

Département d'Automatique, Télécommunication et d'Électronique

## Projet de Fin d'Études

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Électronique

Spécialité : Instrumentation

### Thème

Effet de la vitesse de recombinaison surfacique des porteurs de charge sur l'efficacité de conversion d'une cellule solaire

Préparé par :

- KAIBACHE Nestrine
- MERSEL Kahina

Dirigé par :

Mr Abderrezak LAHRECHE MCA

Examiné par :

President : Mme Souad IDJDARENE / MCB

Examineur : Mme Lyakout ACHOUR/ MCB

## *Remerciements*

*Nous remercions le dieu pour la patience et la force qu'il nous a donné pour faire ce travail.*

*Avec les belles expressions de respect, nous adressons nos remerciements les plus sincères à notre encadreur Mr A.Lahreche d'avoir accepté, de nous prendre en charge pour réaliser ce mémoire, grâce à sa présence, ses conseils et ses remarques, nous avons pu réaliser ce travail.*

*Nos remerciements vont également aux membres du jury qui nous font honneur d'avoir examiné ce travail.*

*Merci également à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à la réalisation de ce travail de recherche.*

## *Dédicace*

*Je dédie ce manuscrit à mes chers parents qui m'ont  
Encouragé à donner le meilleur de moi-même, et qui m'ont  
fourni Les moyens d'être ce que je suis aujourd'hui.  
Je le dédie aussi à ma sœur, à mes frères et à toute la famille.  
Je leurs souhaite Une vie pleine de succès. Que dieu les garde tous.*

*Kaibache. Nesrine*

## *Dédicace*

*Je dédie ce manuscrit à mes chers parents qui m'ont  
Encouragé à donner le meilleur de moi-même, et qui m'ont  
fourni Les moyens d'être ce que je suis aujourd'hui.*

*Je le dédie aussi à mes sœurs, à toute la famille.  
Je leurs souhaite Une vie pleine de succès. Que dieu les garde tous.*

*Mersel. Kahina*

Sommaire

Remerciement	
Dédicaces	
Sommaire .....	I
Liste des figures.....	IV
Liste des tableaux .....	VII
Liste des abréviation.....	VIII
Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur le solaire photovoltaïque</b>	
I.1 Introduction.....	3
I.2 les généralités de la source fondamentale de l'énergie photovoltaïque .....	3
I.2.1 Rayonnement solaire.....	3
I.2.1.1 Le soleil .....	3
I.2.1.2 Le spectre solaire .....	3
I.2.2 Air Mass.....	5
I.2.3 Les conditions de test standard (STC) .....	6
I.3 Différents types de matériaux .....	6
I.3.1 Types de matériaux .....	6
I.3.1.1 Conducteur .....	6
I.3.1.2 Isolants.....	7
I.3.1.3 Semiconducteur .....	7
I.3.2 Type des semiconducteurs .....	7
I.3.2.1 Semiconducteur intrinsèque.....	7
I.3.2.1.1 Niveau de Fermi.....	8
I.3.2.1.2 La fonction exponentielle de Fermi.....	8
I.3.2.2 Semiconducteur extrinsèque .....	9
I.3.2.2.1 Semiconducteurs de type P.....	9
I.3.2.2.2 Semi-conducteurs de type N .....	10
I.4 Jonction pn .....	11
I.5 Interaction photon semi-conducteur.....	12
I.6 Conclusion .....	13
Références chapitre I.....	14

**Chapitre II : La cellule photovoltaïque**

II.1 Introduction.....	15
II.2 Cellule photovoltaïque.....	15
II.2.1 la découverte historique.....	15
II.2.2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	16
II.2.3 Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire.....	17
II.2.4 Caractéristique d'une cellule photovoltaïque.....	18
II.2.4.1 Le courant de court-circuit JSC.....	19
II.2.4.2 La tension de circuit ouvert VOC.....	20
II.2.4.3 Le facteur de forme FF.....	20
II.2.4.4 Le rendement de conversion de l'énergie $\eta$ .....	21
II.2.4.5 La réponse spectrale RS.....	21
II.2.5 Mesure de rendement quantique externe.....	21
II.2.6 Descriptifs des différentes générations.....	22
II.2.6.1 Première génération.....	23
II.2.6.2 Deuxième génération.....	24
II.2.6.3 Troisième génération.....	24
II.2.7 Mécanisme de perte dans une cellule photovoltaïque.....	25
II.2.7.1 Pertes physiques.....	25
II.2.7.2 pertes technologiques.....	26
II.3 Conclusion.....	29
Références chapitre II.....	30

**Chapitre III : Simulation et Résultats**

III.1 Introduction.....	32
III.2 Formalisme mathématique.....	32
III.3 Présentation du logiciel PC1D.....	34
III.4 Paramètres de la simulation.....	36
III.4 Résultats et discussion.....	37
III.4.1 Influence de la vitesse de recombinaison de la face avant ( $V_{r(av)}$ ) et de la face arrière ( $V_{r(ar)}$ ) sur les paramètres électriques de la cellule.....	37
III.4.1.1 Caractéristiques courant-tension I(V).....	37
III.4.1.2 Effet de la vitesse de recombinaison sur la tension du circuit ouvert.....	38
III.4.1.3 La densité de courant de court-circuit ( $J_{sc}$ ).....	39
III.4.1.4 Le facteur de forme (FF).....	39
III.4.1.5 La puissance délivrée.....	40

## Sommaire

---

III.4.1.6 La réponse spectrale.....	41
III.4.2 Influence de l'épaisseur de la cellule sur son rendement .....	42
III.4.2.1 Influence de l'épaisseur l'émetteur de la cellule sur le rendement .....	42
III.4.2.2 Influence de l'épaisseur de la base.....	43
III-5- Conclusion .....	44
Références chapitre III .....	45
Conclusion générale .....	47

Liste des figures

Figure I.1: Spectre du rayonnement solaire .....	4
Figure I.2 : Les trois composantes du rayon solaire globale sur un plan incliné .....	5
Figure I.3 : Définition de l'air mass AMx .....	6
Figure I.4 Spectres solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM.....	6
Figure I.5 : Représentation des bandes d'énergie pour les trois types de matériaux .....	7
Figure I.6 : Semiconducteur intrinsèque .....	9
Figure I.7 : Représentation schématique des liaisons électroniques pour le cas du Silicium (Si) dopé par le bord (B).....	10
Figure I.8 : Schéma représentatif du semi-conducteur Silicium dopé N par des impuretés d'arsenic.	11
Figure I.9 : (a) Schéma d'une jonction p-n. (b) Diagramme de bande d'une jonction p-n .....	12
Figure I.10 : Transitions inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur.....	12
Figure I.11 : Coefficient d'absorption du silicium et profondeur de pénétration des photons en fonction de la longueur d'onde.....	13
Figure II-1 : Principe d'une cellule photovoltaïque.....	17
Figure II.2 : Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire.....	18
Figure II.3: Caractéristique d'une cellule photovoltaïque.....	19
Figure II.4 : Variation spectrale du rendement quantique externe d'une cellule photovoltaïque .....	22
Figure II.5 : Schéma illustratif d'une cellule solaire à base de silicium .....	24
Figure II.6 : Les pertes intrinsèques d'une cellule photovoltaïque à base de silicium .....	26
Figure II.7 : Coefficient d'absorption et profondeur de pénétration de la lumière dans le silicium cristallin en fonction de la longueur d'onde à 300 K . .....	27
Figure II.8 : Représentation des différents mécanismes de recombinaison.....	28
Figure III.1 : Fenêtre de démarrage ouverte au démarrage du logiciel de simulation PC1D .....	35
Figure III.2 : Caractéristique courant-tension I(V) pour différentes valeur de vitesse de recombinaison .....	37
Figure III.3 Variation de la tension de circuit ouvert VOC en fonction de la vitesse de recombinaisons .....	38
Figure III.4 :Variation de la densité de courant de court-circuit Jsc en fonction de la vitesse de recombinaisons.....	39
Figure III.5 : Variation de Facteur de forme en fonction de la vitesse de recombinaisons surfacique.	40

## Liste des figures

---

Figure III.6 Puissance délivrées par la cellule en fonction de la tension pour différentes valeurs de vitesse de recombinaison.....	40
Figure III.7 Variation de la réponse spectrale en fonction de la longueur d'onde du spectre solaire pour différentes valeurs de vitesse de recombinaison..	41
Figure III.8 : La variation du rendement en fonction de l'épaisseur de l'émetteur de la cellule .....	42
Figure III.9 : La variation du rendement en fonction de l'épaisseur de base de la cellule .....	43

## Liste des tableaux

---

### Liste des tableaux

Tableau II- 1. Tableau des différentes générations de cellules solaires.....	23
Tableau III-1 Différentes paramètres de simulation.....	36
Tableau III-2 : Les principaux paramètres d'une cellule solaire de silicium pour différentes valeurs de vitesse de recombinaison surfacique.....	42

## Liste des abréviations

AM :Air masse.  
B :Coefficient de recombinaison radiative.  
C :Vitesse de la lumière.  
 $C_{n0}, C_{p0}$  :Coefficient de recombinaison Auger.  
 $D_n (D_p)$  :Coefficient de diffusion des électrons (trous).  
E :Eclairement.  
 $E_F$  :Niveau de fermi.  
 $E_g$  :L'énergie de gap du matériau.  
EQE :Rendement quantique externe.  
FF :Facteur de forme.  
G :Taux de génération.  
GaAs :Arséniure de gallium.  
h :Constante de Planck.  
hv :Energie du photon.  
 $I_{d1}$  :courant de génération-recombinaison.  
 $I_{d2}$  :Courant de diffusion des zones neutres.  
 $J_{ph}$  :Courant photogénéré.  
IQE :Rendement quantique interne.  
 $I_s$  :Courant de saturation.  
 $J_{sc}$  :Courant de court-circuit.  
 $J_p (J_n)$  : Les densités de courant des électrons (trous).  
 $K_b$  :Constante de Boltzmann.  
 $n_1 (p_1)$  :Concentration des électrons (trous) sur les pièges.  
 $N_D (N_A)$  :Concentration des atomes donneurs (accepteurs).  
P:Puissance.  
p (n) :Concentration des électrons (trous).  
 $P_{in}$  :Puissance solaire incidente.  
 $P_{max}$  :Puissance maximale.  
PV :Photovoltaïque.  
q :Charge de l'électron.  
R :Taux de recombinaison.  
 $R_{Aug}$  :Recombinaison auger.  
 $R_{rad}$  :Recombinaisons radiative.  
 $R_{SRH}$  :Recombinaison read-Hall .  
 $R_{surf}$ :Recombinaison surfacique.  
 $R_p$  :Résistance parallèle.  
RS : Réponse spectrale.  
 $R_s$  :Résistance série.  
 $R_{sh}$  :Résistance shunt.  
Si :Silicium.  
 $V_r$  :Vitesse de recombinaison.  
 $S_n (S_p)$  :Vitesse de recombinaison surfaciques des électrons (trous).  
av :Face avant.  
ar :Face avant.  
T :Température.

## Liste des abréviations

---

$T_c$  : Température absolue.

$V$  : Tension.

$V_{oc}$  : Tension de circuit ouvert.

ZCE : Zone de Charge d'Espace.

$\mu_n, \mu_p$  : Coefficient de mobilité des électrons (trous).

$\epsilon$  : Constant diélectrique du semiconducteur.

$\eta$  : Rendement.

$\gamma$  : le facteur d'idéalité.

$\Omega_{abs}$  : L'angle d'absorption.

$\Omega_{emit}$  : L'angle de l'émission.

$\lambda$  : Longueur d'onde.

$\phi$  : potentiel électrique.

### Introduction générale

Si l'on pouvait réduire les 4.6 milliards d'années, l'âge de la Terre, à une échelle de 4.6 ans, alors l'humanité n'existerait que depuis 25 minutes et la révolution industrielle aurait commencé il y a 6 secondes. Depuis le début de cette dernière, les sources fossiles d'énergie (charbon, gaz naturel et pétrole) sont les ressources les plus consommées par l'humanité. L'utilisation massive de ce type d'énergie a provoqué une réduction dans ces réserves et aussi des conséquences néfastes sur l'environnement à l'échelle planétaire telle que la pollution et le réchauffement climatique. Ces effets ont amené l'humanité à s'inquiéter de plus en plus sur l'avenir environnemental de notre planète.

Face à ce problème énorme, des efforts sont multipliés afin de sauvegarder l'environnement et la santé publique. Ainsi, l'humanité a commencée à chercher d'autres moyens pour produire une énergie "propre" et "durable ou renouvelable" et ainsi garder un même niveau de confort tout en préservant l'environnement [1].

L'énergie solaire photovoltaïque avec sa source inépuisable présente une voie très prometteuse pour produire une énergie propre et durable. Son principe se base sur la conversion directe de la lumière du soleil en électricité. Cette technologie utilise un composant électronique (une jonction pn) appelé la cellule solaire. Ce composant capture l'énergie solaire et la transformer en courant électrique continue.

Les performances de ce composant (la cellule) dépendent de plusieurs paramètres tels que les propriétés physiques du matériau (la durée de vie des porteurs de charge, le gap, le coefficient d'absorption de la lumière...etc.) et les étapes de fabrication de ce dernier [2].

La surface de la cellule (avant ou arrière) présente une discontinuité physique de la matière donc, elle est le siège de plusieurs défauts (liaisons pendantes, les dislocations, les impuretés...etc.) [2,3]. Ces défauts créent des centres de recombinaison pour les porteurs de charge. Donc, ils diminuent leur durée de vie. Par conséquence, leur présence avec certaine concentration impacte les performances de conversion de la cellule. En pratique, l'effet de surface sur les caractéristiques électriques de la cellule peut être contrôlé par un traitement chimique appelé la passivation. Généralement, ceci est réalisé par un dépôt d'une couche d'oxyde sur la surface de cette dernière (par exemple pour le silicium, l'oxyde de silicium) [4].

Dans ce travail, nous allons étudier l'impact de l'état de surface sur les paramètres électriques d'une cellule solaire à base de silicium, à savoir, le courant de court-circuit ( $I_{sc}$ ),

la tension du circuit ouvert ( $V_{oc}$ ), le facteur de remplissage (facteur de forme (FF)) et enfin le l'efficacité de conversion ( $\eta$ ).

Pour de mettre en évidence impact de l'état de la surface les paramètres électriques de la cellule, nous allons modéliser tous les mécanismes de recombinaisons qui se produisent sur cette surface par un paramètre qu'on va appeler la vitesse de recombinaison surfacique ( $v_r$ ).

Cette étude est réalisée en utilisant le logiciel PC1D qui est largement utilisé pour modéliser les cellules solaires.

Cette étude est structurée en, trois chapitres et une conclusion :

Le premier chapitre, est une revue bibliographique concernant les aspects généraux des concepts clés concernant notre thème de recherche à savoir, des généralités sur le spectre solaire, l'air de Mass et des notions de base sur la physique des semiconducteurs.

Le deuxième chapitre, est une présentation des principes de base de la conversion photovoltaïque à savoir, le principe de fonctionnement d'une cellule solaire, la caractéristique  $I(V)$  d'une cellule solaire et la réponse spectrale. Enfin, les paramètres qui limitent le rendement de conversation.

Le troisième chapitre, est consacré à la partie simulation et la présentation des résultats. D'abord, on commence par une description du logiciel (PC1D), l'approche suivie, les paramètres utilisés dans la simulation et en fin la présentation des résultats obtenus.

### Références

- [1] REN21 RENEWABLES 2022, GLOBAL STATUS REPORT, page 126, disponible sur : <https://www.ren21.net/gsr-2022/>, consulté le : 30 Mai 2023.
- [2] H. Mathieu, "Physique des semiconducteurs et des composants électroniques", Masson, 1987.
- [3] S. M. Sze et K. K. Ng, "Physics of Semiconductor Devices", third Edition, Wiley, 2006.
- [4] P. Würfel, U. Würfel, "Physics of Solar Cells: From Basics Principles to Advanced Concepts", Third edition, Wiley-VCH, 2016.

**CHAPITRE I**  
**GÉNÉRALITÉ SUR SOLAIRE**  
**PHOTOVOLTAÏQUE**

## I.1 Introduction

Le soleil est une source importante d'énergie, qui atteint la terre et ses créatures depuis sa formation jusqu'à nos jours en leur donnant toute l'énergie dont ils ont besoin. C'est aussi une alternative magique pour générer de l'énergie et protéger l'environnement.

