

*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique*  
*Université Ibn Khaldoun – Tiaret*



*Faculté des Sciences de la Matière*  
*Département de Physique*

## **Mémoire**

*Présenté par :*

**Mr. CHAMEKHI Imad eddine**

*Pour obtenir le diplôme de*

## **Master**

**Filière : Physique**

**Spécialité: Nano physique**

**Thème :**

**Comparaison par Simulation Numérique entre une Cellule  
Solaire à Base du Silicium Cristallin de type P en Couches  
Minces et une Cellule solaire à Base du Silicium Cristallin de  
type N en Couches Minces**

**Soutenu le : 25 juin 2018**

**Devant le jury :**

|                             |             |                     |
|-----------------------------|-------------|---------------------|
| <b>Mr. Yanallah Khalifa</b> | <b>Prof</b> | <b>président</b>    |
| <b>Mr. Djakhdane Khaled</b> | <b>MCB</b>  | <b>Examineur</b>    |
| <b>Mr. DEHBI Abdelkader</b> | <b>Prof</b> | <b>Encadreur</b>    |
| <b>Mr. YESREF Djamel</b>    | <b>MAA</b>  | <b>Co-Encadreur</b> |

**PROMOTION 2017/2018**

# *Dédicace*

*Grâce et louange à " Dieu " le Tout-Puissant pour m'avoir donné le courage, la volonté et la force qui m'a éclairé le bon chemin.*

*Je dédie ce travail à :  
Très chers personnes dans ma vie "mes parents" pour tout les efforts et sacrifié qu'ils ont faits pour moi. Je les porterais toujours dans mon Cœur.*

*Tous mes enseignants.*

*Toute ma famille surtout, mon frère Abd ellrahman et mes sœurs Houda, Anfal et Hadjer.*

*A toutes mes amies.*

*A tous ceux et celles qui nous ont aidé et encourage pour tous les bons moments passés ensemble qui nous ont rendu ce mémoire.*

# Remerciements

*Ce travail a été réalisé dans laboratoire de génie physique, département de physique, faculté des sciences de la matière, université ibn Khaldoun- Tiaret.*

*Tous d'abord, Je remercie **ALLAH** le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail et la chance d'étudier et de suivre le chemin de la science et notre grand salut sur notre prophète **MOHAMMED** que le salut soit sur lui.*

*Je tiens à remercier mon directeur de mémoire, monsieur **DEHBI Abdelkader**, Professeur à l'Université Ibn Khaldoun-Tiaret- pour sa patience et ces précieux conseils et ses encouragements apportés dans mes démarches et pour m'avoir fait bénéficier de ces compétences scientifiques, ses qualités humaines et sa constante disponibilité.*

*Il m'est agréable d'exprimer ma profonde reconnaissance à monsieur **YESREF Djamel** enseignant à l'Université Ibn Khaldoun- Tiaret, pour son aide et pour ses encouragements de son expérience dans l'orientation et la direction de ce travail.*

*J'exprime mes sincères remerciements à monsieur **K. yannallah**, professeur à l'Université Ibn Khaldoun- Tiaret, qui m'a fait l'honneur de présider le Jury de ce mémoire.*

*Je remercie sincèrement monsieur **DJAKHDANE KHALED MCB** à l'Université Ibn Khaldoun- Tiaret, de m'avoir fait l'honneur d'être membre du jury de ce travail.*

*Mes sincères remerciements sont adressés à mes parents.*

*Enfin, j'adresse mes vives reconnaissances à tous les membres de laboratoire de génie physique. Aussi j'adresse mes reconnaissances à tous les enseignants de département de physique, sans oublier mes collègues avec qui je passe mon parcours d'étude dans la spécialité Nanophysique*



# Sommaire

---

## Sommaire

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Listes des symboles                                                         |    |
| Liste des figures                                                           |    |
| Liste des tableaux                                                          |    |
| Introduction générale.....                                                  | 1  |
| Référence.....                                                              | 4  |
| <b>Généralité sur les cellules photovoltaïque et l'énergie renouvelable</b> |    |
| I.1.Introduction.....                                                       | 5  |
| I.2.Les 5 familles d'énergies renouvelables .....                           | 5  |
| I.2.1.L'énergie solaire .....                                               | 5  |
| I.2.2.L'énergie éolienne .....                                              | 6  |
| I.2.3.La géothermie ou l'énergie de la Terre .....                          | 7  |
| I.2.4.L'énergie des océans.....                                             | 7  |
| I.2.5.L'énergie tirée de la biomasse ou bioénergie .....                    | 8  |
| I.3. Le photovoltaïque .....                                                | 9  |
| I.3.1. Notions préliminaires sur le rayonnement solaire.....                | 9  |
| I.3.2.Définition du photovoltaïque .....                                    | 11 |
| I.3.3.Historique.....                                                       | 12 |
| I.3.4.Effet photovoltaïque.....                                             | 13 |
| I.3.5. Le photovoltaïque dans le monde .....                                | 14 |
| I.3.6. Potentiel d'énergie solaire en Algérie .....                         | 15 |
| I.3.7.Les zones énergétiques Algériennes .....                              | 16 |
| I.4.Les semi-conducteurs.....                                               | 16 |
| I.4.1.Définition .....                                                      | 16 |
| I.4.2.Conduction par électron et par trou.....                              | 17 |
| I.4.3. Semi-conducteurs dopés ou extrinsèques.....                          | 17 |
| A) Dopage de type N.....                                                    | 18 |
| B) Dopage de type P.....                                                    | 18 |
| Les 3 méthodes de dopages .....                                             | 19 |
| I.4.4. Bandes d'énergie des semi-conducteurs dopés .....                    | 19 |
| I.4.5. La jonction P-N .....                                                | 20 |

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| A) Jonction non polarisée .....                                          | 20 |
| B) Jonction P-N polarisée en inverse .....                               | 20 |
| C) Jonction P-N polarisée en direct .....                                | 21 |
| I.4.6. Le silicium .....                                                 | 22 |
| I.4.6.1. Silicium monocristallin .....                                   | 23 |
| I.4.6.2. Silicium polycristallin (multicristallin) .....                 | 23 |
| I.4.6.3. Silicium amorphe .....                                          | 24 |
| I.4.6.4. Fabrication des cellules photovoltaïques .....                  | 25 |
| Extraction du silicium à partir de la silice .....                       | 25 |
| A) Purification du silicium .....                                        | 27 |
| B) Obtention des lingots de silicium .....                               | 27 |
| C) Obtention des wafers photovoltaïques .....                            | 28 |
| I.5. Les cellules photovoltaïques .....                                  | 28 |
| I.5.1. Aperçu des cellules photovoltaïques .....                         | 28 |
| I.5.2. Les différents types de cellules photovoltaïques .....            | 29 |
| Les cellules monocristallines .....                                      | 29 |
| Les cellules polycristallines .....                                      | 30 |
| Les cellules amorphes .....                                              | 31 |
| Les cellules en couches minces .....                                     | 31 |
| Les cellules en polymère .....                                           | 32 |
| I.5.3. Structure des cellules photovoltaïques .....                      | 32 |
| I.5.3.1. Le silicium comme matériau de base pour le photovoltaïque ..... | 32 |
| I.5.3.2. Les constituants de base d'une cellule photovoltaïque .....     | 33 |
| A) Passivation des faces avant et arrière .....                          | 34 |
| B) Couche antireflet .....                                               | 34 |
| C) Texturation de la surface .....                                       | 34 |
| D) Contacts face avant et arrière .....                                  | 35 |
| E) BSF .....                                                             | 35 |
| I.6. Conclusion .....                                                    | 35 |
| Référence .....                                                          | 36 |

**La Conversion Photovoltaïque**

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| II.1. Introduction .....                                                               | 37 |
| II.2.Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque .....                     | 37 |
| II.2.1.L'interaction photon/semi-conducteur .....                                      | 37 |
| II.2.2.La cellule photovoltaïque .....                                                 | 40 |
| II.2.2.1.Définition .....                                                              | 40 |
| II.2.2.2. Fonctionnement de la cellule photovoltaïque .....                            | 40 |
| II.2.2.3.Schéma électrique équivalent .....                                            | 42 |
| II.2.2.4.Caractéristiques électriques et paramètres de la cellule photovoltaïque ..... | 43 |
| A) Facteur de forme FF .....                                                           | 44 |
| B) Rendement de conversion d'énergie $\eta$ .....                                      | 44 |
| II.4. Rendement quantique et réponse spectrale .....                                   | 45 |
| II.5. Définition d'une couche mince .....                                              | 46 |
| II.6 Principaux domaine d'application des couches minces .....                         | 47 |
| II.7 Propriétés spéciales des couches minces .....                                     | 47 |
| II.8 Techniques de dépôt des couches minces .....                                      | 48 |
| II.9 .Conclusion .....                                                                 | 49 |
| Référence .....                                                                        | 50 |

**Résultats et discussion**

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| III.1 Introduction .....                                                             | 51 |
| III.2 Description du logiciel PC1D .....                                             | 51 |
| III.2.1 Aperçu du logiciel .....                                                     | 51 |
| III.2.2 L'environnement de PC1D .....                                                | 51 |
| III.2.3 Les paramètres du dispositif (Devise) .....                                  | 52 |
| III.2.4 Les paramètre des régions ..                                                 | 53 |
| III.3 Le fonctionnement du logiciel PC1D .....                                       | 53 |
| III.4 Structure à simuler .....                                                      | 54 |
| III.5 Cellule solaire p-n .....                                                      | 54 |
| III.5-1 paramètres de la structure (p-n) simulée .....                               | 55 |
| III.6-Influence de l'émetteur sur le rendement des cellules solaires utilisées ..... | 56 |
| III.6.1 Effet de l'épaisseur .....                                                   | 56 |
| III.6-2 Effet du dopage ( $N_d$ ) de l'émetteur .....                                | 58 |

## *Sommaire*

---

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| III.7 Influence de la base (collecteur) sur le rendement des cellules solaires utilisées .....  | 59 |
| III.7.1 Effet de l'épaisseur .....                                                              | 60 |
| III.7.2 Effet du dopage ( $N_a$ ) de la base .....                                              | 61 |
| III.8 Effet de la durée de vie des porteurs minoritaires .....                                  | 63 |
| III.9 Influence de la couche de passivation .....                                               | 64 |
| III.9.1 Effet de la variation (SF).....                                                         | 64 |
| III.9.2 Effet de la variation (SR) .....                                                        | 66 |
| III.10 Cellule solaire n-p .....                                                                | 67 |
| III.11 paramètres de la structure (n-p) simulée .....                                           | 67 |
| III.12-Influence de l'émetteur sur le rendement des cellules solaires utilisées .....           | 68 |
| III.12.1 Effet de l'épaisseur .....                                                             | 68 |
| III.12.2 Effet du dopage ( $N_a$ ) de l'émetteur .....                                          | 69 |
| III.13 Influence de la base (collecteur) sur le rendement des cellules solaires utilisées ..... | 70 |
| III.13.1 Effet de l'épaisseur .....                                                             | 71 |
| III.13.2 Effet du dopage ( $N_a$ ) de la base.....                                              | 72 |
| III.14 Effet de la durée de vie des porteurs minoritaires .....                                 | 73 |
| III.15 Influence de la couche de passivation .....                                              | 74 |
| III.15.1 Effet de la variation (SF) .....                                                       | 75 |
| III.15.2 Effet de la variation (SR).....                                                        | 76 |
| III.16 Comparaison entre les deux cellules optimales .....                                      | 77 |
| III.17 Conclusion .....                                                                         | 78 |
| Référence .....                                                                                 | 50 |
| Conclusion générale .....                                                                       | 80 |

## Liste des symboles

---

## LISTE DES SYMBOLES

| <i>Symbole</i> | <i>Description</i>                                   |
|----------------|------------------------------------------------------|
| $I_{ph}$       | le photo-courant                                     |
| $R_s$          | La résistance série                                  |
| $R_p$          | La résistance parallèle                              |
| $I_s$          | Courant de saturation                                |
| $I(V)$         | La caractéristique courant- tension                  |
| $I$            | Le courant électrique                                |
| $V$            | La tension électrique                                |
| $\lambda$      | Longueur d'onde                                      |
| $AM_x$         | Air mass                                             |
| $H$            | L'hauteur du Soleil                                  |
| $P$            | La zone p de la jonction                             |
| $N$            | La zone n de la jonction                             |
| $C_{ar}$       | Couche anti-réfléchissante                           |
| $I_{obs}$      | Courant d'obscurité                                  |
| $V_{th}$       | Le potentiel thermique                               |
| $K$            | La constante de Boltzmann                            |
| $T$            | La température absolue                               |
| $Q$            | La charge électrique d'un électron en valeur absolue |
| $I_d$          | Courant de la diode                                  |
| $V_j$          | La tension aux bornes de la jonction p-n             |
| $I_{cc}$       | Courant de court circuit                             |
| $V_{co}$       | Tension de circuit ouvert                            |
| $P_m$          | Puissance maximale                                   |
| $I_m$          | Curant du point du fonctionnement                    |
| $V_m$          | Tension du point du fonctionnement                   |

|           |                                                             |
|-----------|-------------------------------------------------------------|
| FF        | Le facteur de forme                                         |
| $\eta$    | Le rendement                                                |
| S         | La surface de la cellule                                    |
| E         | L'éclairement                                               |
| $\alpha$  | Coefficient de variation relative du $I_{cc}$               |
| $E_g$     | Energie du gap                                              |
| $\Omega$  | Ohm                                                         |
| ZCE       | Zone de charge d'espace                                     |
| $\vec{E}$ | Le champ électrique                                         |
| $E_c$     | Le niveau énergétique le plus bas de la bande de conduction |
| $E_v$     | Le niveau énergétique le plus haut de la bande de valence   |
| $E_F$     | Le niveau de Fermi                                          |
| $L_n$     | Longueur de diffusion des électrons                         |
| $L_p$     | Longueur de diffusion des trous                             |
| $\nu$     | Fréquence du rayonnement                                    |
| P         | La puissance électrique                                     |
| C         | La vitesse de la lumière dans le vide                       |
| SF        | vitesse de recombinaison en surface face avant              |
| SR        | vitesse de recombinaison en surface face arrière            |

## Liste des figures

---

**Figure I.1 :** Les panneaux solaires.

**Figure I.2 :** Les éoliennes ou aérogénérateurs.

**Figure I.3:** La géothermie.

**Figure I.4:** L'énergie des océans.

**Figure I.5 :** L'énergie tirée de la biomasse.

**Figure I.6 :** Représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5.

**Figure I.7 :** Panneaux solaires.

**Figure I.8 :** Effet photovoltaïque.

**Figure I.9 :** Dopage de type N.

**Figure I.10 :** Dopage de type P.

**Figure I.11 :** Bande d'énergie du semi-conducteur dopé de type N.

**Figure I.12 :** Bande d'énergie du semi-conducteur dopé de type P.

**Figure I.13 :** Jonction P-N polarisée en inverse.

**Figure I.14 :** Jonction P-N polarisée en direct.

**Figure I.15 :** Structure de bande du Silicium

**Figure I.16 :** Le silicium monocristallin.

**Figure I.17 :** Le silicium poly-cristallin.

**Figure I.18 :** La silice : matière première d'une cellule photovoltaïque.

**Figure I.19 :** Extraction du silicium.

**Figure I.20 :** Purification du silicium.

**Figure I.21 :** Les lingots de silicium.

**Figure I.22:** Cellule photovoltaïque.

**Figure I.23:** Cellules Photovoltaïques Monocristallines.

**Figure I.24:** Photovoltaïques Polycristallines.

**Figure I.25:** Cellules Photovoltaïques Amorphes

**Figure I.26:** Utilisation des matériaux photovoltaïques en 2003

**Figure I.27 :** Composition d'une cellule photovoltaïque.

**Figure II.1 :** Transitions inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur. Le cas a) correspond à un semi-conducteur à gap direct, le cas b) à un gap indirect.

**Figure II.2 :** Coefficient d'absorption du silicium et profondeur de pénétration des photons en fonction de la longueur d'onde.

**Figure II.3 :** Structure de base d'une cellule solaire.

**Figure II.4:** Structure (a) et diagramme de bande (b) d'une cellule photovoltaïque.

**Figure II.5 :** Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.

**Figure II.6:** (a) Caractéristiques courant-tension de la cellule photovoltaïque sous éclairage et sous obscurité et (b) représentation conventionnelle de la courbe I(V).

**Figure II.7 :** Rendement quantique externe d'une cellule photovoltaïque.

**Figure II.8 :** couche mince et substrat.

**Figure II.9 :** Classification des procédés de dépôt de couches minces.

**Figure III.1 :** Fenêtre du logiciel PC1D utilisé en simulation numérique.

**Figure III.2 :** structure et paramètre de la 1<sup>ère</sup> cellule p-n de référence.

**Figure III.3:** Variation du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur de l'émetteur.

**Figure III.4 :** Variation du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de dopage de l'émetteur.

**Figure III.5 :** Variation du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur de la base.

**Figure III.6:** Variation du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de dopage de la base.

**Figure III.7 :** Variation du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de la durée de vie.

**Figure III.8 :** Variation du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de la vitesse de recombinaison face avant.

**Figure III.9:** Variation du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de la vitesse de recombinaison face arrière.

**Figure III.10 :** structure et paramètre de la 2<sup>ème</sup> cellule p-n de référence.

**Figure III.11 :** Variation du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur de l'émetteur.

**Figure III.12 :** Variation du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction du dopage de l'émetteur.

**Figure III.13:** Variation du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur de la base.

**Figure III.14 :** Variation du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction du dopage de la base.

**Figure III.15 :** Variation du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction la durée de vie.

**Figure III.16 :** Variation du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de la vitesse de recombinaison face avant.

**Figure III.17:** Variation du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de la vitesse de recombinaison face arrière.

## Liste des tableaux

---

**Tableau I.1:** Ensoleillement reçu annuellement en Algérie par région climatique.

**Tableau I.2:** Potentiel d'énergie solaire en Algérie.

**Tableau I.3 :** AVERAGE journal du somme des irradiations directes normales pendant le moi Juin.

**Tableau III.1 :** les paramètres de la cellules (p-n) de référence.

**Tableau III.2:** paramètres des variables pendant la simulation.

**Tableau III.3 :** les paramètres de la cellule (n-p) de référence.

**Tableau III.4 :** comparaison entre les deux cellules p et n.

# Introduction Générale

---

## Introduction Général :

En raison du développement de l'industrie, du transport et des moyens de communication, une croissance de la consommation mondiale d'électricité a été observée pendant les dernières décennies. Cependant, la plupart de l'énergie par combustion de ressources non renouvelables (carbone, pétrole, gaz, nucléaire) dont le délai d'épuisement est estimé à quelques décennies.

De plus, ce type de production d'énergie est très polluant. Le développement des sources d'énergies renouvelables et non polluantes est donc d'actualité. Parmi les sources d'énergies renouvelables, on compte le vent, les flux marins et océaniques, la géothermie, le solaire (cellules photovoltaïques), etc.... Ce dernier est une source d'énergie très puissante. En effet, la puissance du rayonnement solaire au niveau du sol est d'environ 950 Watt/m<sup>2</sup>[1]. La quantité totale d'énergie solaire reçue au niveau du sol pendant une semaine dépasse l'énergie produite par les réserves mondiales de pétrole, de gaz et d'uranium. Mais dans la plupart des cas, une conversion (transformation) de l'énergie du rayonnement solaire en électricité est nécessaire.[2]

L'électricité photovoltaïque est obtenue par la transformation directe de la lumière du soleil en électricité, au moyen de cellules photovoltaïques. La production d'électricité photovoltaïque connaît une croissance importante depuis les années 1990 dépasser les 3500 MWc en 2010[1] (figure 1).

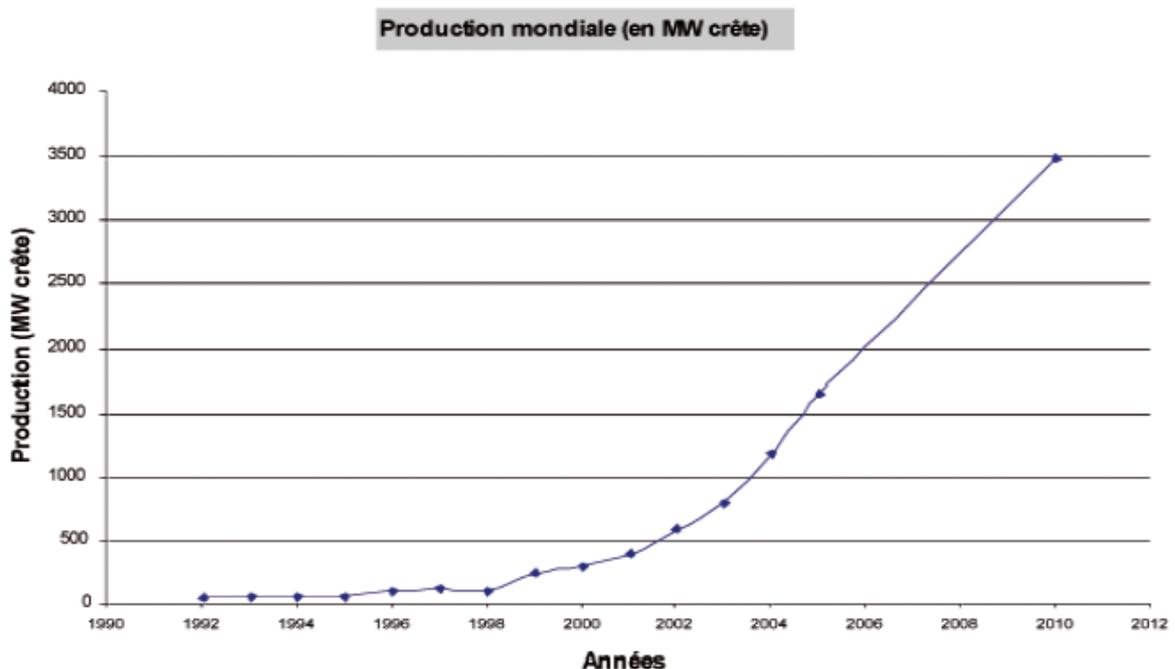


Figure1:Evolution de la production mondiale de cellules photovoltaïques(en MWc) [1].

## INTRODUCTION GENERAL

---

Les projections les plus courantes prévoient un marché annuel de l'ordre de 4 GWc pour l'année 2012, et entre 9 et 21 GWc pour 2020. Pour faire face à cette croissance, la recherche dans le domaine s'oriente sur deux axes essentiels, qui peuvent sembler opposés : augmenter le rendement des cellules, tout en diminuant les coûts de production.

