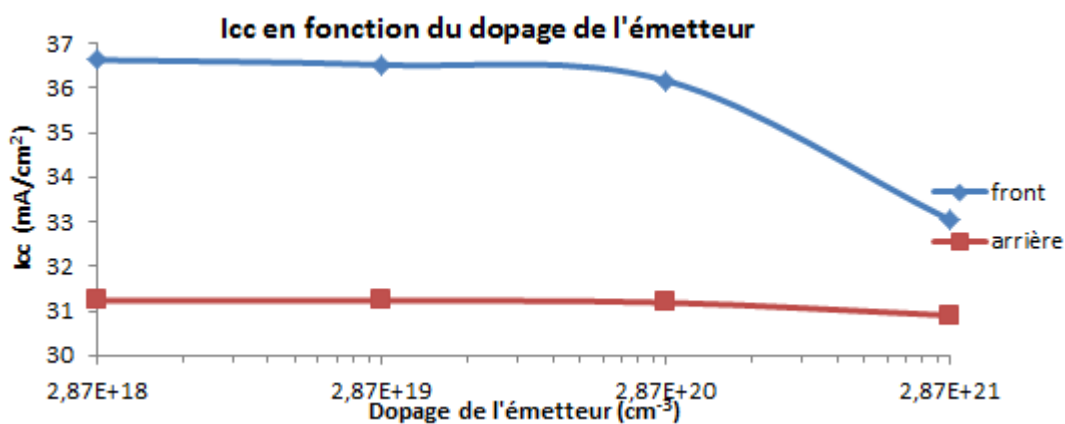


Figure IV-4 : Variation du courant de court-circuit en fonction du dopage de l'émetteur.

D'après la figure (IV-4), on remarque que le courant de court-circuit du front est d'abord constant à 36,7  $\text{mA}/\text{cm}^2$  jusqu'à la valeur de  $14.10^{19} \text{ cm}^{-3}$  puis se dégrade brusquement. Mais pour l'arrière de la cellule  $I_{cc}$  reste presque inchangé à la valeur voisine de 31  $\text{mA}/\text{cm}^2$ . Il faut noter que le courant de court-circuit pour le front reste toujours important que celui de l'arrière.

##### 2. Etude de la tension de circuit ouvert $V_{co}$ :

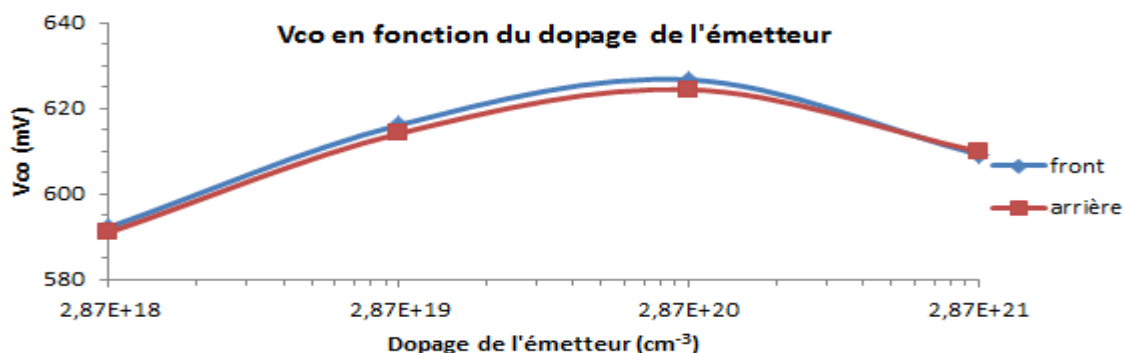
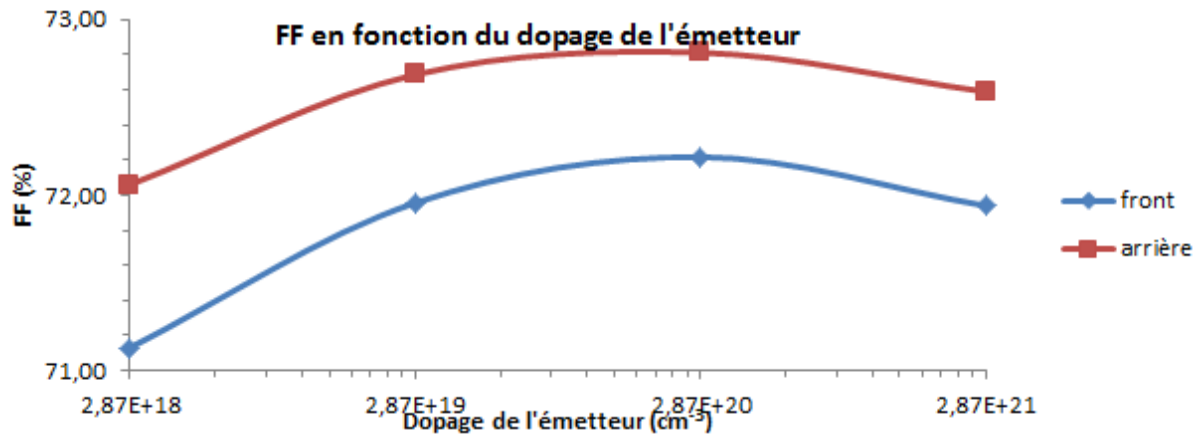


Figure IV-5 : Variation de la tension de circuit ouvert en fonction du dopage de l'émetteur.

Lorsque le dopage de l'émetteur augmente, la tension de circuit ouvert croît jusqu'à la valeur de 627 mV pour le front et de 624,4 mV pour l'arrière pour un dopage de  $3.10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , puis elle décroît pour les deux faces.

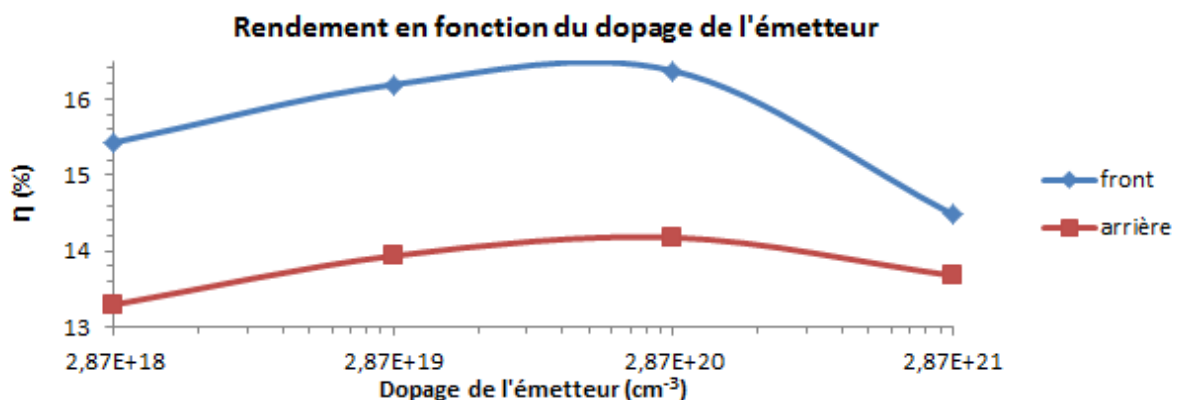
### 3. Etude du facteur de forme FF :



**Figure IV-6 :** Variation du facteur de forme en fonction du dopage de l'émetteur.

Lorsque on fait varier le dopage de l'émetteur, on constate que le facteur de forme croît jusqu'à une valeur optimale 72,22 % pour le front et 72,81 % pour l'arrière de la cellule ces valeurs deviennent pour même dopage de l'émetteur ( $2,87.10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ), puis commence à croître légèrement.

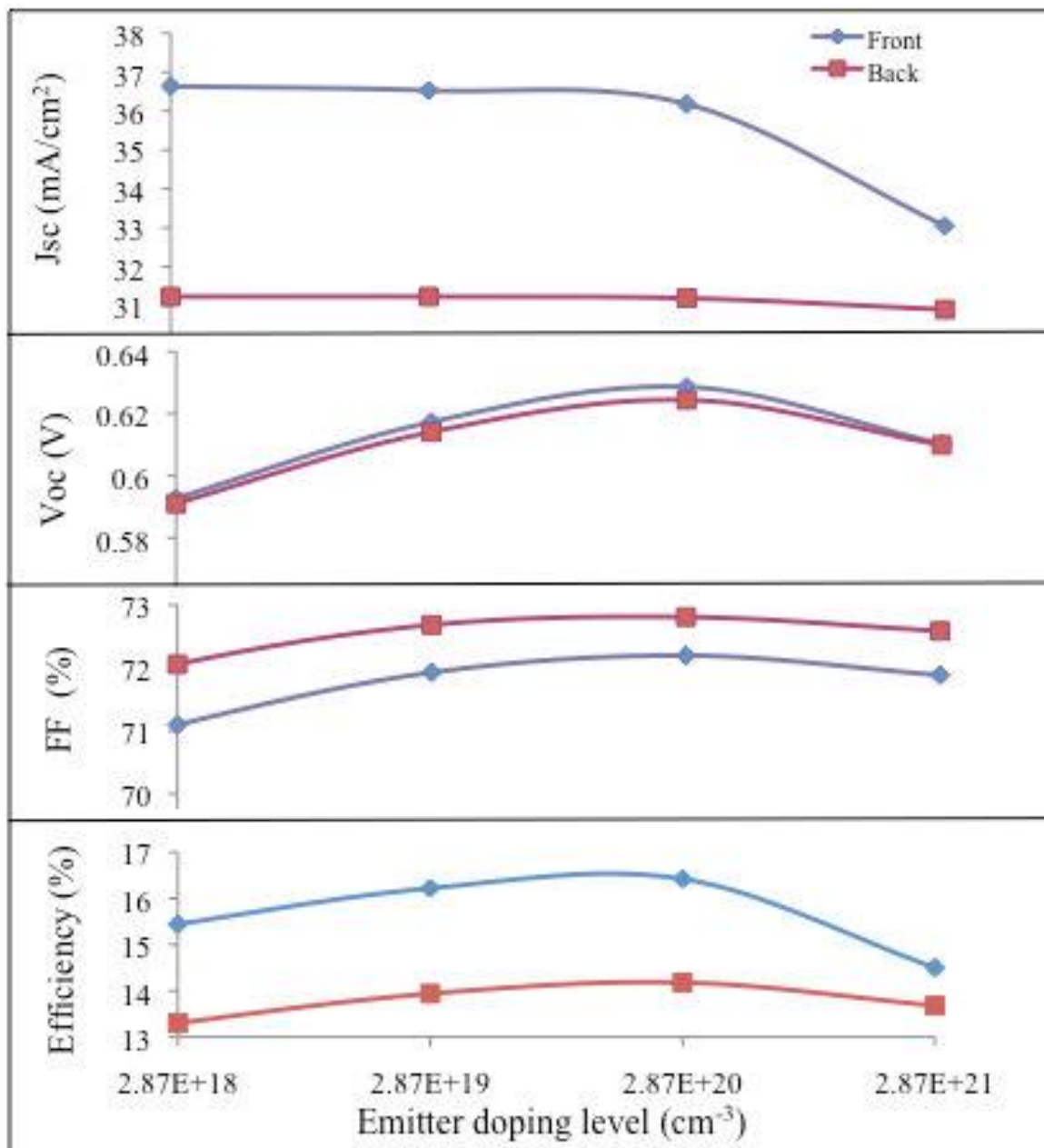
### 4. Etude du rendement $\eta$ :



**Figure IV-7 :** Variation le rendement en fonction du dopage de l'émetteur.

La Figure (IV-7) représente le rendement du front et de l'arrière de la cellule solaire. On remarque que le rendement du front est mieux que le rendement de l'arrière de la cellule. Donc le front est rapporté le meilleur rendement (16,4 %).