Ce premier chapitre sera d'abord consacré aux généralités de la source principale d'énergie photovoltaïques. Ainsi, nous allons donner un bref aperçu sur les différents types de matériaux, puis sur les différents types de semiconducteurs. Ensuite, on parlera sur la jonction pn et aussi sur l'interaction photon semi-conducteur. Enfin, on va terminer ce chapitre par une conclusion

## I.2 les généralités de la source fondamentale de l'énergie photovoltaïque

### I.2.1 Rayonnement solaire

#### I.2.1.1 Le soleil

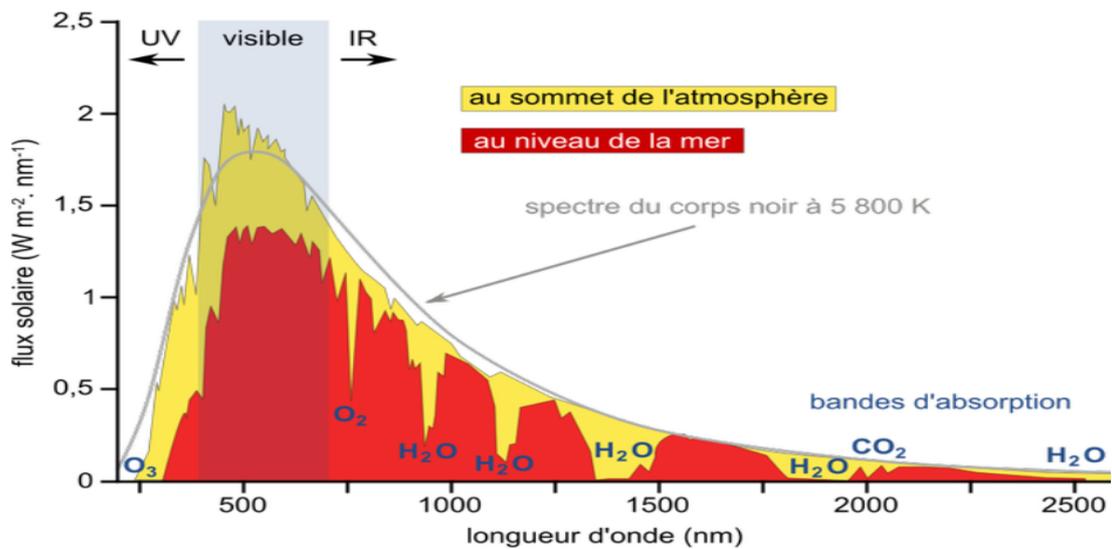
Le soleil est une étoile qui se trouve à une distance de 149,6 millions de kilomètres de la Terre, ce qui correspond à peu près à un voyage de 8 min à la vitesse de la lumière. Il est considéré comme d'une immense sphère lumineuse composée principalement de gaz ionisé. Avec un diamètre de 1,5 million de kilomètres, cet astre est le plus grand corps céleste du système solaire. Sa température à la surface ; la photosphère, avoisine les 6000 °C et monte à 15 millions de degrés au centre, là où se déroulent les réactions de fusion thermonucléaire [1]. Cette réaction dégage une immense énergie qui est émise sous forme de rayonnement électromagnétique [1]. Ce rayonnement émis correspond à celui d'un corps noir à 6000 K [2,3]. En moyenne la puissance émise par le soleil sous forme de rayonnement est estimé à  $90.10^{15}$  GW, alors que la couche terrestre n'arrive à recevoir que  $18.10^6$  GW. Arrivant à la terre, le rayonnement solaire subit de considérables modifications, dues principalement aux phénomènes d'absorption et de diffusion.

#### I.2.1.2 Le spectre solaire

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,28  $\mu\text{m}$  à 4  $\mu\text{m}$ . La figure I.1 représente la variation de la répartition spectrale énergétique.

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

- ✓ 9% dans la bande des ultraviolets ( $<0,4 \mu\text{m}$ ).
- ✓ 47% dans la bande visible ( $0,4$  à  $0,8 \mu\text{m}$ ).
- ✓ 44% dans la bande des infrarouges ( $>0,8 \mu\text{m}$ ).



**Figure I.1:** Spectre du rayonnement solaire [4].

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de 1,37 kilowatt au mètre carré ( $\text{kW/m}^2$ ), à plus ou moins 3 %, selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du soleil dans sa rotation autour de celui-ci. Environ 30 % du rayonnement est directement réfléchi vers l'espace ; le reste subit, en traversant l'atmosphère, une atténuation et une modification de spectre suite à des phénomènes complexes d'absorption par les gaz, de diffusion par les molécules et d'absorption et de diffusion par les poussières et les aérosols. Ainsi, la couche d'ozone absorbe la majeure partie du rayonnement ultraviolet tandis que la vapeur d'eau absorbe une partie du rayonnement infrarouge. Le rayonnement global se décompose en rayonnements direct et diffus [5]:

- Rayonnement direct : il est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère, ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc les ombres des objets au sol et peut être aussi concentré par des miroirs
- Rayonnement diffus : il est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols, nuages). La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions dans le ciel.
- Rayonnement réfléchi (Albédo) : est la partie réfléchi par le sol. Il dépend de l'environnement du site. La neige, par exemple, renvoie énormément de rayons lumineux alors qu'un asphalte n'en envoie pratiquement aucun. Il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur un plan incliné.
- Rayonnement global : est tout simplement la somme de ces diverses contributions comme le montre la figure suivante :

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

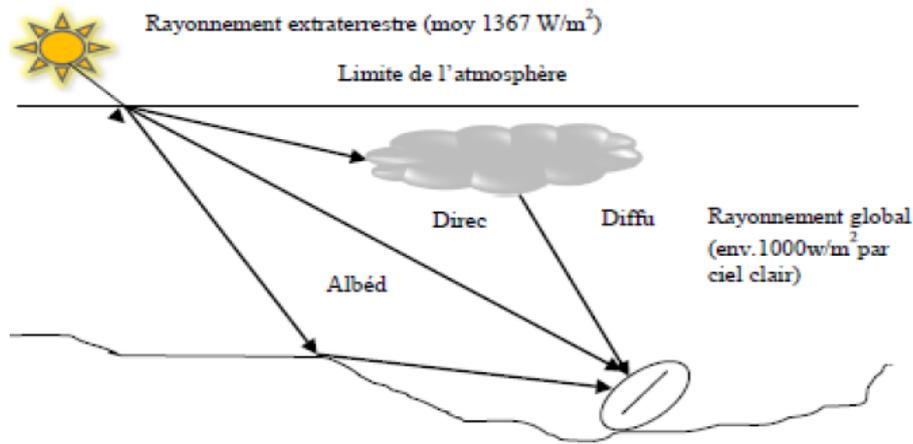
$$E = h\nu = hc/\lambda \quad (\text{I.1})$$

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

$\nu$  : la fréquence du la longueur d'onde associé au photon,

$c$  : la célérité de la lumière ( $c = 3 \times 10^8$  m/s),

$\lambda$  : la longueur d'onde correspondante exprimée en mètre (m).



**Figure I.2** : Les trois composantes du rayon solaire globale sur un plan incliné [5]

### I.2.2 Air Mass

Afin de comparer les performances des cellules solaires, la notion d'Air Mass (AM), ou « masse atmosphérique » a été créée. L'Air Mass est le rapport entre l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu (figure 3). Ce nombre est défini par l'équation :  $AM = 1/\cos \theta$ . Où  $\theta$  est l'angle que fait le soleil avec son zénith. Par convention, AM0 désigne le rayonnement solaire hors atmosphère (spectre valable pour les applications spatiales) [6,7]

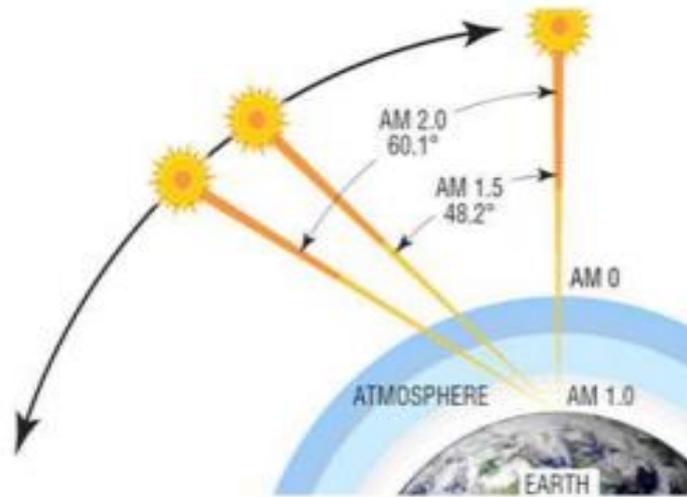


Figure I.3 : Définition de l'air mass AMx [7].

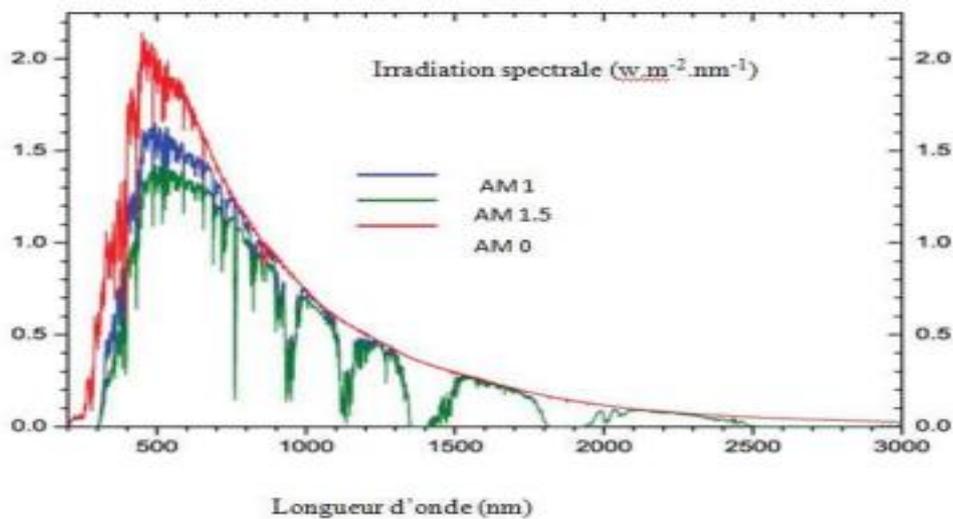


Figure I.4 : Spectres solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM [7].

### I.2.3 Les conditions de test standard (STC)

Afin d'uniformiser les tests sur les panneaux solaires, des conditions d'essai sont mises en place pour comparer la puissance des différents panneaux solaires. Les conditions normalisées de test sont caractérisées par un rayonnement de  $1000 \text{ W/m}^2$ , un spectre solaire AM1,5 :  $(1/\cos \theta) = 1,5$  cas  $\theta=48^\circ$  et une température de  $25^\circ \text{C}$ . Ces conditions sont appelées STC (Standard Test Conditions).

## I.3 Différents types de matériaux

### I.3.1 Types de matériaux

Il existe trois grandes familles de matériaux: les isolants, les conducteurs et les semi-conducteurs

#### I.3.1.1 Conducteur

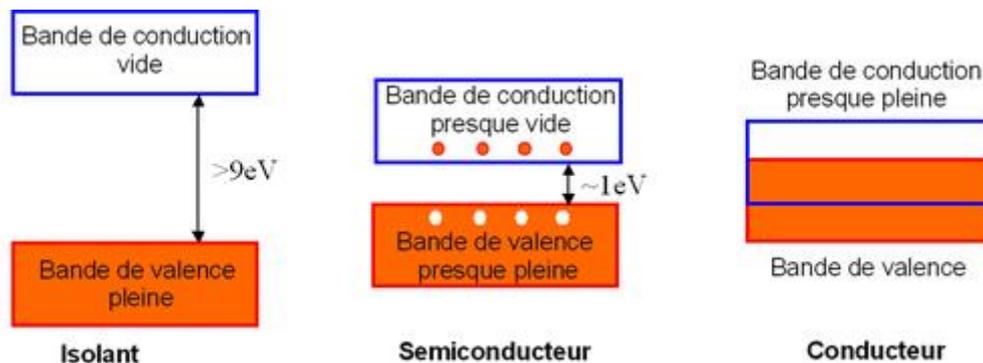
Le conducteur est un matériau qui conduit aisément le courant électrique. Les meilleurs conducteurs sont des matériaux constitués d'un seul élément comme le cuivre, l'argent, l'or et l'aluminium, ces éléments étant caractérisés par des atomes ayant un seul électron de valence faiblement lié à l'atome. Ces électrons de valence peuvent facilement se détacher de leur atome respectif et devenir des électrons libres (figure I.5) [8].

### I.3.1.2 Isolants

L'isolant est un matériau qui ne conduit pas l'électricité. Généralement, les bons isolants sont souvent des matériaux composés de plusieurs éléments, contrairement aux conducteurs. Les électrons de valence sont solidement rattachés aux atomes, laissant très peu d'électrons libres de se déplacer dans un isolant [9]. Il existe deux types de bandes autorisées: une de basse énergie appelée la Bande de Valence (BV) et l'autre d'énergie supérieure appelée la Bande de Conduction (BC) (les électrons qui atteignent cette bande contribuent à la formation d'un courant électrique) figure I.5.

### I.3.1.3 Semiconducteur

Un matériau semiconducteur est un matériau qui a une conductivité électrique intermédiaire entre le conducteur et l'isolant. A l'état pur (intrinsèque), le semiconducteur n'est pas un bon conducteur ni un bon isolant. En général, la conductivité électrique des matériaux (métal, semiconducteur, ou isolant) peut être expliquée en utilisant la théorie des bandes d'énergie [9] (Figure I.5).



**Figure I.5 :** Représentation des bandes d'énergie pour les trois types de matériaux[9].

## I.3.2 Type des semiconducteurs

On distingue deux types de semiconducteurs, l'un parfait dit intrinsèque et l'autre dopé appelé extrinsèque :

### I.3.2.1 Semiconducteur intrinsèque

Un semi-conducteur pur, parfaitement régulier, sans défauts structuraux et ne comportant aucune impureté est appelé intrinsèque. Son comportement électrique dépend uniquement de sa structure et de l'excitation thermique. Il présente les caractéristiques suivantes:

- Les porteurs de charge (électrons) sont créés par les défauts cristallins et par excitation thermique des électrons de la bande de valence.
- Le nombre d'électrons dans la bande de conduction est égal au nombre de trous dans la bande de valence figure I.6.
- Le niveau de Fermi intrinsèque  $E_F$  se trouve au voisinage du centre de la bande interdite.
- La concentration intrinsèque des porteurs et le niveau de Fermi intrinsèque sont calculés par les expressions suivantes [10].

Le calcul de la concentration intrinsèque des porteurs et le niveau de Fermi intrinsèque nécessite l'introduction de la notion de densité d'états énergétique  $N(E)$ . Cette densité, fonction de l'énergie électronique  $E$ , correspond à la place disponible pour les électrons dans la bande de conduction  $N_c(E)$  et à la place disponible pour les trous dans la bande de valence  $N_v(E)$ .

$$N_c(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_c}{h^2}\right)^{3/2} \sqrt{E - E_c} \quad (\text{I.2})$$

$$N_v(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_v}{h^2}\right)^{3/2} \sqrt{E_v - E} \quad (\text{I.3})$$

Où  $h$ ,  $m_c$  et  $m_v$  sont respectivement la constante de Planck normalisée, la masse effective des électrons

dans la bande de conduction et celle dans la bande de valence.

### I.3.2.1.1 Niveau de Fermi

Le nombre effectif d'électrons et de trous, dans chacune des bandes, nécessite la connaissance de la probabilité de présence d'un électron sur un niveau d'énergie  $E$ . Cette probabilité est donnée par la fonction de Fermi-Dirac [11-13]:

$$F(E) = \frac{1}{1 + e^{(E - E_F)/k_B T}} \quad (\text{I.4})$$

Où  $k_B$ ,  $T$  et  $E_F$  sont respectivement la constante de Boltzmann, la température et l'énergie de Fermi.

-  $E_F$  Niveau de Fermi eV, il correspond à une probabilité d'occupation égale à 1/2 quelle que soit la température  $T$ .

-  $k_B$  Constante de Boltzmann [ $k_B = 1.38 \times 10^{-23}$  J. K<sup>-1</sup>].

-  $T$  Température absolue exprimée en kelvin.