Le matériau le plus commercialisé dans l'industrie photovoltaïque est le silicium cristallin (abondant, facile à processeur, non toxique). Cependant, dans le coût du module, le prix du matériau intervient pour environ 50% et de nombreuses études visent donc à réduire les coûts relatifs à la préparation des substrats [3]. Parmi celles-ci, notons la récupération du silicium de type N. En effet, un lingot de silicium après sa croissance, il contient également une proportion importante sous forme de silicium de type N. Cette proportion n'est pas exploitée car le silicium de type N nécessite une diffusion bore pour former la jonction, étape du processus très énergivore (~950°C). Devant les prix élevés du silicium de type P, l'exploitation du silicium de type N est de plus en plus recommandée car son prix est nettement plus faible. Ceci nécessite de nombreux travaux de recherche afin de lever les difficultés actuelles sur la filière du silicium de type N. Dans ce cadre, nous avons inscrit notre sujet.

L'objectif de ce travail est la comparaison par simulation numérique entre une cellule solaire **n-p** et une cellule solaire **p-n** en silicium cristallin.

Nous avons utilisé le logiciel de simulation PC1D pour simuler les caractéristique courant tension(I-V) et calculer le rendement dans les conditions standards d'une cellule solaire **n-p** et **p-n**.

Ce mémoire se compose de quatre chapitres :

- dans le premier chapitre, nous décrivons quelques notions sur le photovoltaïque, et on présente un petit rappel sur les semi-conducteurs intrinsèques et extrinsèques, et enfin on termine ce chapitre par le fonctionnement et la structure des cellules photovoltaïques, les constituants des cellules PV et leurs rendement quantiques.
- dans le second chapitre nous utilisons le matériau silicium pour fabriquer les cellules PV et nous décrivons les étapes d'extraction du silicium et de se connaître les différents types de cellule PV, et nous avons présenté une étude sur les couches minces et leurs propriétés et les techniques des dépôts des couches mince.
- Le troisième chapitre concerne les différentes étapes du logiciel PC1D utilisé en simulation numérique et aussi il consacrée à l'étude simulatrice des cellules n-p et

## INTRODUCTION GENERAL

---

p-n à base de silicium cristallin et l'influence des différents paramètres sur les performances des cellules est présenté et discuté pour chaque paramètre.

### **Référence :**

[1] OBSERV'ER. Baromètre du Solaire Photovoltaïque, Systèmes Solaires, Avril 2004, N° 160, pp.69-83.

[2] S. Berger. Croissance de silicium monocristallin en couche mince par épitaxie en phase liquide sur couches sacrificielles pour report sur substrat faible coût pour applications photovoltaïques. Thèse EEA. Lyon : INSA de Lyon, 2003, 122 p.

[3] OLEKSIY NICHIPORUK. Thèse en physique : Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités, INSA de Lyon, 2005  
page14

---

# CHAPITRE I

---

## Résumé :

*Dans ce chapitre, nous avons effectué une étude bibliographique sur les cellules solaires et l'énergies renouvelables surtout l'énergie photovoltaïque.*

*. Dans un premier temps, une explication détaillée sur les 5 familles d'énergies renouvelables et surtout l'énergie solaire et son application dans le domaine photovoltaïque.*

*. Puis dans un deuxième temps, nous avons également cité quelques notion sur les semi conducteur et technique d'élaboration le matériau de base et les types des cellules solaire.*

*Nous exposerons à la suite la conversion photovoltaïque et le principe de fonctionnement.*

### **I.1. Introduction :**

Ce chapitre présente les bases indispensables à la compréhension du sujet. Nous aborderons ainsi en premier lieu quelques notions sur les énergies renouvelables et surtout la source d'énergie que représentent le soleil (l'énergie solaire), et son application dans le domaine photovoltaïque. Nous décrirons ensuite le fonctionnement des cellules photovoltaïques et ses différents types, leurs caractéristiques principales, le rendement quantique et réponse spectrale des cellules photovoltaïques.

### **I.2. Les 5 familles d'énergies renouvelables :**

L'énergie renouvelable fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des végétaux, les énergies renouvelables n'engendrent pas ou peu de déchets ou d'émissions polluantes. Elles participent à la lutte contre l'effet de serre et les rejets de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère, facilitent la gestion raisonnée des ressources locales, génèrent des emplois. Le solaire (solaire photovoltaïque, solaire thermique), l'hydroélectricité, l'éolien, la biomasse, la géothermie sont des énergies flux inépuisables par rapport aux « énergies stock » tirées des gisements de combustibles fossiles en voie de raréfaction : pétrole, charbon, lignite, gaz naturel. L'énergie renouvelable est séparée en cinq familles lesquelles :

#### **I.2.1. L'énergie solaire :**

Le soleil, bien que distant de plus de 150 millions de kilomètres de nous, demeure notre plus grande source d'énergie même si elle est intermittente avec l'alternance jour / nuit.

L'énergie fournie par le soleil est plus de 11 000 fois supérieure à la demande énergétique de toute la population mondiale : ce qui, théoriquement, en fait une énergie largement suffisante pour couvrir tous nos besoins. L'énergie solaire, peut être convertie en luminosité dans l'habitat mais aussi en chaleur ou en électricité. A ce titre, l'énergie solaire permet de s'orienter vers l'autonomie énergétique à l'échelle de l'habitat voire du quartier [1].



**Figure I.1.**Les panneaux solaires.

### **I.2.2.L'énergie éolienne :**

Les éoliennes ou aérogénérateurs sont destinés à exploiter la force du vent pour produire de l'énergie, elles sont directement issues des anciens moulins à vent. Une éolienne se compose de pales (3 en général) portées par un rotor et installées au sommet d'un mât vertical.

Cet ensemble est fixé sur une nacelle qui abrite un générateur. Un moteur électrique permet d'orienter la nacelle afin que le rotor soit toujours face au vent. Le vent fait tourner les pales entre 10 et 25 tours par minute. Les éoliennes fonctionnent pour des vitesses de vent généralement comprises entre 14 et 90 km / h. Au-delà, elles sont progressivement arrêtées pour sécuriser les équipements et minimiser leur usure. Le générateur transforme l'énergie mécanique, par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesses, en énergie électrique directement injectée dans le réseau électrique.



**Figure I.2:**Les éoliennes ou aérogénérateurs[1].

### I.2.3. La géothermie ou l'énergie de la Terre :

L'essentiel de la chaleur dégagée par la Terre provient de la radioactivité. C'est l'énergie nucléaire produite par la désintégration de l'uranium, du thorium et du potassium. Ce flux géothermique est si faible à la surface du globe qu'il ne peut être directement capté. En fait, on exploite la chaleur accumulée, stockée dans certaines parties du sous-sol via des nappes d'eau. Cette eau est alors captée au moyen de forages. On véhicule ainsi la chaleur emmagasinée vers la surface. Le flux géothermique est particulièrement intense sur toute la côte ouest de l'Amérique, sur la côte est de l'Asie, ainsi que sur la "ceinture de feu" qui borde l'océan pacifique[1].

Les caractéristiques du fluide géothermique extrait (température, composition) dépendent de celles de la formation géologique. Il en résulte une multiplicité de techniques et de modes de valorisation. C'est pourquoi on distingue plusieurs types de géothermie et deux filières en fonction des technologies utilisées et de leurs applications.



**Figure I.3 :** La géothermie.

### I.2.4. L'énergie des océans :

L'énergie marine provient de l'énergie potentielle, cinétique, thermique et chimique de l'eau de mer, qui peut servir à produire de l'électricité, de l'énergie thermique ou de l'eau potable. Des technologies très diverses peuvent être employées, comme les centrales marémotrices, les turbines sous-marines exploitant les marées et les courants océaniques, les échangeurs de chaleur fondés sur la transformation de l'énergie thermique des océans et divers systèmes qui tirent profit de l'énergie des vagues et des gradients de salinité. L'énergie des océans est potentiellement considérable, mais elle est très dispersée et donc

difficile à collecter et loin des lieux de consommation. La seule qui ait été vraiment captée jusqu'ici est l'énergie des marées mais seulement sur quelques sites.

À l'exception des centrales marémotrices, les technologies océaniques en sont au stade de la démonstration et des projets pilotes, et nombre d'entre elles exigent davantage de recherche-développement. Certaines de ces technologies se caractérisent par une forte variabilité de la production énergétique et des niveaux de prévisibilité (par ex. vagues, amplitude des marées et courants), alors que d'autres sont susceptibles d'être exploitées de façon quasi continue ou même contrôlable (par ex. l'énergie thermique des océans et le gradient de salinité). Près des côtes, l'amplitude des marées entre le niveau de basse mer et le niveau de haute mer peut dépasser dans certains sites 15 m (baie de Fundy au Canada). Et c'est cette énergie potentielle due à cette différence de hauteur qui est captée par les centrales marémotrices. Actuellement, le Royaume-Uni se positionne comme leader des technologies holométriques et marémotrices, c'est le premier pays au monde capable de lancer les premiers projets de production d'énergie marine à l'échelle commerciale [1].



**Figure I.4** :L'énergie des océans.

### **I.2.5.L'énergie tirée de la biomasse ou bioénergie :**

La bioénergie couvre notamment les cultures énergétiques, les résidus issus des forêts, de l'agriculture et de l'élevage, ainsi que les biocarburants dits de deuxième génération. La bioénergie est intégrée de façon complexe dans les systèmes mondiaux de biomasse servant à la production de denrées alimentaires, de fourrage, de fibres et de produits forestiers et dans la gestion de déchets et de résidus. La bioénergie joue un rôle

intime et essentiel dans la vie quotidienne de milliards d'habitants des pays en développement

On appelle également "houille verte" l'énergie en provenance des végétaux. Celle-ci est renouvelable puisque les plantes repoussent pratiquement sans cesse grâce à l'énergie solaire et au processus de photosynthèse :

Anabolisme :  $n [\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}] + \text{énergie} \longrightarrow n (\text{CH}_2\text{On})$

Catabolisme :  $[\text{CH}_2\text{O}]_n + n\text{O}_2 \longrightarrow n[\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}] + \text{dégagement d'énergie}$

On regroupe les termes d'anabolisme et de catabolisme sous le nom de métabolisme.

Ainsi, la photosynthèse absorbe du gaz carbonique, consomme de l'eau et rejette de l'oxygène. L'avantage est que le soleil intermittent est ici stocké dans la masse végétale. Mais c'est une énergie à faible densité énergétique, de plus l'humidité contenue dans la biomasse la réduit d'où un rendement énergétique très faible. Et c'est une grande consommatrice d'espace et d'eau. On distingue deux types de biomasse : la biomasse solide (bois, paille...) et la biomasse à haute efficacité [1].



**Figure I.5 :** L'énergie tirée de la biomasse.

### **I.3. Le photovoltaïque:**

#### **I.3.1. Notions préliminaires sur le rayonnement solaire :**

Le développement, l'optimisation et la caractérisation des cellules photovoltaïques impliquent une certaine connaissance de la source d'énergie utilisée (le soleil). La surface de celui-ci se comporte comme un corps noir à la température d'environ 5800K. Ceci conduit à un pic d'émission situé à une longueur d'onde de  $0,5 \mu\text{m}$  pour une puissance

d'environ 60 MW/m<sup>2</sup>, soit un total de 9,5.1025W [2]. En tenant compte de la surface apparente du soleil et de la distance entre celui-ci et la terre, cela conduit à un éclairage moyen dans l'année de 1,36 kW/m<sup>2</sup> hors atmosphère.

Afin de comparer et d'unifier les performances des cellules photovoltaïques élaborées dans les différents laboratoires du monde, il a été institué la notion d'Air Mass (AM), elle quantifie la quantité de puissance absorbée par l'atmosphère en fonction de l'angle du soleil par rapport au zénith :  $AM = \frac{1}{\cos(\theta)}$  ... (I.1)

Si le soleil est au zénith du lieu d'observation,  $\theta = 0^\circ$ , AM=1 : la notation utilisée est AM1. AM0 correspond à l'irradiante hors atmosphère, et est surtout utilisée pour prédire le comportement des cellules pour applications spatiales. Le spectre standard le plus étudié est AM1.5G, G signifiant global car il tient compte à la fois des radiations directes et diffuses, par opposition à AM1.5D qui ne tient compte que des directes. AM1.5G donne une irradiante de 970 W/m<sup>2</sup>, mais a été arrondi à 1 kW/m<sup>2</sup>.

L'intensité  $I_D$  reçue à la surface de la terre peut être calculée grâce à la Formule empirique suivante [4]:  $I_D = 1,353 \cdot (0,7^{AM})^{0,678}$  .....(I.2)

Avec  $I_D$  en kW/m<sup>2</sup>, pour une surface perpendiculaire aux rayons incidents. Les spectres AM0 et AM1.5 sont représentés sur la figure I.6 :

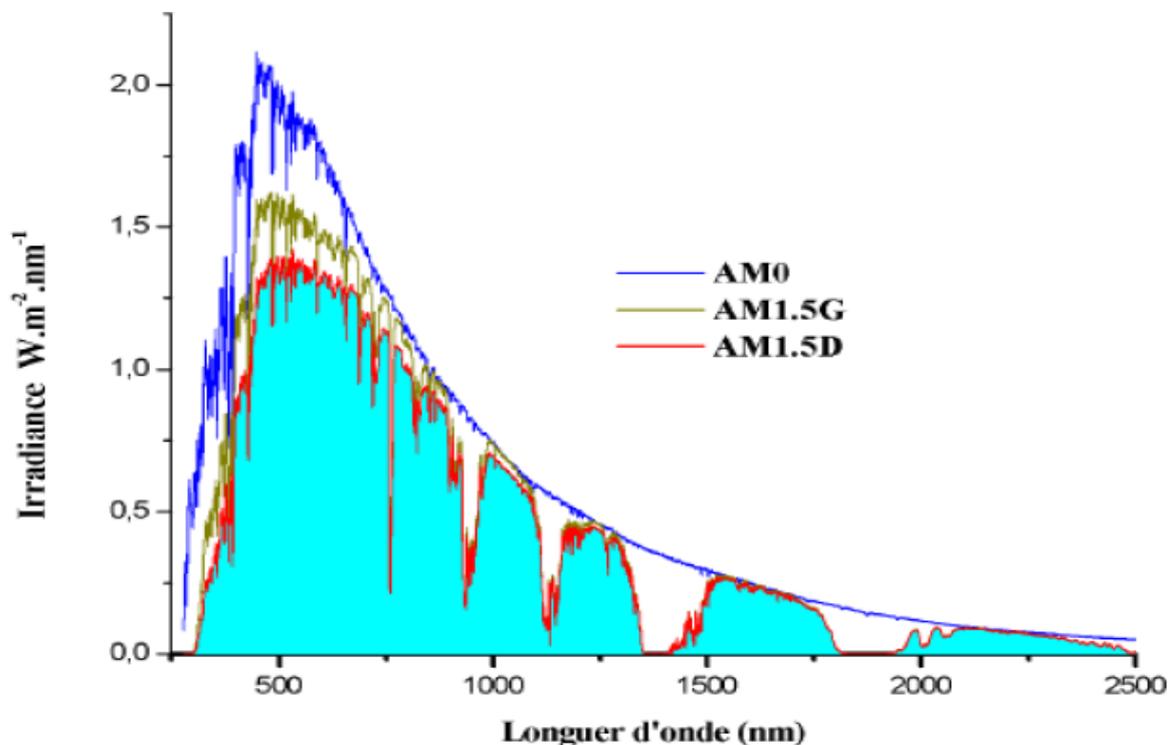


Figure I.6 : Représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5 [2].

Le domaine spectral utile aux cellules en silicium est mis en évidence.

Il apparaît que la partie la plus importante du spectre solaire à la surface de la terre concerne le domaine du visible et du proche infrarouge.

Les irradiances définies par le nombre AM ne tiennent toutefois pas compte de la variété des conditions climatiques, et de l'altitude du lieu. La terre présente ainsi de grandes disparités dans la répartition de la puissance solaire :

Les pays du Maghreb ont un potentiel solaire élevé. Les taux d'irradiation

Solaire effectués par satellites par l'Agence Spatiale Allemande (DLR), montrent des niveaux d'ensoleillement exceptionnels de l'ordre de 1200 kWh/m<sup>2</sup>/an dans le Nord du Grand Sahara.

Par contre, les meilleurs taux d'irradiation solaire en Europe sont de l'ordre de 800 kWh/m<sup>2</sup>/an limités à la partie sud de l'Europe [3].

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit: 169.000 kWh/an pour le solaire thermique, 13,9 kWh/an pour le solaire photovoltaïque et 35 kWh/an pour l'éolien [4]. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est présentée dans le Tableau I.1, selon l'ensoleillement reçu annuellement [5,6].

| Régions                                         | Littoral | Hauts Plateaux | Sahara |
|-------------------------------------------------|----------|----------------|--------|
| Superficie (%)                                  | 4        | 10             | 86     |
| Ensoleillement (h/an)                           | 2650     | 3000           | 3500   |
| Energie moyenne reçue (kWh /m <sup>2</sup> /an) | 1700     | 1900           | 2650   |

Tableau I.1: Ensoleillement reçu annuellement en Algérie par région climatique.

### I.3.2. Définition du photovoltaïque [7]:

Tous les jours, le soleil fournit de l'énergie à la Terre. Les gens peuvent utiliser cette énergie gratuite grâce à une technologie appelée photovoltaïque, qui transforme l'énergie solaire en électricité.

Les modules ou panneaux photovoltaïques sont composés de semi-conducteurs qui permettent de transformer directement la lumière du soleil en électricité.

Ces modules peuvent s'avérer une source d'énergie qui est sûre, fiable, sans entretien

et non polluante pendant très longtemps. La majorité des modules sur le marché aujourd'hui sont pourvus de garanties de plus de 20 ans, et ils fonctionneront bien au-delà de cette période.

Des millions de systèmes ont été installés dans le monde entier, de puissances différentes allant d'une fraction d'un watt à plusieurs mégawatts. Pour de nombreuses applications, les systèmes solaires électriques sont non seulement rentables, mais ils peuvent aussi représenter l'option la moins coûteuse.



**Figure I.7:** Panneaux solaires.

### **I.3.3. Historique :**

En 1839, le physicien français Antoine César Becquerel constata les effets électriques que produisent les rayons solaires dans une pile constituée par des électrodes de platine et de cuivre oxydé plongeant dans une solution électrolytique acide appelé photopile, mais il faudra attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène de la physique.

La transformation directe de l'énergie solaire en énergie électrique, est apparue en 1930 avec les cellules à oxyde cuivreux puis au sélénium, mais ce n'est qu'à partir de 1954, avec la réalisation des premières cellules photoélectriques au silicium dans les laboratoires de la compagnie Bell Téléphone, que l'on entrevoit la possibilité de fournir de l'énergie. Très rapidement utilisées pour l'alimentation des véhicules spatiaux, leur développement et de rapides progrès ont été motivés par la conquête de l'espace. Mais, pour des raisons à la fois

techniques et économiques, cette nouvelle source d'énergie électrique a tardé à s'imposer en dehors du domaine spatial. Cependant, au cours des années 80, la technologie photovoltaïque terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelques mégawatts, et même est devenue familière des consommateurs à travers de nombreux produits de faible puissance y faisant appel : montres, calculatrices, balises radio et météorologiques, pompes et réfrigérateurs solaires.

Début 1980, des maisons équipées en panneaux solaires photovoltaïques et des électrifications rurales sont réalisées. Ces électrifications se développent depuis 1990 et concernent en 2002 plus d'un million de maisons individuelles.

A partir de 1995, des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001 [8].

### I.3.4.Effet photovoltaïque :

Il a été démontré que le rayonnement solaire est constitué de photons transportant chacun une énergie  $E_{ph}$  qui répond, elle même, à la relation suivante:  $E_{ph} = h \frac{c}{\lambda} \dots \dots (I.3)$

Où  $E_{ph}$  : représente la quantité d'énergie

$\lambda$ : la longueur d'onde

$h$  : la constante de Planck ( $6,626068 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg / s}$ )

La lumière du soleil se compose de photons contenant une énergie correspondant aux différentes longueurs d'onde du spectre solaire. Quand un photon heurte une cellule photovoltaïque, son énergie peut être transférée à un électron dans le matériau semi-conducteur de la cellule. Avec cette énergie supplémentaire, l'électron peut alors s'échapper de sa position normale dans l'atome créant un « trou », qui deviendra une partie d'un courant dans un circuit électrique. C'est ce qu'on appelle la paire électron-trou.

Une cellule photovoltaïque est une diode, formée de deux couches de matériaux de semi-conducteur dopées de sorte que l'une conduise les charges négatives et l'autre, les charges positives. Ce phénomène crée un champ électrique permanent dans la cellule.

Grâce à cet effet diode et lorsque la paire électron-trou a été créée, les charges négatives vont être séparées des charges positives. Il se crée donc une différence de potentiel entre les couches N et P de la cellule.

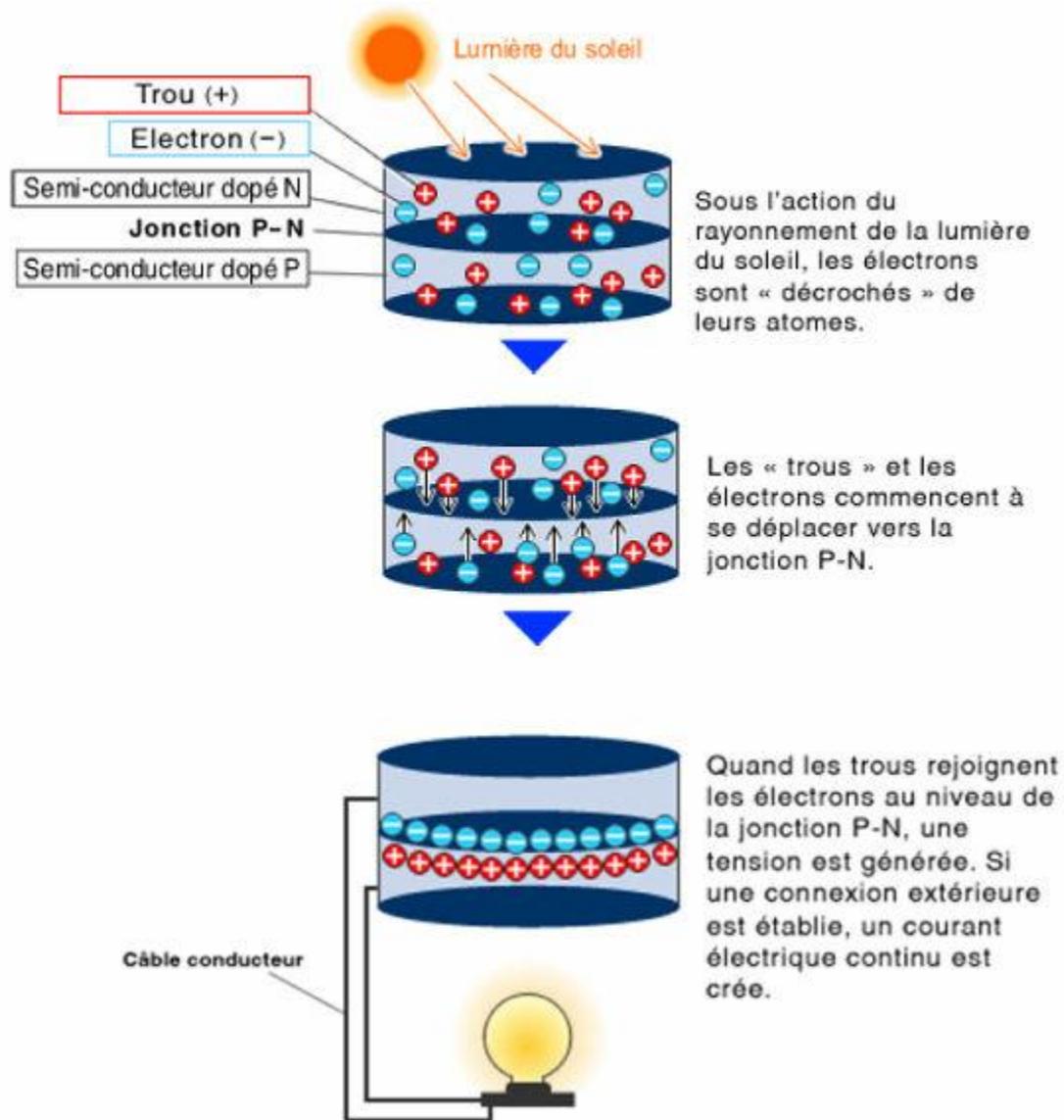


Figure I.8: Effet photovoltaïque [9].