Remarque : les résultats obtenus ci-dessus par nos calculs sont exactement celles déterminées par la littérature comme le montre la figure (IV-7 bis) suivante :



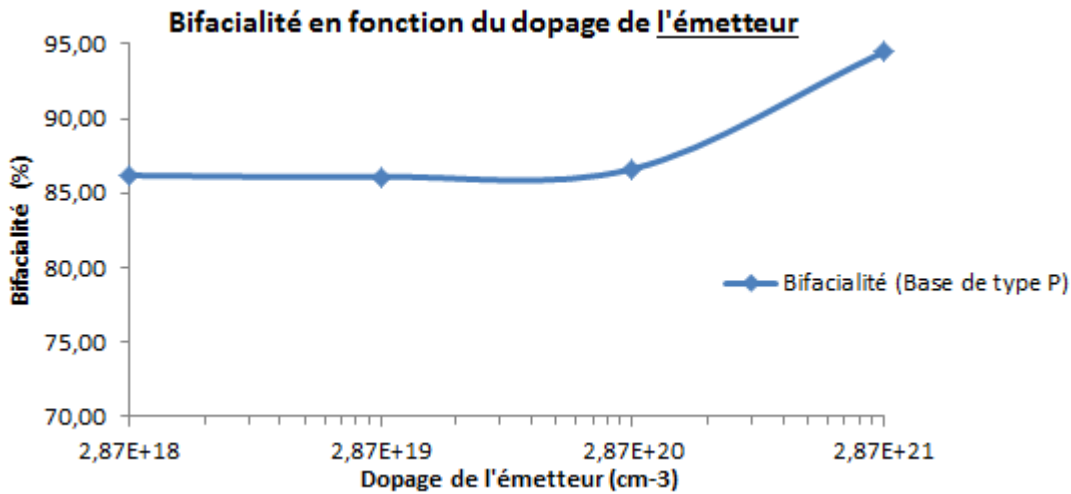
**Figure IV-7 bis** : Courbes obtenues par Sepai et al.

Ces courbes démontrent bien la validation de nos résultats.

### 5. Etude la bifacialité B :

La bifacialité définissant le rapport entre le rendement de la face arrière de la cellule et le rendement du front, est donné par la relation suivante :

$$B = \frac{\eta_{\text{arrière}}}{\eta_{\text{front}}} \quad (\text{IV.1})$$



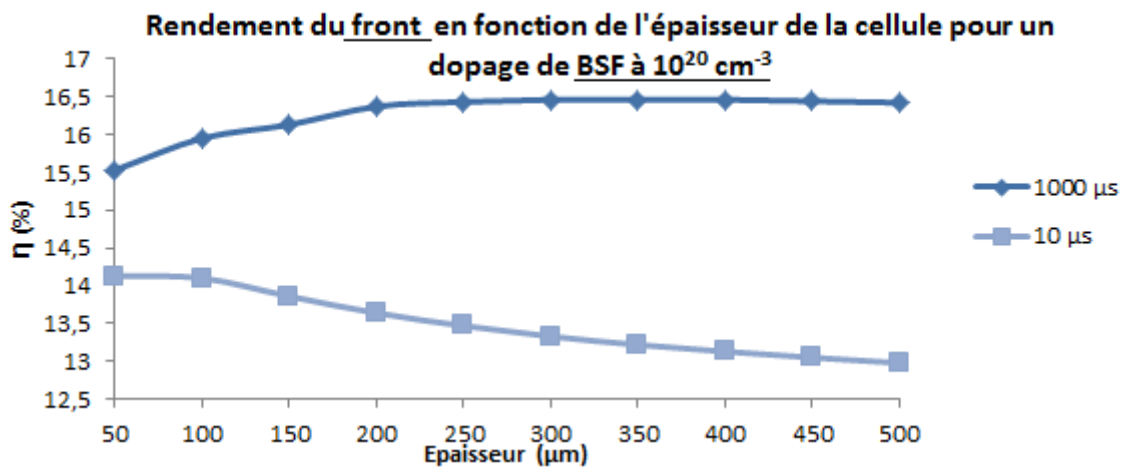
**Figure IV-8 :** Variation la bifacialité en fonction du dopage de l'émetteur.

Lorsqu'on fait varier le dopage de l'émetteur, on constate que la bifacialité ne change presque pas jusqu'à une valeur optimale 87% pour un dopage d'environ  $2,87 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  puis commence à croître strictement avec une pente raide.

#### IV.3.2.2 Effet de l'épaisseur de la base :

Cette étude est faite en couplage avec la variation du dopage de BSF ( $10^{16}$  et  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ) et pour 2 durées de vie des porteurs dans le substrat (10 et 1000  $\mu\text{s}$ ). Pour éviter une forte densité du travail, on ne s'est intéressé ici qu'aux rendements des deux faces de la cellule comme pour les travaux qui suivront.

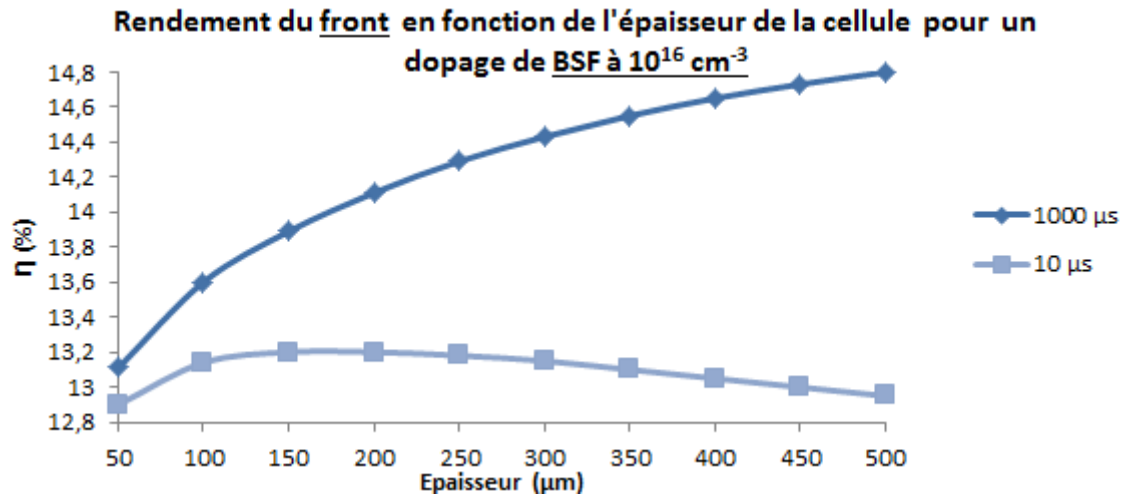
##### 1. Etude du Rendement du front de la cellule:



**Figure IV-9 :** Variation du rendement du front de la cellule en fonction de l'épaisseur de la cellule pour un dopage de BSF à  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  et pour 2 durées de vie des porteurs de la base (10 et 1000  $\mu\text{s}$ ).

Comme on peut le voir sur la figure (IV-9), l'augmentation de l'épaisseur de substrat entraîne une dégradation franche du rendement du front pour une durée de vie 10  $\mu\text{s}$  et une croissance

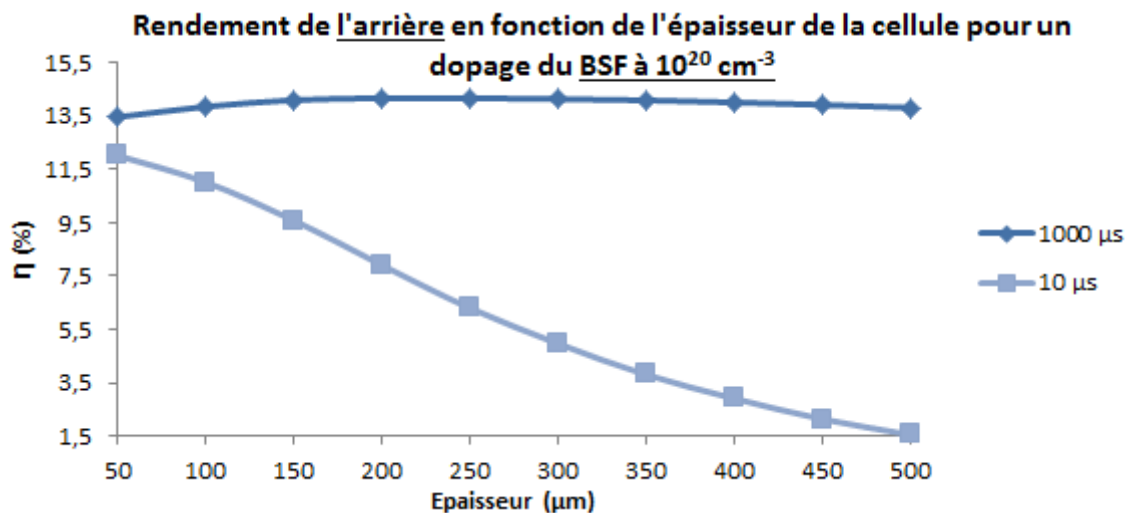
pour une durée de vie de 1000 jusqu'à l'épaisseur de 250  $\mu\text{s}$ . Au-delà de cette valeur, le rendement stagne autour d'un rendement de 16.5 %.



**Figure IV-10 :** Variation du rendement du front en fonction de l'épaisseur de la cellule pour un dopage de BSF à  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  et pour 2 durées de vie des porteurs de la base (10 et 1000  $\mu\text{s}$ ).

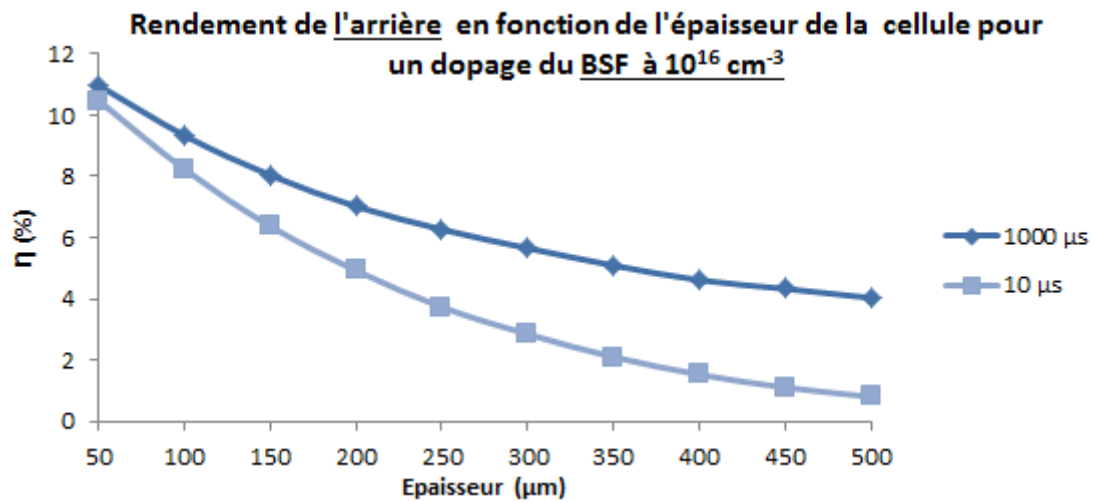
Selon ces résultats, nous remarquons que lorsque l'épaisseur du substrat augmente, le rendement du front croît grâce à l'augmentation de la durée de vie des porteurs de charges d'environ (1000  $\mu\text{s}$ ). Par contre, pour les durées de vie de 10  $\mu\text{s}$ , on observe une légère croissance pour une épaisseur de 150  $\mu\text{m}$  puis un abaissement continu. Comparativement, les rendements sont de loin meilleurs pour un dopage du BSF à  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  qu'à  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ .

## 2. Etude du Rendement de l'arrière de la cellule :



**Figure IV-11 :** Variation du rendement de l'arrière de la cellule en fonction de l'épaisseur de la cellule pour un dopage de BSF à  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  et pour 2 durées de vie des porteurs de la base (10 et 1000  $\mu\text{s}$ ).

On remarque qu'avec l'augmentation de l'épaisseur et de la durée de vie de 1000  $\mu\text{s}$  de la cellule, on obtient une optimisation du rendement de la face arrière de la cellule aux alentours d'une épaisseur de 250  $\mu\text{m}$  pour un dopage de BSF à  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ .

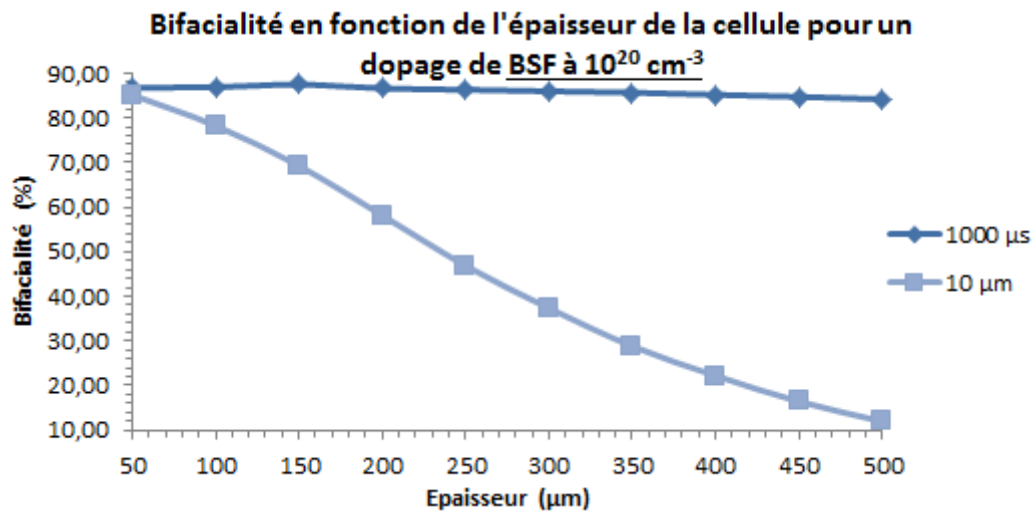


**Figure IV-12 :** Variation du rendement de l'arrière en fonction de l'épaisseur de la cellule pour dopage de BSF à  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  et pour 2 durées de vie des porteurs de la base (10 et 1000  $\mu\text{s}$ ).