### I.3.2.1.2 La fonction exponentielle de Fermi

$$n = N_c e^{\frac{E_c - E_F}{k_B T}} \quad (\text{I.5})$$

$$p = N_v e^{\frac{E_v - E_F}{k_B T}} \quad (\text{I.6})$$

Où  $N_c$  et  $N_v$  sont respectivement la densité effective d'électrons dans la bande de conduction et celle des trous dans la bande de valence. La densité des porteurs intrinsèques est défini par la

relation :

$$n_i = \sqrt{n \cdot p} = \sqrt{N_c N_v} e^{\frac{E_v - E_c}{2k_B T}} \quad (\text{I.7})$$

Dans le cas où il y a égalité des porteurs pour un semiconducteur pure, l'énergie du niveau de Fermi et défini par :

$$E_F = \frac{1}{2}(E_c + E_v) + \frac{1}{2}KT \ln \frac{N_v}{N_c} \quad (\text{I.8})$$

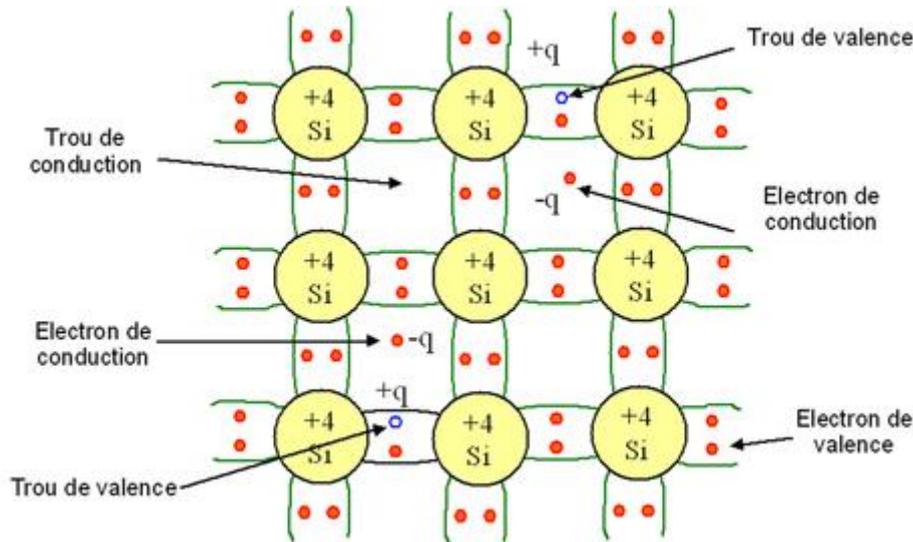


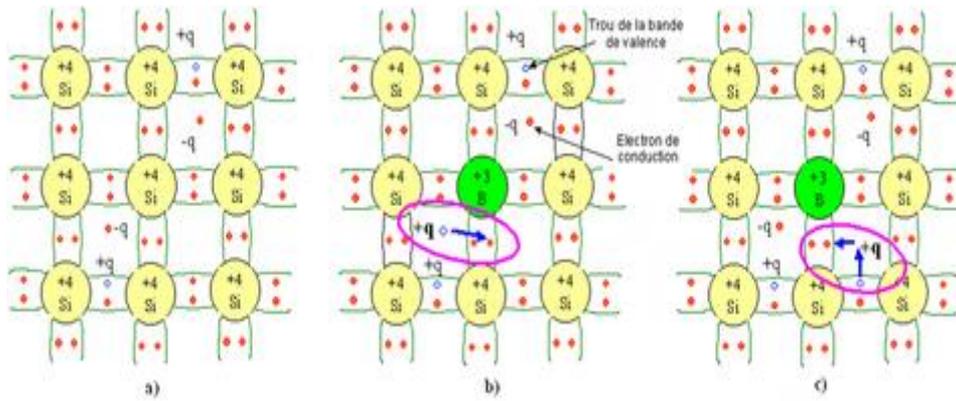
Figure I.6 : Semiconducteur intrinsèque [13].

### I.3.2.2 Semiconducteur extrinsèque

Les semiconducteurs extrinsèques sont des semiconducteurs dopé par des impuretés spécifiques qui leur confèrent des propriétés électriques adaptées aux applications électroniques (Diodes, transistors, etc.) et à l'optoélectronique (émetteurs de lumière, récepteurs, etc.) [14]. On distingue deux types de semi-conducteurs extrinsèques :

#### I.3.2.2.1 Semiconducteurs de type P

Un semiconducteur type P est un semiconducteur intrinsèque (ex : Silicium Si) dans lequel on a introduit des impuretés de type accepteurs (généralement ce sont des atomes de la troisième colonne du tableau périodique comme le Bor). Ces impuretés sont ainsi appelées parce qu'elles acceptent un électron de la bande de conduction pour réaliser une liaison avec le cristal semiconducteur, figure I.7 [14,15].



**Figure I.7 :** Représentation schématique des liaisons électroniques pour le cas du Silicium (Si) dopé par le bord (B) [15].

La figure I.7 met en évidence qu'un semiconducteur dopé P a une densité d'électrons  $n$  plus faible et une densité de trous  $p$  plus élevée. On dit alors que les électrons sont les porteurs minoritaires et les trous, les porteurs majoritaires. Pour les semiconducteurs extrinsèques, la densité de dopant est toujours très supérieure à densité de porteurs intrinsèques  $N_A \gg n_i$ . Dans le cas d'un semiconducteur de type P, la densité de trous est donc proche de celle du dopant accepteur  $N_A$  [15]. Donc si tous les atomes du dopage sont ionisés :

$$p = N_A$$

Puisque  $p \cdot n = n_i^2$  on a

$$n = n_i^2 / N_A$$

La position du niveau de fermi :

$$E_F = E_V + k_B T \ln \left( \frac{N_V}{N_A} \right)$$

### I.3.2.2.2 Semi-conducteurs de type N

Un semi-conducteur de type N est un semiconducteur dans lequel on introduit des impuretés possédant 5 électrons de valence sur leur couche périphérique comme (N, P, As, Sb), pouvant ainsi céder un électron à la bande de conduction, pour réaliser une liaison avec le cristal semiconducteur. Un exemple typique est le dopage de Si par des atomes donneurs de la colonne V (As par exemple) qui présentera quatre liaisons covalentes et un électron libre (Figure I.8). Cet électron faiblement lié à l'atome peut être excité vers la bande de conduction. Cette excitation ne conduit pas à la formation de trous dans ce genre de matériau et le nombre d'électrons dépasse celui des trous. Les électrons et les trous sont respectivement les porteurs majoritaires et minoritaires [16].



**Figure I.8 :** Schéma représentatif du semi-conducteur Silicium dopé N par des impuretés d'arsenic [16].

Donc si tous les atomes du dopage sont ionisés :

$$n = N_d$$

Puisque  $p \cdot n = n_i^2$  on a

$$p = n_i^2 / N_d$$

La position du niveau de fermi :

$$E_F = E_C - k_B T \ln \left( \frac{N_c}{N_d} \right)$$

## I.4 Jonction pn

L'effet photovoltaïque est exploité grâce au composant électronique appelé photodiode. Ce composant n'est qu'une jonction p-n sensible à l'exposition à la lumière. La jonction p-n est formée lorsque deux matériaux, l'un dopé n et l'autre dopé p sont « mis en contact ». Cette mise en contact (théorique) entraîne un retour à l'équilibre du système constitué des semi-conducteurs n et p, qui implique nécessairement une égalisation des deux niveaux de Fermi. La conséquence de ce retour à l'équilibre se manifeste par une diffusion des électrons du matériau n vers le matériau p, et inversement, des trous du matériau p vers le matériau n. Ce mouvement d'électrons (respectivement de trous) laisse derrière lui des charges de signe opposé sur les éléments dopants qui sont eux immobiles dans le cristal, chargés positivement côté n et chargés négativement côté p. Un champ électrique est alors installé entre ces deux zones, comme représenté en figure I.9, Cette région est appelée la zone de déplétion ou zone de charge d'espace (ZCE). Le champ électrique va créer une barrière de potentiel qui va empêcher les porteurs (électrons ou trous) de diffuser vers le matériau de type opposé [17].

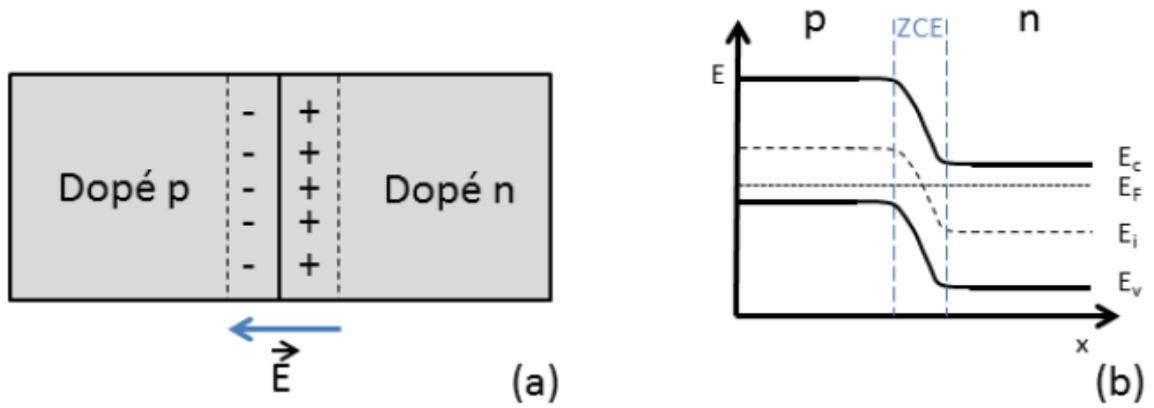


Figure I.9 : (a) Schéma d'une jonction p-n. (b) Diagramme de bande d'une jonction p-n[17].

### I.5 Interaction photon semi-conducteur

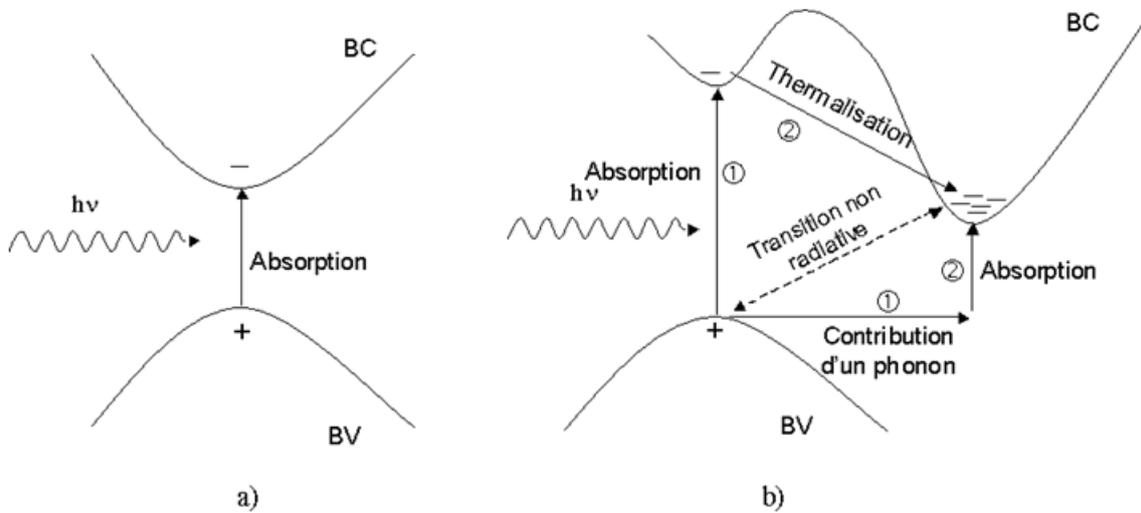
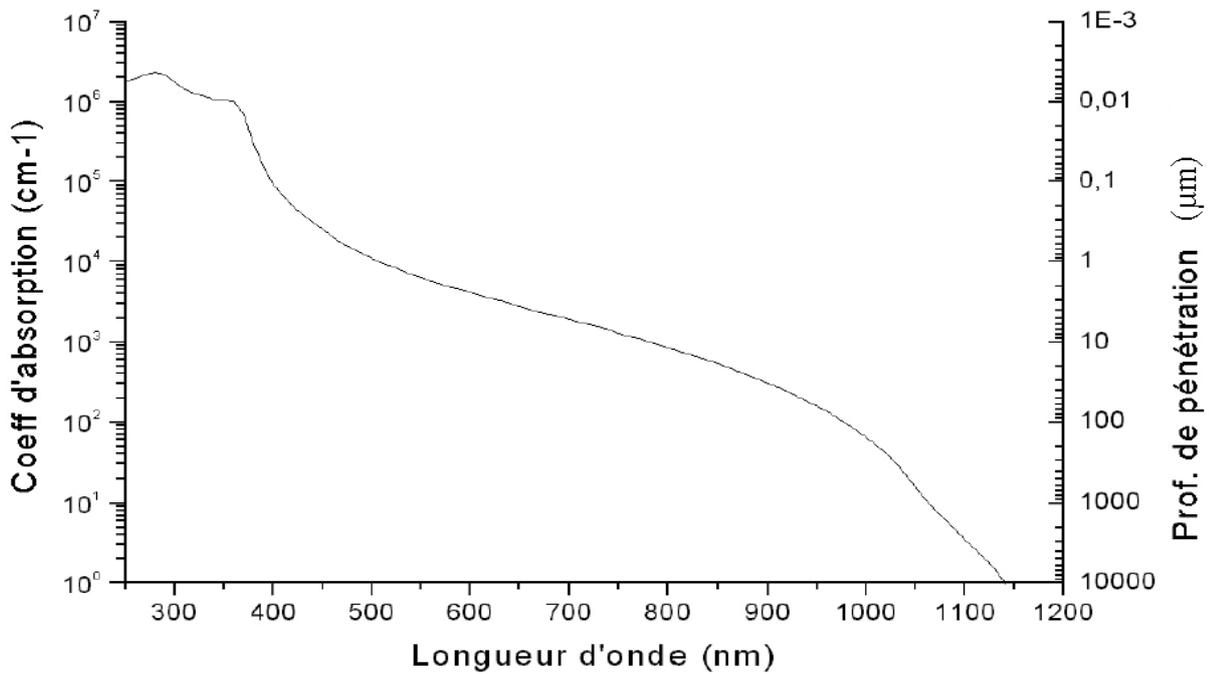


Figure I.10 : Transitions inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur. a) cas d'un semi-conducteur à gap direct. b) cas d'un semi-conducteur à gap indirect [18].

L'interaction entre les photons et un semi-conducteur se traduit par une caractéristique essentielle du matériau dans le domaine photovoltaïque : le coefficient d'absorption. Il traduit le nombre de photons absorbés par unité d'épaisseur du matériau en fonction de leur longueur d'onde. Présente la variation de ce paramètre pour le cas nous donne du silicium. La figure montre que les longueurs d'ondes inférieures à 365 nm, sont absorbées au voisinage de la surface (à une profondeur qui ne dépasse pas les 100 angström). L'augmentation de la longueur d'onde des photons entraîne une diminution du coefficient d'absorption par conséquent une profonde pénétration dans le matériau. Lorsque l'énergie d'un photon devient inférieure à celle du gap du matériau (à l'énergie d'un phonon près), la transition n'est plus possible et le photon n'est pas absorbé.



**Figure I.11** : Coefficient d'absorption du silicium et profondeur de pénétration des photons en fonction de la longueur d'onde, d'après [18].

L'interaction photon électron au sein du semi-conducteur se traduit finalement par la génération d'une paire électron-trou, qui modifie localement la conductivité du matériau. Notons que nous nous situons dans un régime de faible injection, c'est à dire que la densité de porteurs photo générés est faible devant celle des porteurs majoritaires au sein du matériau. Ainsi cet excès de porteurs est plus sensible dans le cas des porteurs minoritaires (trous dans la région dopée n et électrons dans celle dopée p). La cellule photovoltaïque se comportant comme un générateur, il s'agit à présent de séparer ces deux types de porteurs pour éviter qu'ils ne se recombinent entre eux, et de les collecter dans un circuit électrique extérieur. [18]

## I.6 Conclusion

Dans ce chapitre on a donné une bref introduction sur les généralités sur la source principale d'énergie photovoltaïque et sur les matériaux semiconducteurs. On a également présenté la jonction pn et l'interaction photon semiconducteur.

## Références chapitre I

- [1] A. BOURAIOU, "Élaboration et Caractérisation des Couches Minces CuInSe<sub>2</sub> par Électrodéposition", Thèse de doctorat, Université Mentouri – Constantine, 2009.
- [2] R.A. Messenger, J. Ventre, "Photovoltaic systems engineering", 3rd Ed., CRC Press (2010).
- [3] Ahmed LABADI, "Etude et simulation d'une cellule solaire en CIGS par SCAPS", Mémoire de master, Université de Biskra 2022.
- [4] A.A. Dialou, "Elaboration et caractérisation des cellules solaires hybrides (Pérovskite-biomatériaux)", Mémoire de Master, Université Assane Seck de Ziguinchor (2019).
- [5] O. Achour, A. Boutchicha, "Etude thermique d'un capteur photovoltaïque", Mémoire de Master, université Mohamed Boudiaf M'sila (2021).
- [6] A. Labouret, M. Velloz, "énergie solaire photovoltaïques", 3<sup>ème</sup> Edition, DUNOD, paris, 2006.
- [7] K-E. Bendjebbar, "Amélioration des rendements des cellules photovoltaïques a filière silicium", thèse de doctorat, université M<sup>ed</sup> Boudiyaf Oron (2021).
- [8] A. SOUCI, "cours de Physique des Semiconducteurs", Faculté des Sciences Exactes Université de Béjaia, Algérie, (2013/2014).
- [9] <https://lewebpedagogique.com/estechno/files/2016/02/LA-JONCTION-PN.pdf>.
- [10] Charles Kittel (trad. Nathalie Bardou, Évelyne Kolb), "Physique de l'état solide", Dunod, (1998).
- [11] Y. Marouf, "Modélisation des cellules solaires en InGaN En utilisant Atlas Silvaco", mémoire de master, Université de Biskra (2013).
- [12] S.M. Sze, and Kwok K. Ng, "Physics of semiconductor devices", J. Wiley and Sons (2007)
- [13] Neil W. Ashcroft, N. David Mermin, "Physique des solides", EDP Sciences (2002).
- [14] [http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI\\_fr\\_M05\\_C02/co/Contenu\\_04.html](http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M05_C02/co/Contenu_04.html)
- [15] Mme BOOUGHIAS, cours ; Chapitre 2 : La théorie des bandes d'énergie ; Université Mouloud MAMMARI DE Tizi-Ouzou ; Faculté de Génie Electrique et Informatique ; Master Académique Microélectronique semestre 1 ; Physique des composants semiconducteurs 1; (2016/2017).
- [16] C. Ben Saad, "Etude des propriétés structurales, élastiques et électroniques des semiconducteurs par la méthode Ab-initio", Mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf – M'sila, (2018).
- [17] H. Mathieu, "Physique des semiconducteurs et des composants électroniques", Masson, 1987.
- [18] Robert F. Pierret, "Semiconductor Devices Fundamentals", ADDISON-WEALEY PUBLISHING COMPANY (1996).