### I.3.5. Le photovoltaïque dans le monde :

Le potentiel de la technologie photovoltaïque est tel que la filière est incontournable pour répondre à la demande mondiale. Au cours de ces dernières années, le marché mondial du photovoltaïque a connu un taux de croissance annuel de 35%.

Les estimations pour les années à venir sont tout aussi optimistes puisque les spécialistes prévoient que la production soit multipliée par 40 d'ici 2020.

Le marché attire donc de plus en plus de pays.

## Chapitre I : Généralité sur les cellules photovoltaïque et l'énergie renouvelable

| Puissance | Location                                    | Description                                         | Construction                                        | Photo                                                                                 |
|-----------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 97 MW     | Canada,<br>Sarnia(Ontario)                  | Sarnia PV<br>power plant<br>GM                      | 2009-2010                                           |    |
| 84.2 MW   | Italy, Montalto di<br>Castro (Lazio)        | Montalto di<br>Castro PV<br>power plant<br>GM       | SunPower Corp.<br>SunRay Renewa<br>ble<br>2009-2010 |    |
| 80.2 MW   | Germany,<br>Finsterwalde                    | Solarpark<br>Finsterwalde<br>I,II,III GM            | Q-Cells<br>International<br>2009-2010               |   |
| 70.6 M W  | Italy, Rovigo                               | Rovigo PV<br>power plant<br>GM                      | 2010                                                |  |
| 60 MW     | Spain, Olmedilla<br>(Castilla-La<br>Mancha) | Parque<br>Fotovoltaico<br>Olmedillade<br>Alarcón GM | 2008                                                |  |
| 54 MW     | Germany,<br>Straßkirchen                    | Solarpark<br>Straßkirchen<br>GM                     | Q-Cells<br>International<br>2009                    |  |

GM - Ground-mounted photovoltaic system . [16]

### I.3.6. Potentiel d'énergie solaire en Algérie :

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700KWh/m<sup>2</sup>/an au Nord et 2263 kWh/m<sup>2</sup>/an au Sud du pays.

| Régions                                        | Régions côtière | Haut plateaux | Sahara |
|------------------------------------------------|-----------------|---------------|--------|
| Superficie                                     | 4               | 10            | 86     |
| Durée moyenne d'enseillement (Heure/an)        | 2650            | 3000          | 3500   |
| Energie moyenne reçue (kWh/m <sup>2</sup> /an) | 1700            | 1900          | 2650   |

**Tableau I.2:** Potentiel d'énergie solaire en Algérie

### I.3.7. Les zones énergétiques Algériennes :

| Région      | Energie globale moyenne  |
|-------------|--------------------------|
| Annaba      | 4.61 KWh/m <sup>2</sup>  |
| Alger       | 5.26 KWh/m <sup>2</sup>  |
| Batna       | 5.97 KWh/m <sup>2</sup>  |
| Ouargla     | 6.35 KWh/m <sup>2</sup>  |
| Ain Salah   | 6.75 KWh/m <sup>2</sup>  |
| Adrar       | 7.10 KWh/m <sup>2</sup>  |
| Tamanrasset | 7.0 0 KWh/m <sup>2</sup> |
| Janet       | 7.44 KWh/m <sup>2</sup>  |

**Tableau I.3:** Average journal du somme des irradiations directes normales pendant le moi Juin.

## I.4. Les semi-conducteurs :

### I.4.1. Définition :

Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charges libres est très faible par rapport aux métaux.

Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction). C'est

l'énergie du "band gap", en électronvolt (eV). Cette valeur seuil est propre à chaque matériau semi-conducteur et va de 1,0 à 1,8 eV pour les applications photovoltaïques. Elle est de 1,1 eV pour le silicium cristallin (c-Si), et 1,7 eV pour le silicium amorphe (a-Si).

Le spectre du rayonnement solaire est la distribution des photons - particules de lumière en fonction de leur énergie (inversement proportionnelle à la longueur d'onde). Le rayonnement arrivant sur la cellule solaire sera en partie réfléchi, une autre partie sera absorbée et le reste passera au travers de l'épaisseur de la cellule.

Les photons absorbés dont l'énergie est supérieure à l'énergie du band gap vont libérer un électron négatif, laissant un "trou" positif derrière lui. Pour séparer cette paire de charges électriques de signes opposés (positive et négative) et recueillir un courant électrique, il faut introduire un champ électrique,  $\vec{E}$ , de part et d'autre de la cellule. La méthode utilisée pour créer ce champ est celle du "dopage" par des impuretés.

### I.4.2. Conduction par électron et par trou :

Si une liaison de valence est brisée (agitation thermique, photon ...) l'électron devient mobile : il laisse un excès de charge positive le « trou » (symbolisé par un + dans un carré). Cette lacune va être comblée par un électron voisin libéré par agitation thermique et qui va à son tour laisser un trou : ceux-ci semblent se déplacer dans le réseau. Aux électrons (masse positive, charge négative) correspondent des trous (masse négative, charge positive). Le déplacement des trous étant un processus à deux étapes, leur mobilité dans le réseau est plus faible que celle des électrons.

Trous et électrons constituent les porteurs libres intrinsèques dont le nombre est fonction de la température. La neutralité électrique du matériau impose que les trous et les électrons soient en nombres identiques ( $n_i$  et  $p_i$ ).

Pour le silicium pur à 300 K, on mesure :  $n_i = p_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ . Ce nombre est très faible si on le compare au nombre des atomes.

Toujours pour le silicium pur à 300 K, les mobilités sont :

$$\mu_n = 12 \cdot 10^6 \text{ m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1} \text{ et } \mu_p = 5 \cdot 10^6 \text{ m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}.$$

La conductivité intrinsèque du matériau  $\sigma = e(n_i \cdot \mu_n + p_i \cdot \mu_p)$  est très faible [10].

### I.4.3. Semi-conducteurs dopés ou extrinsèques :

Dans un matériau pur, on introduit des impuretés par dopage. Pour que celui-ci soit contrôlable, il faut que le degré de pureté initial global soit supérieur au taux du dopage.

Les taux de dopage utilisés sont de l'ordre de  $10^{-8}$  à  $10^{-11}$ . Une mole de silicium (28 g) correspond à  $6,023 \cdot 10^{23}$  atomes et la densité du silicium est voisine de  $7,1 \text{ cm}^3$  de silicium

contient donc environ  $1,5 \cdot 10^{23}$  atomes. Avec un taux de dopage de l'ordre  $10^{-10}$ , il y a environ  $1,5 \cdot 10^{13}$  atomes d'impureté par  $\text{cm}^3$ .

### A) Dopage de type N :

Le dopage de type N consiste à ajouter un atome de phosphore au sein de la structure cristalline du silicium. Le phosphore disposant de 5 électrons sur sa couche électronique externe va s'associer avec 4 atomes de silicium, laissant ainsi libre un électron : Cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale négative [12].

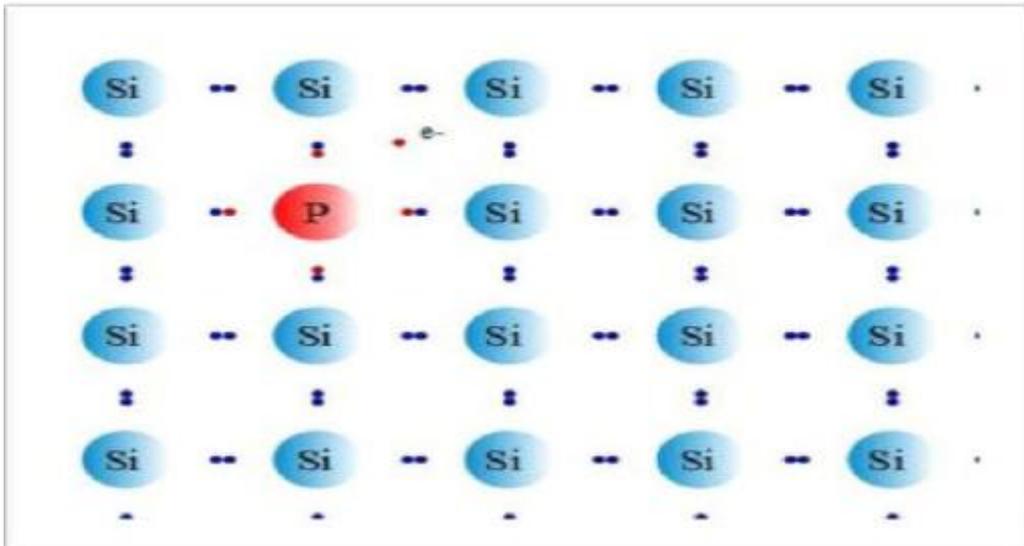


Figure I.9 : Dopage de type N

### B) Dopage de type P :

Le dopage de type P consiste à ajouter un atome de bore au sein de la structure cristalline du silicium. Le bore disposant de 3 électrons sur sa couche électronique externe va s'associer avec 4 atomes de silicium, laissant ainsi libre un trou : Cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale positive.

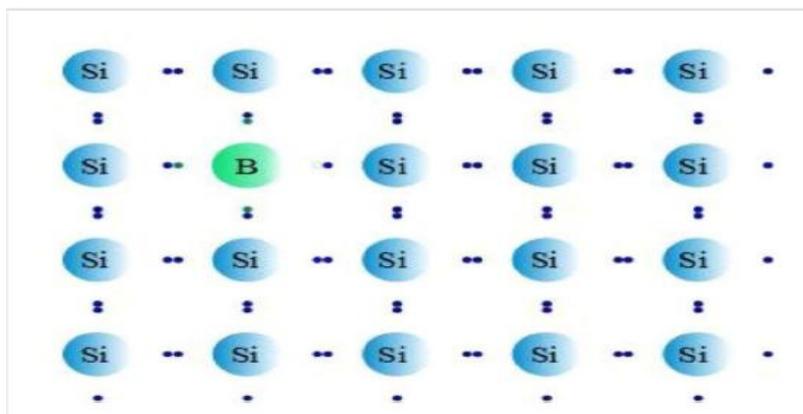


Figure I.10 : Dopage de type P .

### Les 3 méthodes de dopages [10]:

\_ La diffusion : On utilise un four, dans lequel on injecte des gaz avec une solution dopante pour le silicium. Avec la chaleur, le dopant a une énergie suffisante pour entrer dans la plaquette de silicium. Cette méthode est assez ancienne, et nécessite d'avoir une température uniforme dans le four.

\_ La croissance epitaxiale : Cette méthode utilise toujours un four, mais cette fois les atomes du dopant sont déposés sur le silicium qui se présente sous la forme d'une plaquette. On a ainsi un dépôt en surface, et non pas une insertion comme pour la méthode de dopage par diffusion. La température du four doit avoisiner les 1 200 °C.

\_ Le bombardement ionique :- Une source (appelé faisceau ionique énergétique) produit des ions, qui sont ensuite accélérés, et par le biais d'un contrôle très précis, ceux-ci vont alors se positionner sur la plaquette. L'avantage de ce principe est que l'opération se déroule à température ambiante. Le défaut de cette technique est qu'elle peut provoquer des dommages au silicium induisant un réarrangement indésirable de sa structure cristalline, exigeant ainsi une recristallisation subséquente.

#### I.4.4. Bandes d'énergie des semi-conducteurs dopés :

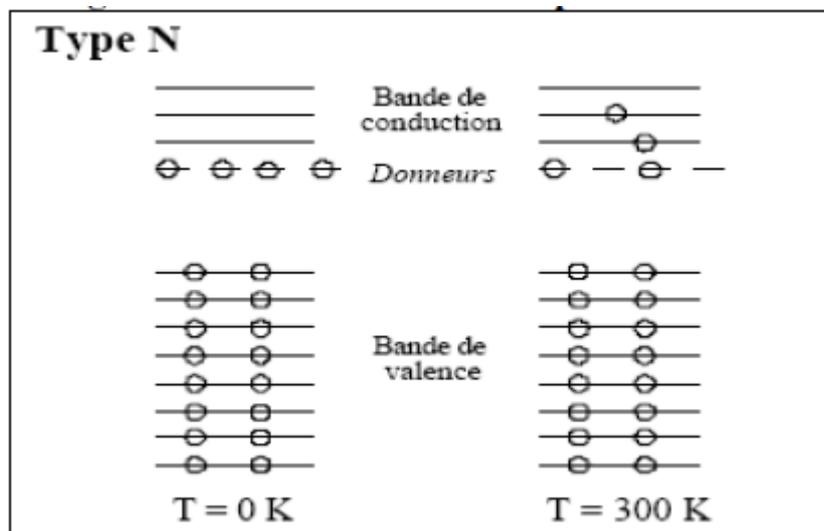


Figure I.11: Bande d'énergie du semi-conducteur dopé de type N.

Les atomes de pentavalents (donneurs) introduisent attirent les électrons en créant ainsi de nouveaux niveaux dont l'énergie est légèrement inférieure à ceux de la bande de conduction du matériau pur. Si on élève la température, ces électrons peuvent passer dans la bande de conduction.

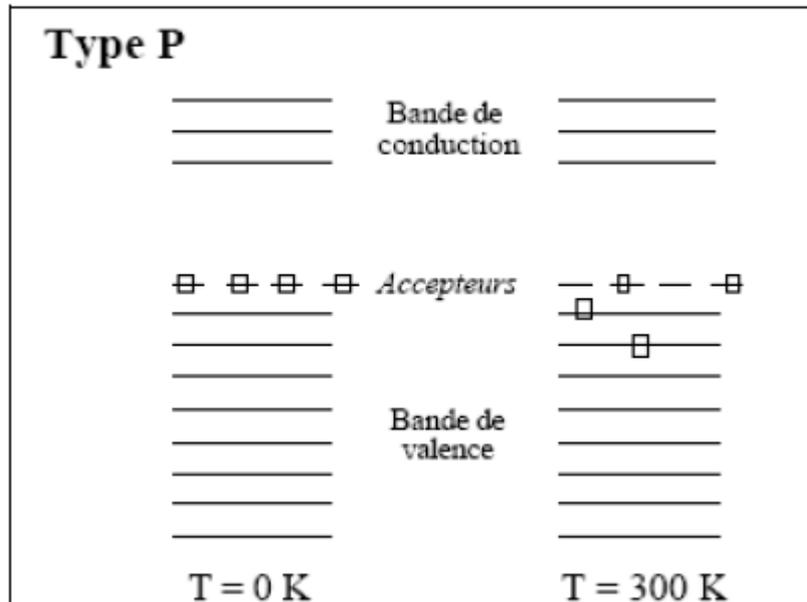


Figure I.12: Bande d'énergie du semi-conducteur dopé de type P.

Les atomes de trivalents (accepteurs), introduisent des trous dans la bande de valence.

Si on élève la température, ces trous se comportent comme des charges positives libres.

#### I.4.5. La jonction P-N :

##### A) Jonction non polarisée :

Une jonction est constituée par la réunion de deux morceaux de semi-conducteurs dopés P et N (jonction P-N). Les connexions avec le milieu extérieur sont réalisées par des contacts métalliques.

En pratique, on part d'une plaque de silicium dopée N sur laquelle on crée en général par diffusion une zone dopée P. On sait donner à la zone de séparation entre les deux matériaux nommée la zone de transition, une épaisseur très faible (typiquement  $0,5 \mu\text{m}$ ). Dans cette zone, les taux de dopages et donc le nombre de porteurs libres varient avec la distance.

- Dans la zone P les porteurs majoritaires sont les trous. Les atomes accepteurs constituent un réseau d'ions négatifs. De même dans la zone N les porteurs majoritaires sont les électrons. Les atomes donneurs constituent un réseau d'ions positifs.

Les trous ont tendance à gagner la zone N où ils se recombinent avec des électrons. De même des électrons de la zone N vont combler des trous de la zone P.

- Dans la zone de transition existe une charge d'espace due aux charges non compensées des noyaux des impuretés. En l'absence d'une polarisation externe, existe un champ électrique interne qui s'oppose au mouvement des porteurs majoritaires mais qui accélère les minoritaires. Il existe au niveau de la jonction une barrière de potentiel dont la

hauteur est la différence entre les niveaux d'énergie des accepteurs et des donneurs. Les porteurs minoritaires induisent le courant de diffusion ; les porteurs majoritaires créent le courant de saturation. En l'absence de polarisation, ces deux courants sont égaux.

### B) Jonction P-N polarisée en inverse :

Dans cette situation, le champ électrique externe créé par le générateur de f.e.m.

$V_{inv}$  s'ajoute au champ interne de la jonction : la hauteur de la barrière de potentiel augmente.

Seul un courant de minoritaires est possible à travers la jonction. C'est le courant inverse ou courant de fuite. A température ambiante, ce courant est très faible (100 nA).

Comme il dépend du nombre des minoritaires, il est fonction de la température : pour le silicium, il est négligeable en dessous de 110°C mais il devient si important au-dessus de 175°C qu'il interdit le fonctionnement de la jonction en diode. Pour le germanium le fonctionnement est impossible au-dessus de 85°C.

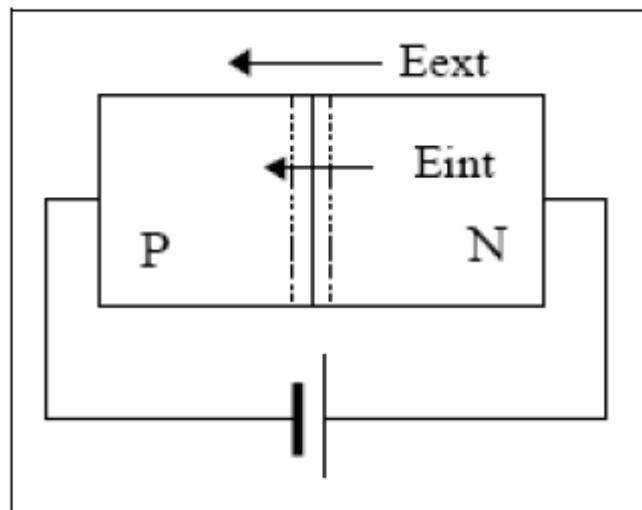


Figure I.13 : Jonction P-N polarisée en inverse.

### C) Jonction P-N polarisée en direct :

Dans cette situation le champ externe créé par le générateur s'oppose au champ interne.

Dès que le champ externe dépasse le champ interne, un courant des majoritaires s'établit à travers la jonction. Il existe pour une jonction P-N une tension de seuil qui est caractéristique du matériau :

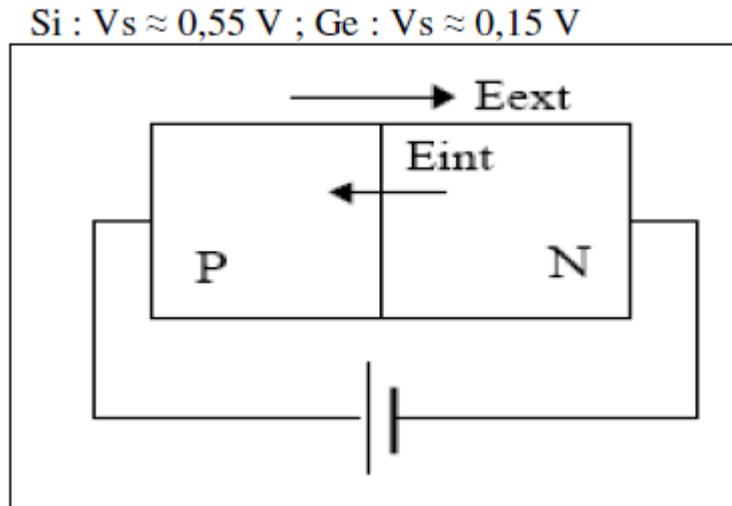


Figure I.14 : Jonction P-N polarisée en direct [11].

#### I.4.6. Le silicium [12] :

Le silicium fait partie de la colonne IV de la classification périodique de Mendeleïev, il dispose de 4 électrons de valence. Malgré que le silicium n'est pas le matériel idéal pour la conversion PV, mais il est le plus utilisé à ce jour pour la réalisation des cellules solaires (plus de 90%). Ce semi-conducteur présente en effet différents avantages

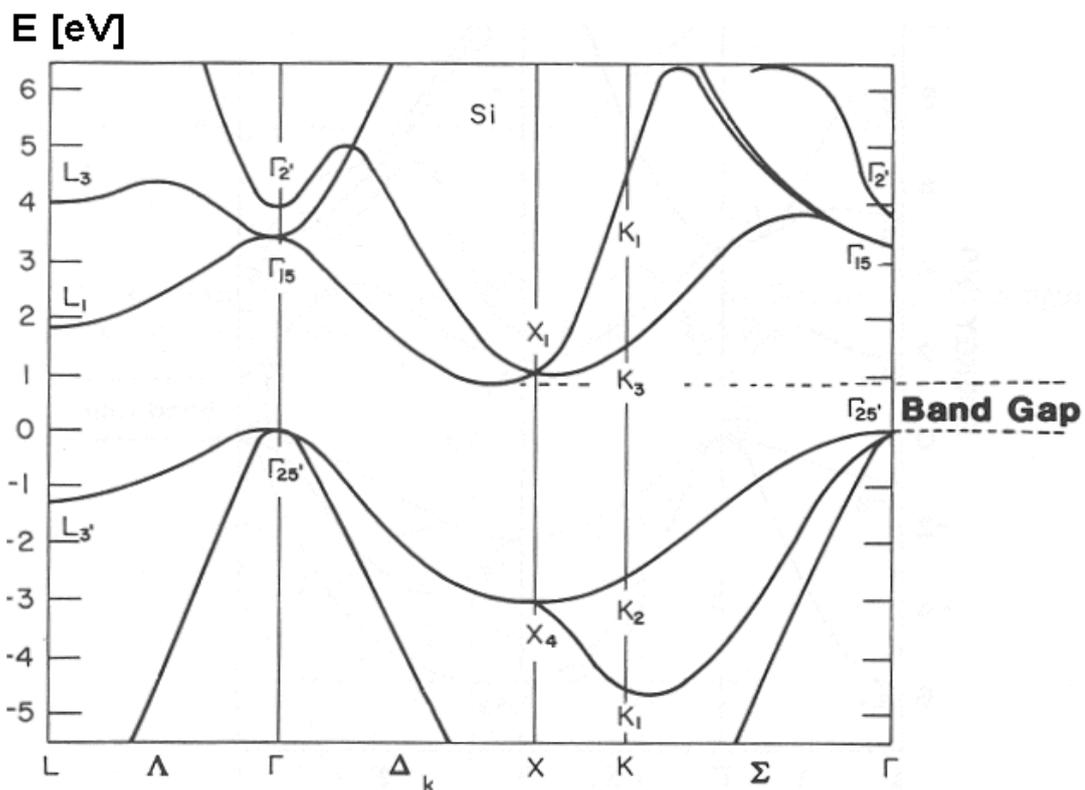


Figure I.15 Structure de bande du Silicium.