La plus grande valeur de rendement est de 11% que ce soit pour une durée de vie de 1000  $\mu\text{s}$  ou de 10  $\mu\text{s}$ . Elle donc optimisée quand l'épaisseur de la cellule est la plus mince possible (50  $\mu\text{m}$ ).

D'autre part, on note que c'est avec un dopage du BSF à  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  qu'on détermine les meilleurs résultats pour le rendement de la face arrière, comme d'ailleurs pour la face avant.

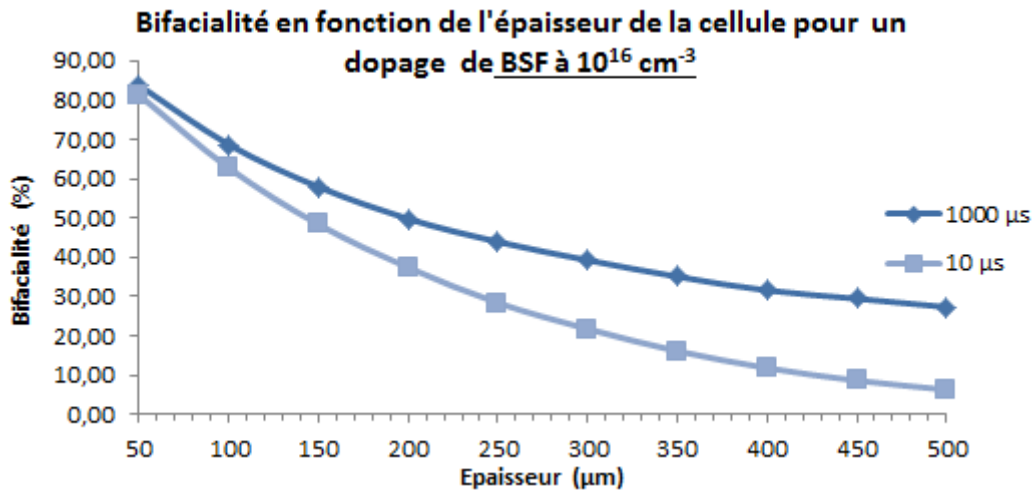
### 3. Etude la bifacialité de la cellule :



**Figure IV-13 :** Variation la bifacialité en fonction de l'épaisseur de la cellule pour dopage de BSF à  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  et pour 2 durées de vie des porteurs de la base (10 et 1000  $\mu\text{s}$ ).

D'après les résultats, nous constatons que lorsque l'épaisseur du substrat augmente, il y a une décroissance de la bifacialité pour la petite durée de vie (10  $\mu\text{s}$ ) et une légère croissance à forte dopage de BSF pour la durée de vie la plus grande (1000  $\mu\text{s}$ ).

On obtient la meilleure bifacialité à 87,48.% pour une épaisseur de 150  $\mu\text{m}$ .



**Figure IV-14 :** Variation la bifacialité en fonction de l'épaisseur de la cellule pour un dopage du BSF à  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  et pour 2 durées de vie des porteurs de la base (10 et 1000  $\mu\text{s}$ ).

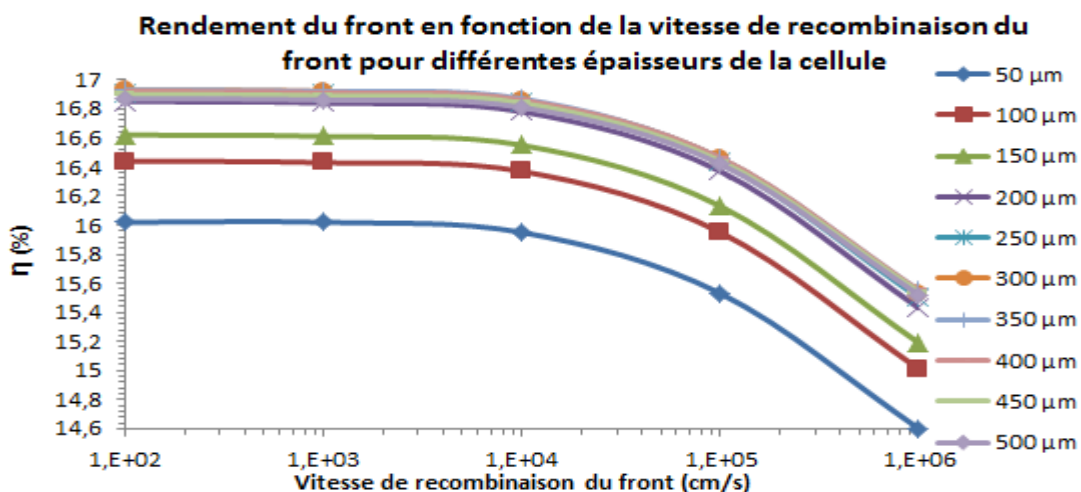
La bifacialité maximale (85 %) est celle de l'épaisseur mince de 50  $\mu\text{m}$ . En outre, on remarque à peu près la même forme de variation que celle du rendement de l'arrière de la cellule pour un dopage de BSF à  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . En effet, on observe un décroissement du rendement à  $\tau = 10 \mu\text{s}$  jusqu'à une bifacialité de 5 % à pour l'épaisseur de 500  $\mu\text{m}$ .

Finalement, un fort dopage du BSF à  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  est bon que ce soit pour les faces avant et arrière que pour un faible dopage de celui-ci à  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ .

### IV.3.2.3 Effet de la vitesse de recombinaison couplée à la variation de l'épaisseur de la base :

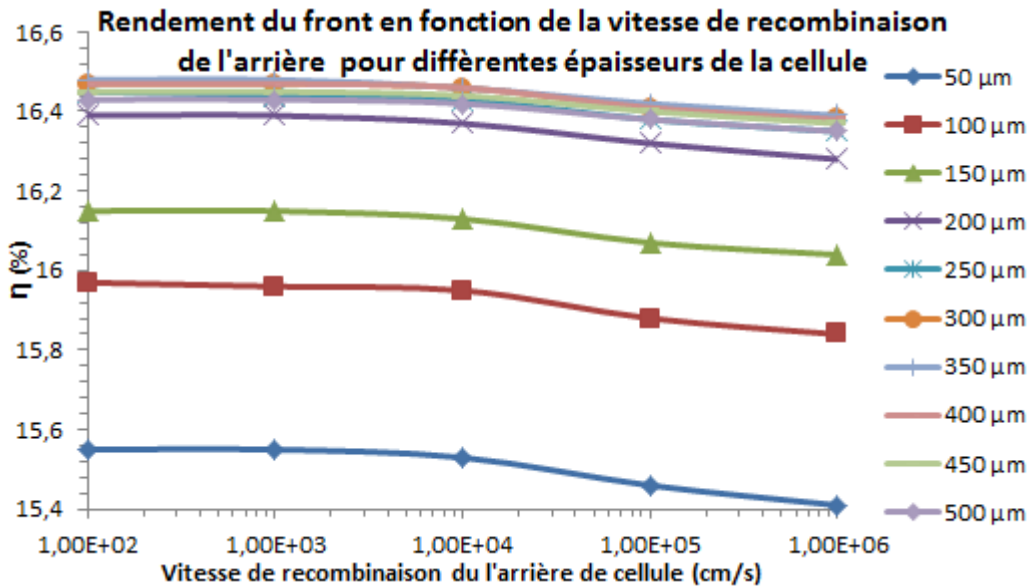
L'étude est faite en couplage avec la variation de la vitesse de recombinaison en surface avant (front) et de la vitesse de recombinaison en surface arrière (BSF) et qui a donné les figures suivantes.

#### 1. Étude du Rendement du front de la cellule :



**Figure IV-15 :** Variation du rendement du front en fonction de la vitesse de recombinaison du front pour différentes épaisseurs de la cellule.

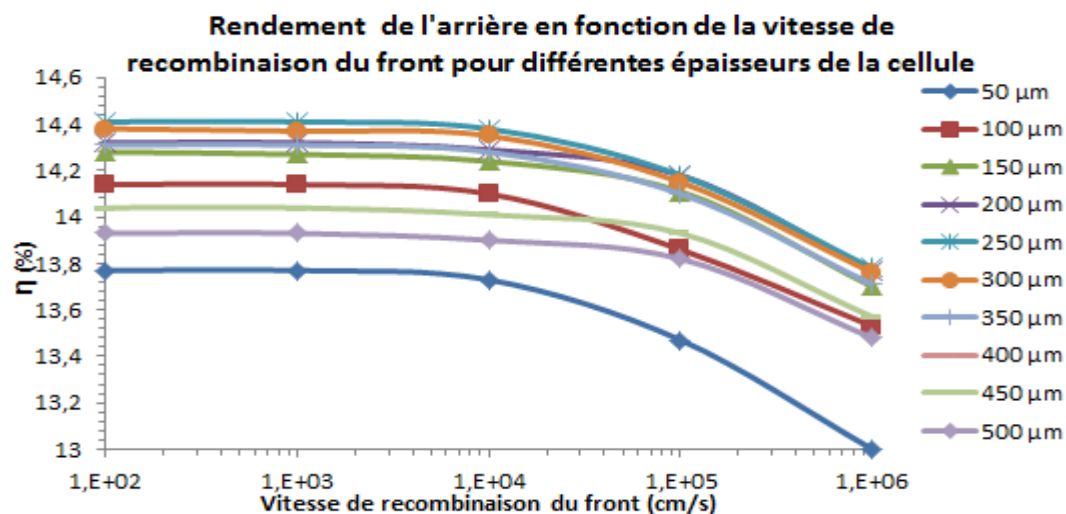
La figure (IV-15) montre que l'augmentation de la vitesse de recombinaison du front entraîne une saturation du rendement de cette face jusqu'à la valeur proche de  $10^4$  cm/s, puis une diminution à partir de cette valeur critique. Cette réduction est d'autant plus accentuée que l'épaisseur de la cellule est mince. L'optimisation est obtenue pour une épaisseur d'environ  $300 \mu\text{m}$  de la base avec un rendement 16,9 % du front, ensuite il puis commence à baisser à partir de la vitesse de recombinaison de 1000 cm/s.



**Figure IV-16 :** Variation du rendement du front en fonction de la **vitesse de recombinaison de l'arrière** pour différentes épaisseurs de la cellule.

D'après les résultats trouvés, l'élévation de la vitesse de recombinaison de la face arrière de la cellule indique une légère diminution du rendement du front qui atteint une valeur optimale de 16,5 % pour une épaisseur moyenne de  $250 \mu\text{m}$  et pour une vitesse de recombinaison de 100 cm/s.

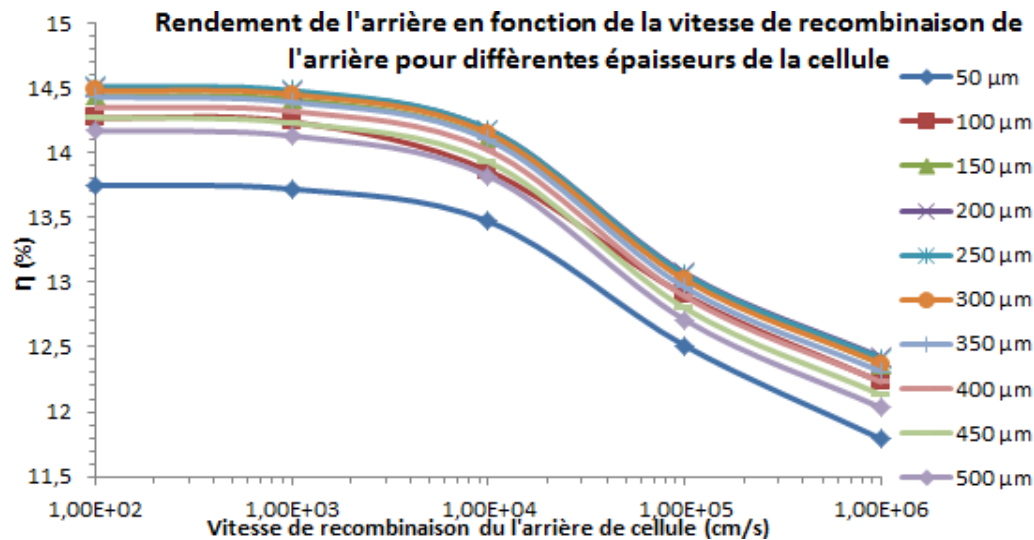
## 2. Etude du Rendement de l'arrière de la cellule :



**Figure IV-17 :** Variation du rendement de l'arrière en fonction de la **vitesse de recombinaison du front** pour différentes épaisseurs de la cellule.