# CHAPITRE II

## LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

## II.1 Introduction

L'énergie photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie de la lumière en électricité. Cette conversion s'effectue par le biais d'un dispositif appelé la cellule solaire. La production de cette énergie est basée sur un phénomène physique appelé l'effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque le dispositif est exposé à la lumière.

Dans ce chapitre présente un aperçu sur :

- Les principes de fonctionnement d'une cellule solaires.
- La caractéristique  $I(V)$  de la cellule est sa réponse spectrale.
- Les paramètres fondamentales des cellules solaires à savoir le courant de court-circuit ( $I_{sc}$ ), la tension du circuit ouvert ( $V_{oc}$ ), le facteur de remplissage (FF) et le rendement de conversion ( $\eta$ ).
- les différentes générations des cellules solaires.
- les facteurs limitants la conversation des cellules solaire.

## II.2 Cellule photovoltaïque

La cellule solaire est un composant qui permet la conversion du rayonnement solaire en énergie électrique.

La taille de ce composant varie de quelques centimètres carrés jusqu'à  $100 \text{ cm}^2$ . Sa forme est généralement carré ou circulaire. En pratiques, les cellules sont branchées en série pour but d'obtenir une différence de potentiel entre 6 et 24V.

### II.2.1 la découverte historique

L'énergie photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité. Cette conversion est produite par certains matériaux appelés semiconducteurs, qui ont la faculté de libérer leurs porteurs de charges sous l'influence d'une excitation extérieure. Ce phénomène est découvert en 1839 par Alexandre Edmond Becquerel et son père Henri Becquerel [1]. En 1883, Charles Fritts met au point la première cellule fonctionnelle à base de sélénium et d'or. Elle présente un rendement d'environ 1 % [2]. Albert Einstein expliqua le phénomène photovoltaïque en 1905.

Jusqu'à la seconde guerre mondiale, cette découverte a resté comme une curiosité scientifique dans les laboratoires. Il a fallu attendre jusqu'au début des années 50 pour sa mise en application. En 1954, Gerald Pearson, Daryl Chapin et Calvin Fuller créent la première cellule photovoltaïque (PV) à base de silicium avec un rendement de 6 % [3]. Quelques années plus tard, la conquête de l'espace est commencée. C'est cette dernière a enfin permise le développement de l'énergie PV. En effet, les panneaux solaires dans l'espace, autonomes et constamment sous éclairage étaient une source d'énergie toute indiquée pour alimenter des satellites. En 1958, une cellule avec un

rendement de 9% est mise au point et les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

L'industrie PV est restée limitée aux applications spatiales jusqu'au 1973 lorsque la crise du pétrole s'est déclenchée. Avant cette date, la fiabilité de la cellule était le moteur qui propulse et le coût n'était pas aussi important. Après, et afin d'utiliser cette source d'énergie pour produire nos besoins en énergie électrique sur terre, le coût de fabrication de la cellule est devenu le majeur souci de tous les chercheurs à travers le monde. Ainsi d'autres alternatives telles que les cellules à base de silicium polycristallin et à base de couches minces comme le silicium amorphe, de Tellurure de Cadmium CdTe, de Cuivre Indium Gallium Sélénium (CIGS), Arsenic de Gallium (GaAs) et les cellules à colorant ont vu le jour [4–9].

Dans les années 2000, et dans la logique d'améliorer les performances de la cellule, de nouveaux prototypes de cellules tels que les cellules à multi jonctions et les cellules à colorant ont été largement explorés. En outre, la maîtrise de la croissance des matériaux à l'échelle nanométrique et le développement des techniques de caractérisation de leurs propriétés, physico-chimiques ouvrent de nouveaux horizons pour la fabrication des cellules solaires avec des performances largement supérieures à celle de la cellule à base de silicium mono cristallin et à faible coût de production. Ainsi, les cellules à base de matériaux organiques tels que les polymères, de matériaux pérovskite et d'autres composés inorganiques ont été proposés [10–15].

### II.2.2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

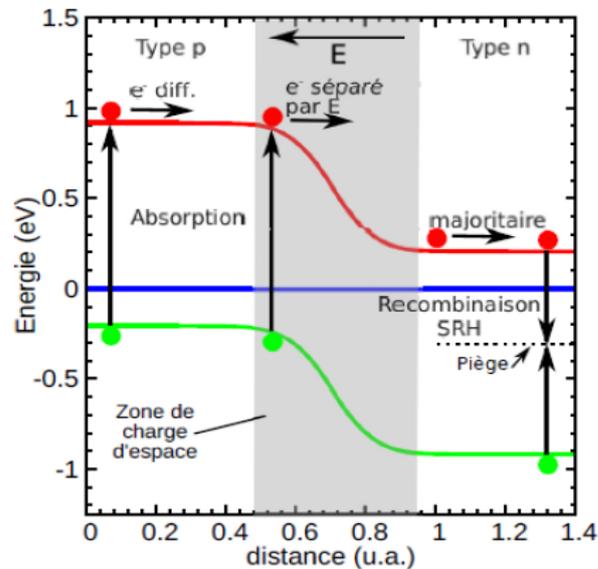
La cellule solaire est un dispositif qui assure la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique. Ceci se fait en trois étapes :

- Absorption des photons de la lumière du soleil,
- Conversion de l'énergie reçue par les photons en énergie électrique (particules électriques libres) ; ce qui correspond à la création de paires électron-trou dans le volume du semiconducteur,
- Collection des charges en excès dans un circuit électrique externe.

En effet, quand les photons d'énergie  $h\nu$  supérieure ou égale à l'énergie du gap arrivent sur la surface de la cellule, ils seront absorbés et des paires électron-trou seront créés dans les trois zones de la cellule.

Les différents mécanismes de transport qui interviennent pour séparer les paires électron-trou créées dans les différentes régions de la cellule sont récapitulés sur la figure II.1. Si les paires sont créées dans la zone de déplétion, elles sont immédiatement séparées grâce au champ électrique : les électrons sont envoyés du côté n et les trous du côté p. Si les paires électron-trou sont générées à

proximité de la ZCE soit du côté P ou N, les porteurs de charge minoritaires créés (électrons du côté p et trous du côté n) peuvent diffuser vers la ZCE sur une distance environ égale à la longueur de diffusion du porteur. Par la suite, le champ électrique va favoriser leurs transferts vers la zone où ils seront majoritaires. Ces porteurs majoritaires vont pouvoir se déplacer facilement vers les électrodes, où ils seront collectés, et créer un courant photogénéré ( $J_{ph}$ )



**Figure II.1** : Principe d'une cellule photovoltaïque : absorption des photons, création de la paire électron-trou, et séparation des porteurs photogénérés [5].

Si les paires sont générés en dehors de la ZCE, se trouvent à une distance supérieure à la longueur de diffusion de la ZCE, risquent de se recombiner. La recombinaison est le phénomène inverse de la génération, c'est-à-dire la disparition de la paire électron-trou. La longueur de diffusion est définie en fonction de la constante de diffusion ( $D$ ), de la durée de vie ( $\tau$ ) des porteurs qui correspond au temps d'existence de l'électron avant qu'il se recombiner [4]:

$$L_{Diff} = \sqrt{D\tau} \quad (\text{II.1})$$

### II.2.3 Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé par le schéma électrique équivalent présenté sur la figure II.2. La cellule photovoltaïque idéale peut modéliser par une source de courant et une diode en parallèle. La source de courant modélise le courant généré par les photons et la diode qui modélise la jonction pn.

Pour modéliser la cellule photovoltaïque réelle, le circuit équivalent doit intégrer deux autres résistances :

- Une résistance branchée en série appelée la résistance série. Cette résistance quantifie les pertes électriques dues aux résistances de chaque couche de la cellule et aussi l'effet des mauvais contacts de collection.
- Une résistance branchée en parallèle appelée la résistance shunt. Elle quantifie les pertes électriques causées par les défauts présents dans la zone de charge d'espace.

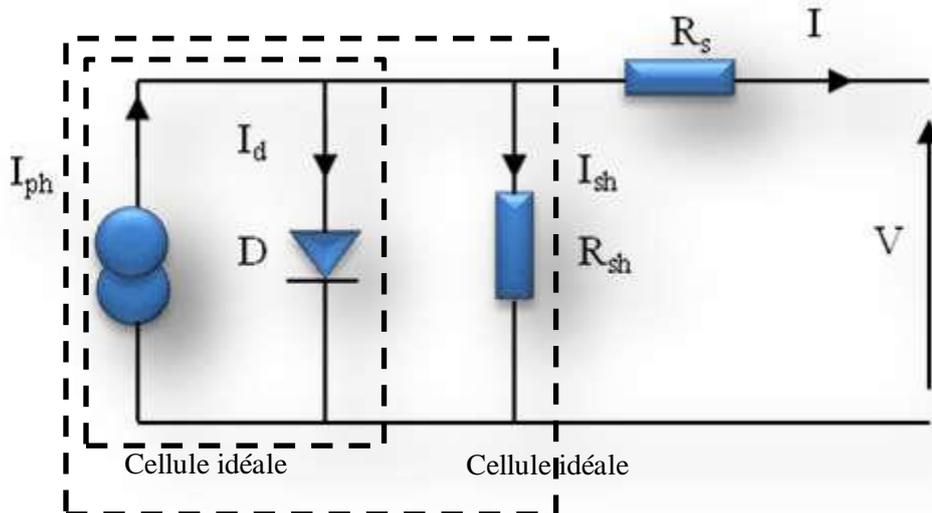


Figure II.2 : Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire [8].

### II.2.4 Caractéristique d'une cellule photovoltaïque

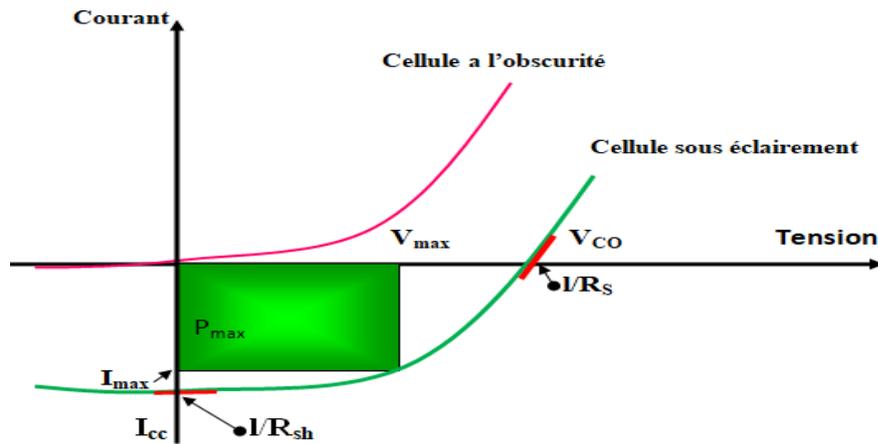
Les cellules solaires sont généralement caractérisées par des courbes de courant en fonction de la tension appliquée sous obscurité et sous éclairage. Sous obscurité, la cellule solaire possède la caractéristique d'une diode, comme représenté en figure II-2. Lorsqu'un potentiel plus élevé est appliqué sur la zone P par rapport à la zone N (polarisation directe), la barrière de potentiel diminue et les porteurs diffusent vers le matériau de type opposé. Une densité de courant d'obscurité ( $J_{obs}$ ) apparaît alors sous la forme:

$$J_{obs} = J_0 \left( \exp \left( \frac{qV}{\gamma k_B T} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.1})$$

Avec  $J_0$  la densité de courant de saturation,  $q$  la charge élémentaire de l'électron,  $k_B$  la constante de Boltzmann,  $T$  la température et  $\gamma$  le facteur d'idéalité.

Lorsque la cellule est éclairée, les porteurs générés et collectés donnent naissance à une densité de courant photogénéré ( $J_{ph}$ ) qui s'oppose à la densité de courant d'obscurité. La densité de courant totale aux bornes de la cellule est donc :

$$J = J_0 \left( \exp \left( \frac{qV}{\gamma k_B T} \right) - 1 \right) - J_{ph} \quad (\text{II.2})$$



**Figure II.3 :** Caractéristique d'une cellule photovoltaïque

La courbe  $I(V)$  caractéristique de la cellule sous éclairement est donc translatée vers le bas par rapport à celle sous obscurité, comme représenté sur la figure II-2. La caractéristique est souvent tracée pour des courants positifs, l'axe des ordonnées est alors renversé, l'équation devient donc :

$$J = J_{ph} - J_0 \left( \exp \left( \frac{qV}{\gamma k_B T} \right) - 1 \right) \quad (\text{II.3})$$

Cependant, ces équations décrivent une cellule idéale. En réalité d'autres paramètres sont à prendre en compte pour le calcul du courant, en particulier, la résistance série ( $R_S$ ) et la résistance parallèle ( $R_{Sh}$ ). Ces deux résistances sont représentées dans schéma électrique équivalent, tracé sur la figure II-1. La densité de courant s'écrit alors :

$$J = J_{ph} - J_0 \left( \exp \left( \frac{q(V - R_S J_{obs})}{\gamma k_B T} \right) - 1 \right) - \frac{q(V - R_S J_{obs})}{R_p} \quad (\text{II.4})$$

Au final, les cellules solaire sont généralement caractérisées par 4 paramètres principales : la densité de courant de court-circuit ( $J_{sc}$ ) et la tension de circuit ouvert ( $V_{OC}$ ) indiquées sur la figure II-2, le facteur de forme (FF) et le rendement de conversion ( $\eta$ ). La densité de puissance traversant la cellule est également souvent calculée et tracée pour déterminer les valeurs caractéristiques de la cellule.

#### II.2.4.1 Le courant de court-circuit $J_{sc}$

Le courant de court-circuit exprime généralement en mA, représente le courant qui circule dans la cellule sous éclairement et lorsque le potentiel appliqué est nul (en prenant  $V = 0$ ). Il croît

linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et il dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs de charges et de la température [8].

### II.2.4.2 La tension de circuit ouvert $V_{OC}$

La tension de circuit ouvert est la tension mesurée aux bornes de la cellule et pour laquelle le courant débité par la cellule solaire est nul. Ce paramètre dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction PN, jonction Schottky), des matériaux utilisés pour fabriquer la cellule, et aussi de la nature des contacts de collection [9]. Elle dépend également de l'éclairement de la cellule [9].

Son expression est donnée par :

$$V_{oc} = \gamma \cdot k_B T \cdot q \cdot \ln \left( \frac{J_{ph}}{J_0} + 1 \right) \quad (\text{II.5})$$

Avec :

$k_B$  : La constante de Boltzmann.

$q$  : La charge électrique.

$T$  : La température absolue.

$J_0$  : Le courant de saturation de la diode.

$J_{ph}$  : Le courant photogénéré.

### II.2.4.3 Le facteur de forme FF

C'est un paramètre important, son utilisation c'est à partir de la caractéristique  $I(V)$  pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur photovoltaïque, et représente aussi le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée  $P_{max}$  et la puissance formée par le rectangle  $J_{sc} \times V_{oc}$ , Plus ce facteur est important, plus la courbe tend vers un rectangle et plus le rendement est élevé. Il dépend principalement des pertes dues aux résistances parasites, ainsi que du courant de diode. Ce facteur est défini par la relation suivante [10] :

$$FF = \frac{P_{max}}{J_{sc} V_{oc}} = \frac{I_{max} V_{max}}{J_{sc} V_{oc}} \quad (\text{II.6})$$

$I_{max}$  : Le courant à la puissance maximal de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

$V_m$  : La tension à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

$P_{max}$  : La puissance maximale.

#### II.2.4.4 Le rendement de conversion de l'énergie $\eta$

Le paramètre le plus important qui qualifie la cellule solaire et le rendement de conversion. En effet, ce paramètre exprime la capacité de la cellule à convertir les photons de la lumière incidente en courant électrique. Il est calculé par le rapport entre la puissance maximale générée par la cellule et la puissance du rayonnement solaire incident [11].

Le rendement est donné par l'équation ci-dessous :

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{inc}}} = \frac{J_m V_m}{P_{\text{inc}}} \quad (\text{II.7})$$

$P_{\text{inc}}$  : La puissance lumineuse incidente.