### I.4.6.1. Silicium monocristallin :

Les cellules en silicium monocristallin représentent la première génération des générateurs photovoltaïques.

Pour les fabriquer, on fond du silicium en forme de barreau. Lors d'un refroidissement lent et maîtrisé, le silicium se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension.

On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme.

Durée de vie : 20 à 30 ans.

#### ➤ Avantages :

- bon rendement, de 12% à 18% [12]
- bon ratio  $Wc/m^2$  (environ  $150 Wc/m^2$ ) ce qui permet un gain de place si nécessaire
- nombre de fabricants élevé

#### ➤ Inconvénients :

- coût élevé
- rendement faible sous un faible éclairement.



Figure I.16 : Le silicium monocristallin.

### I.4.6.2. Silicium polycristallin (multicristallin) :

Pendant le refroidissement du silicium dans une lingotière, il se forme plusieurs cristaux. La cellule photovoltaïque est d'aspect bleuté, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.

### ➤ **Avantages :**

- cellule carrée (à coins arrondis dans le cas du Si monocristallin) permettant un meilleur foisonnement dans un module
- moins cher qu'une cellule monocristalline

### ➤ **Inconvénients :**

- moins bon rendement qu'une cellule monocristalline : 11 à 15% [12]
- ratio  $Wc/m^2$  moins bon que pour le monocristallin (environ  $100 Wc/m^2$ )
- rendement faible sous un faible éclairage.

Ce sont les cellules les plus utilisées pour la production électrique (meilleur rapport qualité-prix).

Durée de vie : 20 à 30 ans[12].

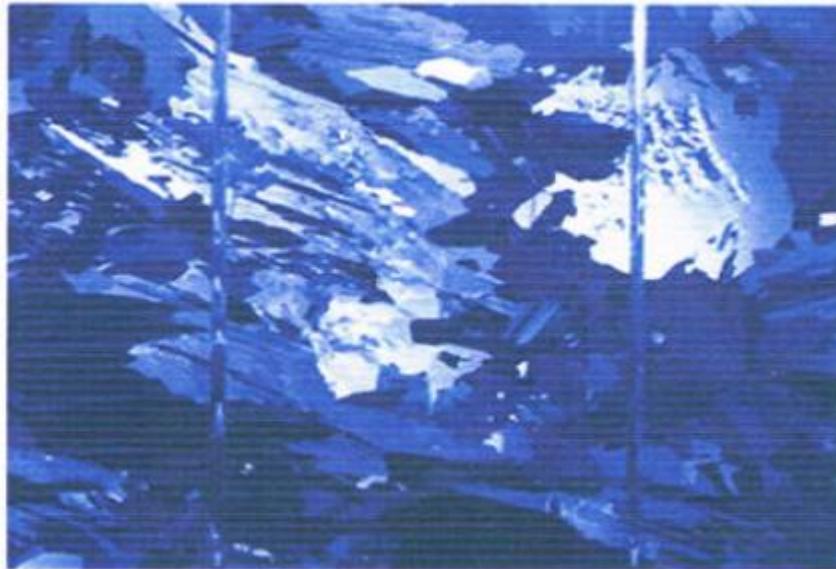


Figure I.17 : Le silicium poly-cristallin.

### **I.4.6.3.Silicium amorphe :**

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites "solaires"[12].

### ➤ **Avantages :**

- fonctionne avec un éclairage faible ou diffus (même par temps couvert)
- un peu moins chère que les autres technologies
- intégration sur supports souples ou rigides.

### ➤ **Inconvénients :**

- rendement faible en plein soleil, de 6% à 8% [12]
- nécessité de couvrir des surfaces plus importantes que lors de l'utilisation de silicium cristallin (ratio  $Wc/m^2$  plus faible, environ  $60 Wc/m^2$ )
- performances qui diminuent avec le temps (environ 7%).

### **I.4.6.4.Fabrication des cellules photovoltaïques [11] :**

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque, basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire un courant lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

Deux technologies de cellules photovoltaïques sont présentes aujourd'hui :

- **Les cellules dites cristallines**
- **Les cellules dites couches minces**

### ➤ **Extraction du silicium à partir de la silice :**

La silice : La silice est un composé chimique nommé aussi dioxyde de silicium, de formule chimique  $SiO_2$ . La silice est l'élément le plus répandu dans la croûte terrestre après l'oxygène. Il représente 25 % de la masse de la croûte terrestre [11].

La silice se présente sous la forme d'un minéral dur. Dans la nature, on la trouve en grande quantité dans :

- Les roches sédimentaires détritiques (sables, grès),
- Les roches métamorphiques, (schistes, gneiss, quartzites), Les roches métamorphiques sont formées par la recristallisation (et généralement la déformation) de roches sédimentaires ou de roches magmatiques sous l'action de la température et de la pression qui croissent avec la profondeur dans la croûte terrestre ou au contact d'autres roches.



**Figure I.18** : La silice : matière première d'une cellule photovoltaïque.

Le silicium est un élément chimique de symbole Si. Il n'existe pas à l'état pur dans la nature.

Le silicium (Si) est donc extrait de la silice ( $\text{SiO}_2$ ) grâce à la réaction chimique simplifiée suivante :  $\text{SiO}_2 + 2 \text{C} \rightarrow \text{Si} + \text{CO}$

Cette réaction se réalise dans un four à arc car elle nécessite de faire fondre la silice. La température du four peut atteindre 3 000 °C. La puissance du four peut aller jusqu'à 30MW, afin d'enclencher les réactions chimiques. En réalité, la réaction de réduction de la silice en silicium résulte d'un grand nombre de réactions chimiques intermédiaires. La puissance du four peut aller jusqu'à 30 MW, afin d'enclencher les réactions chimiques.

Après cette opération, le silicium est obtenu sous forme liquide. Sa pureté est de 98 %. Il faut le purifier encore de plusieurs ordres de grandeur afin d'obtenir un matériau adéquate pour les applications photovoltaïques.

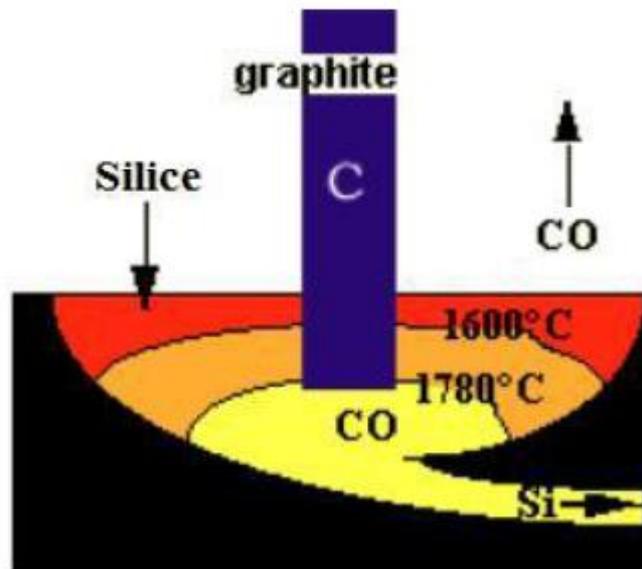


Figure I.19 : Extraction du silicium

➤ **Purification du silicium [11] :**

Il s'agit, en partant du silicium métallurgique, de faire une purification chimique. De nombreux procédés ont été développés par les différents producteurs mondiaux de silicium.

Au final, le procédé de purification aboutit à l'obtention de lingots de silicium purifiés à 99.99 %.

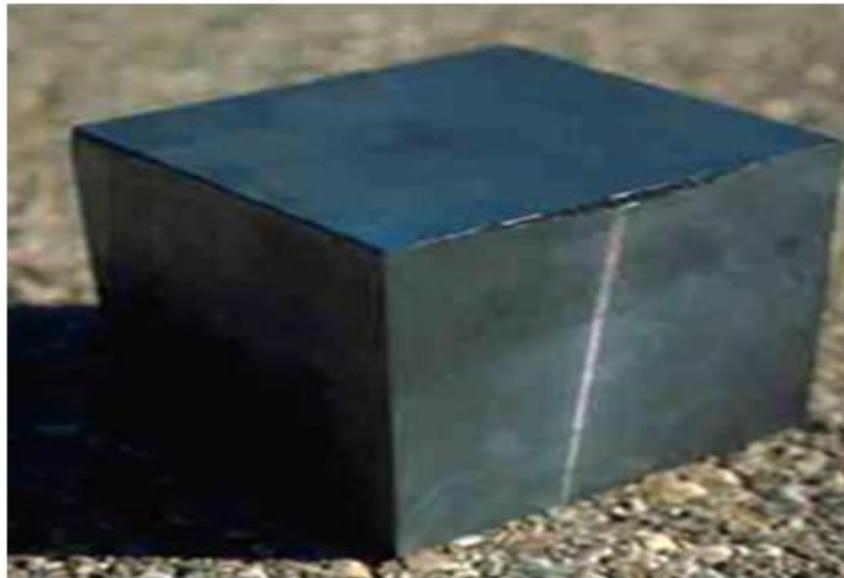
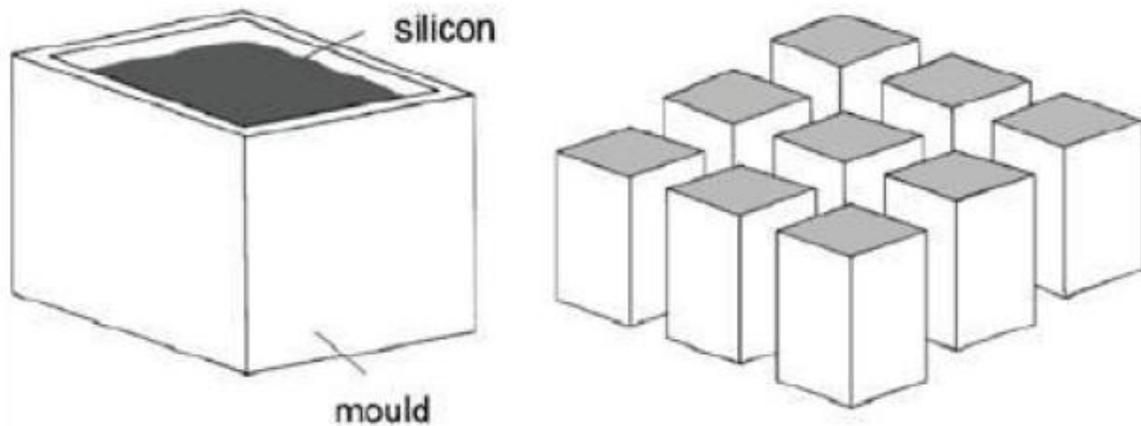


Figure I.20 : Purification du silicium.

**B) Obtention des lingots de silicium :**

Une fois l'étape de purification terminée, vient l'étape de cristallisation du silicium liquide. Le produit issu de cette étape est un lingot de silicium à l'état solide. Il existe deux

grandes méthodes de cristallisation. La première permet d'obtenir du silicium polycristallin (composé de plusieurs cristaux). La deuxième permet d'obtenir du silicium monocristallin (composé d'un seul cristal).



**Figure I.21:** Les lingots de silicium.

### C) Obtention des wafers photovoltaïques :

Les lingots cylindriques (silicium monocristallin) ou parallélépipédiques (silicium polycristallin) de silicium obtenus à l'issue de l'étape de solidification sont ensuite sciés en fines plaques de 200 micromètres d'épaisseur qui sont appelées « wafers » (en anglais, "wafer" signifie "galette"). La coupe des lingots est effectuée par une scie à fil.

Compte-tenu de la faible épaisseur des tranches à découpées (300 $\mu\text{m}$ ), le principal problème du sciage est la perte de découpe. Afin de minimiser ces pertes, la solution technique retenue est la scie à fil. En effet, la perte de découpe (kerf) typique des scies à fil est de 200 $\mu\text{m}$  à 240 $\mu\text{m}$ , ce qui représente 55% de perte en moins par rapport aux scies à diamètre intérieur (perte de découpe de 310  $\mu\text{m}$  à 350 $\mu\text{m}$ ).

Avec une scie à fil, il faut donc 570  $\mu\text{m}$  de silicium pour produire une tranche de 350  $\mu\text{m}$ .

L'étape du sciage représente un élément déterminant dans le coût de la production des cellules photovoltaïques [11].

## I.5. Les cellules photovoltaïques:

### I.5.1. Aperçu des cellules photovoltaïques:

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique (c'est une diode électronique PN de grande surface) qui, exposé à la lumière (photons), génère de l'électricité. C'est l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène. Le courant obtenu est fonction de la lumière incidente. L'électricité produite est fonction de l'éclairement, la cellule photovoltaïque produit un courant continu.

Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium (Si) et plus rarement d'autres semi-conducteurs : séléniure de cuivre et d'indium ( $\text{CuIn}(\text{Se})_2$  ou  $\text{CuInGa}(\text{Se})_2$ ), tellure de cadmium (CdTe), etc. Elles se présentent généralement sous la forme de fines plaques d'une dizaine de centimètres de côté, prises en sandwich entre deux contacts métalliques, pour une épaisseur de l'ordre du millimètre.

Les cellules sont souvent réunies dans des modules solaires photovoltaïques ou panneaux solaires, en fonction de la puissance recherchée.



**Figure I.22:** Cellule photovoltaïque.

### **I.5.2. Les différents types de cellules photovoltaïques :**

#### ➤ **Les cellules monocristallines :**

Les cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération. Elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Vues de près, les cellules ont une couleur uniforme.

Elles ont un bon rendement, mais la méthode de production est laborieuse.

Le silicium n'est pas cristallisé, il est déposé sur une feuille de verre. La cellule est d'un gris très foncé. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites "solaires".

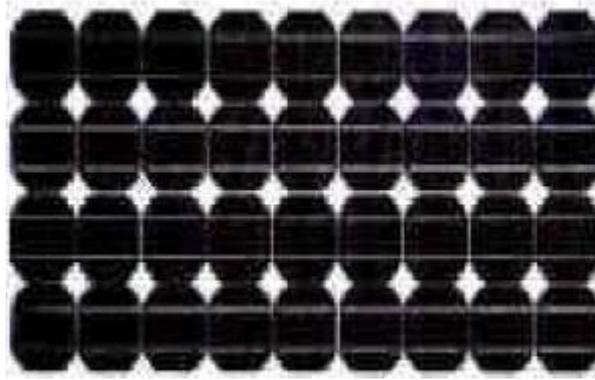


Figure I.23: Cellules Photovoltaïques Monocristallines.

❖ **Avantages :**[12]

- Très bon rendement (23% en théorie et environ 17% dans la pratique).

❖ **Inconvénients :**

- Coût élevé
- Rendement faible sous un faible éclaircissement

➤ **Les cellules polycristallines :**

Les cellules polycristallines sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vues de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes). Elles ont un rendement de 11 à 13%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines.

Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais n'est pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.

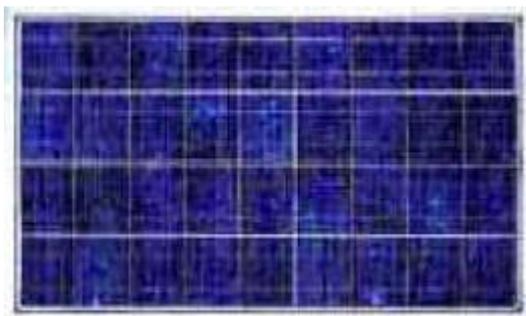


Figure I.24: Cellules Photovoltaïques Polycristallines.

❖ **Avantages :**[12]

- Bon rendement 13%, mais cependant moins bon que le monocristallin.
- Moins cher que le monocristallin
- Meilleur rapport qualité/prix.

### ❖ Inconvénients :

- Rendement faible sous un faible éclairement.

#### ➤ Les cellules amorphes :

Ces cellules sont composées d'un support en verre ou en matière synthétique sur lequel est disposé une fine couche de silicium (l'organisation des atomes n'est plus régulière comme dans un cristal). Leur rendement est de l'ordre de 5 à 10% [12](cf. tableau1), plus bas que celui des cellules cristallines mais le courant produit est relativement bon marché. Elles sont appliquées dans les petits produits de consommation (montres, calculatrices) mais sont peu utilisées dans le cadre des installations solaires.

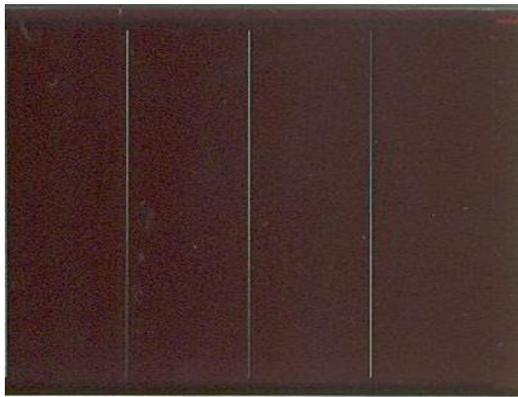


Figure I.25: Cellules Photovoltaïques Amorphes.

### ❖ Avantage :

- Fonctionnent avec un éclairement faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment).
- Moins chères que les autres.

### ❖ Inconvénients :

- Rendement faible en plein soleil (environ 6%).[12]
- Performances qui diminuent sensiblement avec le temps.

#### ➤ Les cellules en couches minces :

La technologie à couche mince désigne un type de cellule obtenu par diffusion d'une couche mince de silicium sur un substrat de verre.

Dans cette technologie, le principe est d'appliquer le semi-conducteur sous forme de "spray" sur un support. Le semi-conducteur est ainsi économisé car il n'est pas, comme pour les cellules au silicium cristallin, scié dans la masse. Cette méthode de fabrication devrait permettre dans l'avenir de réduire significativement les coûts de production des cellules PV.

### ➤ Les cellules en polymère :

Au-delà de l'amélioration des performances en termes de rendement et de fiabilité des dispositifs photovoltaïques, le véritable enjeu est de réduire de façon significative le coût du kilowattheure produit. Les matériaux organiques plastiques ou polymères, faciles à mettre en œuvre, sont en passe de s'imposer à côté du silicium pour la fabrication des cellules solaires, même si des verrous technologiques restent à lever.

Si le marché des cellules photovoltaïques est aujourd'hui dominé à plus de 90% par le silicium cristallin, les composites organiques, encore au stade de l'étude de la faisabilité d'introduction sur le marché en termes de rendement et de fiabilité, sont appelés à s'imposer là où les technologies du silicium sont ou seront mal positionnées.

Les organiques, autrement dit les plastiques, moins onéreux, apparaît en effet de plus en plus comme une voie d'avenir complémentaire, séduisante et crédible.

Dégradables, les polymères garantissent une technologie propre dans un contexte de développement durable. Faciles à manipuler, leur choix comme matériau de base permettrait aux industriels de n'avoir recours pour l'ensemble de l'ingénierie de la cellule qu'à une seule et même technologie peu coûteuse, car proche des techniques éprouvées de l'imprimerie.

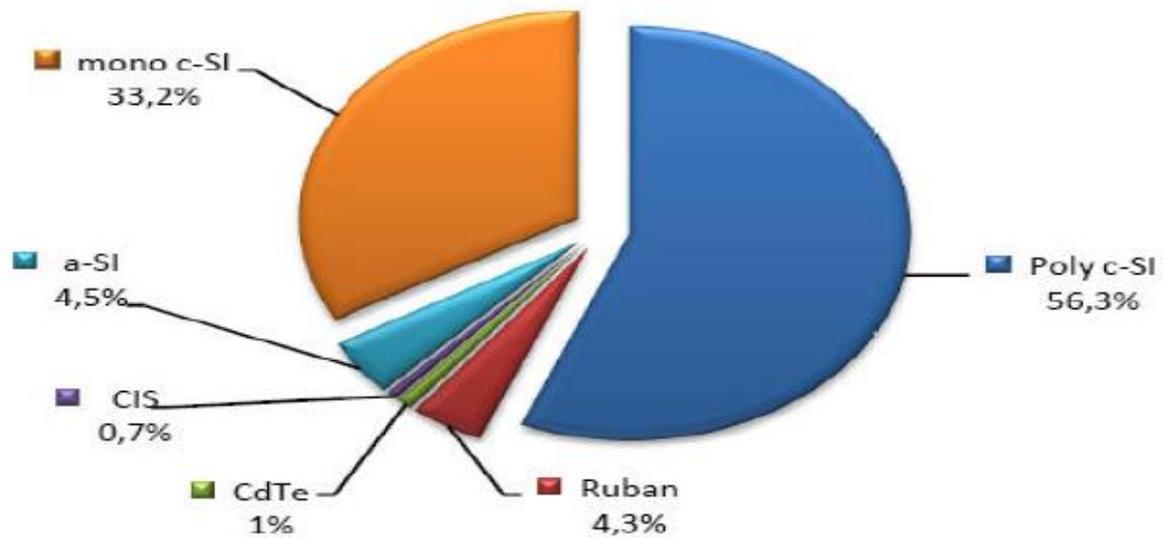
Autre avantage: ces plastiques permettraient également d'étendre l'offre à des produits souples ou de conformations diverses (tuiles de bâtiments par exemple), donnant accès à des marchés inaccessibles aux technologies classiques, notamment par leur intégration à des systèmes multifonctionnels.