On remarque que pour des variations croissantes de l'épaisseur, le rendement augmente jusqu'à 250  $\mu\text{m}$  puis entame une baisse. La diminution du rendement est d'autant plus importante lorsque la vitesse de recombinaison du front augmente.

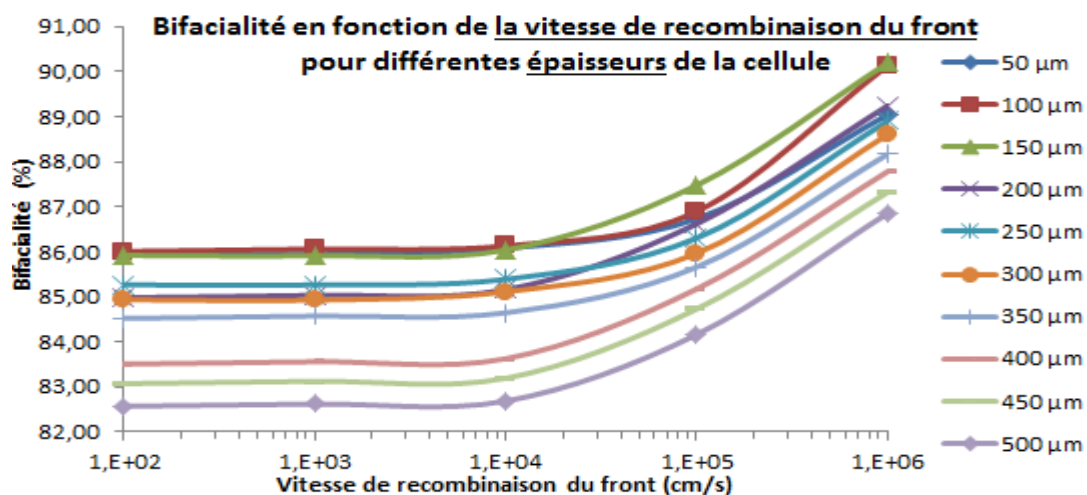
Le rendement de l'arrière de la cellule prend une valeur maximale de 14,41 % pour une épaisseur d'environ 250  $\mu\text{m}$  et jusqu'à une vitesse de recombinaison moyenne du front de  $10^4$  cm/s, puis au-delà de cette valeur, débute une diminution qui atteint une valeur minimale 13 % pour une épaisseur de 50  $\mu\text{m}$ .



**Figure IV-18 :** Variation du rendement de l'arrière en fonction de la vitesse de recombinaison de l'arrière pour différentes épaisseurs de la cellule.

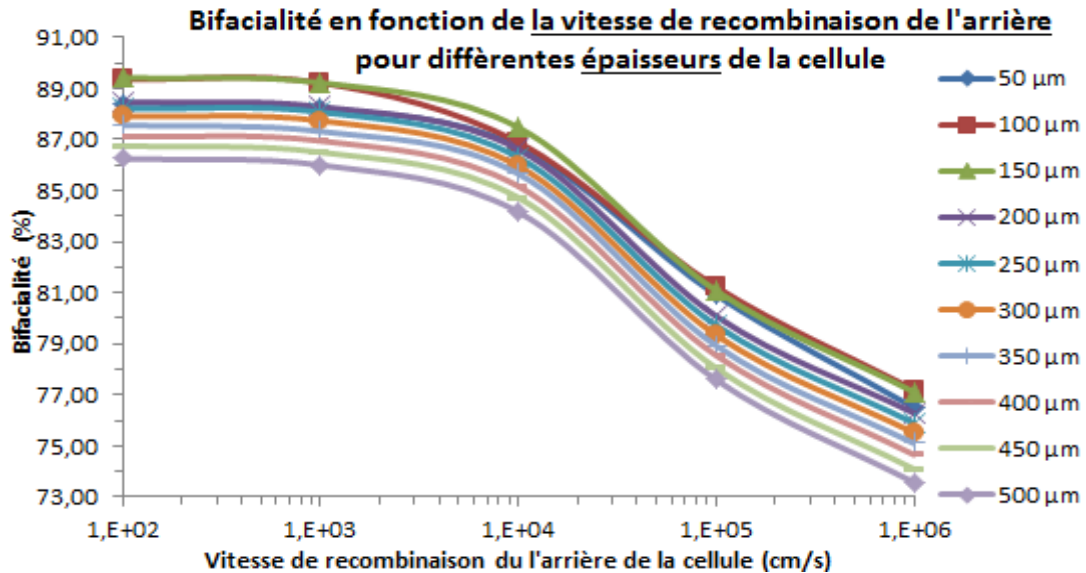
Comme on peut le constater sur la figure (IV-18), l'augmentation de la vitesse de recombinaison de l'arrière de la cellule entraîne une décroissance du rendement qui atteint une valeur minimale possible de 11,79 % pour une épaisseur de 50  $\mu\text{m}$ . L'optimisation de l'épaisseur est de 250  $\mu\text{m}$  pour une vitesse de recombinaison de l'arrière de l'ordre de 100 cm/s.

### 3. Etude la bifacialité de la cellule :



**Figure IV-19 :** Variation la bifacialité en fonction de la vitesse de recombinaison du front pour différentes épaisseurs de la cellule.

D'après les résultats trouvés, nous avons remarquées que la bifacialité presque reste stable jusqu'à une vitesse de recombinaison d'environ  $10^4 \text{ cm}^{-3}$  pour chaque épaisseur de la cellule. Puis croître légèrement qui atteint une valeur optimale de 90,19 % pour une épaisseur de 150  $\mu\text{m}$ .



**Figure IV-20 :** Variation la bifacialité en fonction de la **vitesse de recombinaison de l'arrière** pour différentes épaisseurs de la cellule.

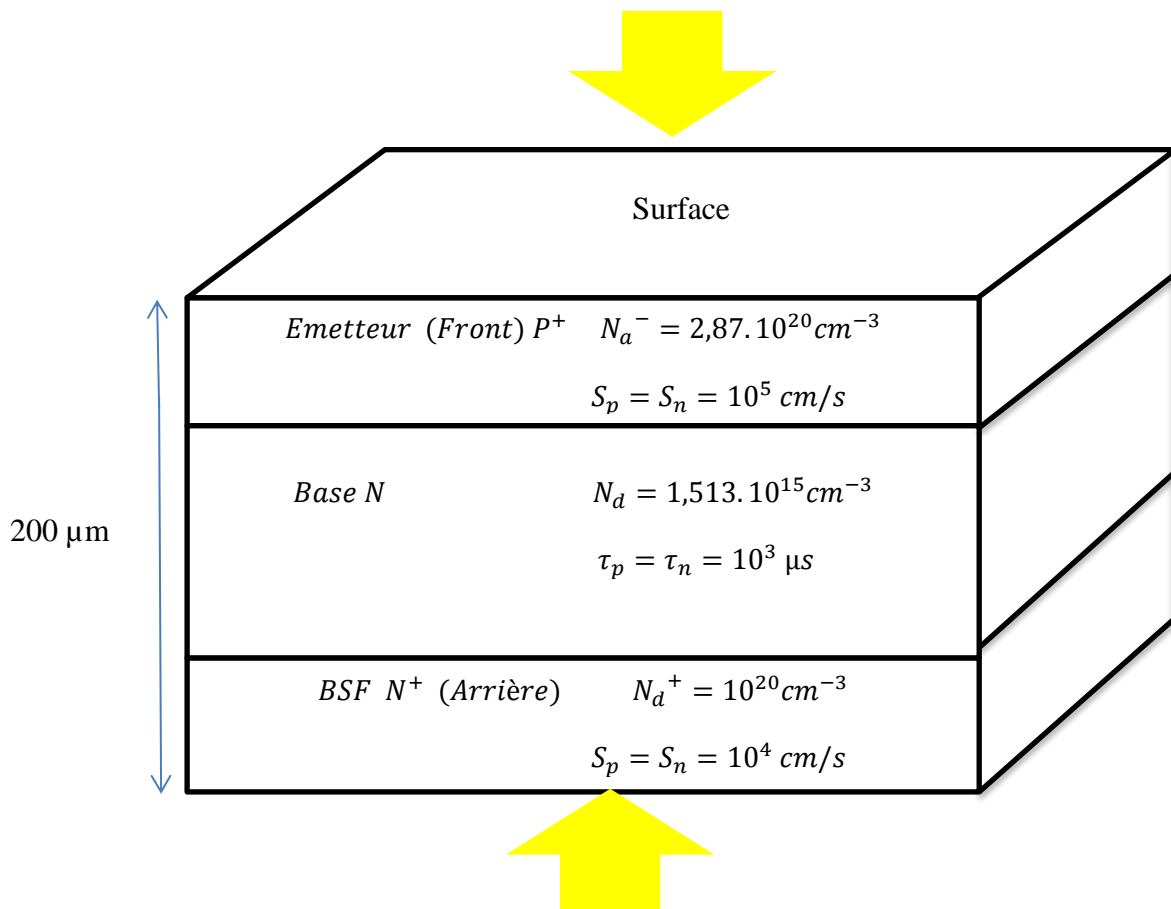
On remarque la bifacialité diminue avec l'augmentation de la vitesse de recombinaison de l'arrière de la cellule et l'épaisseur jusqu'à 500  $\mu\text{m}$ , on obtient une valeur minimale de 73,58 %.

### IV.3.3 Etude la cellule bifaciale de type N :

Après avoir validé les paramètres de la cellule prise dans la littérature, nous avons voulu poursuivre ce travail en s'intéressant à l'étude d'une cellule bifaciale de substrat de type N ( $\text{P}^+/\text{N}/\text{N}^+$ ) tout en maintenant les mêmes valeurs des paramètres pour les différentes régions et qui sont indiqués dans le tableau suivant :

Régions	Paramètres	Valeurs initiales retenues dans PC1D
	La surface de la cellule solaire	100 cm <sup>2</sup>
	La texturisation (ou texturation)	-Angle de pyramide: 54,74° -Epaisseur de pyramide: 3 μm
<b>Base de type N</b>	L'épaisseur de la base (la cellule)	200 μm
	Le dopage de la base	1,513.10 <sup>15</sup> cm <sup>-3</sup>
	La durée de vie des électrons et des trous (τ <sub>n</sub> et τ <sub>p</sub> ) dans le volume (base)	1000 μs
<b>Emetteur de type P<sup>+</sup></b>	Le dopage de l'émetteur (par diffusion thermique)	2,87.10 <sup>20</sup> cm <sup>-3</sup>
	Les vitesses de recombinaison des électrons S <sub>n</sub> et des trous S <sub>p</sub> à la surface de l'émetteur	10 <sup>5</sup> cm/s
<b>BSF de type N<sup>+</sup></b>	Le dopage de l'arrière de la cellule (par diffusion thermique) (BSF)	1.10 <sup>20</sup> cm <sup>-3</sup>
	Les vitesses de recombinaison des électrons S <sub>n</sub> et des trous S <sub>p</sub> dans la surface arrière de la cellule	10 <sup>4</sup> cm/s

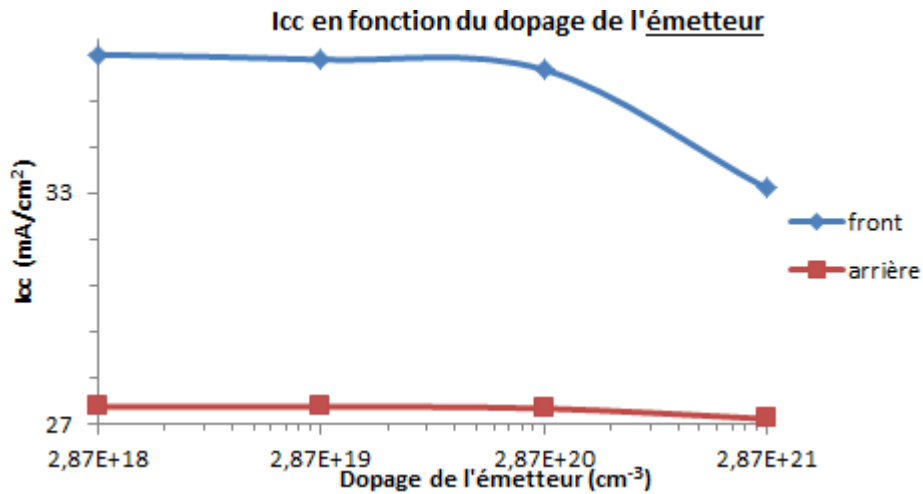
**Tableau IV-2** : Les différents paramètres initiaux de simulation de la cellule.