#### II.2.4.5 La réponse spectrale RS

La réponse spectrale (RS) est de manière analogue, représente le rapport de l'intensité  $I(\lambda)$  générée par la cellule sur la puissance incidente  $P_{\text{inc}}(\lambda)$ , pour chaque longueur d'onde.

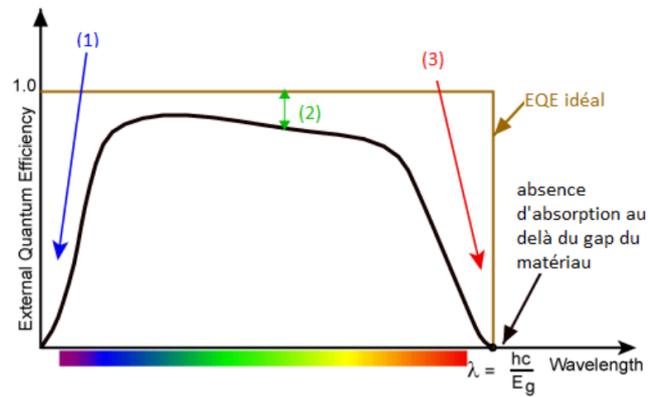
La réponse spectrale RS est donnée par la relation suivante [22]:

$$\text{RS} = \frac{I(\lambda)}{P_{\text{inc}}(\lambda)} \quad (\text{II.8})$$

#### II.2.5 Mesure de rendement quantique externe

Les mesures de rendement quantique externe (EQE) permettent de compléter la caractérisation électrique d'une cellule photovoltaïque en déterminant le rapport entre le flux d'électrons collectés et le flux de photons incidents en fonction de la longueur d'onde du rayonnement monochromatique incident. Cette analyse permet de déterminer les zones limitantes au sein de notre cellule par rapport au rendement quantique idéal comme on peut le voir sur la figure II-3.

Les pertes en (1) indiquent une diminution de la conversion des photons de hautes énergies. Il s'agit de pertes liées aux recombinaisons près de la surface ou par absorption par des couches qui ne participent pas à la photo-génération. Les pertes indiquées en (2) sont principalement causées par les réflexions du rayonnement incident sur la cellule, les recombinaisons aux interfaces de la cellule et, de plus en plus présentes vers les faibles énergies, par des pertes dues à une trop faible longueur de diffusion des porteurs minoritaires. Enfin, les pertes indiquées en (3) résultent d'une recombinaison des porteurs à proximité de la face arrière, d'une trop faible épaisseur du matériau absorbant et/ou d'une trop faible longueur de diffusion des porteurs. Au-delà de la valeur du gap de l'absorbeur, le rendement quantique est nul car les photons ne sont plus absorbés par la cellule.



**Figure II.4 :** Variation spectrale du rendement quantique externe d'une cellule photovoltaïque [22].

### II.2.6 Descriptifs des différentes générations

En général, l'objectif principale de la recherche dans le domaine du photovoltaïque est d'améliorer le rendement des cellules tout en maintenant voir en diminuant leur coût de fabrication. Différentes technologies existent et sont généralement classées en 3 générations dont les caractéristiques sont résumées dans le tableau II.1

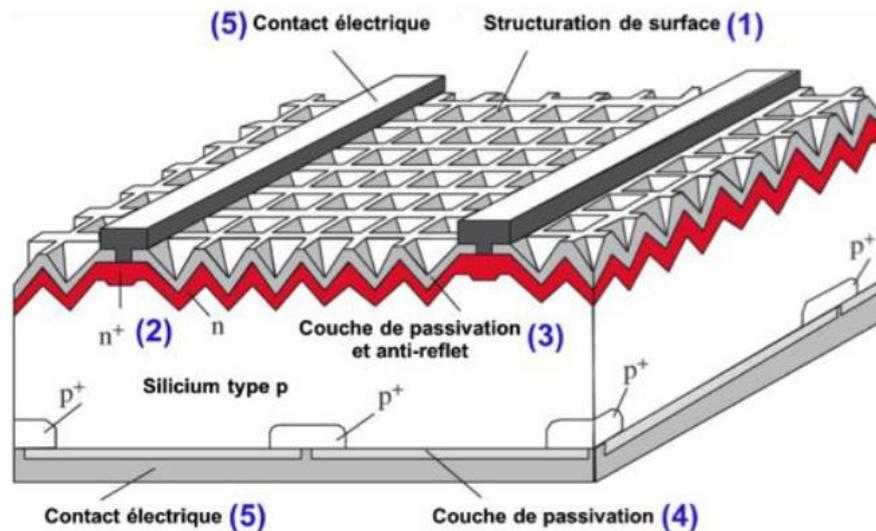
**Tableau II.1** : Tableau des différentes générations de cellules solaires [8].

Génération	Matériaux utiliser	Rendement records (NREL)	Prix	Epaisseur
1 <sup>ere</sup>	Silicium mon& poly-cristallin massif	26.7%	Moyen	~200µm
	Couches minces			
2 <sup>eme</sup>	Silicium amorphe	22.6% (CIGS)	Bas	10 µm
	CdTe, CIS, CIGS, CZTS			
3 <sup>eme</sup>	Couches minces « avancées » (organiques, DSSC, Pérovskites)	46%	Elevé mais dépend des technol.	Dépond des technol.
	Nouveaux concepts (porteurs chauds, concentration tandem, multifonctions, thermo PV)	17.8% (nanofil)		
	Architecture complexes (nanofils, nanoparticules, quantum dots)			

### II.2.6.1 Première génération

C'est la plus ancienne technologie de fabrication de cellule photovoltaïque. Elle utilise le silicium cristallin massif comme matière première [9]. Cette génération de cellules est la plus utilisée pour l'usage domestique. En effet, ceci pour nombreux avantages. Le silicium est le deuxième élément chimique le plus abondant dans la croûte terrestre ; la technologie microélectronique sur Si est

mature ; le gap du silicium est de 1,12 eV, ceci lui permet d'atteindre un rendement idéal de 33% environ. La figure II.5 présente un schémas illustratif d'une cellule solaire à base de silicium.



**Figure II.5** : Schéma illustratif d'une cellule solaire à base de silicium [9].

### II.2.6.2 Deuxième génération

L'inconvénient principal des cellules de la première génération et l'usage d'une grande quantité de silicium pour compenser son faible coefficient d'absorption de la lumière.

Pour diminuer les coûts de production et de maintenir le rendement, une nouvelle technologie de fabrication des cellules solaires est introduite. Cette technologie utilise les matériaux en couches minces (la deuxième génération). Dans cette technologie des semiconducteurs à gap direct qui absorbent plus efficacement la lumière que le silicium, comme le CdTe, le CIGS. Ceci permet de limiter l'épaisseur des cellules et donc d'utiliser moins de matière.

On trouve également dans la deuxième génération, les cellules à base de silicium amorphe qui atteignent des rendements record de 14% [8].

Le rendement record mondial de cette technologie est actuellement de 22,6% [8].

### II.2.6.3 Troisième génération

La troisième génération des cellules solaire comporte différentes technologies qui n'ont pas les mêmes applications. On y retrouve les cellules multi-jonctions avec des hauts rendements qui peuvent atteindre 46% [8]. Ce type de cellules est principalement utilisées pour des applications aérospatiales, elles sont très coûteuses. Cette génération regroupe aussi d'autres nouveaux concepts comme l'utilisation de porteurs chauds [13], l'utilisation de bandes intermédiaires [14], le thermo photovoltaïque [15] etc. Certaines technologies utilisées dans cette génération visent à diminuer le

prix des cellules et à les rendre flexibles et/ou transparentes comme les cellules organiques qui ont un rendement maximum de 13,2% [7]. D'autres technologies dans cette génération adoptent des architectures complexes dans le but d'améliorer l'absorption ou la collecte des charges créées comme les cellules à concentration, les cellules à base de nanoparticules ou à base de nano fils [16–20]. Ces dernières présentent de nombreux avantages et elles sont très prometteuses pour les applications terrestre et spéciales.

### II.2.7 Mécanisme de perte dans une cellule photovoltaïque

Une cellule solaire exposée à un rayonnement solaire, peut être modélisée par le circuit présenté sur la figure II.1. Dans les faits, il existe plusieurs facteurs de perte de la conversion énergétique au sein de la cellule solaire.

Les différents facteurs de pertes, sont dus soit dues aux restrictions purement physiques liées au matériau, soit aux limitations technologiques induites par le processus de fabrication. Des choix technologiques appropriés peuvent cependant avoir des conséquences sur les limitations intrinsèques du matériau [21].

#### II.2.7.1 Pertes physiques

##### II.2.7.1.1 Pertes dues aux photons de grande longueur d'onde

Tous les photons possédant une énergie  $h\nu$  inférieure à celle du gap  $E_g$  du semiconducteur ne peuvent générer des paires électron-trou et sont donc perdus. Sous un éclairement d'AM1.5, ces pertes sont évaluées à 23.5% dans le cas du silicium [16].

##### II.2.7.1.2 Pertes dues à l'énergie excédentaire des photons

Chaque photon absorbé génère seulement une paire électron-trou. Les photons d'énergie supérieure au gap, leur excès d'énergie est dissipé sous forme de chaleur.

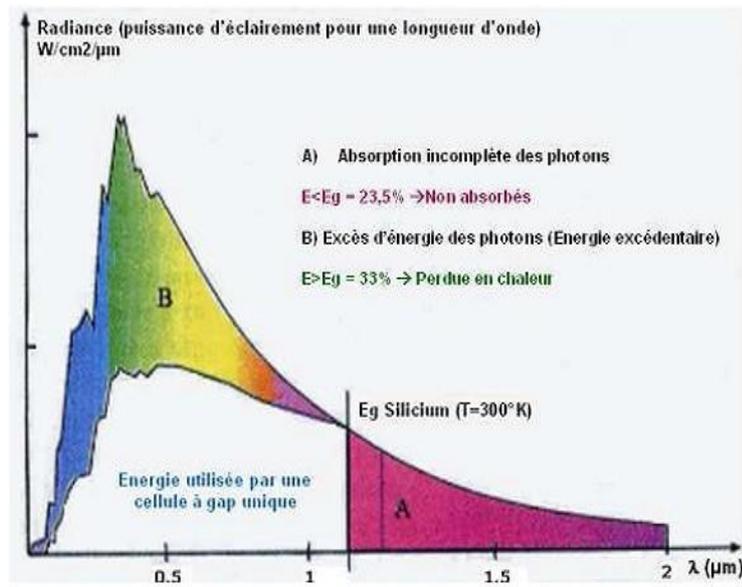
Pour le cas du silicium, sous un éclairement d'AM1.5, ces pertes sont estimées à 33% de la puissance totale [23].

Ajoutant à ces pertes :

- Les valeurs de  $V_{oc}$  qui sont de l'ordre de 700 mV ( $\sim qE_g$ ).
- Les équations courant-tension sont régies par les équations de Boltzmann sous une forme exponentielle de type  $\exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right)$ , la courbe  $I(V)$  ne peut donc avoir une forme rectangulaire même dans le cas d'une cellule idéale, par conséquent le facteur de forme ne peut dépasser 0.89. Ce

terme dépend également des paramètres technologiques modélisés par les résistances série et parallèle. Le rendement est donc limité par ces différents facteurs à une valeur théorique maximale. Les travaux de Schokley et Quiesser, ont démontré l'efficacité ultime de 33% pour le silicium qui a un gap de 1,1 eV [7].

Les principales pertes intrinsèques pour une cellule photovoltaïque en silicium sont présentées sur Figure II.4.



**Figure II.6 :** Les pertes intrinsèques d'une cellule photovoltaïque à base de silicium. (A) Pertes des photons de grandes longueurs d'onde. (B) Pertes dues à l'énergie excédentaire des photons. L'insert illustre le phénomène de thermalisation [23].

## II.2.7.2 Les pertes technologiques

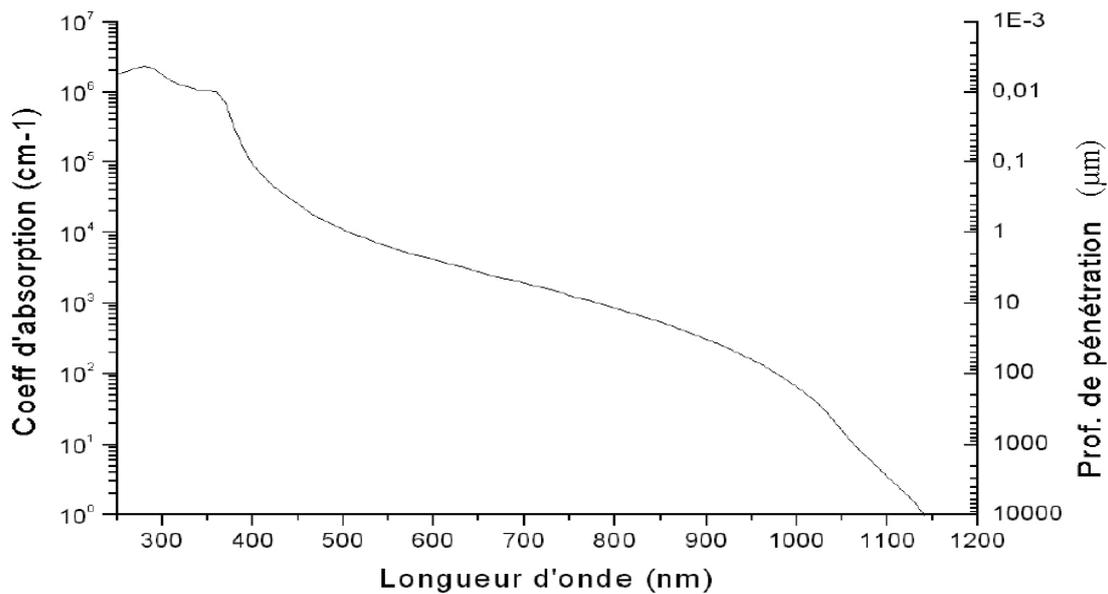
### II.2.7.2.1 Les pertes optiques

Elles proviennent de photons qui ne sont pas absorbés par la cellule, malgré que leur énergie est supérieure à celle du gap du matériau qui forme la cellule. Il en résulte principalement une réduction du courant de la cellule.

- ❖ L'ombrage de la face avant de la cellule à cause de la grille métallique de contacte. Cette limite est minimisée par un travail d'optimisation de cette grille. Le cas échéant est de déposer une électrode transparente.
- ❖ La réflexion de la lumière par la face avant de la cellule. Ceci est généralement due à la différence entre l'indice de réfraction du matériau et celui de l'air. Ce type de perte peut être minimisé par la

texturisation de la surface avant de la cellule et/ou par dépôt d'un matériau diélectrique pour former une couche antireflet.

- ❖ La manière avec laquelle le matériau absorbe la lumière. Pour le cas du silicium, l'absorption des photons de grandes longueurs d'onde est supérieure à l'épaisseur de la cellule (figure II-5). Donc, une partie du spectre est perdue. Ce type de perte peut être réduit en utilisant un confinement optique.



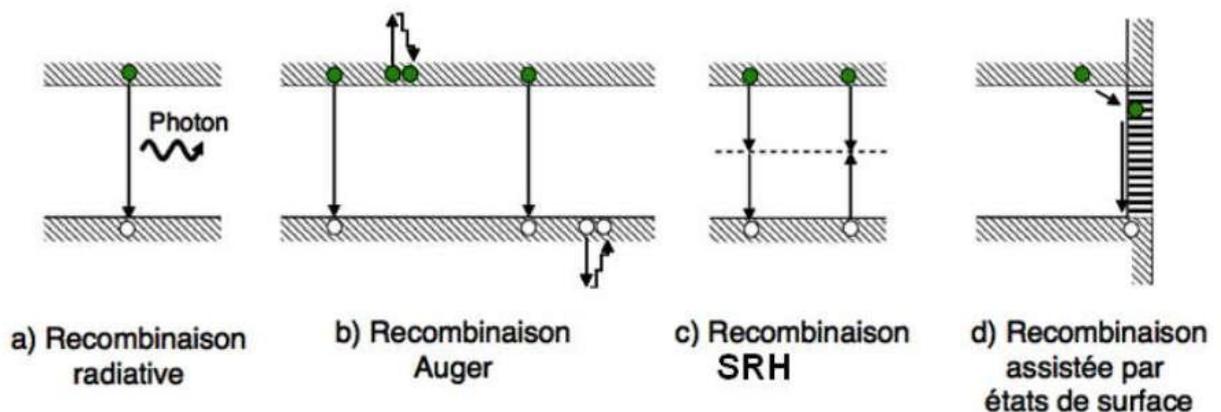
**Figure II.7 :** Coefficient d'absorption et profondeur de pénétration de la lumière dans le silicium cristallin en fonction de la longueur d'onde à 300 K [18].

#### II.2.7.2.2 Les pertes par recombinaison

Une fois que la paire électron-trou est formée suite à l'absorption d'un photon, les porteurs de charge vont migrer vers la ZCE et vers les zones de collecte. En chemin, il est possible qu'un électron et un trou se recombinent. Les porteurs de charge sont alors perdus et ne pourront pas être collectés pour être formés en un courant électrique. Le temps et la distance parcourus par un porteur avant d'être recombiné sont caractérisés par leur durée de vie et leur longueur de diffusion. Il existe différents mécanismes de recombinaison.