### **I.5.3. Structure des cellules photovoltaïques :**

#### **I.5.3.1. Le silicium comme matériau de base pour le photovoltaïque :**

L'industrie photovoltaïque est concentrée à plus de 90% [13] sur l'utilisation du silicium comme matériau de base (figure I-26). Ce semi-conducteur présente en effet, différents avantages : il est abondant à la surface du globe car facilement extrait à partir du sable ; il n'est pas toxique comme certains semi-conducteurs III-V ; il possède un oxyde naturel ( $\text{SiO}_2$ ) présentant d'excellentes propriétés électroniques et il peut se doper facilement (avec le phosphore ou le bore). Son seul véritable inconvénient est son gap indirect à 1,1 eV. Ceci entraîne une absorption du rayonnement plus faible qu'avec un matériau à gap direct : pour absorber 90% du spectre solaire, il faudra utiliser une épaisseur de 100  $\mu\text{m}$  pour le silicium, alors que seulement 1  $\mu\text{m}$  de GaAs suffisent. De plus, la largeur de bande interdite du silicium fait qu'il n'est pas le mieux adapté pour capter la part optimale du spectre solaire

(entre 1 et 1,7 eV) : le GaAs, avec une largeur de bande interdite de 1,38 eV, permet d'accéder à des rendements théoriques plus élevés.



**Figure I.26:** Utilisation des matériaux photovoltaïques en 2003 [13].

Le silicium reste cependant le matériau le plus utilisé dans le photovoltaïque (figure I-27). Outre les avantages précités, il bénéficie d'une implantation importante et durable dans l'industrie de la microélectronique. Celle-ci utilise du silicium monocristallin de très haute pureté, obtenu par des méthodes telles que le tirage CZ (Czockralski). Ce type de matériau, qui présente d'excellentes qualités électroniques, est très coûteux. La part de silicium monocristallin y est plus importante, puisque les modules produits selon cette technologie ont un rendement plus élevé que ceux en silicium multi-cristallin.

Le silicium multi-cristallin est quant à lui fabriqué à partir de sources de matériau moins raffinées, mais convient aux processus de l'industrie photovoltaïque : il constitue 56,4% des modules fabriqués en 2003[1]. La majeure partie de ce matériau est produit par des procédés de solidification unidirectionnelle. D'autres méthodes de production se développent, tel que le silicium en ruban EFG (pour Edgedefined film Fed Growth), qui est produit directement sous forme de plaques minces, mais qui présente des rendements de conversion inférieurs à ceux des lingots traditionnels.

### **I.5.3.2. Les constituants de base d'une cellule photovoltaïque :**

Bien que différentes structures soient envisageables pour l'élaboration des cellules photovoltaïques, des parties similaires sont présentes dans chaque composant. La structure d'une cellule photovoltaïque avec contacts sur les deux faces est présentée sur la figure I.28.

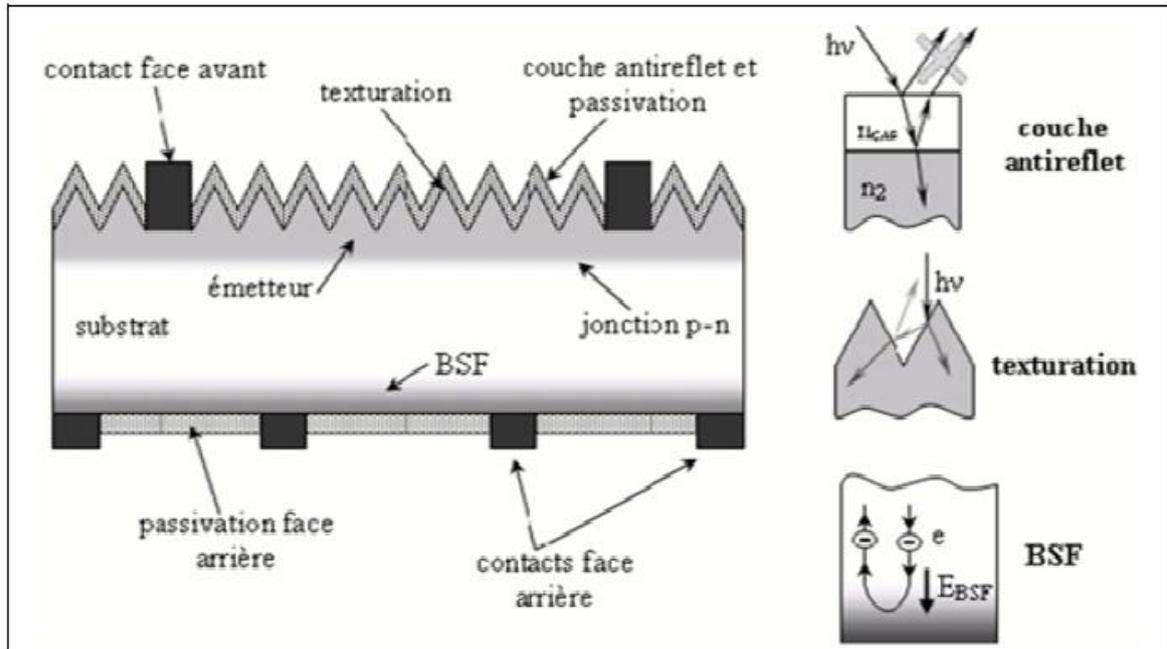


Figure I-27 : Composition d'une cellule photovoltaïque.

**A) Passivation des faces avant et arrière :**

La surface des semi-conducteurs contient une densité importante de défauts (liaisons pendantes, impuretés, etc.) entraînant des pertes non négligeables liées à la recombinaison en surface. La passivation consiste à améliorer les qualités électroniques de la surface et du volume du matériau en neutralisant les effets de ses défauts électriquement actifs. Diverses couches de passivation sont utilisées en photovoltaïque mais les principales sont l'oxyde thermique de silicium ( $\text{SiO}_2$ ) et le nitrure de silicium hydrogéné ( $\text{SiN}_x\text{H}$ ).

**B) Couche antireflet :**

Pour minimiser la réflexion de la lumière, une couche antireflet (CAR) est utilisée. Le principe d'action des couches antireflet est basé sur l'interférence des faisceaux lumineux dans les couches diélectriques minces (voir l'insertion sur la figure I.28). Si l'épaisseur de la couche diélectrique est égale à :

$$d_{\text{CAR}} = \frac{(2.N+1).\lambda}{4.n_{\text{CAR}}}, \quad N=0,1,2,3,\dots$$

On obtiendra l'annulation des faisceaux réfléchis à l'interface air/CAR et CAR/semi-conducteur. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, une double couche antireflet est utilisée (avec deux diélectriques différents). Différentes CAR sont utilisées en photovoltaïque :  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{ZnS}$ ,  $\text{MgF}_2$ ,  $\text{SiN}_x$ , etc.

**C) Texturation de la surface :**

La texturation du silicium est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule. Cette opération vise à développer en surface un relief micrométrique, généralement

de forme pyramidale. La longueur d'onde de la lumière incidente étant inférieure aux dimensions des structures ainsi réalisées, les rayons incidents suivent les lois de l'optique géométrique.

### **D) Contacts face avant et arrière :**

Les contacts métalliques à l'émetteur et au substrat servent à collecter le courant de porteurs photo générés. Les contacts doivent être ohmiques, c'est-à-dire que la caractéristique  $I=f(V)$  du contact doit être linéaire. La résistance des contacts est un paramètre très important. La forte résistance des contacts augmente la résistance série de la cellule et baisse le facteur de forme et le rendement. Différents procédés sont utilisés pour réaliser les contacts.

Dans le cadre des cellules photovoltaïques industrielles en silicium multi-cristallin, les contacts sont généralement réalisés par sérigraphie. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, la pulvérisation cathodique ou l'évaporation sous vide sont utilisées.

### **E) BSF [14]:**

Le champ électrique arrière (BSF : Back Surface Field) consiste à créer une barrière de potentiel (par exemple, jonction p+-p) sur la face arrière de la cellule pour assurer une passivation. La barrière de potentiel induite par la différence de niveau de dopage entre la base et le BSF tend à confiner les porteurs minoritaires dans la base (voir l'insertion sur la figure I.28). Ceux-ci sont donc tenus à l'écart de la face arrière qui est caractérisée par une vitesse de recombinaison très élevée.

## **I.6. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases indispensables à la compréhension du sujet. Nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, et son application dans le domaine photovoltaïque. Nous allons ensuite expliquer le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que les paramètres limitant leur rendement. Puis nous avons abordé les constituants de base d'une cellule photovoltaïque en silicium.

Alors le chapitre suivant, nous nous attacherons le Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque et les leurs caractéristiques électriques et présenté les technique des dépôts des couches minces

### **Référence :**

- [1] <http://www.notre-planete.info> >Ecologie >Energie
- [2] HONSBURG C. and BOWDEN S. Photovoltaics: Devices, Systems and Applications [CDROM]. Sydney, Australia : University of New South Wales, 1998.
- [3] D.R. di Valdalbero, 'La Recherche Energétique Européenne: Pont de Coopération sur la Méditerranée', Liaison Energie-Francophonie, N°71, Energie et Développement Durable en Méditerranée, pp. 71 - 76, 2ème Trimestre 2006.
- [4] Document, Liaison Energie-Francophonie. 'Energie et Développement Durable en Méditerranée', N°71, p. 95, 2ème Trimestre 2006.
- [5] S. Bentouba, A. Slimani et M.S. Boucherit, 'Les Energies Renouvelables dans le Cadre d'un Développement Durable en Algérie, Wilayas du Grand Sud par Exemple', 8<sup>ème</sup> Séminaire International sur la Physique Energétique, SIPE'06, Centre Universitaire de Béchar, Algérie, 11 - 12 Novembre 2006.
- [6] A. Ainouche, 'Natural Gas and Algerian Strategy for Renewable Energy', 23rd World Gas Conference, Amsterdam, 2006.
- [7] <http://www.photovoltaique.info/L-effet-photovoltaïques.html>
- [8] N. Oleksiy, « Simulation, Fabrication Et Analyse De Cellules Photovoltaïque à Contact Arrières Inerdigités », Thèse De Doctorat, L'institut National Des Sciences Appliquées De LYON, (2005).
- [9] <http://www.hallou-solaire.com/usermedia/document-634234564258437500-2.pdf>.
- [10] <http://www.ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/./semicon.pdf>
- [11] <http://www.hallou-solaire.com/usermedia/document-634234564258437500-2.pdf>
- [12] <http://www.ef4.be/fr/photovoltaïque/aspects-techniques/cellules-photovoltaïque.html>
- [13] OBSERV'ER. Baromètre du Solaire Photovoltaïque, Systèmes Solaires, Avril 2004, N° 160, pp.69-83.
- [14] LÖLGEN Peter. Surface and volume recombination in silicon solar cells. Thèse. Utrecht, Pays-Bas: Universiteit Utrecht, Faculteit Natuur en Sterrenkunde, 1995, 152 p.
- [15] Hamakawa Y. Solar PV energy conversion and the 21st Century civilization. Tech. Digest of 12th PVSEC, Jeju, Corée du Sud, 2001, pp. 15-18.
- [16] <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/le-developpement-du-photovoltaïque-dans-le-monde>



---

# *CHAPITRE II*

---

## **Résumé :**

*Le deuxième chapitre est dédié à la conversion photovoltaïque et à la description de quelques techniques expérimentales les plus utilisées actuellement pour élaborer les couches minces.*

### II.1. Introduction :

L'énergie solaire photovoltaïque est une forme d'énergie renouvelable. Elle permet de produire de l'électricité par transformation d'une partie du rayonnement solaire grâce à une cellule photovoltaïque.



**Figure II. 1:** la conversion photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont les constituants des panneaux solaires. C'est une énergie nouvelle et propre, ce sont leurs principaux avantages et c'est peut-être un bon moyen contre la pollution qui est souvent la conséquence d'une production d'énergie. Premièrement, nous décrivant quelques notions sur les semi-conducteurs. Nous nous sommes donc intéressés au fonctionnement et la fabrication de ces cellules, nous décrivons les étapes l'extraction et la purification du silicium. Ainsi nous aborderons l'ensemble des différents types de cellules photovoltaïques. Nous avons donc décidé d'étudier leurs caractéristiques électriques.

### II.2.Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque a été mis en évidence pour la première fois par E. Becquerel en 1839, il découvrit que certains matériaux délivraient une petite quantité d'électricité quand ils étaient exposés à la lumière. Albert Einstein expliqua le phénomène photoélectrique en 1912, mais il fallut attendre le début des années 50 pour sa mise en application pratique dans la réalisation d'une cellule photovoltaïque en silicium d'un rendement de 4,5% [1]. Nous présentons ici les mécanismes de la génération de porteurs électroniques au sein d'un semi-conducteur sous l'impact de photons.

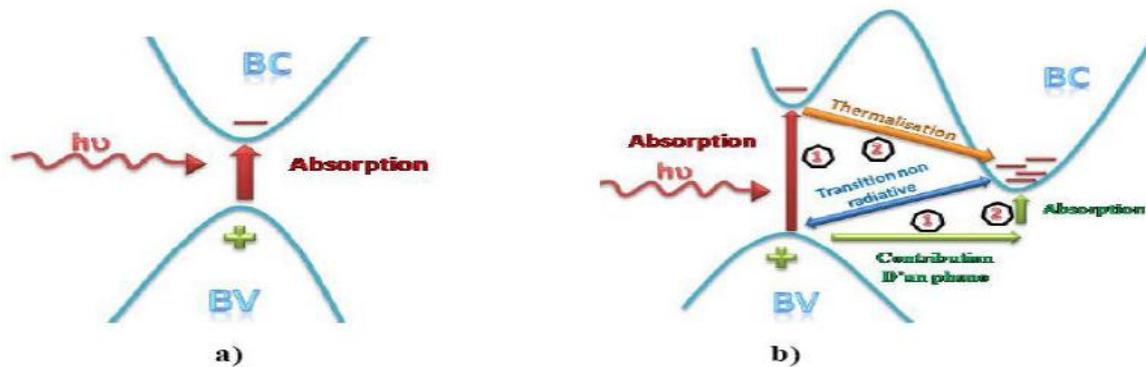
#### II.2.1.L'interaction photon/semi-conducteur :

L'écart entre la bande de valence et de conduction, ou gap, représente une caractéristique fondamentale des semi-conducteurs. La figure II.1 présente les différentes transitions possibles selon la nature du gap. Quand le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence coïncident dans l'espace des  $k$ , il s'agit d'un gap direct. Les transitions inter bandes s'effectuent verticalement, et sont donc radiatives

(figure II.1 (a)). Ceci illustre le fonctionnement des semi-conducteurs binaires, tels que le GaAs, beaucoup utilisés en optoélectronique.

Dans le cas du silicium, le gap est indirect : les transitions électroniques entre les extrema des bandes sont obliques, donc non radiatives puisqu'elles impliquent un changement du vecteur d'onde de l'électron. Les électrons du sommet de la bande de valence peuvent toutefois être directement excités vers le minimum relatif central de la bande de conduction grâce à un photon de plus grande énergie. Pour que la transition s'effectue dans le gap indirect, il faut qu'un phonon soit au préalable absorbé (ou émis) par l'électron, afin que le vecteur d'onde de ce dernier corresponde au maximum de la bande de valence, pour absorber un photon (cf. figure II.1 (b)).

Notons que la valeur du gap indirect du silicium est de 1,12 eV à 300 K (ce qui correspond à une longueur d'onde de 1107 nm), mais celle du premier gap direct vaut 3,4 eV (soit 365 nm).

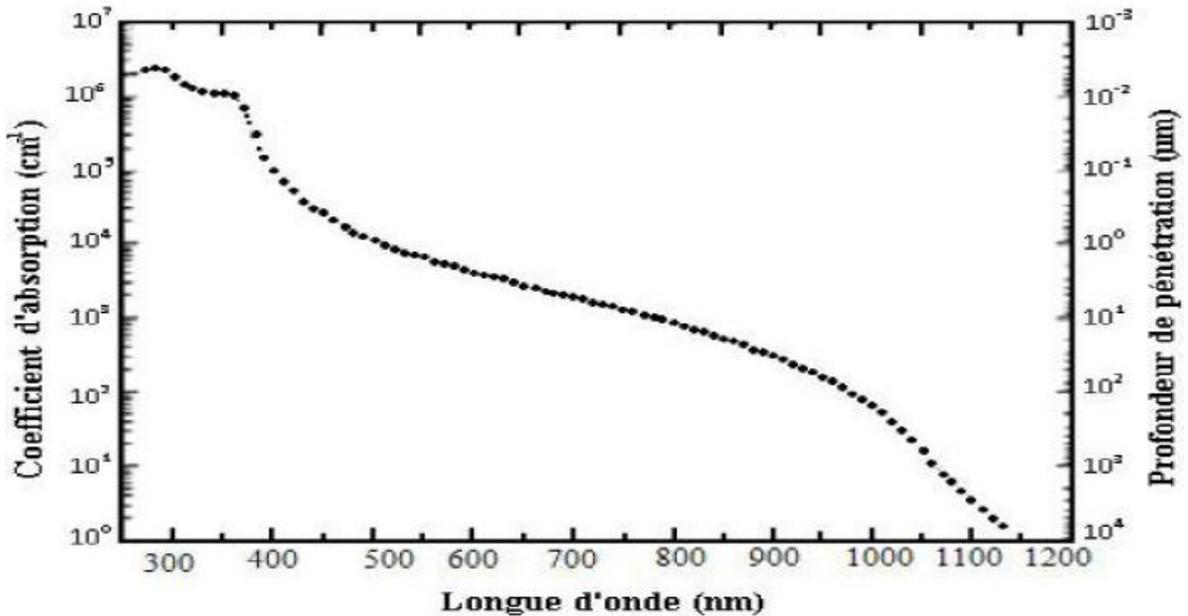


**Figure II.2:** Transitions inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur. Le cas a) correspond à un semi-conducteur à gap direct, le cas b) à un gap indirect [2].

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. La figure II.2 nous donne celui du silicium. Nous constatons que pour des longueurs d'ondes inférieures à 365 nm, la majorité des photons incidents est absorbée dans les 100 premiers Å du matériau.

Comme nous l'avons vu précédemment, ces transitions directes ne sont plus possibles pour des longueurs d'ondes plus grandes. Il faut alors qu'un phonon au moins vienne assister l'électron pour que ce dernier passe dans la bande de conduction. Ceci réduit la probabilité de transition.

L'augmentation de la longueur d'onde des photons entraîne donc une diminution du coefficient d'absorption. Lorsque l'énergie du 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 II.3:** Coefficient d'absorption du silicium et profondeur de pénétration des photons en fonction de la longueur d'onde [3].

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.

L'absorption est caractérisée par le taux de génération optique, noté  $G$  : il s'agit taux de création de paires électron-trou (en  $\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Les porteurs minoritaires (électrons dans un matériau de type p et trous dans un matériau de type n) sont métastables et n'existeront, en moyenne, que pour un temps égal à la durée de vie  $\tau$  des porteurs minoritaires. Cette grandeur définit la durée de vie moyenne avant que les porteurs ne se recombinent et est liée à la longueur de diffusion  $L_D$  et au coefficient de diffusion  $D$  du matériau.

### II.2.2. La cellule photovoltaïque :

#### II.2.2.1. Définition :

Une cellule solaire est un composant électronique qui convertit la lumière du soleil en électricité. La structure de base est présentée sur la figure ci-dessous.

Le principe de la conversion photovoltaïque peut être décrit par les mécanismes suivants :

- Absorption des photons incidents et création de paires électron-trou si l'énergie du photon incident est supérieure au gap du matériau.

- Diffusion des porteurs de charges minoritaires jusqu'à la zone de charge d'espace.

Transfert des charges électriques dans la zone où elles vont être majoritaires grâce au champ électrique présent au niveau de la zone de charge d'espace de la jonction p-n et collecte. Au cours de la diffusion des charges vers la zone de charge d'espace les charges électriques peuvent se recombiner et être perdues.

- Dissipation de puissance dans la charge et dans les résistances parasites.

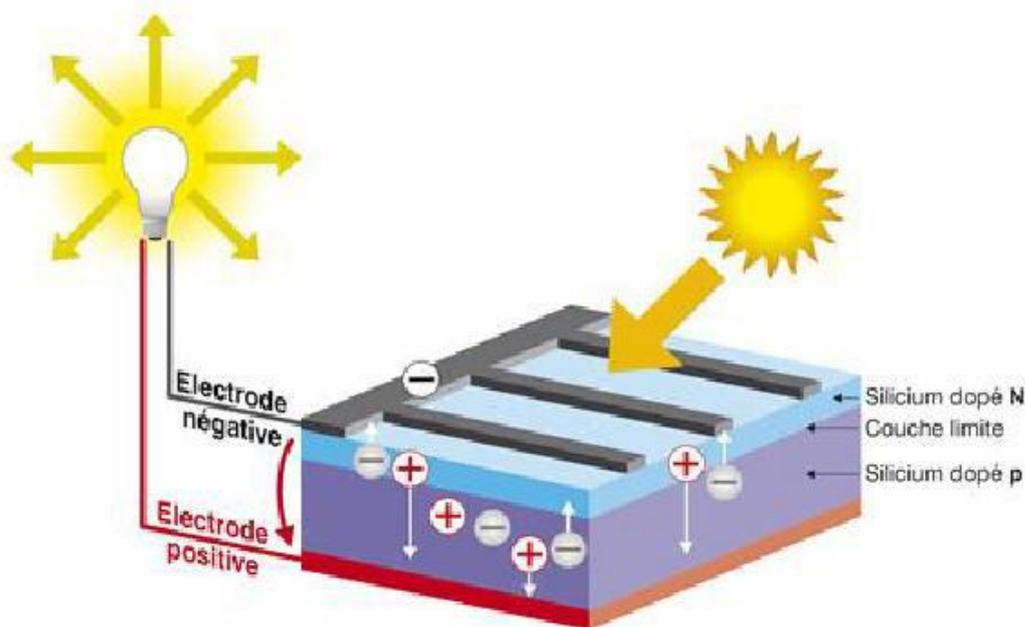


Figure II. 4 : Structure de base d'une cellule solaire [4].