**Figure IV-3 bis** : Schéma de la structure avec les paramètres initiaux de la cellule solaire étudiée.

### IV.3.3.1 Effet du dopage de l'émetteur ( $p^+$ ) :

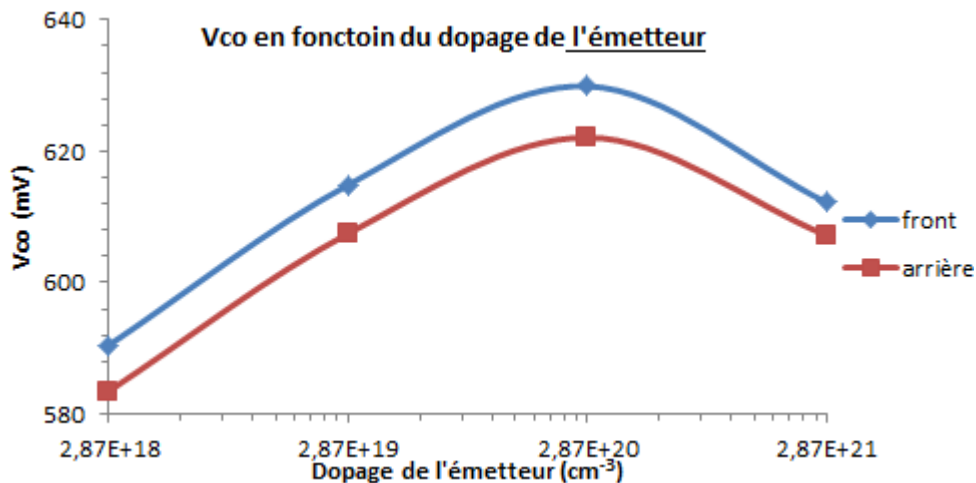
#### 1. Etude du courant de court-circuit $I_{cc}$



**Figure IV-21 :** Variation du courant de court-circuit en fonction du dopage de l'émetteur.

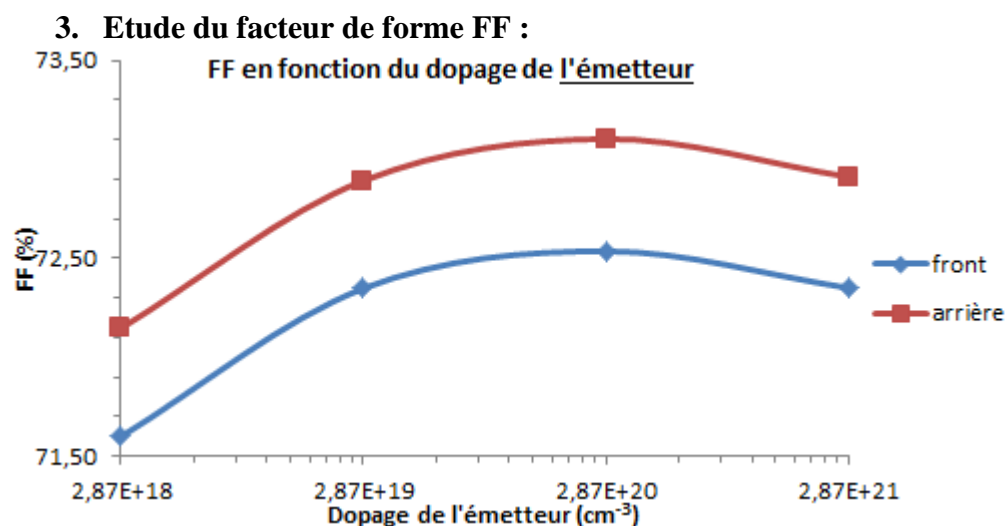
D'après les résultats de la simulation, nous avons remarqué que lorsque le dopage de l'émetteur augmente, il y a une stabilité du courant de court-circuit du front jusqu'à une valeur de  $2,87.10^{20} cm^{-3}$  juste après va diminuer, par conséquent de courant de court-circuit de l'arrière de la cellule presque inchangée.

#### 2. Etude de la tension de circuit ouvert $V_{co}$ :



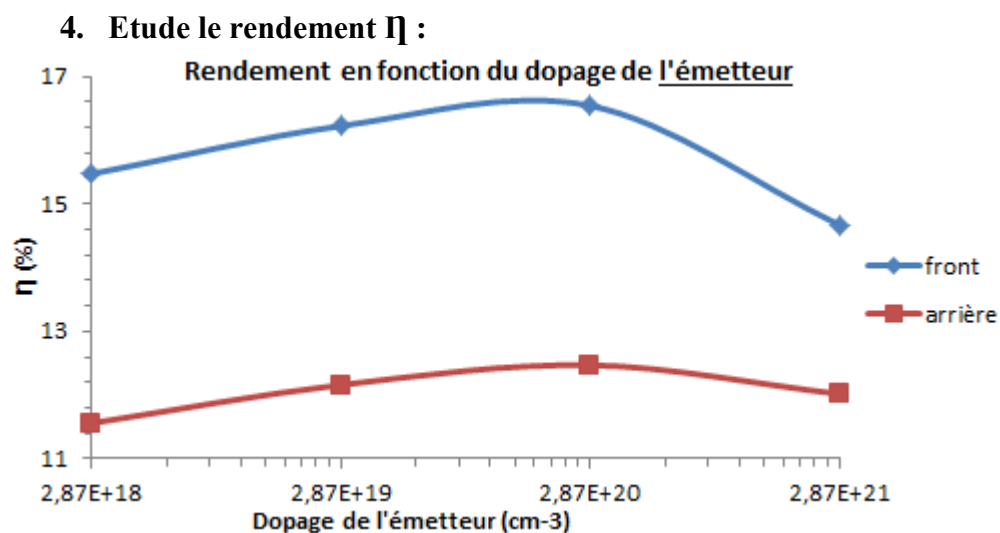
**Figure IV-22 :** Variation de la tension de circuit ouvert en fonction du dopage de l'émetteur.

Pour la tension de circuit ouvert du front, on remarque à peu près la même forme de variation que celle de la tension de circuit ouvert de l'arrière de la cellule, un accroissement jusqu'à une valeur optimale 629,9 mV est suivi une diminution à partir de dopage du l'émetteur de  $2,87.10^{20} cm^{-3}$ .



**Figure IV-23 :** Variation du facteur forme en fonction du dopage de l'émetteur.

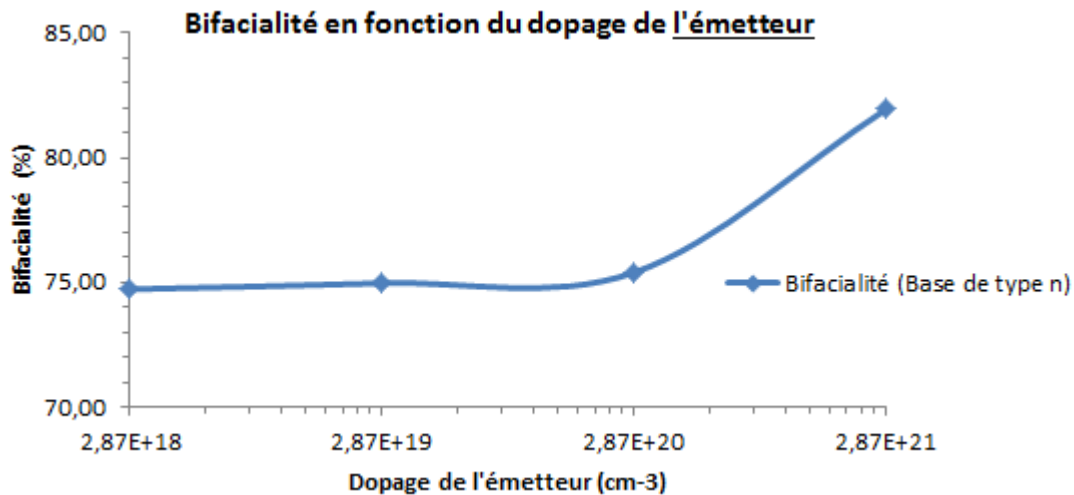
Lorsque on fait varier le dopage de l'émetteur, on constate que le facteur de forme croit jusqu'à une valeur optimale 72,54 % pour le front et 73,10 % pour l'arrière de la cellule ces valeurs deviennent pour même dopage de l'émetteur ( $2,87 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ), puis commencent à croître légèrement.



**Figure IV-24 :** Variation le rendement en fonction du dopage de l'émetteur.

Le rendement croit jusqu'à une valeur de 16,54 % pour le front et de 12,47 % pour l'arrière de la cellule avec l'augmentation du dopage de l'émetteur à  $2,87 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , puis commence à décroître.

### 5. Etude la bifacialité B :



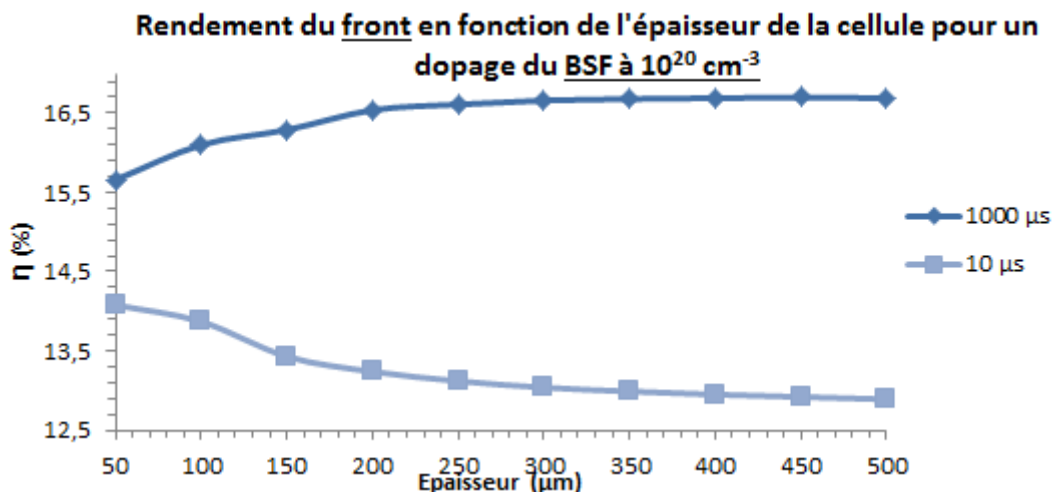
**Figure IV-25 :** Variation la bifacialité en fonction du dopage de l'émetteur.

Si on varie le dopage de l'émetteur, on remarque que la bifacialité presque ne change pas jusqu'à une valeur optimale 75,39 % pour dopage d'environ  $2,87 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , puis commence à croître strictement.

### IV.3.3.2 Effet de l'épaisseur de la base :

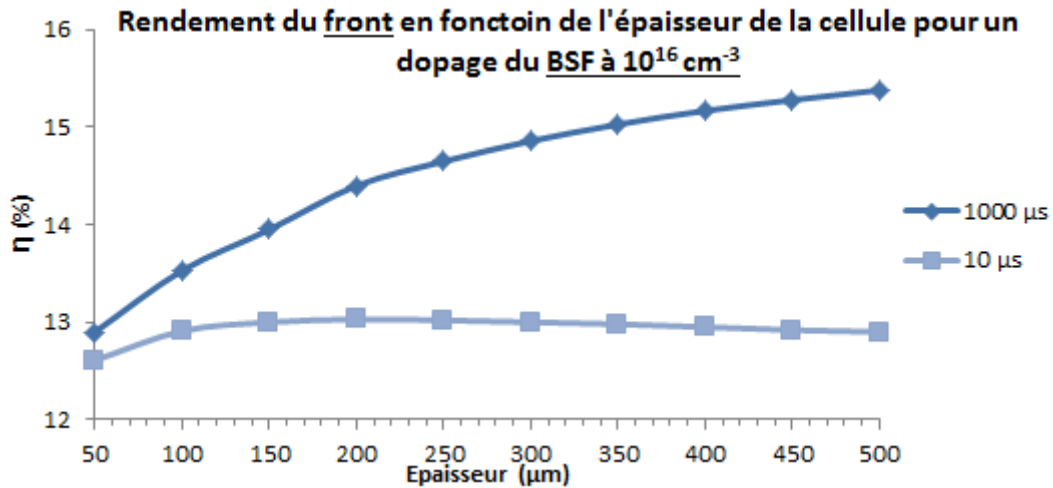
Cette étude est faite en couplage avec la variation du dopage de BSF ( $10^{16}$  et  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ) et pour 2 durées de vie des porteurs dans le substrat (10 et 1000  $\mu\text{s}$ ). Pour éviter une forte densité du travail, on ne s'est intéressé ici qu'aux rendements des deux faces de la cellule comme pour les travaux qui suivront.