- ❖ La recombinaison radiative : cette recombinaison est le procédé inverse à la photogénération. Dans ce cas, un électron et un trou se recombinent pour donner un photon ayant une énergie égale au gap. Ce mode de recombinaison est négligeable dans le cas des semiconducteurs à gap indirect.

- ❖ La recombinaison Auger : c'est recombinaison qui met en jeu trois particules : l'énergie de la recombinaison bande à bande d'une paire électron-trou est transférée à un électron de la bande de conduction ou à un trou de la bande de valence. Cette énergie est par la suite dissipée par thermalisation. Ce type de recombinaison est significative dans le cas de forte taux d'injection et dans le cas forte niveau de dopage, comme dans les émetteurs. La durée de vie des porteurs varie alors avec la densité de porteurs.
- ❖ La recombinaison Shockley-Read-Hall (SRH) : cette recombinaison s'effectue par le baie des défaut et des impuretés qui créent des niveaux d'énergie discrets dans la bande interdite du semiconducteur.
- ❖ La recombinaison de surface : cette recombinaison est aussi due aux défauts présents sur la surface du semiconducteur. La surface est une discontinuité du milieu cristallin, elle cause la présence de nombreuses liaisons pendantes, qui sont autant de niveaux intermédiaires dans la bande interdite. Ces défauts sont neutralisés par deux façons. Les états d'interfaces sont neutralisés en supprimant les liaisons pendantes par le dépôt d'une couche d'un diélectrique. L'utilisant un effet de champ, les porteurs sont repoussés du voisinage de la surface et ne peuvent donc pas s'y recombinaison. Ceci est réalisé par un dopage localement plus élevé, ou bien par un diélectrique chargé, qui engendre une couche d'accumulation ou d'inversion [24].



**Figure II.8** : Représentation des différents mécanismes de recombinaison [25].

### **II.3 Conclusion**

Ce chapitre présente les bases indispensables à la compréhension du principe de fonctionnement de la cellule ainsi que les différentes sources qui influent sur son rendement de conversion.

Nous avons commencé par définir la cellule photovoltaïque et donné brièvement son histoire de développement. Ensuite, on a expliqué le principe son fonctionnement et définir ses caractéristiques électriques. En fin, nous avons abordé les facteurs limitant le rendement de conversion de la cellule solaire.

## Références chapitre 2

- [1] A. E. Becquerel, "Memoire sur les Effects d'Electriques Produits Sous l'Influence des Rayons Solaires", Comptes Rendus de l'Académie des Sciences 9, 561-567 (1839).
- [2] A. Einstein, "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt", Annalen der Physik Annalen der Physik 17, 132-148 (1905).
- [3] S. M. Sze and K. K. Ng, "Physics of Semiconductor Devices", third Edition, Wiley (2006).
- [4] H. Mathieu, "Physique des semiconducteurs et des composants électroniques", Masson (1987).
- [5] J. Michallon, "Étude et optimisation de l'absorption optique et du transport électronique dans les cellules photovoltaïques à base de nanofils", thèse de doctorat, université de Grenoble 2015.
- [6] S. Selberher, "Analysis and Simulation of Semiconductor Devices", (Springer, 1984).
- [7] W. Shockley and W. Read, "Detailed Balance Limit of Efficiency of P-N Junction Solar Cells", Journal of Applied Physics 32, 510-519 (1961).
- [8] J. Verrier, "Fabrication et caractérisation avancée de cellule solaire à base de nanofils de ZnO", thèse de doctorat, université de Grenoble (2016).
- [9] B.L. Sofia "Cours énergie solaire photovoltaïque", Université de Bejaia (2015).
- [10] Fraunhofer-ISE, "Current and Future cost of Photovoltaics", 2015.
- [11] NREL, "Best-Research-Cell Efficiencies", 2016. [En ligne]. Available: <http://nrel.gov/ncpv/>.
- [12] M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta and E.D. Dunlop, "Solar cell efficiency tables (version 50)" Prog. Photovolt. Res. Appl. 25, 668-676 (2017).
- [13] D. Chapin, C. Fuller and G. Pearson, "A New Silicon P-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power", Journal of Applied Physics 25, 676-677 (1954).
- [14] D. Feldman, G. Barbose, R. Margolis, N. Darghouth, T. James, S. Weaver, A. Goodrich and R. Wiser, "Photovoltaic System Pricing Trends: Historical, Recent, and Near-Term Projections-2013 Edition" Lawrence Berkeley Laboratory Study, (2013).
- [15] Fraunhofer-ISE, "Current and Future cost of Photovoltaics", (2015).
- [16] «UMERC,» [En ligne]. Available: <http://www.umerc.umd.edu/projects/solar08>.
- [17] A.J. Nozik, "Quantum dot solar cells", Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures 14, 115-120 (2002).
- [18] A. Luque and A. Marti, "Increasing the Efficiency of Ideal Solar Cells by Photon Induced Transitions at Intermediate Levels", Physical Review Letters 78, 5014 (1997).
- [19] A. Lenert, D. Bierman, Y. Nam, W. Chan, I. Celanovic, M. Soljacic and E. Wang, "A nanophotonic solar thermophotovoltaic device", Nature nanotechnology 9, 126-130 (2014).

- [20] E.C. Garnett, M.L. Brongersma, Y. Cui et M.D. McGehee, “Nanowire Solar Cells”, *Annu. Rev. Mater. Res* 41, 269-295 (2011).
- [21] J.F. Lelievre, “Elaboration de SiN<sub>x</sub>:H par PECVD : “optimisation des propriétés optiques, passivantes et structurales pour applications photovoltaïques”, thèse de doctorat INSA Lyon (2007).
- [22] K. Helali, “Modélisation d’une photovoltaïque : étude comparative”, Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi –Ouzou (2012).
- [23] Y. Ali, “Optimisations des cellules solaires conventionnelle à base de silicium de type N”, Mémoire de Magister, Université Abou-Bekr Belkaid Tlemcen (2011).
- [24] G. Maïlys, “Réalisation de nouvelles structures de cellules solaires photovoltaïques à partir de couches minces de silicium cristallin sur substrat de silicium préparé par frittage de poudres”, These de doctorat, INSA de Lyon (2012).
- [25] A. Arras, “Caractérisation des cellules photovoltaïque à base d’hétérojonction de silicium a-Si/c-Si”, Mémoire de Master, Université Abou-Bekr Belkaid Tlemcen (2018).

# CHAPITRE III

## SIMULATION ET RÉSULTATS

### III.1 Introduction

L'état électrique de la surface influe énormément sur les propriétés électriques des composants électroniques. La neutralisation électrique de cette surface a fait objet de plusieurs études [1-3]. Pour le cas des cellules solaires, la neutralisation de leur face avant et arrière (la passivation) est une étape cruciale pour minimiser les pertes de conversion [4-6].

Pour gagner du temps et de l'argent, généralement les chercheurs utilisent la simulation pour optimiser les conditions de fabrication et étudier leurs impacts sur les propriétés électriques de la cellule.

La simulation numérique par le logiciel PC1D donne des résultats très proches à ceux obtenus expérimentalement ce qu'il le rend un utile précieux pour l'optimiser des paramètres électriques de la cellule.

Dans cette partie nous allons utiliser ce logiciel pour étudier et déterminer l'influence de l'état électrique de la surface avant et arrière de la cellule sur ses paramètres électriques à savoir, le courant de court-circuit, le potentiel du circuit ouvert le facteur de forme et enfin le rendement de la cellule.

Nous allons commencer par introduire le mode d'utilisation du logiciel ensuite nous exposons les résultats de cette simulation.

### III.2 Formalisme mathématique

PC1D est un code numérique qui résolu l'équation de continuité des porteurs de charge en 1D couplées avec l'équation de poisson [7-9]. Les équations de transport des électrons et des trous sont dérivées de l'équation de transport de Boltzmann avec les hypothèses suivantes :

- Les deux porteurs circulent indépendamment (pas de diffusion porteur-porteur).
- Les deux populations de porteurs restent en équilibre thermique avec le réseau cristallin environnant (pas de porteurs chauds), la mobilité des porteurs est isotrope, et la structure des niveaux d'énergie disponibles pour les électrons n'est pas significativement affectée par l'excitation (bandes rigides).
- Les champs sont également négligés et la température est supposée uniforme.

L'ensemble des équations (III-1)–(III-5) est résolu numériquement par la méthode des éléments finis [7,10]

$$\nabla(\varepsilon\nabla\phi) = q(p - n + N_D - N_A) \quad (\text{III-1})$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\nabla \cdot J_n}{q} + (G - R) \quad (\text{III-2})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\nabla \cdot J_p}{q} + (G - R) \quad (\text{III-3})$$

$$J_n = -q\mu_n n \nabla \phi + qD_n \nabla n \quad (\text{III-4})$$

$$J_p = -q\mu_p p \nabla \phi - qD_p \nabla p \quad (\text{III-5})$$

Avec,  $\varepsilon$  le constant diélectrique du semiconducteur,  $q$  la charge de l'électron,  $\phi$  le potentiel électrique,  $n(p)$  concentration des électrons (trous),  $N_D(N_A)$  concentration des atomes donneurs (accepteurs),  $J_n(J_p)$  la densité du courant pour les électrons (trous),  $G$  le terme du taux de génération optique et  $R$  le terme du taux de recombinaison qui contient la recombinaison radiative, recombinaison Shockley-Read-Hall, recombinaison Auger et la recombinaison surfacique.  $\mu_n(\mu_p)$  le coefficient de mobilité des électron (trous) et  $D_n(D_p)$  le coefficient de diffusion des électrons (trous) qui est relievé à la mobilité par la relation d'Einstein :

$$D_n = \frac{k_B T}{q} \mu_n \quad (\text{III-6})$$

$$D_p = \frac{k_B T}{q} \mu_p \quad (\text{III-7})$$

$k_B$  la constante de Boltzman et  $T$  la température.

Le taux de recombinaison peut être divisé en quatre types de recombinaisons, recombinaison radiative  $R_{rad}$ , recombinaison Shockly- Read-Hall  $R_{SRH}$ , recombinaison Auger  $R_{Aug}$  et recombinaison surfacique  $R_{surf}$  [10]

$$R = R_{rad} + R_{Aug} + R_{SRH} + R_{surf} \quad (\text{III-8})$$

$$R_{rad} = B(np - n_i^2) \quad (\text{III-9})$$

$$R_{SRH} = \frac{(np - n_i^2)}{\tau_p(n + n_1) + \tau_p(p + p_1)} \quad (\text{III-10})$$

$$R_{Aug} = (C_{n0}n + C_{p0}p)(np - n_i^2) \quad (\text{III-11})$$

$$R_{SRH} = \frac{(np - n_i^2)}{\frac{1}{S_p}(n + n_{1s}) + \frac{1}{S_n}(p + p_{1s})} \quad (\text{III-12})$$

$B$ , le coefficient de recombinaison radiative,  $n_1(p_1)$  la concentration des électrons (trous) sur les pièges,  $C_{n0}(C_{p0})$  le coefficient de recombinaison Auger et  $S_n(S_p)$  la vitesse de recombinaison surfaciques des électrons (trous). Les détails du calcul numérique (la discrétisation des équations, le schéma numérique et les conditions de convergence et les modèles physiques pour chaque paramètre) sont exposés en détails dans les références [11,12].

### III.3 Présentation du logiciel PC1D

Le PC1D (personnel computer one-dimensionnel) est l'un des programmes qui a été élaboré pour modéliser et exploiter les composants semi-conducteurs, notamment les cellules photovoltaïques. Il a une réputation internationale dans la recherche photovoltaïque. Il a été développé à l'université "New South Wales de Sydney" en Australie en 1985. Son utilisation est très pratique car il permet de simuler n'importe quelle structure photovoltaïque et donne des résultats très proches de la pratique ce que signifie des gains de temps et d'argent. Le programme est écrit en langage Pascal, il donne la solution numérique des équations de transport des électrons et des trous dans les cellules solaires [1].

Grace à son interface graphique qui contient toutes les étapes nécessaires pour confectionner la cellule solaire, le PC1D, est très facile à utiliser. Cette interface permet d'introduire tous les paramètres importants pour faire une simulation. Il est groupé en cinq sections (figure III.1)

*File: (New Parameters) (Double-click to add a description)*

**DEVICE**

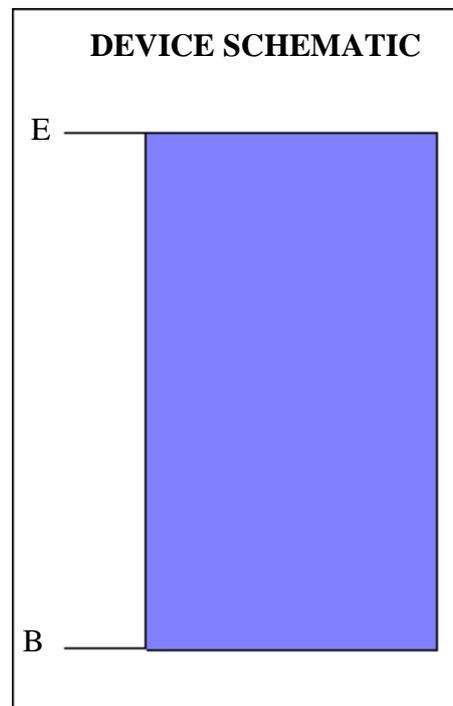
Device area:  $1 \text{ cm}^2$   
 No surface texturing  
 No surface charge  
 No Exterior Front Reflectance  
 No Exterior Rear Reflectance  
 No internal optical reflectance  
 Emitter contact enabled  
 Base contact enabled  
 No internal shunt elements

**REGION 1**

Thickness:  $10 \text{ }\mu\text{m}$   
 Material from program defaults  
 Carrier mobilities from internal model  
 Dielectric constant: 11.9  
 Band gap: 1.124 eV  
 Intrinsic conc. at 300 K:  $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$   
 Refractive index: 3.58  
 Absorption coeff. from internal model  
 Free carrier absorption enabled  
 P-type background doping:  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$   
 No front diffusion  
 No rear diffusion  
 Bulk recombination:  $\tau_n = \tau_p = 1000 \text{ }\mu\text{s}$   
 No Front-surface recombination  
 No Rear-surface recombination

**EXCITATION**

Excitation mode: Steady State  
 Temperature: 300 K  
 Base circuit: Zero  
 Collector circuit: Zero  
 Light sources disabled

**RESULTS**

**Figure III.1** : Fenêtre de démarrage ouverte au démarrage du logiciel de simulation

PC1D

- 1- Section 1 (Device) : c'est la partie comprenant la géométrie de du composant e.g. la surface, la réflectance, la résistance série et shunt.
- 2- Section 2 (région) : cette partie apporte les contraintes nécessaires liées à la zone du dispositif (la jonction) a savoir, le type de matériaux mis en jeu, l'épaisseur, type de dopage etc. Dans cette partie on peut insérer jusqu'à 5 régions
- 3- partie 3 : (excitation) : dans cette partie nous fixons les contraintes de simulation du dispositif telle que le type irradiation ainsi que les autres contraintes comme la température de fonctionnement et d'autres paramètres.
- 4- partie 4 : {résultats} : cette partie est réservée à l'affichage résultat à savoir la valeur de  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$  et  $P_{max}$ .
- 5- partie 5 : {schéma de l'appareil} : est essentiellement le schéma de la disposition que nous créons. Ce schéma permet de visualise les changements introduits sur les paramètres de chaque région du dispositif [1 ,2].

### III.4 Paramètres de la simulation

Afin d'étudier l'effet de la vitesse de recombinaison sur le comportement électrique de la cellule, on a considéré une cellule conventionnelle à base de silicium, formée par un émetteur de type n et une base de type p. Les contacts de collection sont considérés parfait et la résistance électrique des deux parties est négligée (la résistance série est négligée). D'autre part, on a aussi considéré qu'il n'y a pas de recombinaison de charge dans la zone de charge d'espace et n'y a pas de courant de fuites (la résistance Shunt est négligée). En outre, on a considéré que la surface avant de la cellule reflète 10% de la lumière du soleil. Les autres paramètres de la simulation sont récapitulés dans le tableau III.1.