#### II.2.2.2. Fonctionnement de la cellule photovoltaïque :

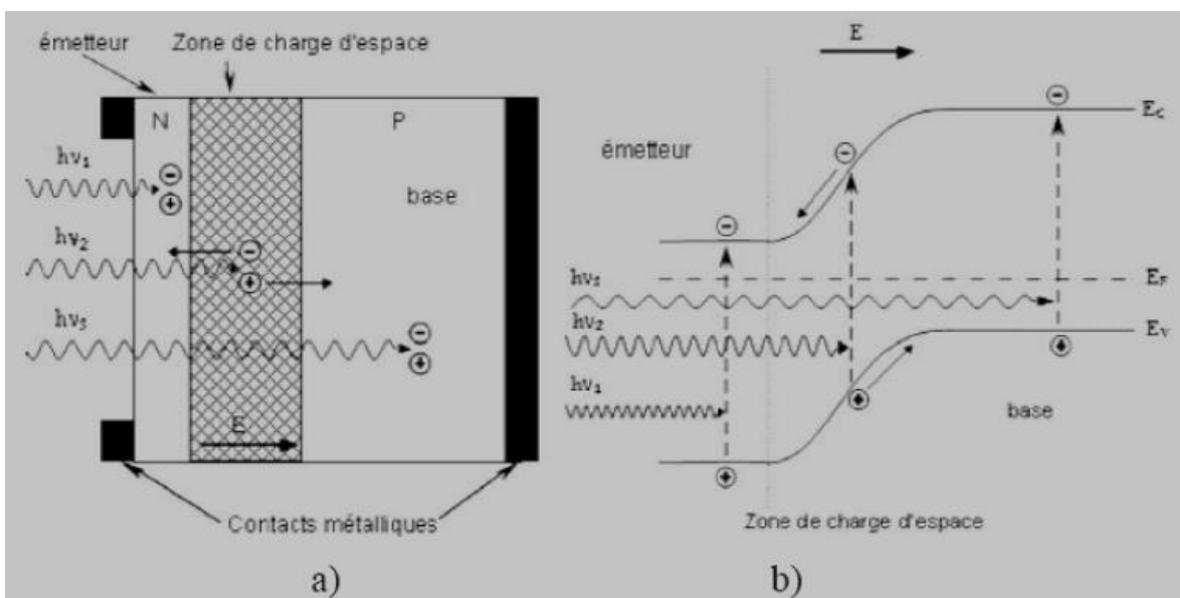
Une cellule PV est formée d'une jonction p-n qui permet de séparer spatialement l'électron et le trou photo-générés grâce à la variation du potentiel électrochimique au sein de la structure.

Une paire électron-trou photo-générée dans la zone de charge d'espace (ZCE) est immédiatement dissociée par le champ électrique : les trous sont accélérés vers la zone p et les électrons vers la zone N, (voir Figure II.4). On a un Photo-courant de génération. Dans

les zones n ou p, les porteurs minoritaires photo-générés diffusent et ceux qui atteignent la ZCE (dépendant de la longueur de diffusion  $L_D$  de ces porteurs) sont propulsés vers la région dans laquelle ils deviennent majoritaires, où ils peuvent être collectés par les contacts ohmiques. On a un photocourant de diffusion. Ces deux contributions s'ajoutent pour donner le photo-courant résultant  $I_{ph}$ .

C'est un courant de porteurs minoritaires proportionnel à l'intensité lumineuse. Ce courant s'oppose au courant de diode, appelé courant d'obscurité  $I_{obs}$ , qui résulte de la polarisation du composant. Le courant résultant  $I$  est :

$$I = I_{obs} - I_{ph} \dots\dots (II.2).$$



**Figure II.5** : Structure (a) et diagramme de bande (b) d'une cellule photovoltaïque. Les dimensions respectives des différentes zones ne sont pas respectées.

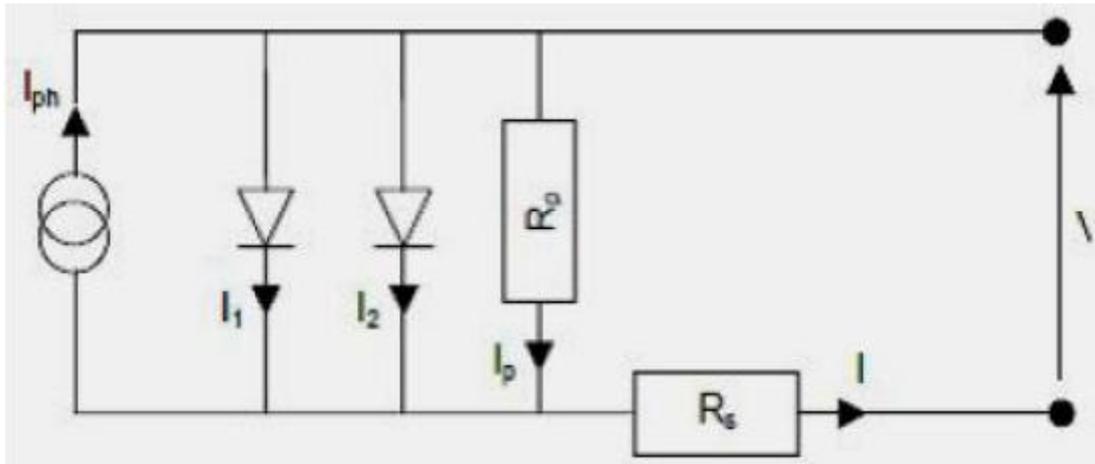
La longueur de diffusion des électrons photo-générés est plus grande que celle des trous. La base présente une épaisseur relativement grande ( $\approx 250-300 \mu\text{m}$ ) et elle est donc le plus souvent de type p : elle va fournir le plus de porteurs. Afin de limiter les recombinaisons avec les porteurs majoritaires, elle est faiblement dopée (environ  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ). L'émetteur, de type n, est de faible épaisseur ( $\approx 0.2 \mu\text{m}$ ) et fortement dopé (environ  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ) afin d'obtenir un champ électrique suffisant dans la ZCE ( $\approx 0.3 \mu\text{m}$ ). L'épaisseur de la cellule doit être choisie de manière à ce qu'un maximum de photons soient absorbés par le silicium, tout en tenant compte des contraintes de découpe du matériau. Même si nous ne l'aborderons pas dans ce travail, il est intéressant de noter que les cellules photovoltaïques en silicium de type n suscitent actuellement un intérêt important et que de nombreuses recherches sont menées sur ce matériau jusqu'ici sous-estimé [5].

### II.2.2.3. Schéma électrique équivalent :

L'équation II.2, correspond à un cas idéal du fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

Pour tenir compte des limitations de la cellule et calculer le courant réellement délivré sur la charge du circuit extérieur, on introduit un modèle comportant une résistance série et une résistance parallèle. Ce modèle est représenté par le schéma électrique suivant

(Figure II.5) :



**Figure II.6 :** Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.

L'équation du courant devient :

$$I = I_1 + I_2 + \frac{V - IR_s}{R_p} - I_{ph} \dots \dots (II.3)$$

$$I = I_{01} \left( \exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{n_1 kT}\right) - 1 \right) + I_{02} \left( \exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{n_2 kT}\right) - 1 \right) + \frac{V - IR_s}{R_p} - I_{ph} \dots \dots (II.4)$$

Le schéma électrique équivalent d'une cellule solaire est ainsi composé d'une source de courant et de deux diodes en parallèle. La source de courant modélise le courant photo-généré  $I_{ph}$ .

La première diode (facteur d'idéalité  $n_1 \approx 1$ ) correspond au courant de diffusion dans la base et l'émetteur.  $I_{01}$  est le courant de saturation de ce phénomène.  $I_2$  est le courant de génération/recombinaison ou d'effet tunnel dans la zone de charge d'espace, avec  $I_{02}$  le courant de saturation et  $n_2$  le facteur d'idéalité de la seconde diode ( $n_2 \approx 2$ ).

Afin de modéliser les courants de fuite existant dans la structure, la résistance parallèle  $R_p$  est ajoutée. Ces courants de fuite peuvent avoir lieu par exemple sur les bords de la cellule ou à travers l'émetteur. La résistance parallèle doit être la plus élevée possible. La résistance série  $R_s$  modélise les pertes résistives dans la structure (base et émetteur), les résistances de contact aux interfaces métal/semi-conducteur et celles du métal à

proprement parler. Afin de limiter son influence sur le courant de la cellule,  $R_s$  doit être minimisée en optimisant les contacts métal/semi-conducteur et en diminuant la résistivité du matériau. Un compromis est à trouver entre cette dernière et la recombinaison des porteurs : un dopage trop élevé entraîne des recombinaisons trop importantes. Les valeurs de résistivité retenues sont comprises en général entre 0.5 et 5  $\Omega \cdot \text{cm}$  pour le substrat initial.

### **II.2.2.4. Caractéristiques électriques et paramètres de la cellule photovoltaïque :**

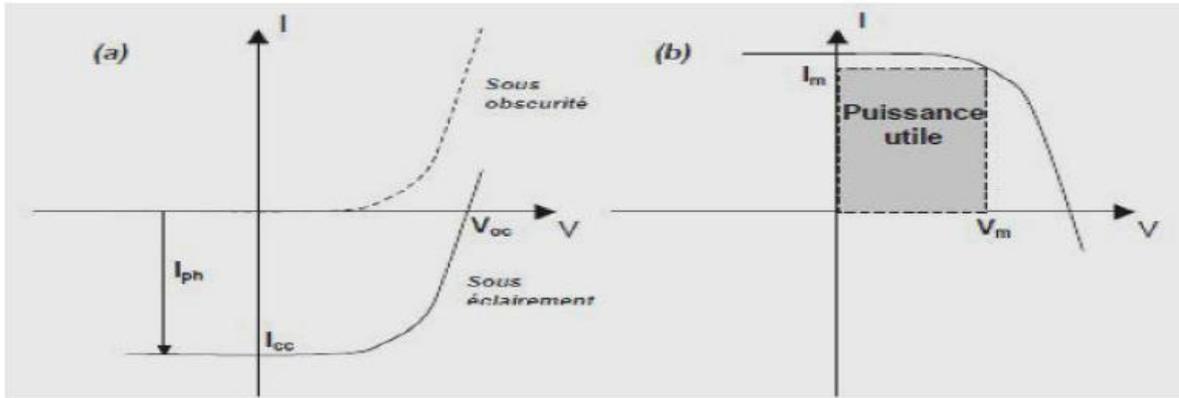
Afin d'obtenir un générateur électrique autonome, il faut donc, selon l'équation II.4, que la diode soit polarisée en direct. L'effet photovoltaïque est à la fois une création d'un photo-courant et d'une tension qui auto-polarise la diode en direct : on a génération d'une puissance électrique.

En effet, en circuit ouvert, la photo-génération de porteurs entraîne une augmentation du nombre d'électrons du côté n de la jonction et de trous du côté p. La séparation de ces charges induit un champ électrique opposé à celui déjà existant à la jonction. Un nouvel équilibre est obtenu pour lequel une tension existe entre les terminaux du circuit extérieur. C'est la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$ , pour laquelle le courant photo-généré et le courant d'obscurité se compensent exactement ( $I = 0$ ). C'est la tension maximale délivrable par la cellule solaire, permettant d'évaluer le nombre de recombinaisons dans la structure (plus  $V_{oc}$  est faible, plus il y a de recombinaisons).

Un autre paramètre important de la cellule est le courant de court-circuit  $I_{cc}$ . C'est le courant maximum que l'on peut extraire de la structure et correspond idéalement au courant photo-généré.

Ce courant dépend fortement du taux de génération optique  $G$  et de la longueur de diffusion  $L_D$  des porteurs (et donc des recombinaisons).

La caractéristique  $I(V)$  d'une cellule solaire est la superposition de celle de la diode sous obscurité et du courant photo-généré (voir Figure II.6.a). L'éclairement de la structure a pour effet de déplacer la courbe  $I(V)$  de la diode vers les courants inverses. Puisque la photodiode est considérée comme un générateur, la convention est d'inverser l'axe des courants, comme illustré par la Figure II.6.b. Notons que la cellule photovoltaïque n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement, seule la courbe  $I(V)$  est fixée. C'est la valeur de l'impédance de la charge aux bornes de la cellule qui va imposer le point de fonctionnement. Il est donc essentiel de choisir une charge telle que la puissance délivrée soit maximale.



**Figure II.7:** (a) Caractéristiques courant-tension de la cellule photovoltaïque sous éclairage et sous obscurité et (b) représentation conventionnelle de la courbe I(V).

**A) Facteur de forme FF :**

Le facteur de forme représente l'efficacité de la cellule ou encore, il peut nous renseigner sur le vieillissement de la cellule. C'est le rapport entre la puissance maximale débitée  $V_m \cdot I_m$  et la puissance idéale  $V_{co} \cdot I_{cc}$ , on le note :

$$FF = P_M / V_{oc} I_{cc} = V_M \cdot I_m / V_{oc} \cdot I_{cc} \dots (II.5)$$

Le maximum de puissance disponible est défini par la tension  $V_m$  et le courant  $I_m$ . La qualité électrique de la cellule est déterminée par le facteur de forme FF.

Le point de fonctionnement de la cellule sur la courbe I(V) est déterminé par l'impédance de la charge, qui, mal adaptée, n'utilisera pas toute la puissance disponible. Il est donc important de pouvoir travailler avec les valeurs  $V_m$  et  $I_m$  afin d'utiliser la puissance maximale.

**B) Rendement de conversion d'énergie  $\eta$  :**

Le rendement de conversion d'énergie est un autre paramètre important pour comparer les performances des photopiles. Il est défini par le rapport de la puissance

$$\eta = \frac{V_m \cdot I_m}{P_i S} = \frac{FF \cdot V_{co} \cdot I_{cc}}{P_i S} \dots (II.6)$$

Pour comparer de manière objective le rendement des cellules solaires, la puissance incidente doit être prise comme identique, par convention sous AM1.5 et à 25°C.

Enfin, afin de comparer la production photovoltaïque avec les autres sources d'énergie, la littérature utilise souvent l'unité Watt crête (W<sub>co</sub> W<sub>pen</sub> anglais pour peak Watt). Elle correspond à la puissance nominale d'une cellule ou d'un module photovoltaïque dans des conditions d'ensoleillement standard (AM1.5).

## II.4. Rendement quantique et réponse spectrale :

Le facteur de forme et le rendement renseignent sur les performances globales de la structure. Pour détailler ces caractéristiques en fonction de la longueur d'onde utilisée, le rendement quantique est introduit.

Le rendement quantique externe est le rapport du nombre de porteurs collectés sur le nombre de photons incidents d'une énergie donnée. Si chaque photon d'une longueur d'onde précise génère un porteur de charge effectivement collecté, le rendement quantique vaut l'unité. Comme nous l'avons vu précédemment, le coefficient d'absorption du silicium varie avec la longueur d'onde du rayonnement.

Les photons de faible longueur d'onde sont absorbés près de la surface (vers la zone d'émetteur) alors que ceux de forte longueur d'onde sont plus en profondeur du dispositif (au niveau de la base). On peut donc accéder au comportement et à l'efficacité de chaque région constitutive de la cellule. Ainsi, ce paramètre est diminué par plusieurs facteurs : les phénomènes de recombinaison en surface et en volume y jouent une part importante. La réflexion sur la face avant et la faible longueur de diffusion des porteurs ont pour conséquence de diminuer le rendement quantique sur toute la gamme de longueurs d'onde (Figure II.13).

Le paramètre présenté ici tient compte des pertes optiques comme la réflexion ou la transmission à travers la cellule : c'est le rendement quantique externe (EQE pour external quantum efficiency). Il peut être corrigé des pertes optiques pour donner le rendement quantique interne (IQE) qui tient compte des caractéristiques propres de la cellule (longueur de diffusion, recombinaisons en surface et en volume) : 
$$IQE = \frac{EQE}{1-R} \dots \dots \dots (II.7)$$

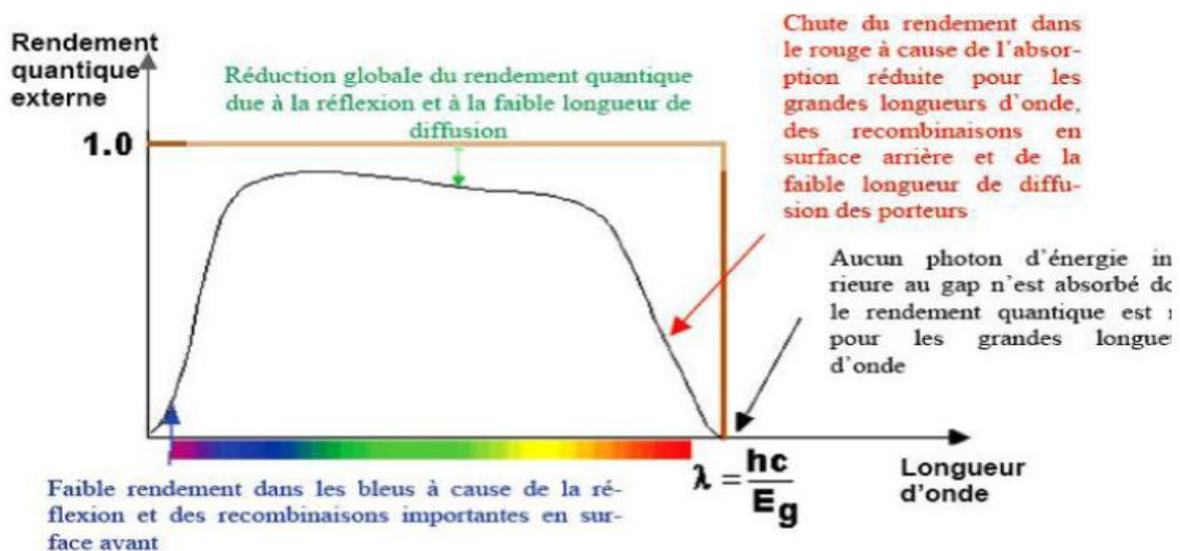


Figure II.8 : Rendement quantique externe d'une cellule photovoltaïque [6].

La réponse spectrale (SR pour spectral response) est, de manière analogue, le rapport de l'intensité  $I(\lambda)$  générée par la cellule sur la puissance incidente  $P_{inc}(\lambda)$ , pour chaque

$$\text{longueur d'onde } SR = \frac{I(\lambda)}{P_{inc}(\lambda)} = \frac{I(\lambda)}{\phi(\lambda).S} \dots\dots\dots(\text{II.8})$$

Où  $\phi(\lambda)$  est le flux lumineux incident ( $\text{W.m}^{-2}$ ) et  $S$  est la surface de la cellule ( $\text{m}^2$ ).

C'est en général cette grandeur qui est mesurée et qui permet de calculer le rendement quantique, en prenant en compte l'énergie des photons :  $SR = \frac{q\lambda}{hc} EQE \dots\dots\dots(\text{II.9})$

### II.5. Définition d'une couche mince :

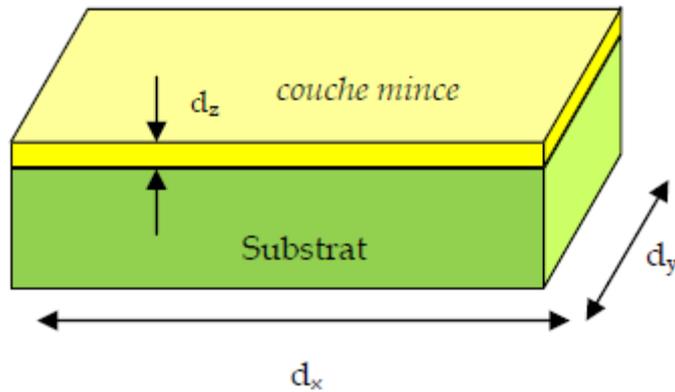
Une couche mince d'un matériau donné est un élément de ce matériau dont l'une des dimensions qu'on appelle l'épaisseur a été fortement réduite de telle sorte qu'elle s'exprime en Angstrom  $\text{\AA}$  et que cette faible distance entre les deux surfaces limites (quasi bidimensionnelle) entraîne une perturbation de la majorité des propriétés physiques [7].

La différence essentielle entre le matériau à l'état massif et à l'état de couche mince est liée au fait que dans l'état massif on néglige généralement, avec raison, le rôle dans les propriétés, tandis que dans une couche mince ce sont au des limites contraire les effets liés aux surfaces limites qui sont prépondérants. Il est assez évident que plus que plus l'épaisseur sera faible et plus cet effet de bidimensionnalité sera important. Inversement lorsque l'épaisseur d'une couche mince dépassera un certain seuil, l'effet d'épaisseur deviendra minime et le matériau retrouvera les propriétés bien connues du matériau massif [8].

Une couche mince est généralement déposée sur un support appelé *substrat*, c'est-à-dire qu'elle n'est pas *autoportante*. Toutefois, certaines couches peuvent être séparées de leur substrat et étudiées ou utilisées telles quelles.

Par ailleurs, il faut savoir que ces revêtements de faible épaisseur peuvent modifier les propriétés du substrat sur lesquels ils sont déposés.

En résumé, une couche mince possède donc une *épaisseur dz très faible devant les dimensions latérales, dx et dy.*



**Figure II.9:** couche mince et substrat

### II.6 Principaux domaines d'application des couches minces :

Les couches minces sont actuellement utilisées dans divers domaines. Sans être exhaustifs, on peut citer les domaines suivants :

- production d'énergie solaire par conversion photovoltaïque : utilisation de matériaux de différents types de conduction électrique (généralement des matériaux semi-conducteurs de types  $n$  et  $p$ ) pour transformer directement la lumière en énergie électrique (exemple: fabrication de cellules solaires de grandes dimensions à base de silicium amorphe).
- en microélectronique pour la fabrication de composants passifs (résistances, condensateurs de très haute précision et stabilité), de composants actifs utilisés par exemple pour la réalisation d'écrans plats (électronique d'adressage des écrans plats LCD et OLED à base de transistors TFT : Thin Film Transistors).
- fabrication de revêtements optiques : revêtements anti-réflexion, filtres de toutes sortes, polariseurs, etc. [9]

### II.7 Propriétés spéciales des couches minces :

Un certain nombre de propriétés physiques des couches minces sont bien différentes de celles des matériaux massifs.

Par rapport aux matériaux massifs dont elles sont issues, les couches minces :

- sont fortement influencées par les effets de surface et d'interface (avec le substrat ou entre les différentes couches s'il s'agit de structures multicouches minces).
- sont souvent peu denses.
- présentent des défauts structuraux différents.
- peuvent faire l'objet de tensions ou *stress* en raison de l'existence éventuelle de différences avec les caractéristiques physiques du substrat. Par exemple, la couche

mince et son substrat peuvent avoir des coefficients de dilatation thermique assez différents, ce qui produit un stress lors du dépôt à des températures élevées ou lors d'un recuit thermique. Ce qu'on entend par stress, est le fait que les atomes du matériau sont déplacés de leurs positions d'équilibre par une force.

- peuvent être obtenues à deux dimensions (exemple : le graphène où l'épaisseur est celle d'une couche atomique).

Ces propriétés spéciales changent sensiblement les propriétés électriques, magnétiques, optiques, thermiques et mécaniques.