#### 1. Etude du Rendement du front de la cellule :



**Figure IV-26 :** Variation du rendement du front de la cellule en fonction de l'épaisseur de la cellule pour un dopage du BSF à  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  et pour 2 durées de vie des porteurs de la base (10 et 1000  $\mu\text{s}$ ).

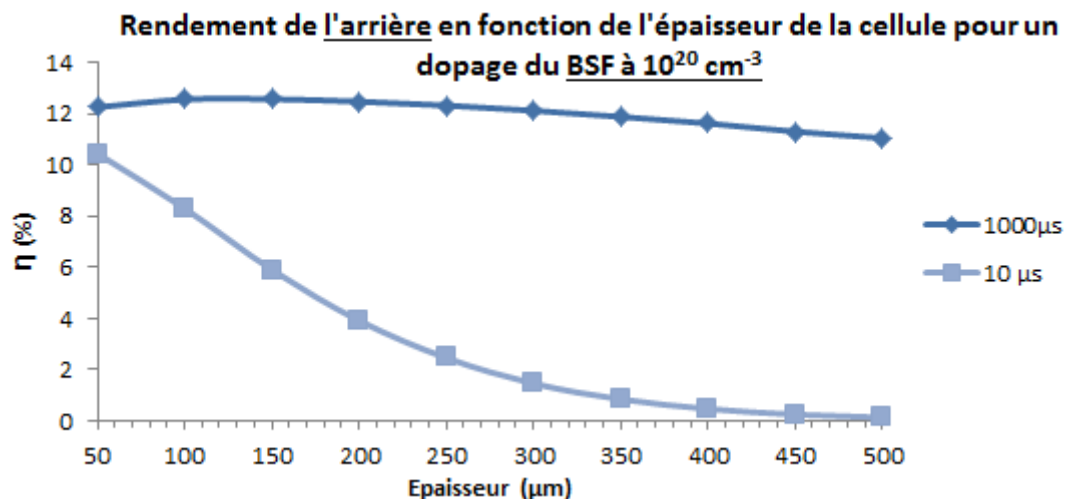
D'après la figure (IV-26), le rendement du front croit suivant l'augmentation de l'épaisseur du substrat jusqu'à une valeur saturation de 16,66 % pour une épaisseur de 300  $\mu\text{m}$  et grâce durée de vie (1000  $\mu\text{s}$ ) et diminue légèrement pour une petite durée de vie, ces résultats obtenus à un dopage fort ( $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ )



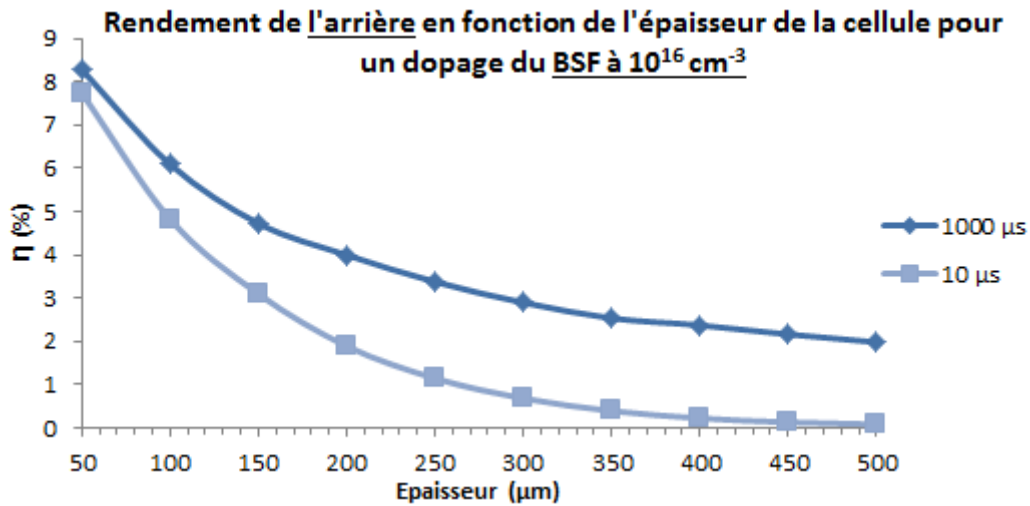
**Figure IV-27 :** Variation du rendement du front en fonction de l'épaisseur de la cellule pour un dopage du BSF à  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  et pour 2 durées de vie des porteurs de la base (10 et 1000  $\mu\text{s}$ ).

Lorsqu'on augmente l'épaisseur du substrat, le rendement du front augmente et par conséquent le rendement croit grâce à l'augmentation de la durée de vie des porteurs de charges (1000  $\mu\text{s}$ ), ces résultats sont obtenus pour un dopage moyen de  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ .

## 2. Etude du Rendement de l'arrière de la cellule :

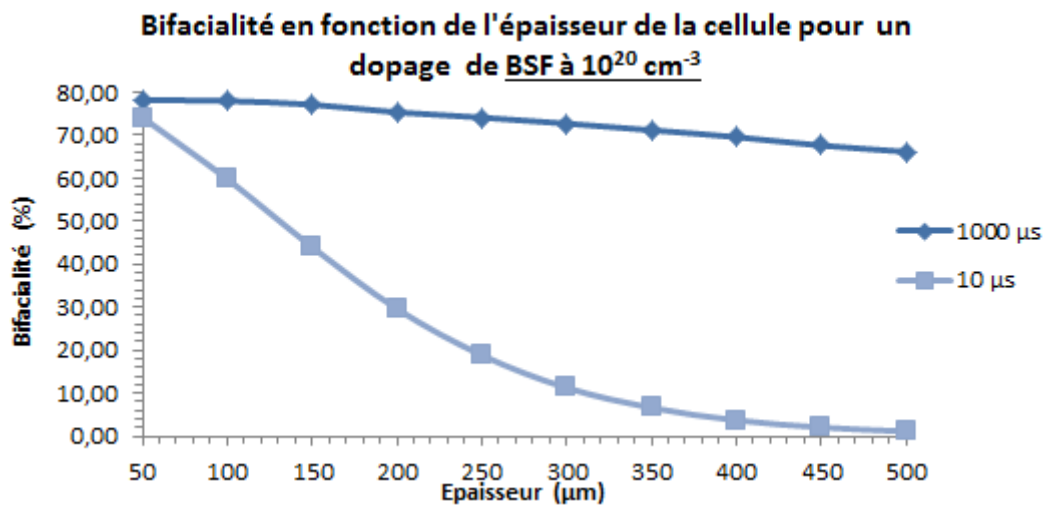


**Figure IV-28 :** Variation du rendement de l'arrière de la cellule en fonction de l'épaisseur de la cellule pour un dopage du BSF à  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  et pour 2 durées de vie des porteurs de la base (10 et 1000  $\mu\text{s}$ ).

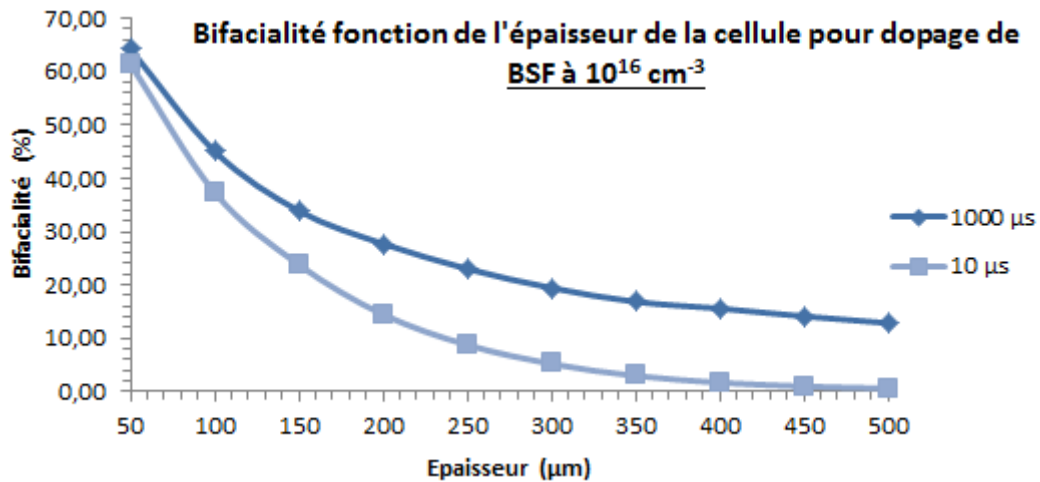


**Figure IV-29 :** Variation du rendement de l'arrière en fonction de l'épaisseur de la cellule pour dopage du BSF à  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  et pour 2 durées de vie des porteurs de la base (10 et 1000 µs).

### 3. Etude la bifacialité de la cellule :



**Figure IV-30 :** Variation la bifacialité en fonction de l'épaisseur de la cellule pour dopage de BSF à  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  et pour 2 durées de vie des porteurs de la base (10 et 1000 µs).

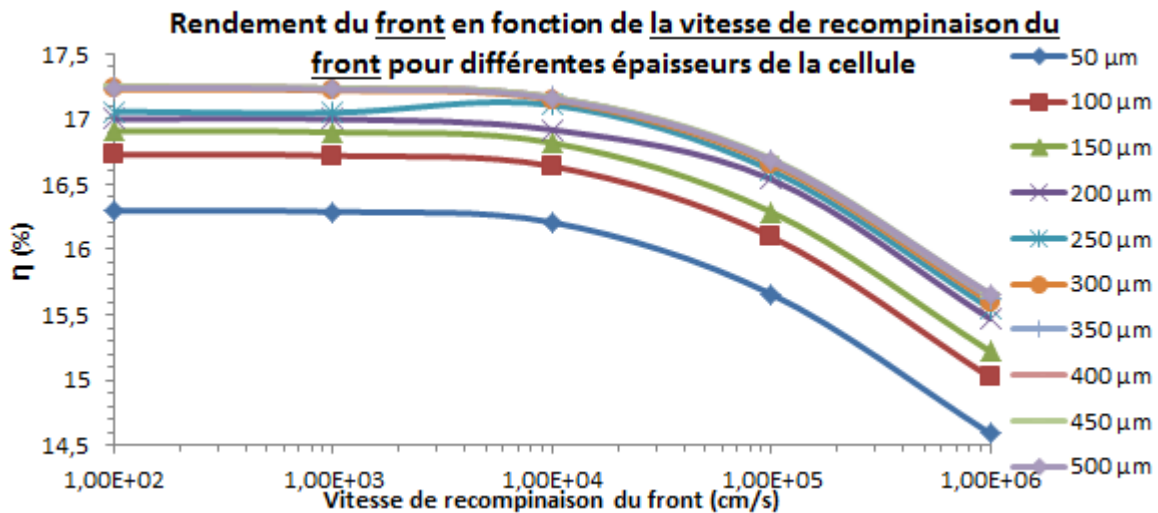


**Figure IV-31 :** Variation la bifacialité en fonction de l'épaisseur de la cellule pour dopage de BSF à  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  et pour 2 durées de vie des porteurs de la base (10 et 1000  $\mu\text{s}$ ).

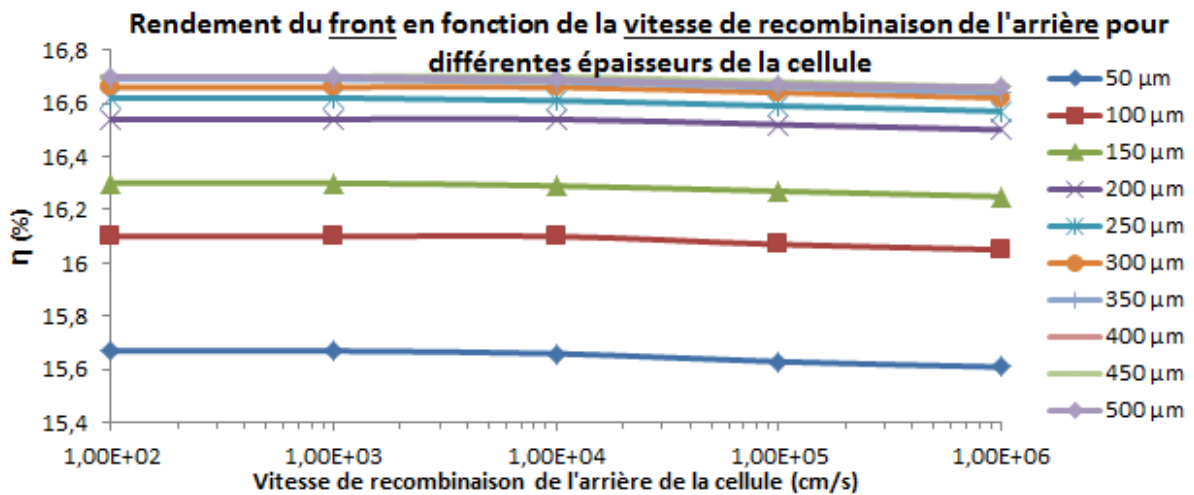
### IV.3.3.3 Effet de la vitesse de recombinaison couplée à l'épaisseur de la base :

L'étude est faite en couplage avec la variation de la vitesse de recombinaison en surface avant (front) et de la vitesse de recombinaison en surface arrière (BSF) et qui a donné les figures suivantes.