**Tableau III.1:** Différentes paramètres de simulation

Paramètre	Valeur
Epaisseur de l'émetteur	$1\mu m$
Epaisseur de la base	$200\mu m$
Concentration de dopage de l'émetteur	$10^{19} cm^{-3}$
Concentration de dopage de la base	$10^{16} cm^{-3}$
Durée de de vie des porteurs de charge dans la couche n	$15\mu s$
Durée de de vie des porteurs de charge dans la couche p	$50\mu s$

Constant diélectrique	11.6
Indice de réfraction	3
La température	25°C

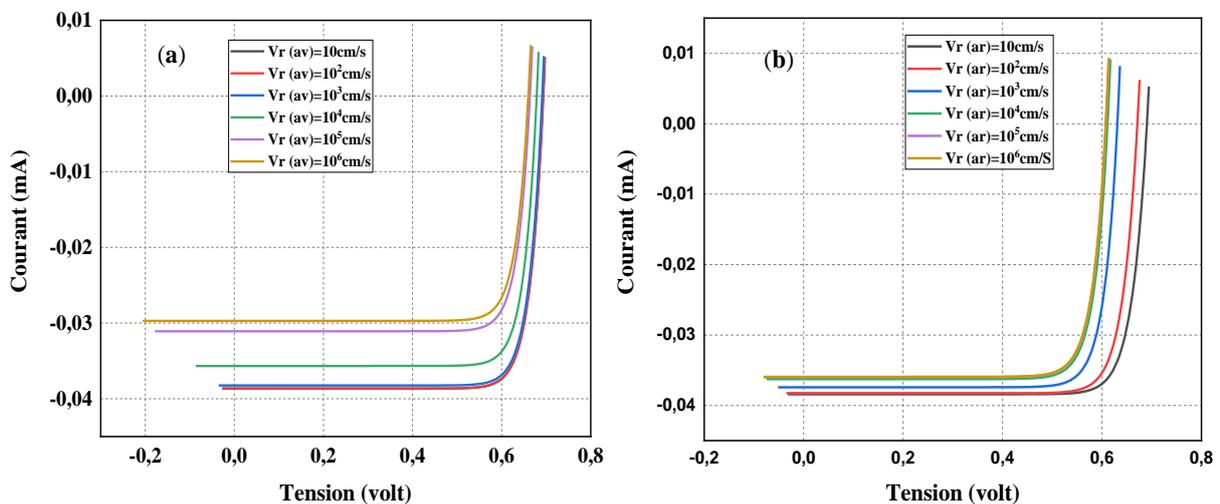
### III.4 Résultats et discussion

Pour pouvoir mettre en évidence l'influence de la vitesse de recombinaison de chaque surface (S) sur les paramètres électriques de la cellule, nous allons fixer la vitesse de recombinaison d'une surface à zéro et en fait varier la valeur de l'autre. Pour chaque valeur de S, nous traçons les caractéristiques  $I(V)$ ,  $P_{\max}(V)$  et la réponse spectrale  $Q(\lambda)$ . Pour chaque cas nous déterminaient les paramètres,  $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$ , FF.

#### III.4.1 Influence de la vitesse de recombinaison de la face avant ( $S_{av}$ ) et de la face arrière ( $S_{ar}$ ) sur les paramètres électriques de la cellule

##### III.4.1.1 Caractéristiques courant-tension $I(V)$

La figure III.2 présente la variation de la caractéristique  $I(V)$  d'une cellule solaire de silicium pour différentes valeurs de la vitesse de recombinaison surfacique, (a) de la face avant ( $V_{r(av)}$ ) et (b) la face arrière ( $V_{r(ar)}$ ).



**Figure III.2 :** Caractéristique courant-tension  $I(V)$  pour différentes valeur de vitesse de recombinaison (a) Face avant et (b) Face arrière.

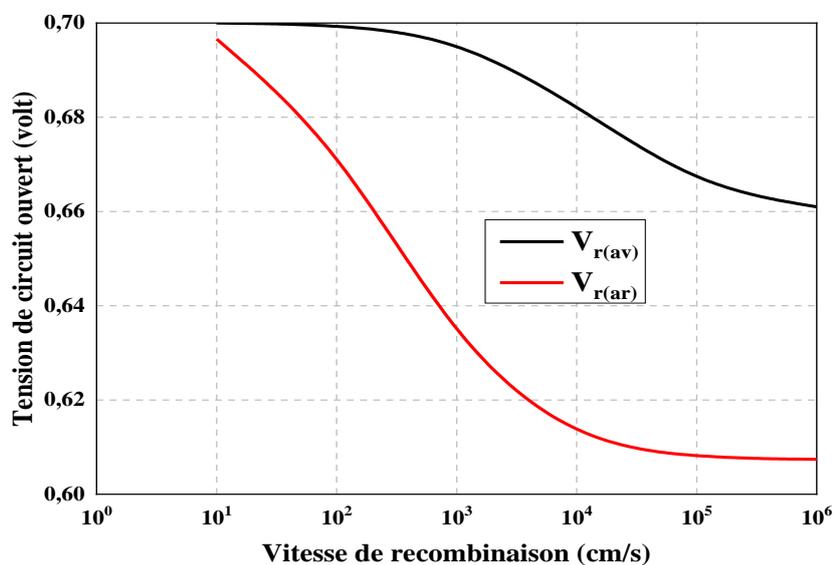
Les résultats de la simulation montrent que la vitesse de recombinaison surfacique influe sur la caractéristique  $I(V)$ . Les valeurs de  $I_{sc}$  et de  $V_{oc}$  décroissent avec l'augmentation de cette dernière. ( $V_{r(av)}$ ) influe sur l'intensité de courant  $I_{sc}$  figure III.2(a), alors que ( $S_{ar}$ ) influe sur la tension du circuit ouvert  $V_{oc}$  figure III.2(b). Ce résultat est en accord avec les travaux

précédents [13–15]. Pour les grandes valeurs de la vitesse de recombinaison, une zone morte est formée sur la surface de la cellule (elle se traduit par un maximum de recombinaison de porteurs de charges). Dans ce cas, la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  et le courant de court-circuit  $I_{sc}$  atteignent leurs valeurs minimales.

### III.4.1.2 Effet de la vitesse de recombinaison sur la tension du circuit ouvert

La figure III.3, montre l'influence de  $V_{r(av)}$  et de  $V_{r(ar)}$  sur la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$ . Les résultats obtenus montrent que  $V_{oc}$  dépend de la vitesse de recombinaison de manière générale. Il diminue avec l'augmentation de ce paramètre. Pour les faibles valeurs de  $V_{r(av)}$ ,  $V_{oc}$  est quasi-constant et il commence à diminuer avec l'augmentation de  $V_{r(av)}$  (figure III-3(a)). Par contre,  $V_{oc}$  décroît plus rapidement avec l'augmentation de  $V_{r(ar)}$  (figure III-3(b)). Il devient quasi-indépendant  $V_{r(ar)}$  quand la valeur de cette dernière ( $V_{r(ar)} > 10^4$  cm/s) et atteint sa valeur minimal pour  $V_{r(ar)} > 10^5$  cm/s.

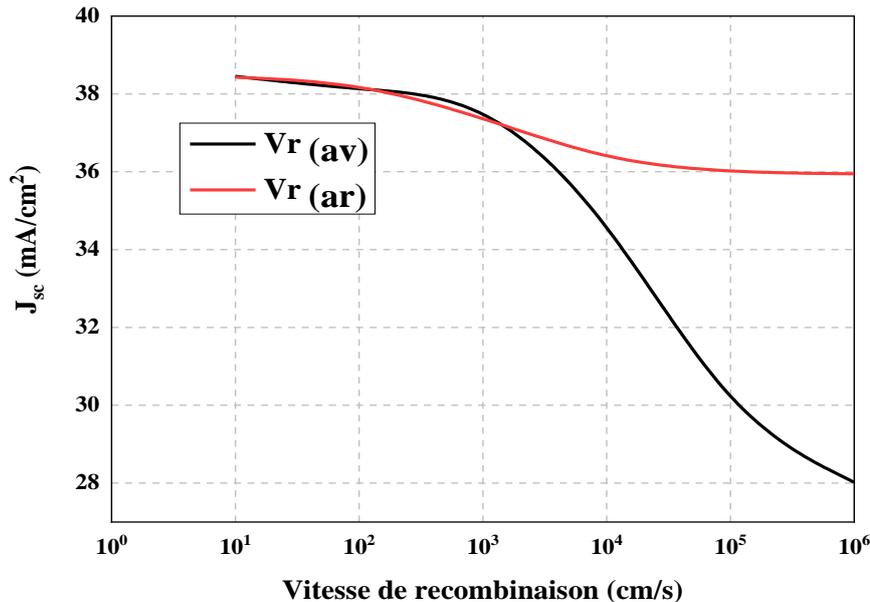
Cette différence de dépendance de variation de  $V_{oc}$  avec  $V_{r(av)}$  et  $V_{r(ar)}$  est attribué au fait que  $V_{r(av)}$  affecte plus le temps de vie des porteurs de charge car il y a un taux de génération important dans la région proche de la surface arrière (la génération se fait dans une région loin de la jonction) alors si  $V_{r(ar)}$  est grandes les porteurs de charge vont se recombiner avant d'arriver à la jonction. Ce résultat est en bon accord avec la littérature [16-17].



**Figure III.3 :** Variation de la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  en fonction de la vitesse de recombinaisons de la face avant ( $V_{r(av)}$ ) et de la face arrière ( $V_{r(ar)}$ ).

### III.4.1.3 La densité de courant de court-circuit $J_{sc}$

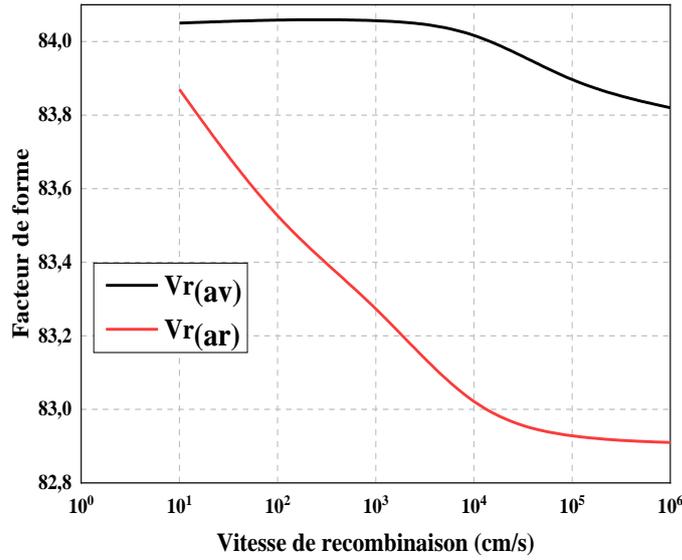
La variation de la densité de courant de court-circuit est présente sur la figure III-4. Les résultats montrent que  $J_{sc}$  diminue avec l'augmentation de  $V_{r(av)}$  et de  $V_{r(ar)}$ . Pour les faibles valeurs de  $V_{r(av)}$  et  $V_{r(ar)}$ , on constate une faible diminution de densité de courant. Pour les grandes valeurs de  $V_{r(av)}$  et  $V_{r(ar)}$ , une forte diminution de  $J_{sc}$  est constatée. De manière générale, l'état de surface influence sur la densité de courant si la vitesse de recombinaison des porteurs sur cette surface est grande.



**Figure III.4 :** Variation de la densité de courant de court-circuit  $J_{sc}$  en fonction de la vitesse de recombinaison de la face avant ( $V_{r(av)}$ ) et de la face arrière ( $V_{r(ar)}$ ).

### III.4.1.6 Le facteur de forme (FF)

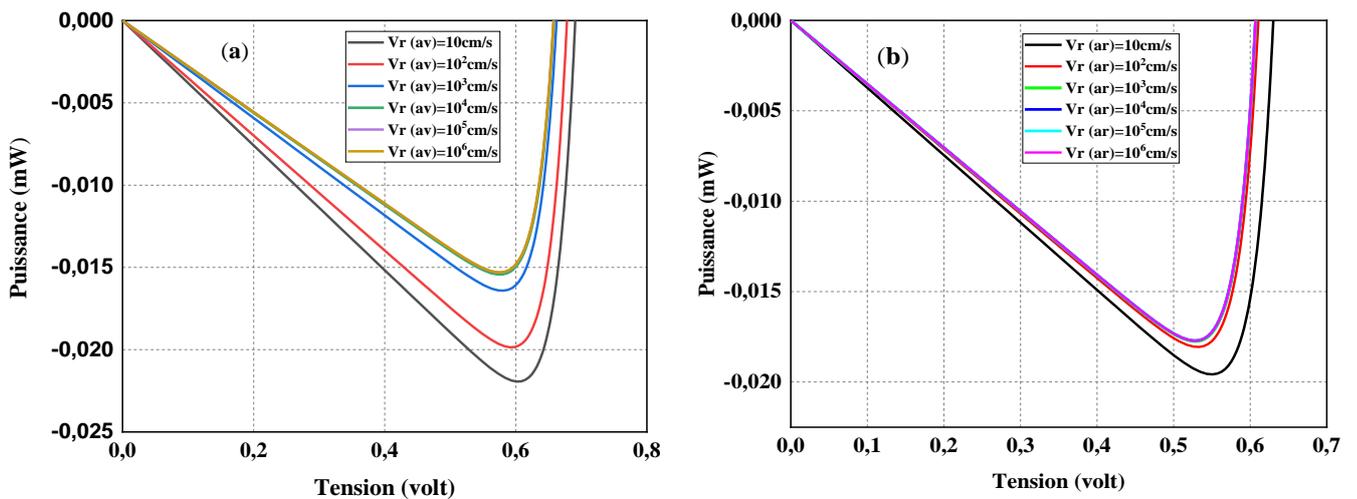
La figure III.5 représente la variation du facteur de forme en fonction de la vitesse de recombinaison surfacique de la face avant et de la face arrière. Le facteur de forme varie très peu avec l'augmentation de la vitesse de recombinaison de la face avant  $V_{r(av)}$ . On peut dire qu'il ne dépend pas directement de la vitesse de recombinaison de la face avant. Par contre, le facteur de forme diminue rapidement avec l'augmentation de la vitesse de recombinaison de la face arrière. Une valeur minimale est obtenue pour le cas des fortes valeurs de  $V_{r(ar)}$  ( $V_{r(ar)} > 10^6 \text{ cm/s}$ ).



**Figure III.5 :** Variation de Facteur de forme en fonction de la vitesse de recombinaisons surfacique de la face avant ( $V_{r(av)}$ ) et de la face arrière ( $V_{r(ar)}$ ).

**III.4.1.7 Puissance délivrée**

La figure III.6 représente les résultats de la simulation de la variation de la puissance délivrée par la cellule en fonction de la tension pour différentes valeurs de recombinaison surfacique de la face avant (figure III.6.a) et de la face arrière (figure III.6.b). Les résultats montrent que la puissance délivrée diminue avec l’augmentation de la vitesse de recombinaison en particulier de la face avant.

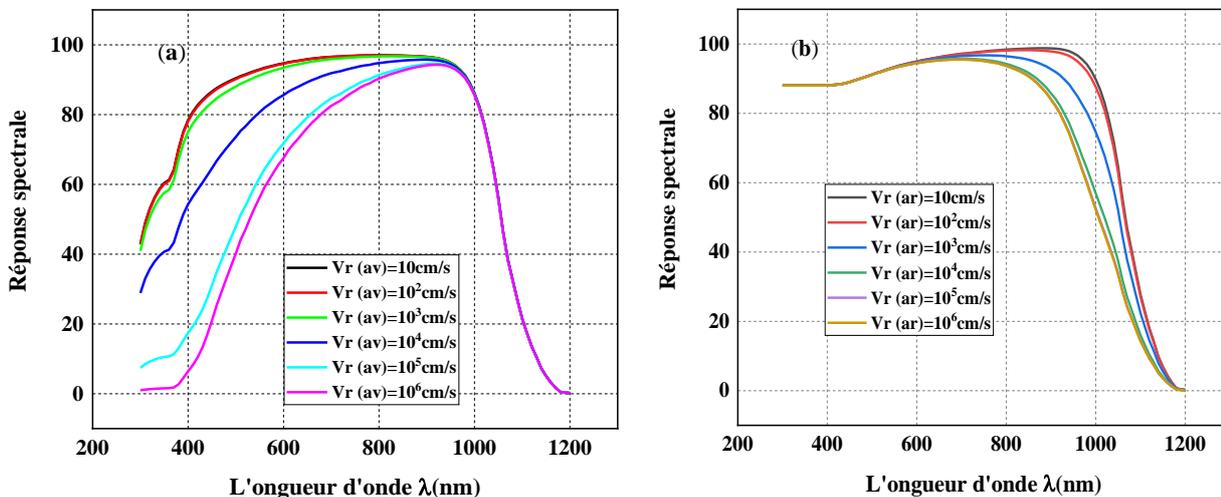


**Figure III.6 :** Puissance délivrées par la cellule en fonction de la tension pour différentes valeurs de vitesse de recombinaison. (a) Face avant. (b) face arrière.

### III.4.1.8 La réponse spectrale

La figure III.7 illustre la variation de la réponse spectrale de la cellule solaire en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs de vitesse de recombinaison de la face avant (figure III.7(a)) et de la face arrière (figure III.7(b)).