### **II.8 Techniques de dépôt des couches minces :**

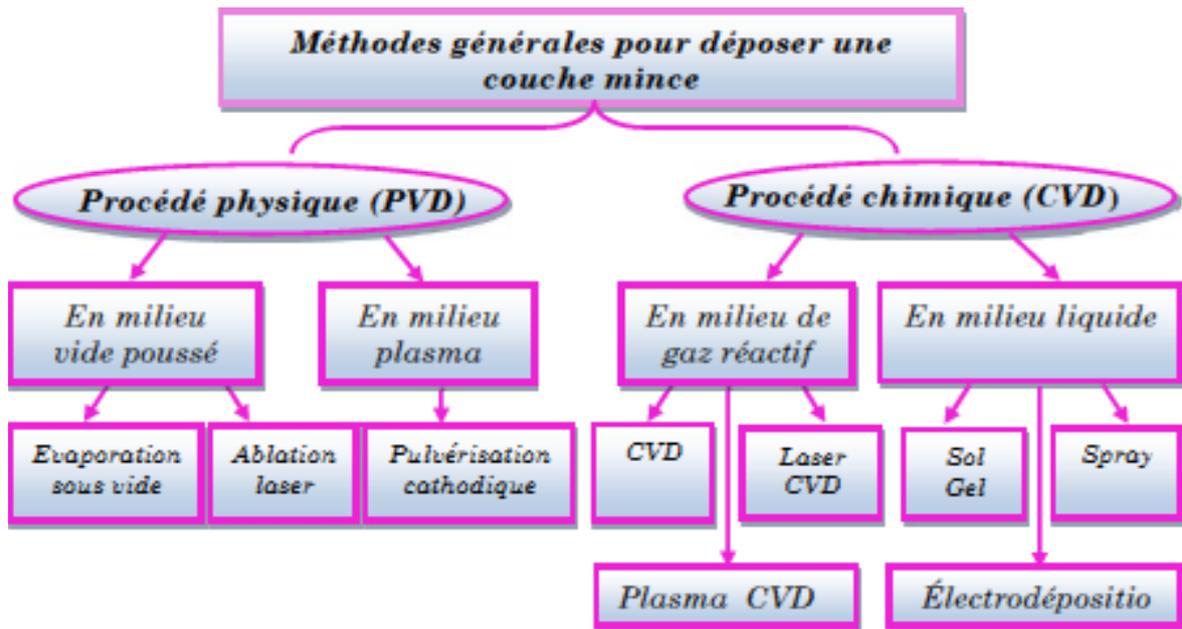
On distingue deux grandes catégories de méthodes d'élaboration de couches minces : les méthodes physiques, telles que la pulvérisation ou l'évaporation, et les méthodes chimiques, comme le dépôt chimique en phase vapeur (connue sous l'acronyme anglais de CVD pour Chemical Vapor Deposition). [10]

Les méthodes physiques sont en général utilisées en recherche, alors que les méthodes chimiques sont également utilisées industriellement, à cause de leur meilleur rendement (vitesse de dépôt plus grande).

Les méthodes de dépôt par voie physique sont l'acronyme anglais PVD (Physical Vapor Deposition). [11]

Ce sont principalement :

- l'évaporation thermique (Thermal Evaporation)
- la pulvérisation cathodique (Sputtering)
- l'ablation laser (PLD : Pulsed Laser Deposition)
- l'épitaxie par jets moléculaires (MBE : Molecular Beam Epitaxy)



**Figure II.10:** Classification des procédés de dépôt de couches minces.

### II.9.Conclusion :

Pour plonger bien dans le domaine photovoltaïque et apprendre les principes de bases il faut seulement comme un début mesurer la caractéristique courant-tension, aussi connaître les techniques générales de caractérisation d'une cellule solaire, nous avons vu dans ce chapitre les caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque (courant-tension et puissance-tension).

Le troisième chapitre on va parler sur les couches minces et leurs applications et les techniques des dépôts.

### **Référence :**

- [1] CHAPIN D.M., FULLER C.S., PEARSON G.L. A new siliconpnjunctionphotocell forconvertingsolar radiation intoelectrical power. J. Appl. Phys., 1954, Vol. 25, pp. 676-677.
- [2] D.R. di Valdalbero, ‘La Recherche Energétique Européenne: Pont de Coopération sur la Méditerranée’, Liaison Energie-Francophonie, N°71, Energie et Développement Durableen Méditerranée, pp. 71 - 76, 2ème Trimestre 2006.
- [3] Sze S.M. SemiconductorDevices. New York : John Wiley, 1981, 867 p.
- [4] <http://pveducation.org/pvcdrom>
- [5] MARTINUZZI S., PALAIS O., PASQUINELLI M. and FERRAZZA F. N-type multicrystallinesilicon wafers and rearjunctionsolarcells. The EuropeanPhysical Journal– AppliedPhysics, 2005,vol. 32, pp. 187-192.
- [6] HONSBURG C. and BOWDEN S. Photovoltaics: Devices, Systems and Applications [CDROM]. Sydney, Australia : University of New South Wales, 1998.
- [7] C. M. Ghimbeu, Préparation et Caractérisation de couches minces d’oxydes Métalliques semi conducteurs pour la détection de gaz Polluants atmosphériques, Thèse doctorat. Université Paul Verlaine de Metz, (2007).
- [8] T. Dauszhenka, Couches minces d’oxyde d’etain : la localisation faible et les effets de l’interaction, Thèse doctorat. Université de Toulouse, (2011).
- [9] K. L. Chopra. S. Major, D. K. Panday, Thin Solid Films. (1983) 102-105.
- [10] Y. Natsume, H. Sakata, T. Hirayama and H.J. Yanagita, Phys. Status Solidi a, 148, 485(1995).
- [11] C.J. Brinker, G.C. Frye, K.J. Ward, and C.S. Ashley, J. Non-Cryst. Solids, 121, 1-3, 294(1994 )

---

# *CHAPITRE III*

---

**Résumé :**

*Le troisième chapitre est dédié la description de logiciel PC1D et simuler les deux structure p et n et faire une comparaison entre les deux.*

### III.1 Introduction :

Nous présentons dans ce chapitre les résultats de la simulation numérique des rendements et des caractéristiques électriques, courant-tension, d'une cellule solaire en silicium cristallin. Une comparaison entre la structure **n-p** et **p-n** de la cellule est effectuée pour constater laquelle des deux structure présente le meilleur rendement de conversion. Pour chaque structure, on a fait également une étude de l'effet de l'épaisseur et du dopage de l'émetteur et du collecteur et durée de vie et la vitesse de recombinaison face avant et face arrière sur les paramètres de sortie de la cellule qui sont, la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  , le courant de court circuit  $I_{cc}$  , et le rendement de conversion  $\eta$ .

### III.2 Description du logiciel PC1D :

#### III.2.1 Aperçu du logiciel

Le programme PC1D (personnel computer one-dimensionnel) a été élaboré par Paul A. Basore durant ses travaux de recherche à la faculté d'ingénierie électrique à l'université d'Iowa, et fut rendu public, pour la première fois, après l'avoir annoncé à la 18ème conférence sur le photovoltaïque IEEE PVSC (décembre 1985).

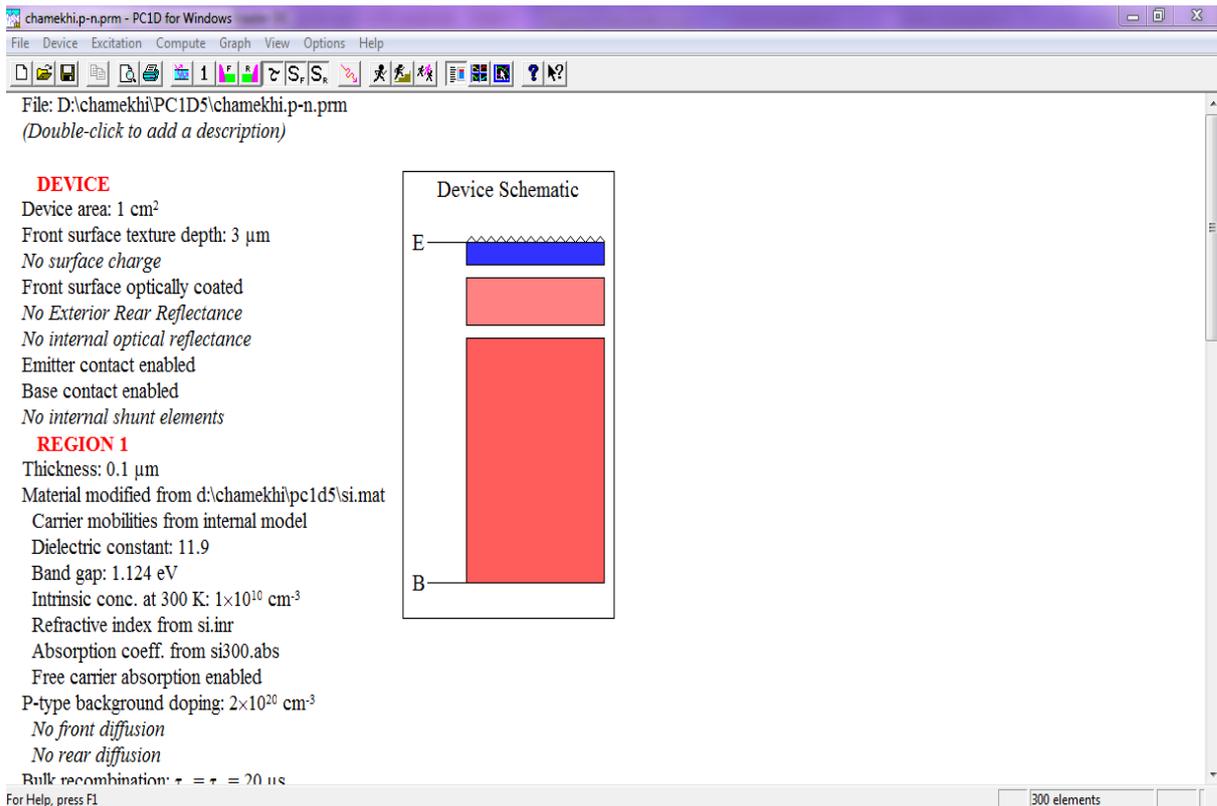
Le PC1D est l'un des programmes qui a été élaboré pour modéliser et exploiter les composants semi-conducteurs, notamment les composants photovoltaïques. Il est capable de résoudre les équations couplées non linéaires qui gouvernent les phénomènes physiques du dispositif étudié.

A l'aide du PC1D, la compréhension des cellules solaires et leurs phénomènes physiques internes tels que le mouvement des porteurs minoritaires la recombinaison et la photo-génération, devient aisée. Les résultats de la simulation, sont très proches des résultats expérimentaux, donc c'est un gain de temps et d'argent.

#### III.2.2 L'environnement de PC1D :

La fenêtre du logiciel PC1D est présentée sur la Figure IV.1, ce logiciel se divise en quatre parties, les trois premières sont pour la programmation ; où il faut introduire les paramètres du dispositif, des régions et de l'excitation. La quatrième partie concerne les résultats de la simulation.

## Chapitre III : Résultats et discussion



**Figure III.1 :** Fenêtre du logiciel PC1D utilisé en simulation numérique

### III.2.3 Les paramètres du dispositif (Devise) :

La surface du dispositif est très importante car elle influe beaucoup plus le courant photo-généré. Dans notre simulation, nous avons choisis une surface de 1cm<sup>2</sup> [1].

Les surfaces texturées utilisées dans toutes les structures étudiées sont composées de micro pyramides inversées de profondeur de 3 μm et d'angle facial de 54.74 , pour diminuer les pertes par réflexion du rayonnement incident la texturisation de surface es très importante .On peut texturer seulement la face avant ,si l'autre face considérée à l'obscurité.

Les couches antireflets sont généralement de la silice (sio2), elle peut être remplacée par d'autres matériaux qui sont transparent au spectre solaire et qui sont donné dans le logiciel sous forme fichiers. Nous considérons que les surfaces des cellules sont spéculaire et non diffuses .par défaut, l'émetteur et la base sont connecté au circuit tandis que le collecteur est déconnecté.[ 2]

### III.2.4 Les paramètre des régions :

L'épaisseur de l'émetteur est relativement mince par rapport à la base .dans le cas du silicium elle varie sur un intervalle compris entre 0.1  $\mu\text{m}$  et 1  $\mu\text{m}$

Concernant les matériaux utilisés. Tous les paramètres qui le décrivent sont stockés dans des fichiers d'extension (\*.mat), ils sont fourni par la suite par le logiciel dans une disquette.

Les paramètres stockés dans un fichier sont donnés comme suit :

- La mobilité : le modèle utilisé est le modèle de Thuber et Al 1981
- La constante diélectrique.
- L'énergie de gap (eV).
- La concentration intrinsèque ( $\text{cm}^{-3}$ )
- L'indice de réfraction
- Coefficient de l'absorption
- Type et concentration de dopage étudiés sont de type n ou p , Ce logiciel présente quatre profils de dopages : le profil uniforme , le profil exponentiel, le profil gaussien et le profil erfc.
- Les recombinaisons en volume utilise un modèle basé sur la statistique de Read Shockley-Hall qui décrit les recombinaisons par piège situées dans la bande de valence
- Les recombinaisons face avant et arrière [1]

### III.3 Le fonctionnement du logiciel PC1D :

Après l'introduction de toutes les données nécessaires au matériau étudié, ainsi que la configuration de la cellule solaire, le simulateur permet d'obtenir des résultats.

Le fonctionnement du PC1D nécessite plusieurs critères à respecter :

- 1- Le choix des gammes de valeurs des différents paramètres n'est pas aléatoire, elles doivent être réalisables par la technologie.
- 2- Pour des considérations numériques, les valeurs à introduire, doivent être comprises dans des intervalles biens déterminés.
- 3- Pour une convergence rapide, il est indispensable de minimiser au maximum la taille des éléments finis, et choisir un nombre adéquat des itérations.

4- Le bon choix des paramètres numériques.

5- Une initialisation convenable des différents paramètres de la simulation.

Ces critères sont nécessaires dans chaque simulation, mais ils ne sont pas suffisants.

Plusieurs fichiers externes sont aussi obligatoires pour exécuter le programme, nous citons, à titre d'exemple, la sélection des fichiers caractérisant chaque matériau, tels que celui du coefficient d'absorption (\*.abs), et celui de l'indice de réfraction (\*.inr).

Le choix des fichiers d'excitation (\*.exc) sont aussi nécessaires avant l'exécution, ces fichiers spécifient l'étude à faire, soit en obscurité (dark-iv-exc.), ou bien sous illumination, dans le dernier cas on trouve deux fichiers (one-sun.exc, scan-qe.exc).

La sélection du fichier (one-sun.sxc) permet le calcul des caractéristiques (**I-V**, **P-V**)

On obtient également le rendement  $\eta$  et le facteur de forme FF.

Le fichier (scanqe.exc) permet le calcul de la réponse spectrale.

Ils existent plusieurs spectres solaires standards, chacun d'eux spécifie l'endroit de l'étude, par exemple, dans les études spatiales on choisit le spectre AM0, l'air masse AM1.5 pour les

Le PC1D utilise trois spectres différents (am0.spc, am1.5g.spc, am1.5.spc).

### III.4 Structure à simuler :

Nous avons simulé des cellules à homo-jonction du type  $n^+ p p^+$  et  $p^+ n n^+$  de surface  $1\text{cm}^2$  avec une texturation à la surface pour optimiser le captage du rayonnement et après on va faire une comparaison entre la structure **p-n** et **n-p** de la cellule est effectuée pour constater laquelle des deux structures présente le meilleur rendement de conversion.

### III.5 Cellule solaire p-n :

La figure III -2 représente la structure et les paramètres de la 1<sup>er</sup> cellule (p-n) de référence pendant la simulation :

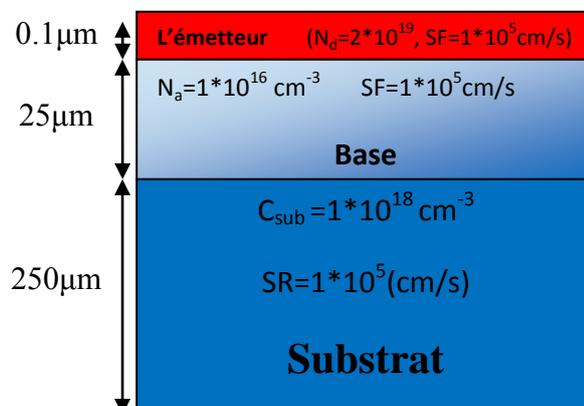


Figure III.2 : structure et paramètres de la 1<sup>er</sup> cellule p-n de référence

### III.5-1 paramètres de la structure (p-n) simulée :

Le tableau suivant représente les paramètres de la cellule (p-n) de référence

|                                           |                  |
|-------------------------------------------|------------------|
| <b>Couche anti reflet</b>                 |                  |
| $n_{\text{car}}$                          | 2.01             |
| $d_{\text{car}}(\text{nm})$               | 75               |
| <b>Texturisation</b>                      |                  |
| Angle( $^{\circ}$ )                       | 54.74 $^{\circ}$ |
| Depth ( $\mu\text{m}$ )                   | 3                |
| <b>Emetteur</b>                           |                  |
| Epaisseur de l'émetteur ( $\mu\text{m}$ ) | 0.1              |
| $N_d(\text{cm}^{-3})$                     | $1*10^{19}$      |
| <b>Profil de diffusion</b>                | Erfc             |
| <b>Base</b>                               |                  |
| $N_a(\text{cm}^{-3})$                     | $1*10^{16}$      |
| $\tau$ ( $\mu\text{s}$ )                  | 0.9              |
| Epaisseur de la base ( $\mu\text{m}$ )    | 25               |
| <b>Substrat</b>                           |                  |
| $X_{\text{sub}}$ ( $\mu\text{m}$ )        | 250              |
| $C_{\text{sub}}$ ( $\mu\text{m}$ )        | $1*10^{18}$      |
| <b>Passivation</b>                        |                  |
| $S_F$ (cm/s)                              | $1*10^5$         |
| $S_R$ (cm/s)                              | $1*10^5$         |

**Tableau III.1 :** les paramètres de la cellules (p-n) de référence.

d'abord on va développer un intervalle limité de chaque paramètre pour obtenir des valeurs optimales de la cellules , comme indiqué dans le tableau III.2

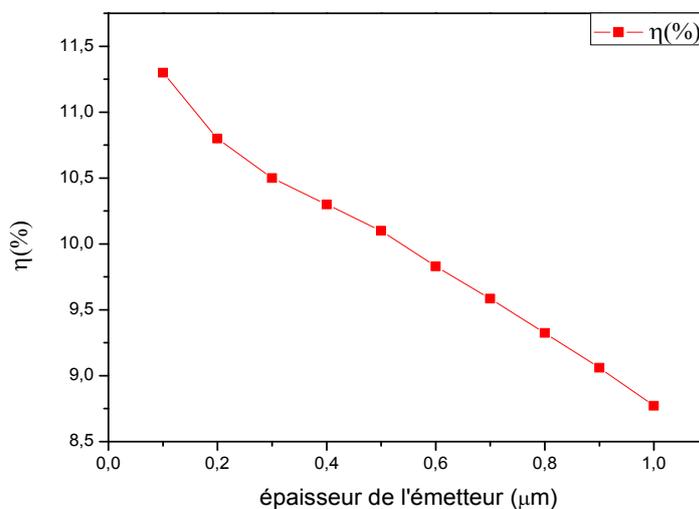
| Paramètre                                | Valeur minimale           | Valeur maximale             |
|------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| L'épaisseur de l'émetteur                | 5μm                       | 100 μm                      |
| Dopage de de l'émetteur                  | 0.1 μm                    | 1 μm                        |
| L'épaisseur de la base                   | $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ | $2*10^{21} \text{ cm}^{-3}$ |
| Dopage de de la base                     | $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ | $5*10^{17} \text{ cm}^{-3}$ |
| Durée de vie                             | 0.1 μs                    | 100 μs                      |
| La vitesse de recombinaison face avant   | 10 cm/s                   | $10^7 \text{ cm/s}$         |
| La vitesse de recombinaison face arrière | 10 cm/s                   | $10^7 \text{ cm/s}$         |

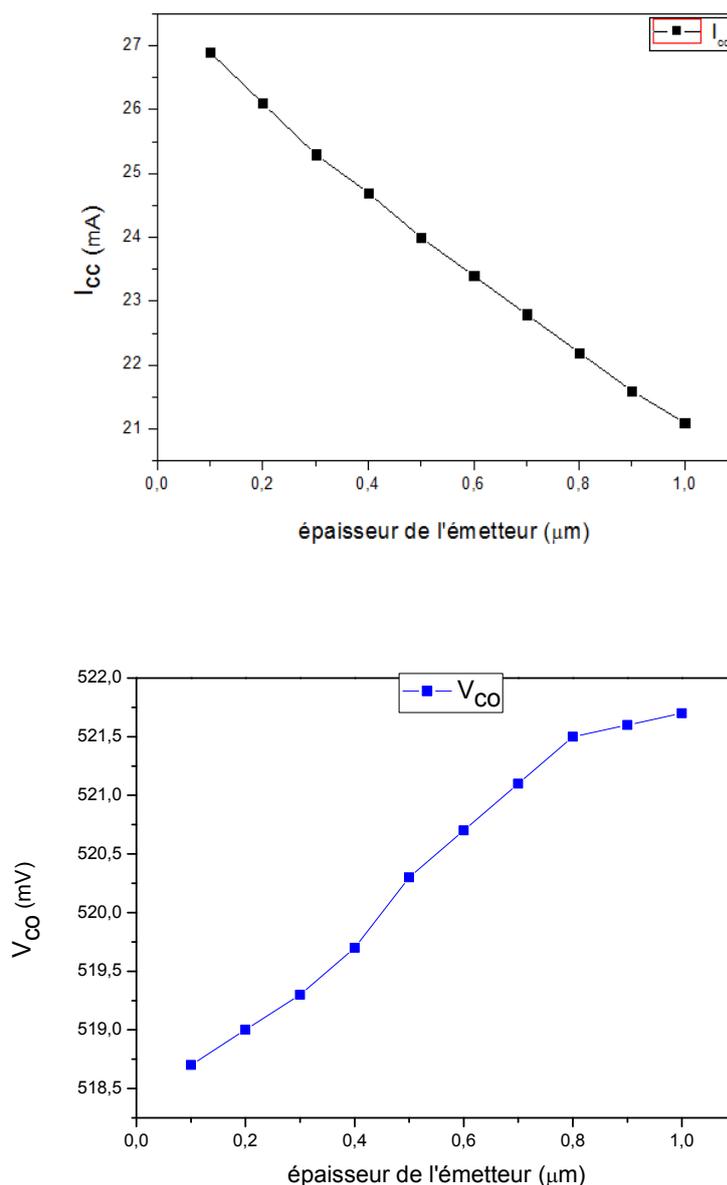
**Tableau III.2:** paramètres des variables pendant la simulation

### III.6 Influence de l'émetteur sur le rendement des cellules solaires utilisées :

Pour étudier l'influence de l'épaisseur de l'émetteur et du dopage de celui-ci sur le rendement de nos cellules solaire, Nous avons fixé tous les paramètres regroupé dans le tableau IV.2 et varier seulement l'épaisseur de l'émetteur ainsi que le dopage de celui-ci, Les résultats obtenus sont présentés sur les figures III.3 et III.4.