#### 1. Etude du Rendement du front de la cellule :

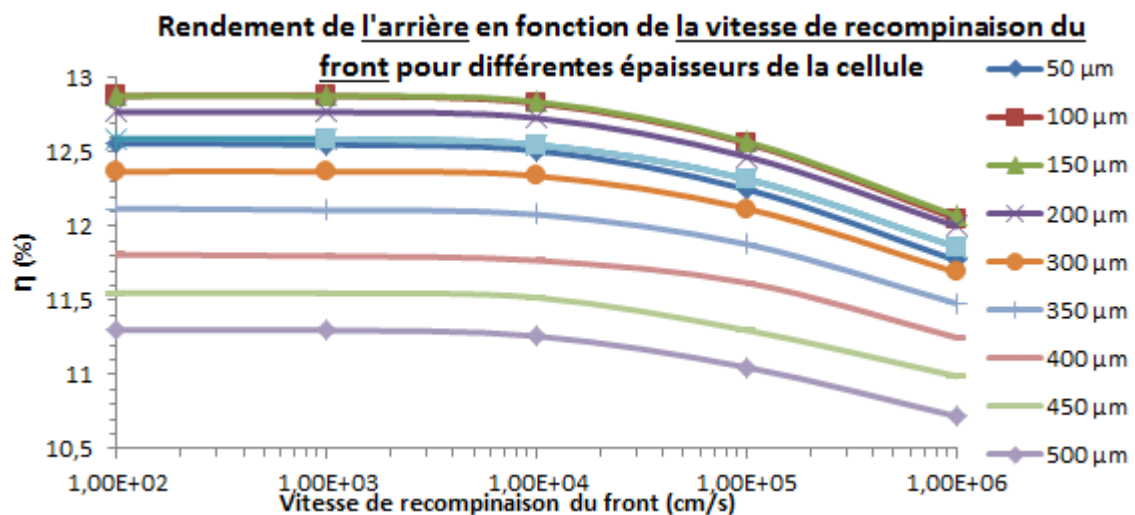


**Figure IV-32 :** Variation du rendement du front en fonction de la vitesse de recombinaison du front pour différentes épaisseurs de la cellule.

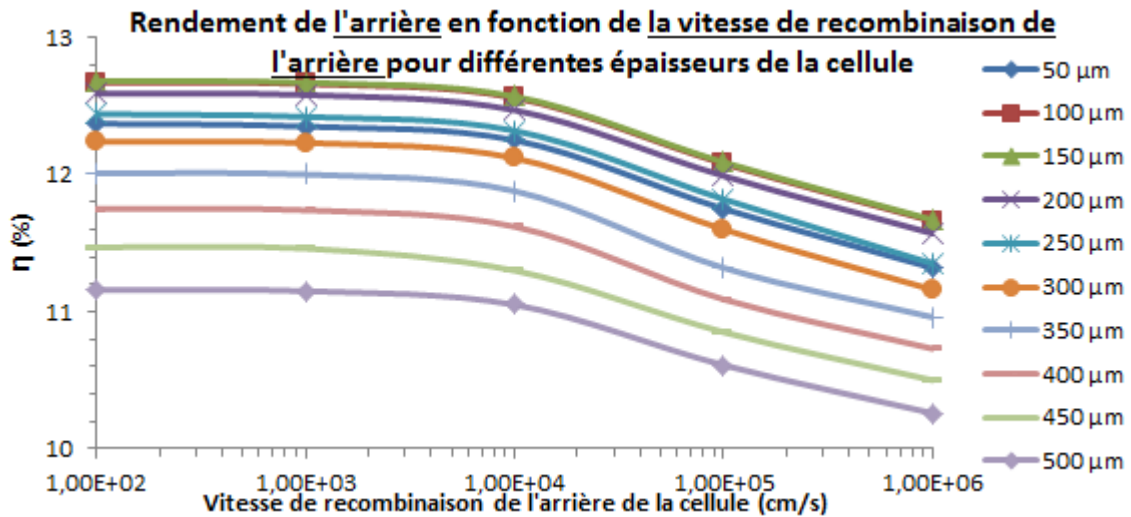


**Figure IV-33 :** Variation le rendement du front en fonction de la vitesse de recombinaison de l'arrière pour différentes épaisseurs de la cellule.

## 2. Etude du Rendement de l'arrière de la cellule :

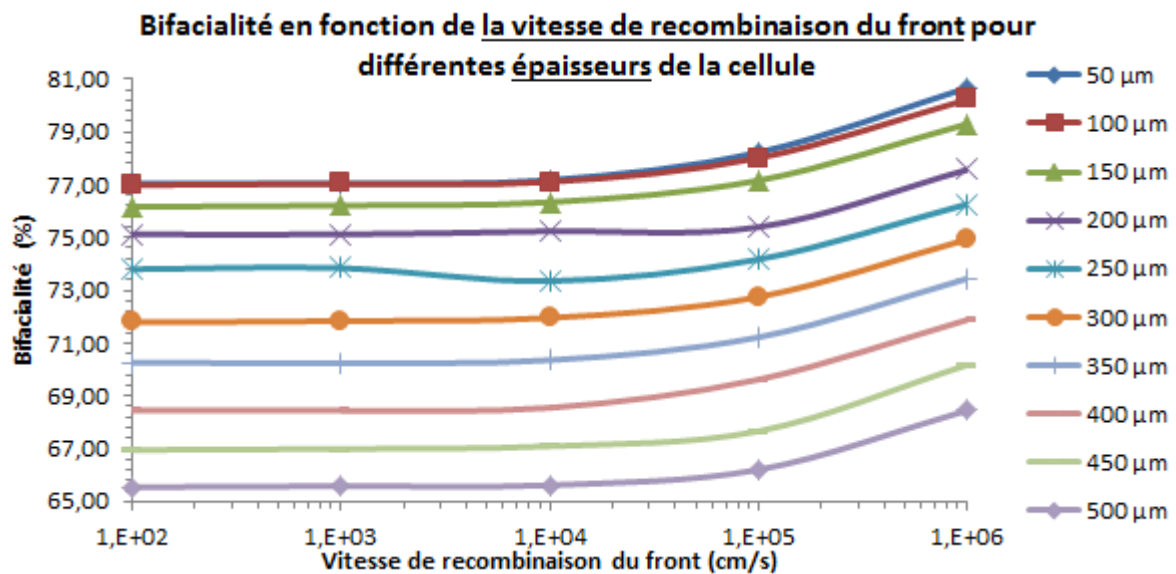


**Figure IV-34 :** Variation le rendement de l'arrière en fonction de la vitesse de recombinaison du front pour différentes épaisseurs de la cellule.

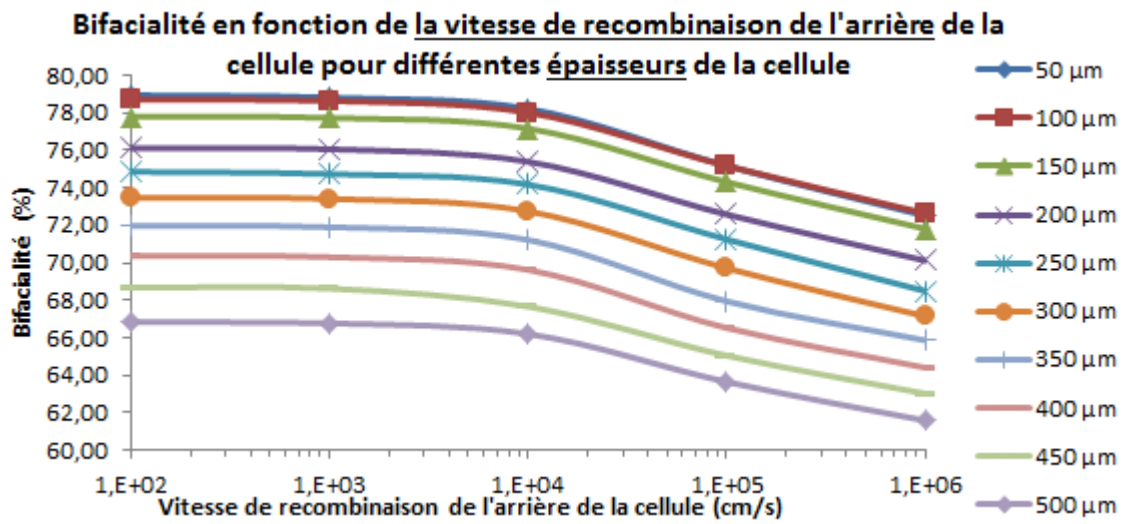


**Figure IV-35 :** Variation le rendement de l'arrière en fonction de la vitesse de recombinaison de l'arrière pour différentes épaisseurs de la cellule.

### 3. Etude la bifacialité de la cellule :



**Figure IV-36 :** Variation la bifacialité en fonction de la vitesse de recombinaison du front pour différentes épaisseurs de la cellule.



**Figure IV-37 :** Variation la bifacialité en fonction de la vitesse de recombinaison de l'arrière pour différentes épaisseurs de la cellule.

## Conclusion générale :

En pratique, la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique n'est pas totale. Différentes pertes viennent influencer le rendement d'une cellule. Elles sont dans la plupart des cas dues à la nature des matériaux et à la technologie utilisée. Tous les photons possédant une longueur d'onde supérieure à celle associée au gap du semi-conducteur ne peuvent générer de paires électron-trou, et sont donc perdus. Le rendement d'une cellule dépend aussi du nombre de photons pénétrant dans le matériau.

Quelle que soit la structure d'une cellule solaire, une optimisation de ses paramètres est nécessaire pour avoir un rendement optimal. Habituellement, les paramètres à optimiser d'une cellule peuvent être en général géométriques, électriques et optiques tels que dans le désordre l'épaisseur de la cellule, le dopage des régions, les vitesses de recombinaison des faces avant et arrière, la durée de vie des porteurs du substrat, les couches antireflet, etc....

Les valeurs des paramètres optimaux dépendent, bien sûr, de la structure de la cellule solaire, de la qualité du matériau, des vitesses de recombinaison en surface (faces avant et arrière), etc... L'optimisation de la cellule solaire comprend donc l'étude de l'influence de ses paramètres sur le rendement afin d'obtenir une structure conduisant au rendement maximum.

Dans un premier temps, nous avons rappelé dans le premier chapitre quelques notions de base sur l'ensoleillement et la composante du spectre solaire, la notion de masse d'air et aussi la zone utile du spectre solaire pour le silicium.

Dans un second temps, nous avons donné dans le deuxième chapitre, les notions fondamentales des semi-conducteurs, nous décrivons sur la jonction p-n à l'équilibre thermodynamique et la jonction avec polarisation directe et indirecte et les différents types de recombinaison dans le semi-conducteur qui peuvent altérer le rendement. Ensuite, nous avons abordé le fonctionnement d'une cellule solaire, son modèle équivalent électrique et ses caractéristiques principales. Enfin, nous avons décrit les différentes pertes limitant le rendement.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté la cellule bifaciale, sa structure et son étude théorique de la physique de la cellule bifaciale.

Dans le dernier chapitre, nous avons étudié l'effet de quelques grandeurs de la cellule solaire biface au silicium monocristallin ( $N^+/P/P^+$ ) à émetteur de type  $N^+$ , de substrat de type P et d'une couche de type  $P^+$  sur la face arrière (BSF) et dont les paramètres utilisés sont tirés de la littérature d'un article sur le sujet datant de 2013. Pour cela, nous avons utilisé le logiciel d'analyse numérique unidimensionnel PC1D pour déterminer les paramètres de cette cellule.

La première partie a concerné la validation des résultats obtenus en comparaison avec ceux trouvés pour la cellule prise comme référence. Les paramètres concernés que sont le courant de court-circuit de la cellule  $I_{cc}$  pour les deux faces (front et arrière), leurs tensions de circuit ouvert  $V_{co}$ , leurs facteurs de forme FF et enfin leurs rendements énergétiques  $\eta$  ont été évalués en fonction du dopage de l'émetteur (de  $2,87 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  à  $2,87 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ ). Nous avons constaté que ces résultats trouvés sont en totale concordance avec ceux de l'article. Selon ces

calculs, nous avons retenu la valeur de  $2,87.10^{20} \text{ cm}^{-3}$  pour dopage de l'émetteur (pour la cellule  $N^+/P/P^+$ ) qui donne à peu près les meilleures performances du rendement pour les deux faces.