La vitesse de recombinaison surfacique de la face avant influe sur les courtes longueurs d'onde (partie UV du spectre optique) puisqu'elles sont absorbées dans une région proche de la face avant. Si  $V_{r(av)}$  est grande, les paires électrons trous générées dans cette région suite à l'absorption de la lumière seront attirer vers la surface ou ils se recombinent et ainsi ils ne participent pas dans la formation du courant électrique [18]. Par ailleurs, la vitesse de recombinaison surfacique de la face arrière influe sur la partie infrarouge du spectre (les longues longueurs d'onde) puisque ces longueurs d'onde pénètrent très profondément avant d'être absorbées (puisque le coefficient d'absorption du silicium est faible). Alors, elles sont absorbées dans une région proche de la face arrière. Si  $V_{r(ar)}$  est grande, les paires électrons trous générées dans cette région suite à l'absorption de la lumière seront attirer vers la surface, où ils vont se recombiner et ainsi ils ne participent pas dans la formation du courant électrique [18].



**Figure III.7 :** Variation de la réponse spectrale en fonction de la longueur d'onde du spectre solaire pour différentes valeurs de vitesse de recombinaison. (a) Face avant. (b) face arrière.

L'état électrique de la surface avant et arrière influe énormément sur le comportement électrique d'une cellule solaire, elle peut tout seul diminuer le rendement de la cellule jusqu'à 50 %. Donc, il est important que la surface de la cellule soit neutralisée

(passivée). Le tableau III.2 récapitule l'effet de la vitesse de recombinaison sur les principaux paramètres de la cellule à base de silicium.

**Tableau III.2 :** Les principaux paramètres d'une cellule solaire de silicium pour différentes valeurs de vitesse de recombinaison surfacique.

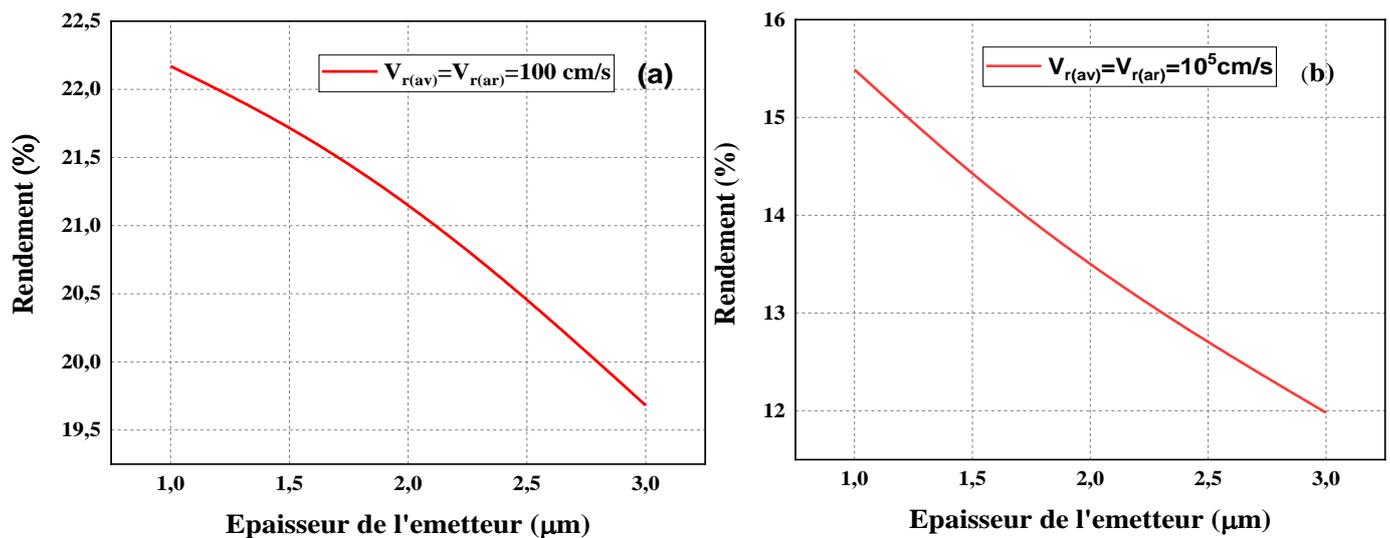
$S_{av}$ (cm/s)	$S_{av}$ (cm/s)	$V_{oc}$ (mV)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_m$ (mV)	$J_m$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$P_{max}$ (mW/cm <sup>2</sup> )	$FF$	$\eta$ (%)
10	10	699.1	39.86	606.4	38.32	23.25	83.41	23.84
10 <sup>2</sup>	10 <sup>2</sup>	675.5	39.69	586.4	38.12	22.36	83.39	22.36
10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup>	632.0	38.63	548.9	37.04	20.34	83.30	20.34
10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>	610.1	35.93	528.2	34.41	18.18	82.96	18.18
10 <sup>5</sup>	10 <sup>5</sup>	601.7	31.39	520.6	30.03	15.64	82.78	15.84
10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>	598.9	29.38	523.6	27.78	15.55	82.72	14.55

### III.4.2 Influence de l'épaisseur de la cellule sur son rendement

Comme l'absorption du spectre optique dépend de la profondeur de pénétration dans le semi-conducteur. Dans ce qui se suit nous allons étudier l'effet de la profondeur de la jonction (profondeur de l'émetteur) et l'effet de l'épaisseur de la base sur le rendement de la cellule.

#### III.4.2.1 Influence de l'épaisseur l'émetteur de la cellule sur le rendement

La figure III.8 présente la variation du rendement de la cellule en fonction de l'épaisseur de l'émetteur.



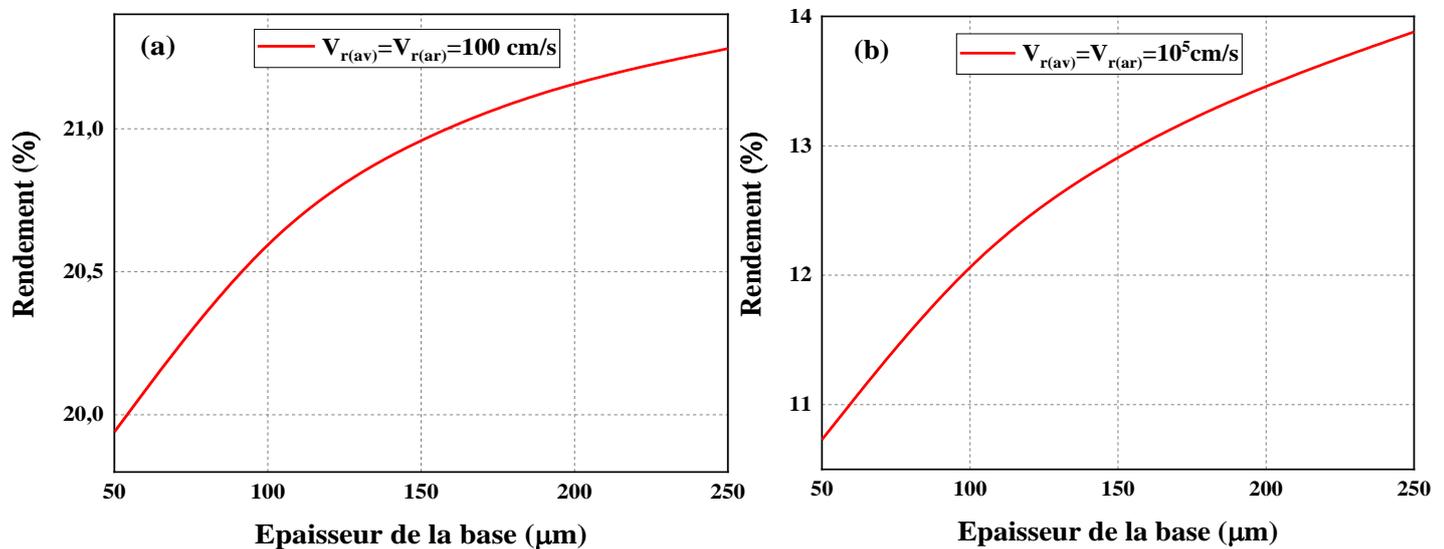
**Figure III.8 :** La variation du rendement en fonction de l'épaisseur de l'émetteur. (a) faible vitesse de recombinaison surfacique (b) forte vitesse de recombinaison surfacique.

Le rendement de la cellule diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur (profondeur de la jonction pn) pour les deux cas. Ceci est expliqué par le fait que les courtes longueurs d'ondes de la lumière sont absorbées dans une région proche de la surface donc, plus la jonction est profonde plus la probabilité de collection des porteurs de charge générés proche de la surface diminue. Ceci se traduit par une diminution du rendement de la cellule.

### III.4.2.2 Influence de l'épaisseur de la base

Figure III.9 présente la variation du rendement de la cellule en fonction l'épaisseur de sa base (couche p).

Le rendement augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la base. Parce que plus l'épaisseur augmente, moins de lumière sort de la face arrière de la cellule. Les travaux sur ce sujet ont montré que pour le cas de silicium, il faut une épaisseur supérieure à  $250 \mu\text{m}$  pour que tout spectre de la lumière sera absorbé (le spectre qui a une énergie  $>1.1\text{eV}$ ) [19-20]. Ceci est expliqué par le fait que le silicium est un semi-conducteur à gap indirect [21], donc, son coefficient d'absorption de la lumière est faible ce qui se traduit par une profonde pénétration de la lumière dans le silicium.



**Figure III.9 :** La variation du rendement en fonction de l'épaisseur de base de la cellule. (a) faible vitesse de recombinaison surfacique (b) forte vitesse de recombinaison surfacique.

### III.5 Conclusion

La recombinaison des porteurs de charge sur les deux faces de la cellule dégrade énormément ses caractéristiques électriques. De manière générale, elle peut diminuer le rendement jusqu'à la moitié.

La dépendance des paramètres de la cellule avec la vitesse de recombinaison sur les deux surfaces varie d'un paramètre à un autre. La densité du courant de court-circuit dépend plus avec de la vitesse de recombinaison de la face avant alors que la tension de circuit ouvert dépend de la vitesse de recombinaison de la face arrière.

La réponse spectrale a permis d'identifier l'effet de chaque surface sur le spectre solaire absorbé. La vitesse de recombinaison de la face avant influe sur les petites longueurs d'onde du spectre solaire tandis que la vitesse de recombinaison de la surface arrière influe sur les longues longueurs d'onde.

**Références chapitre III**

- [1] E. H. Nicollian, "Surface Passivation of Semiconductors", *Journal of Vacuum Science and Technology* 8, S39–S49 (1971).
- [2] L.G. Meiners and H.H. Wieder, "Semiconductor surface passivation", *Materials Science Reports* 3, 139-216 (1988).
- [3] H. Hasegawa, M. Akazawa, A. Domanowska and B. Adamowicz, "Surface passivation of III–V semiconductors for future CMOS devices—Past research, present status and key issues for future", *Applied Surface Science* 256, 5698-5707 (2010).
- [4] A.G Aberle, "Surface passivation of crystalline silicon solar cells: a review", *Progress in Photovoltaics* 8, 473 – 487 (2000)
- [5] J. Schmidt, R. Peibst and R. Brendel, "Surface passivation of crystalline silicon solar cells: Present and future", *Solar Energy Materials and Solar Cells* 187, 39 – 54 (2018)
- [6] A. Cuevas, Y. Wan, D. Yan, C. Samundsett, T. Allen, X. Zhang, J. Cui and J. Bullock, "Carrier population control and surface passivation in solar cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells* 184, 38 – 47 (2018).
- [7] D. T. Rover, P. A. Basore and G. M. Thorson, "Solar Cell Modeling on Personal Computers", *Conf. Rec. of the 18th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.*, pp. 703-709 (1985).
- [8] S. Selberherr, *Analysis and Simulation of Semiconductor Devices* (Springer, 1984).
- [9] J. Nelson, *The Physics of Solar Cells* (Imperial College, 2003).
- [10] H. Haug, J. Greulich, A. Kimmerle, and E.S. Marstein, "PC1Dmod 6.1 - state-of-the-art models in a well-known interface for improved simulation of Si solar cells," *Solar Energy Materials and Solar Cells* 142, 47-53, (2015).
- [11] P.A. Basore, "Essential Elements in the Numerical Modeling of Solar Cells," 4th Photovoltaic Science and Engineering Conf., (1989).
- [12] M.B. Grossman and M.J. Hargrove, "Numerical Solution of the Semiconductor Transport Equations with Current Boundary Conditions," *IEEE Trans. on Electron Devices* ED-30, 1092-1096 (1983).
- [13] K. Ali, H.M. Khan, M.Anmol, I.A. Ahmed, W.A. Farooq, B.A. Al-asbahi, S.M. Qaid and H.M. Ghaithan, "Effect of surface recombination velocity (SRV) on the efficiency of silicon solar cell, *Journal of optoelectronics and advanced materials* 22, 251 – 255 (2020)
- [14] S. Nacer and A. Aissat, "Simulation and optimization of current matching double-junction InGaN/Si solar cells", *Applied physics A* 122, 138(1-10) (2016)

- [15] C. Jin, I. Martín, P.R. Ortega, E. Calle and R. Alcubilla, "3D Simulations of Interdigitated Back-Contacted Crystalline Silicon Solar Cells on Thin Substrates", *Solar Energy* 167, 242 – 250 (2018).
- [16] M.S. Ahmed, S.M. Ahmed and M. Subhyaljader, "Study the role of effective parameters in enhancement of the silicon solar cell performance using PC1D simulation", *Journal of Ovonic Research* 16, 97 – 106 (2020)
- [17] V. Budhraja, N.M. Ravindra, D. Misra, "Simulation of Device Parameters of High Efficiency Multicrystalline Silicon Solar Cells" *Emerging Materials research* 1, 25–32 (2011)
- [18] H. Mackle, "Capturing the spectra of solar cells", PhD thesis, The Australian National University (2004)
- [19] G. Sahin and G. Kerimli, "Effect of depth base along the vertical on the electrical parameters of a vertical parallel silicon solar cell in open and short circuit", *Results in Physics* 8, 257 – 261 (2018)
- [20] A.V. Sachenko, V.P. Kostilyov, A.V. Bobyl, et al. "The effect of base thickness on photoconversion efficiency in textured silicon based solar cells", *Technical Physics Letters* 44, 873–876 (2018)
- [21] S. Bhattacharya. S. John, "Beyond 30% Conversion Efficiency in Silicon Solar Cells: A Numerical Demonstration" *Sci. Rep.* 9, 12482 (2019)

### Conclusion générale

Dans ce mémoire, on a étudié les caractéristiques électriques de la cellule solaire photovoltaïque à jonction pn par le logiciel PC1D.

Le rendement de conversion d'une cellule solaire dépend de plusieurs facteurs physiques tel que, les propriétés intrinsèques du matériau utilisé pour la fabriquer et le procédé de sa fabrication. En raison des coûts élevés de l'expérimentation, les chercheurs se penchent de plus en plus vers l'outil de simulation numérique comme un moyen complémentaire essentiel dans la prédiction.

Le logiciel PC1D compte parmi les outils de simulation les plus simples dans l'étude des dispositifs électroniques et optoélectroniques.

Dans cette étude, on a étudié par une simulation numérique les propriétés électriques d'une cellule solaire conventionnelle de type Si(N+)/Si(P) en utilisant le logiciel PC1D. D'où nous avons essayé de montrer l'influence de la vitesse de recombinaison de la face avant et de la face arrière sur ces paramètres.

D'après les résultats obtenus, nous avons constaté une dégradation générale dans les caractéristiques électriques de la cellule avec l'augmentation de la vitesse de recombinaison, notamment dans le courant de court-circuit ( $I_{sc}$ ), la tension du circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) le facteur de forme FF, la puissance maximale délivrée par la cellule  $P_{max}$  et le rendement de conversion photovoltaïque  $\eta$ .

Dans une seconde partie, nous nous sommes intéressés à l'épaisseur de l'émetteur et la base pour étudier l'influence de celles-ci sur le rendement. Le rendement de la cellule diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur et il augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la base.

## Résumé

Ce travail présente une simulation numérique à travers laquelle on a étudié l'influence de la vitesse de recombinaison surfacique d'une cellule solaire sur ses principaux paramètres électriques.

Les résultats montrent que l'augmentation de la vitesse de recombinaison surfacique dégrade des paramètres électriques de la cellule.

La densité du courant de court-circuit varie plus avec la variation la vitesse de recombinaison de la face avant alors que la tension de circuit ouvert varie plus avec la variation la vitesse de recombinaison de la face arrière. La puissance délivrée par la cellule diminue avec l'augmentation de la vitesse de recombinaison.

Les résultats de réponse spectrale montrent que la vitesse de recombinaison de la face avant influe sur les petites longueurs d'onde du spectre solaire tandis que la vitesse de recombinaison de la surface arrière influe sur les longues longueurs d'onde.

## Abstract

This work presents a numerical simulation on the influence of the surface recombination velocity of a solar cell on its principal electrical parameters.

The results show a degradation of the electrical parameters of the cell with the increasing of the surface recombination velocity.

The short-circuit current density varies more with the variation of the recombination velocity of the front face whereas the open circuit voltage varies more with the variation of the recombination velocity of the rear face. The power delivered by the cell decreases with increasing recombination rate.

The results of spectral response show that the front surface recombination velocity influences the short wavelengths of the solar spectrum whereas, the back surface recombination velocity influences the long wavelengths.