Nous nous sommes intéressés par la suite à l'optimisation des paramètres ( $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ ,  $FF$  et  $\eta$ ) de la cellule en fonction la variation d'autres paramètres tels que :

- ✓ l'épaisseur de la cellule (de  $50 \mu\text{m}$  à  $500 \mu\text{m}$ ),
- ✓ la durée de vie des porteurs dans le substrat ( $10 \mu\text{s}$  et  $1000 \mu\text{s}$ ),
- ✓ le dopage de la couche arrière ( $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  et  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ )
- ✓ et finalement les vitesses de recombinaison des faces avant et arrière (de  $10^2 \text{ cm/s}$  à  $10^6 \text{ cm/s}$ ).

On a fait varier ces paramètres essentiels de la cellule solaire pour voir leurs influences sur ses caractéristiques en plus de sa bifacialité.

La modélisation s'est faite en variant un seul paramètre et en gardant fixes les autres paramètres pour les deux types de la cellule : ( $N^+/P/P^+$ ) et ( $P^+/N/N^+$ ).

Pour l'étude du paramètre suivant, on a fixé le paramètre à une valeur optimale et en gardant les suivants constants et ainsi de suite.

Les résultats obtenus par la simulation nous ont permis de déduire les conclusions suivantes :

- **Pour la cellule ( $N^+/P/P^+$ ) :**

Les paramètres optimisés qui nous ont permis d'obtenir un rendement optimal sont consignés dans le tableau ci-après :

Cellule ( $N^+/P/P^+$ )	Epaisseur	Dopage BSF	Durée de vie des porteurs dans le substrat	Vitesse de recombinaison de la surface du front (émetteur)	Vitesse de recombinaison de la surface arrière (BSF)
Front (Rendement $\eta$ max)	$300 \mu\text{m}$ (16,46%)	$10^{20} \text{ cm}^{-3}$ (16,46%)	$1000 \mu\text{s}$ (16,46%)	$100 \text{ cm/s}$ <b>(16,93%)</b>	$100 \text{ cm/s}$ (16,48% pour $e=350 \mu\text{m}$ )
Arrière (Rendement $\eta$ max)	$250 \mu\text{m}$ (14,18%)	$10^{20} \text{ cm}^{-3}$ (14,18%)	$1000 \mu\text{s}$ (14,18%)	$100 \text{ cm/s}$ (14,41%)	$100 \text{ cm/s}$ <b>(14,51%)</b>

Quelques remarques sur les résultats :

- ✓ **Pour le front :**

Pour une épaisseur  $300 \mu\text{m}$  de la cellule, un dopage du BSF à  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , une durée de vie des porteurs dans le substrat de  $1000 \mu\text{s}$ , une vitesse de recombinaison de l'émetteur à  $10^5 \text{ cm/s}$ , une vitesse de recombinaison du BSF à  $10^4 \text{ cm/s}$ , on obtient un rendement optimum de 16,46%. Lorsqu'on abaisse la vitesse de recombinaison de la surface arrière à  $100 \text{ cm/s}$  et

pour une épaisseur de la cellule à 350  $\mu\text{m}$ , on a observé une très légère amélioration du rendement qui est portée à 16,48%. Par contre, une diminution de la vitesse de recombinaison de la surface de la face avant à 100 cm/s tout en gardant l'épaisseur à 300  $\mu\text{m}$ , on constate une augmentation du rendement jusqu'à 16,93%.

✓ **Pour la face arrière :**

On remarque les mêmes effets mais inversement. En effet, Pour une épaisseur 250  $\mu\text{m}$  de la cellule, un dopage du BSF à  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , une durée de vie des porteurs dans le substrat de 1000  $\mu\text{s}$ , une vitesse de recombinaison de l'émetteur à  $10^5 \text{ cm/s}$ , une vitesse de recombinaison du BSF à  $10^4 \text{ cm/s}$ , on obtient un rendement optimum de 14,18%. Lorsqu'on abaisse la vitesse de recombinaison de la surface du front à 100 cm/s, on a observé une amélioration du rendement qui est portée à 14,41%. Une diminution de la vitesse de recombinaison de la surface de la face arrière à 100 cm/s, induit une augmentation du rendement jusqu'à 14,51%.

• **Pour la cellule (P<sup>+</sup>/N/N<sup>+</sup>) :**

Pour cette cellule de substrat de type N, nous avons procédé de la même façon que la première en optimisant d'abord le dopage de l'émetteur et qui reste pratiquement que le même ( $2,87 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ). Les valeurs des paramètres optimisés sont reprises sur le tableau suivant

Cellule (P <sup>+</sup> /N/N <sup>+</sup> )	Epaisseur	Dopage BSF	Durée de vie des porteurs dans le substrat	Vitesse de recombinaison de la surface du front	Vitesse de recombinaison de la surface arrière
Front (Rendement $\eta$ max)	450 $\mu\text{m}$ (16,7%)	$10^{20} \text{ cm}^{-3}$ (16,7%)	1000 $\mu\text{s}$ (16,7%)	100 cm/s (17,25% pour e=350 $\mu\text{m}$ )	100 cm/s (16,7% pour e=400 $\mu\text{m}$ )
Arrière (Rendement $\eta$ max)	150 $\mu\text{m}$ (12,57%)	$10^{20} \text{ cm}^{-3}$ (12,57%)	1000 $\mu\text{s}$ (12,57%)	100 cm/s (12,88% pour e=100 $\mu\text{m}$ )	100 cm/s (12,68% pour e=150 $\mu\text{m}$ )

Quelques remarques sur les résultats :

✓ **Pour le front :**

Pour une épaisseur 450  $\mu\text{m}$  de la cellule, un dopage du BSF à  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , une durée de vie des porteurs dans le substrat de 1000  $\mu\text{s}$ , une vitesse de recombinaison de l'émetteur à  $10^5 \text{ cm/s}$ , une vitesse de recombinaison du BSF à  $10^4 \text{ cm/s}$ , on obtient un rendement optimum de 16,70%. Lorsqu'on abaisse la vitesse de recombinaison de la surface arrière à 100 cm/s et pour une épaisseur de la cellule à 400  $\mu\text{m}$ , on a observé une amélioration du rendement qui est portée à 16,7%. Par ailleurs, une diminution de la vitesse de recombinaison de la surface de la face avant à 100 cm/s et avec une épaisseur de 350  $\mu\text{m}$ , on constate une augmentation du rendement jusqu'à 17,25%.

✓ **Pour la face arrière :**

On remarque presque les mêmes effets mais inversement. Effectivement, pour une épaisseur 150  $\mu\text{m}$  de la cellule, un dopage du BSF à  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , une durée de vie des porteurs dans le substrat de 1000  $\mu\text{s}$ , une vitesse de recombinaison de l'émetteur à  $10^5 \text{ cm/s}$ , une vitesse de recombinaison du BSF à  $10^4 \text{ cm/s}$ , on obtient un rendement optimum de 12,57%. Lorsqu'on abaisse la vitesse de recombinaison de la surface de l'arrière à 100  $\text{cm/s}$  et pour une épaisseur de 150  $\mu\text{m}$ , on a observé une amélioration du rendement qui est portée à 12,68%. Une diminution de la vitesse de recombinaison de la surface de la face avant 100  $\text{cm/s}$  et pour une épaisseur de 100  $\mu\text{m}$ , a permis une augmentation du rendement jusqu'à 12,88%.

En comparant les résultats des deux cellules, nous observons globalement que le rendement de la cellule de type N s'améliore par rapport à celle de type P mais seulement pour le front. Contrairement à la face arrière où nous remarquons une dégradation du rendement.

Ce travail n'est qu'une étude superficielle qui pourrait être améliorés en optimisant tous les paramètres. Ce que nous retenons globalement et que la cellule à substrat de type N demande moins de matériau où l'épaisseur des cellules sont presque divisées par 2.

Comme perspectives, une étude plus approfondie est plus que souhaitable afin de faire les conclusions appropriées.

## Bibliographie :

Abderrezek. M, « Modélisation Des Cellules Solaires Tandem à Couches Minces et à Haut Rendement », Thèse de doctorat, Université de Setif-1 Algérie, 18-02-2015.

Adolf. G.et al, « Crytalline Silicon Solar Cells », Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Freiburg, Germany, 1998.

Bedda. N, « Etude Des Propriétés Physiques Des Semi-conducteurs : Si, GaAs et Ga AlAs, Simulation Des Cellules Solaires à Base de Si et GaAs », Mémoire de Magister, Université El-hadj lakhdar Batna (Algérie), 16-06-2011.

Benmoussa. W.C.et al, « Etude Comparative Des Modèles de la Caractéristique Courant-Tension d'une Cellule Solaire Au Silicium Monocristallin », Revue des énergies Renouvelables ICRES-07 Tlemcen, Algérie, (2007), 301-306.

Cherouna. A, « Modélisation par MATLAB de la cellule solaire bifaciale à base de silicium monocristallin », Thèse de Magister, Université de Constantine-1. Algérie, 30 juin 2013.

Chovet. A. & Masson. P, « Physique des semi-conducteurs », Ecole Polytechnique Universitaire de Marseille, 2004/2005.

Colinge. Jean-Pierre et Fernand. Van De Wiele, « Physique des dispositifs semi-conducteurs », édition De Boeck Université (Belgique), 1996.

Desrues. T., « Développement de Cellules Photovoltaïques à Hétérojonctions Silicium et Contacts En Face Arrière », Thèse de doctorat, Institut National Des Sciences Appliquées, Lyon-France, 30-11-2009.

Hilali. K, « Modulation D'une Cellule Photovoltaïque: Etude Comparative », Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi ousou (Algérie), 25-06-2012.

Krein. L, « A Novel Method For Determining Bulk Diffusion Length In Bifacial Silicon Solar Cells », IEEE, Université de Jerusalem, (2000) 248-251.

Krou. S, « Optimisation Des Paramètres d'une Cellule Photovoltaïque Par les Algorithmes génétiques », Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas Setif-I (Algérie), 21-12-2014.

Mathieu. H.et Fanet. H., «Physiques des semi-conducteurs et des composants électroniques », 6<sup>ème</sup> édition Dunod, Paris, 2009

Meziani. F, « Détermination du Gisement Solaire par traitement d'images MSG », Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi ousou (Algérie).

Mouhoub. A, « Procédés Technologiques Alternatifs de Réalisation des Photopiles Solaires au Silicium cristallin ». Rev.Energ.ren.Vol.4 (2001), 11-22.

Nadia. B.B, « Propriétés physiques des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et simulation des cellules solaires à bas de Si et SiGe ». Mémoire de Magister, Université Abou-Bakr Belkaïde de Tlemcen, Algérie (2006).

Oleksiy. N, «Simulation, Fabrication Et Analyse De cellules Photovoltaïques A Contacts Arrières Interdigités », Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. France, (2005)

Ricaud. A, « Photopiles Solaires, de la Physique de la Conversion Photovoltaïque Aux Filières, Matériaux et Procédés », Presse Polytechniques et Universitaires Romandes, 1997.

Salhi. H.et al, « Effect of BSF Layer On The Performance Of A Monocristalline Solar Cell », International Renevable Energy Congress, Sousse, Tunisia, (2010).

Sepeai. S.et al, Solar Energy Research Institute (SERI), Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM), 43600 Bangi, Selangor, Malaysia, « Design Optimization of Bifacial Solar Cell by PC1D Simulation », Journal of Energy Technologies and Policy, Vol.3, No.5, 2013

Singh. S.N.and Singh. P.K, « Modeling Of Minority-carrier surface Recombination Veloty At Low-High Junction Of An  $n^+ - p - p^+$  Silicon », IEEE Transactions On Electron devices. Vol.38 no.2, (1991).

Thuillier. B, « Caractérisation Structurale Des Contacts Ohmiques Réalisés A Partir D'encres Métalliques Sur les Cellules Photovoltaïques En Silicium Multicristallin », Thèse de doctorat, Institut National Des Sciences Appliquées, Lyon-France, 2001.

Uematsu. T.et Sutsui. T, « Development of Bifacial pv cells For New Applications of Flat-plate Modules », Solar Energy Materials & Solar Cells 75 (2003) 557-566.

Zouache. F, « Etude de la Concentration Solaire Sur les Performances des Systèmes Photovoltaïques », Thèse de Magister, Université Mentouri, Constantine, 2009.