#### III.6.1 Effet de l'épaisseur :



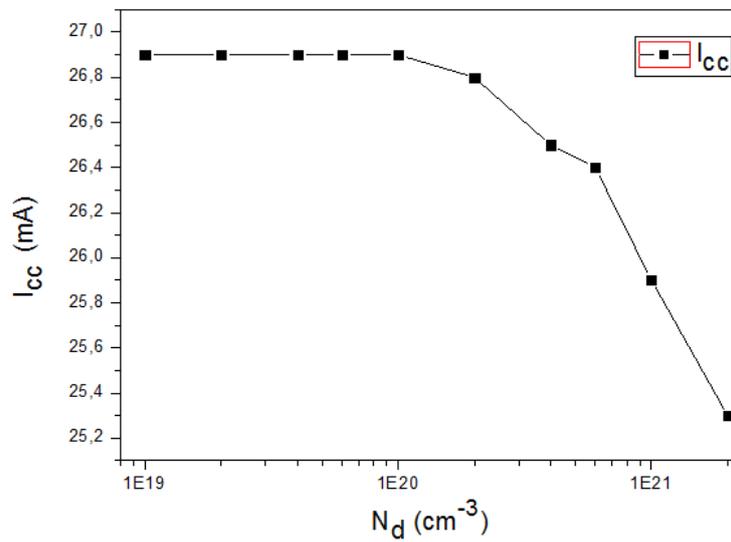
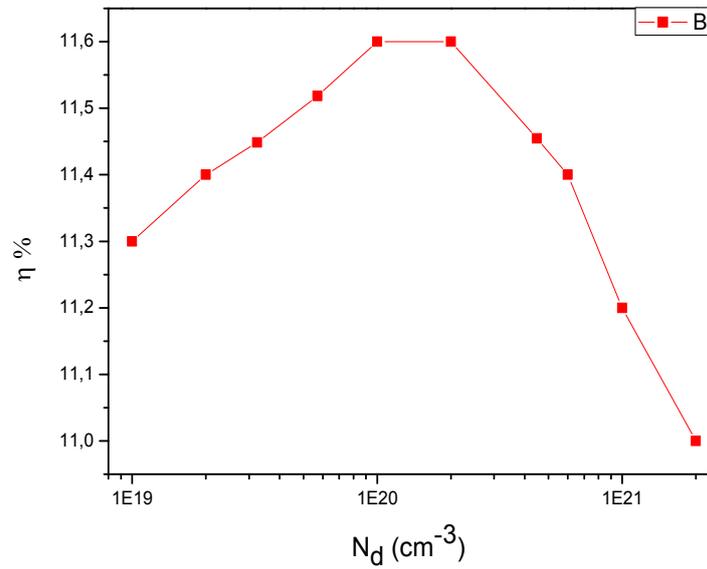


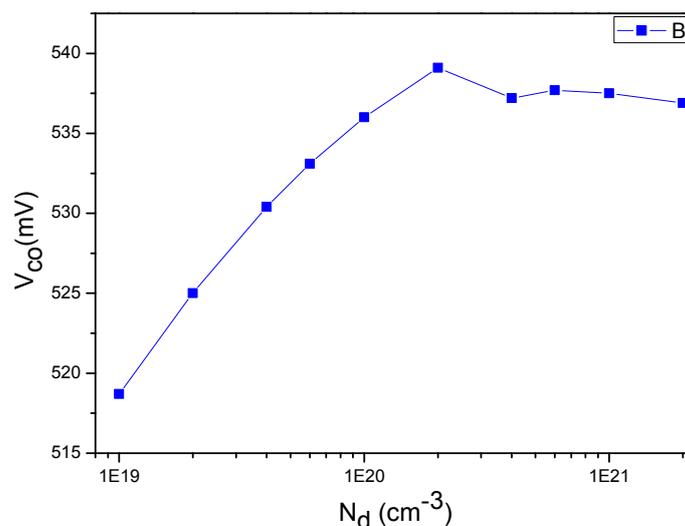
**Figure III.3:** Variation du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur de l'émetteur.

Comme on peut le voir sur la figure (III.3), l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur entraîne croissance de la tension de circuit ouvert et une décroissance du courant de court circuit et par suite le rendement. On peut expliquer ça que l'émetteur est de type n, l'augmentation de l'épaisseur de cette région influe la densité des porteurs minoritaires photo-générés qui sont les trous. Plus la région est épaisse, plus la recombinaison des porteurs minoritaires est avantagée, puisqu'ils doivent parcourir plus de distance pour

atteindre la jonction et soient expulsées par le champ de la zone de déplétion pour atteindre la région p où ils deviennent majoritaires.

### IV.6.2 Effet du dopage ( $N_d$ ) de l'émetteur :





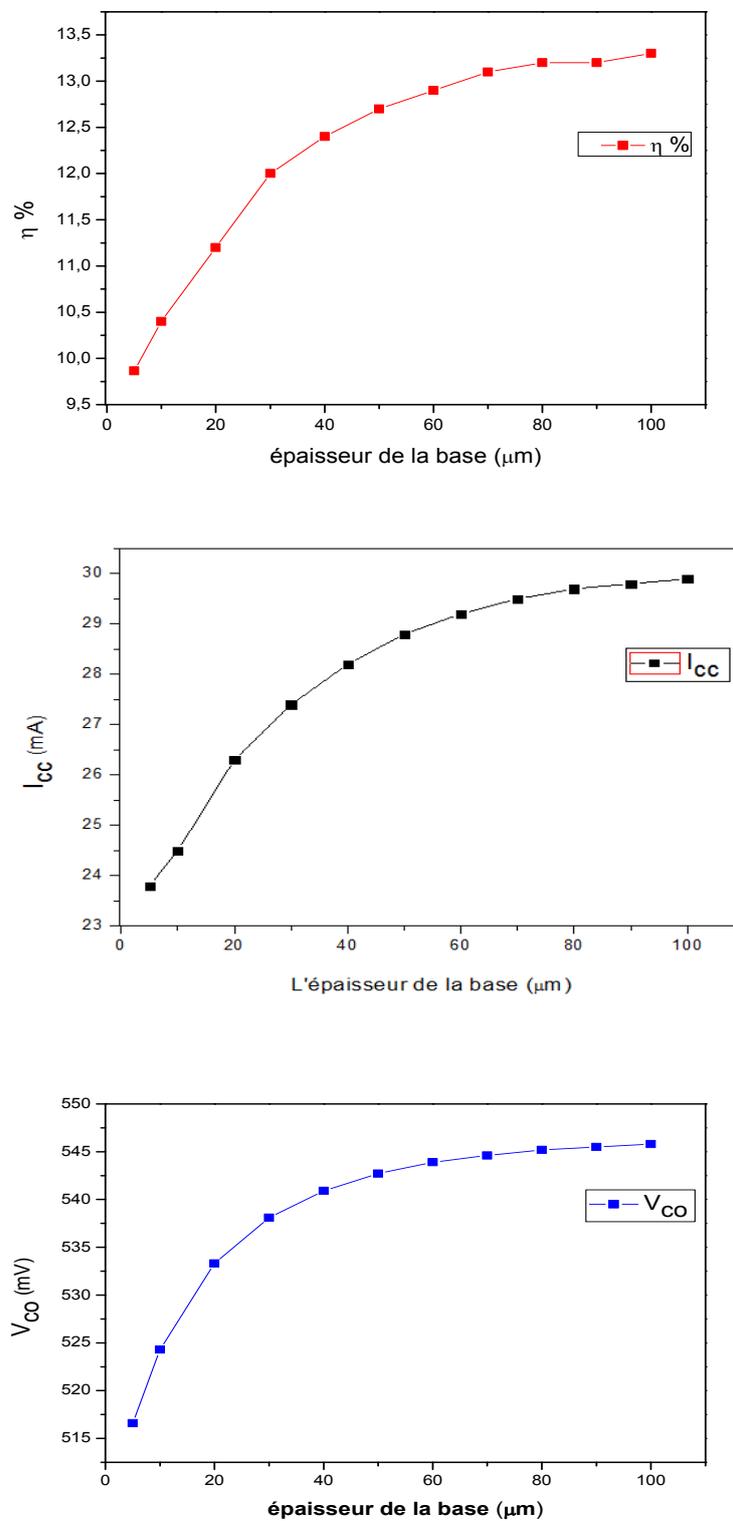
**Figure III.4 :** Variation du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de dopage de l'émetteur.

La figure III.4 illustre l'influence de dopage de l'émetteur sur la rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert, où nous avons vu que  $I_{cc}$  est insensible à la variation du dopage de l'émetteur.  $V_{oc}$  augmente de 0.518 à 0.536 V, et finalement une amélioration dans le rendement de conversion est remarquée. C'est à dire une augmentation jusqu'à une valeur optimale de 11.6 % et après une diminution jusqu'à 11.0 à cause de la décroissance de la barrière de potentiel et faisant diminuer la zone de charge d'espace ce qui entraîne la décroissance du champ séparateur.

### III.7 Influence de la base (collecteur) sur le rendement des cellules solaires utilisées :

Afin d'étudier l'effet de l'épaisseur de la base et du dopage de celui-ci sur le rendement de nos cellules solaire , Nous avons fixé tous les paramètres regroupé dans le tableaux IV.2 et varier seulement l'épaisseur de la base ainsi que le dopage de celui-ci. Les résultats obtenus sont sur la figure III.5 et III.6.

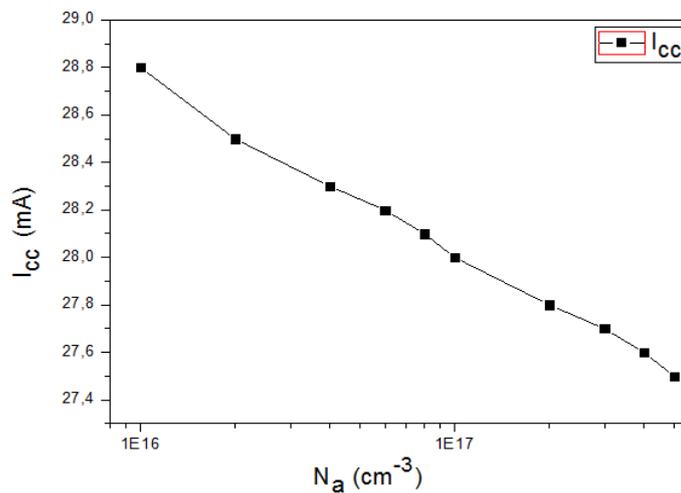
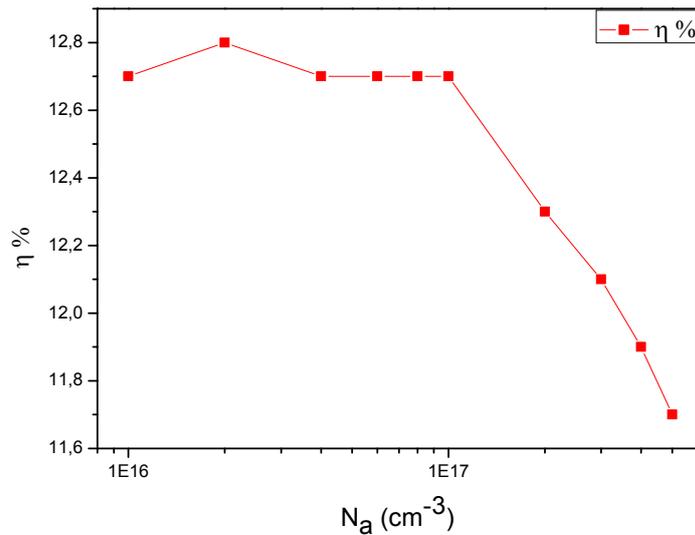
### III.7.1 Effet de l'épaisseur :

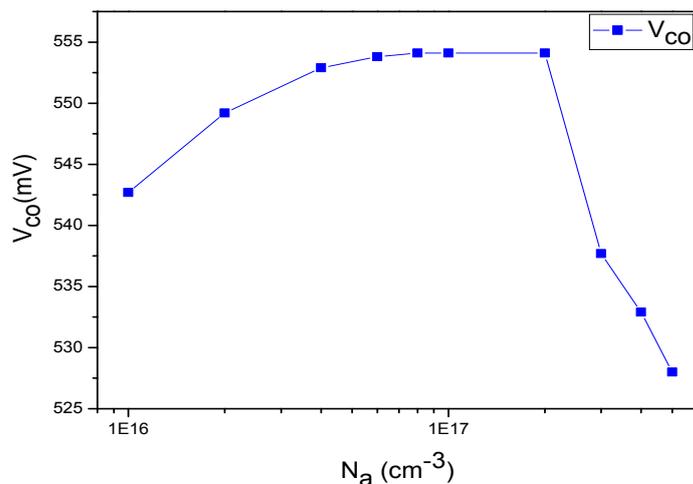


**Figure III.5 :** Variation du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur de la base .

D'après la Figure III -5, quand l'épaisseur du collecteur passe de 10 à 100  $\mu\text{m}$ , il y a une amélioration dans tous les paramètres de sortie de la cellule. Le rendement, en particulier, augmente de 9.86 à 13.3%. puisque l'augmentation de l'épaisseur du collecteur favorise l'absorption et la photo-génération des porteurs libres par la lumière.

### III.7.2 Effet du dopage ( $N_a$ ) de la base :

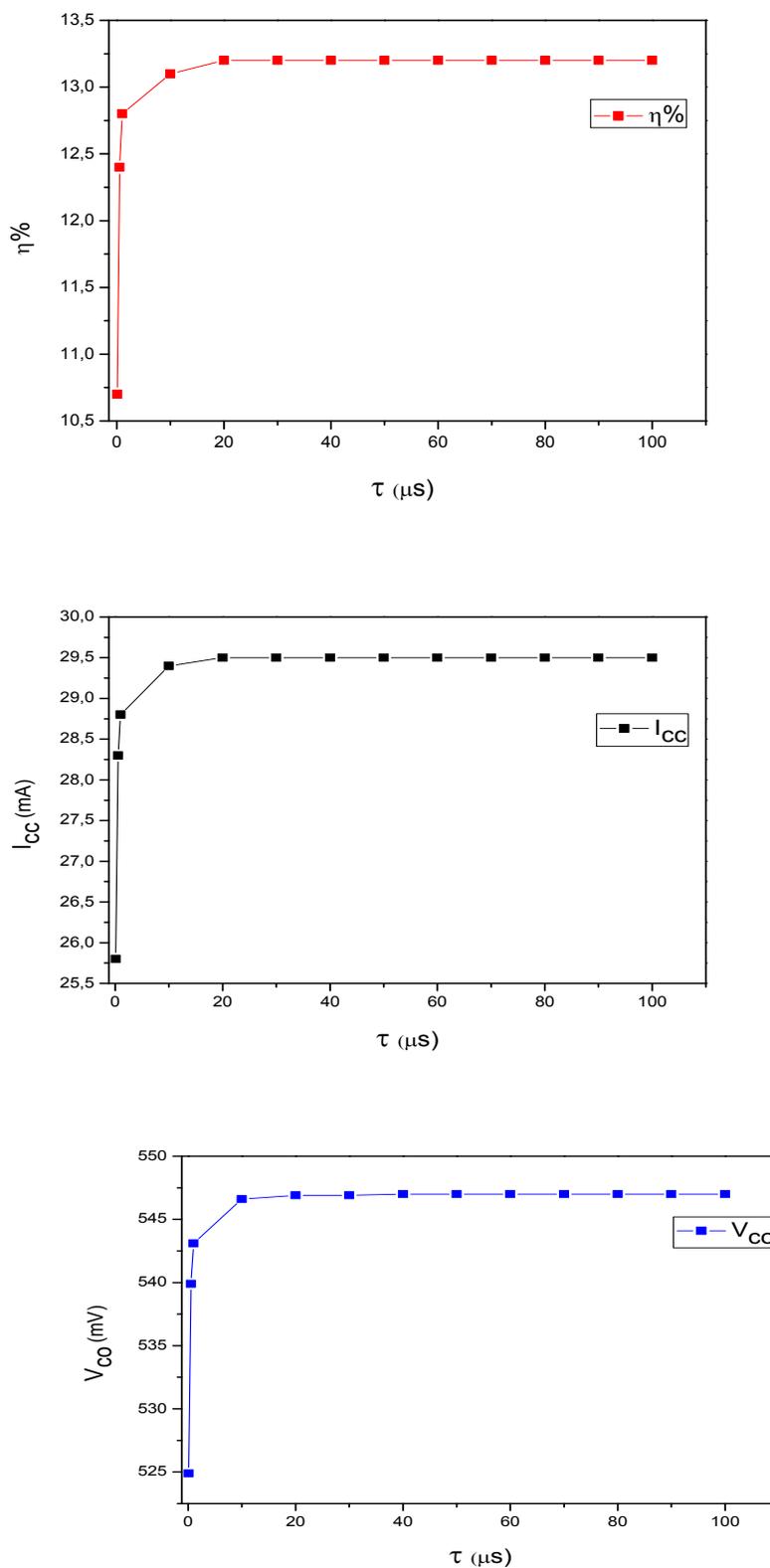




**Figure III.6:** Variation du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de dopage de la base.

La Figure III-6 illustre Le fait d'augmenter le dopage de la région **p** qui constitue le collecteur, on remarque une certaine diminution dans  $I_{cc}$  et pour  $V_{CO}$  on voit une augmentation et après une diminution, cependant le rendement de la cellule passe de 12.7% à 11.7 %. La légère diminution dans  $I_{cc}$  peut être expliquée comme suit: l'augmentation du dopage du collecteur entraîne un rétrécissement de la largeur de la zone de déplétion qui se produit dans la région du collecteur. Par la suite la collecte des porteurs photo-générés sera affectée, puisque c'est le champ interne de la zone de déplétion qui assure la dissociation et la collecte des électrons et des trous photo-générés. Mais comme l'augmentation du dopage d'un autre côté renforce la différence de potentiel entre les régions **n** et **p**, alors  $V_{oc}$  et augmentent et de même pour le rendement.

### III.8 Effet de la durée de vie des porteurs minoritaires :



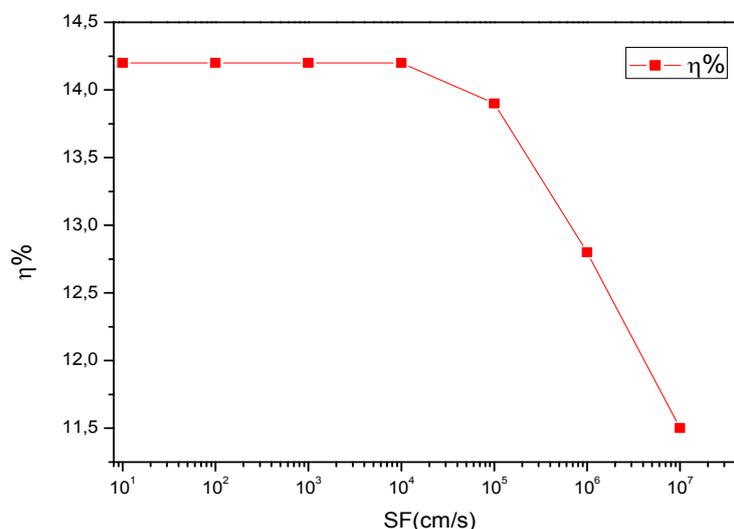
**Figure III.7 :** Variation du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de la durée de vie.

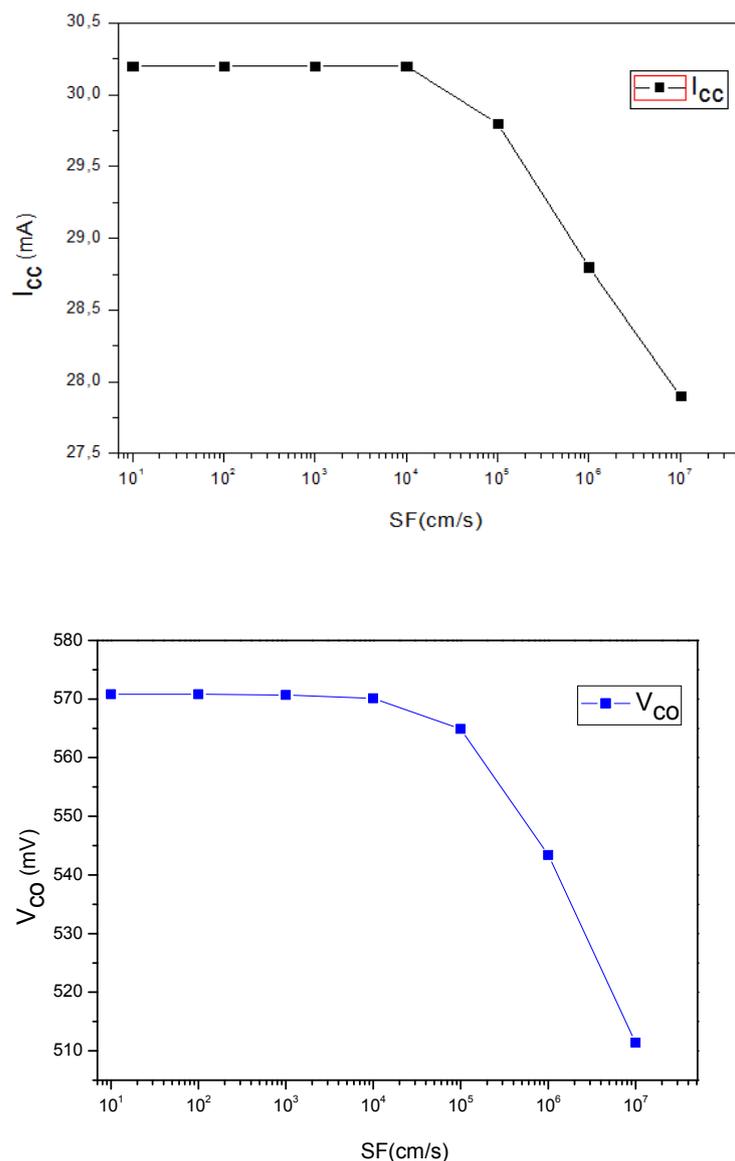
D'après les résultats obtenus, on constate que les paramètres de la cellule (rendement,  $I_{cc}$  et  $V_{CO}$ ) dépendent fortement de la durée de vie ( $\tau$ ) sur la figure III-7. Nous constatons dans l'intervalle de  $0.1\mu s$  et  $20\mu s$  que le rendement de nos cellules augmente car il n'y a pas de recombinaison des porteurs de charge, ensuite le rendement va d'être constant, il y a présence de recombinaison des porteurs de charges en volume.

### III.9 Influence de la couche de passivation :

pour étudier l'influence de la couche de passivation (SF) et (SR) de la cellule solaire sur les performances de nos cellules solaires. Nous avons fixé tous les paramètres cités précédemment dans le tableau III.2 et nous avons varié la vitesse de recombinaison de la face avant (SF) de nos cellules et de vitesse de recombinaison face arrière (SR). D'après les résultats obtenus, présentés sur la figure III-8 nous pouvons conclure que la vitesse de recombinaison face avant (SF) de la cellule est un facteur dominant car il influence beaucoup plus les paramètres de sortie de nos cellules.

#### III.9.1 Effet de la variation (SF) :

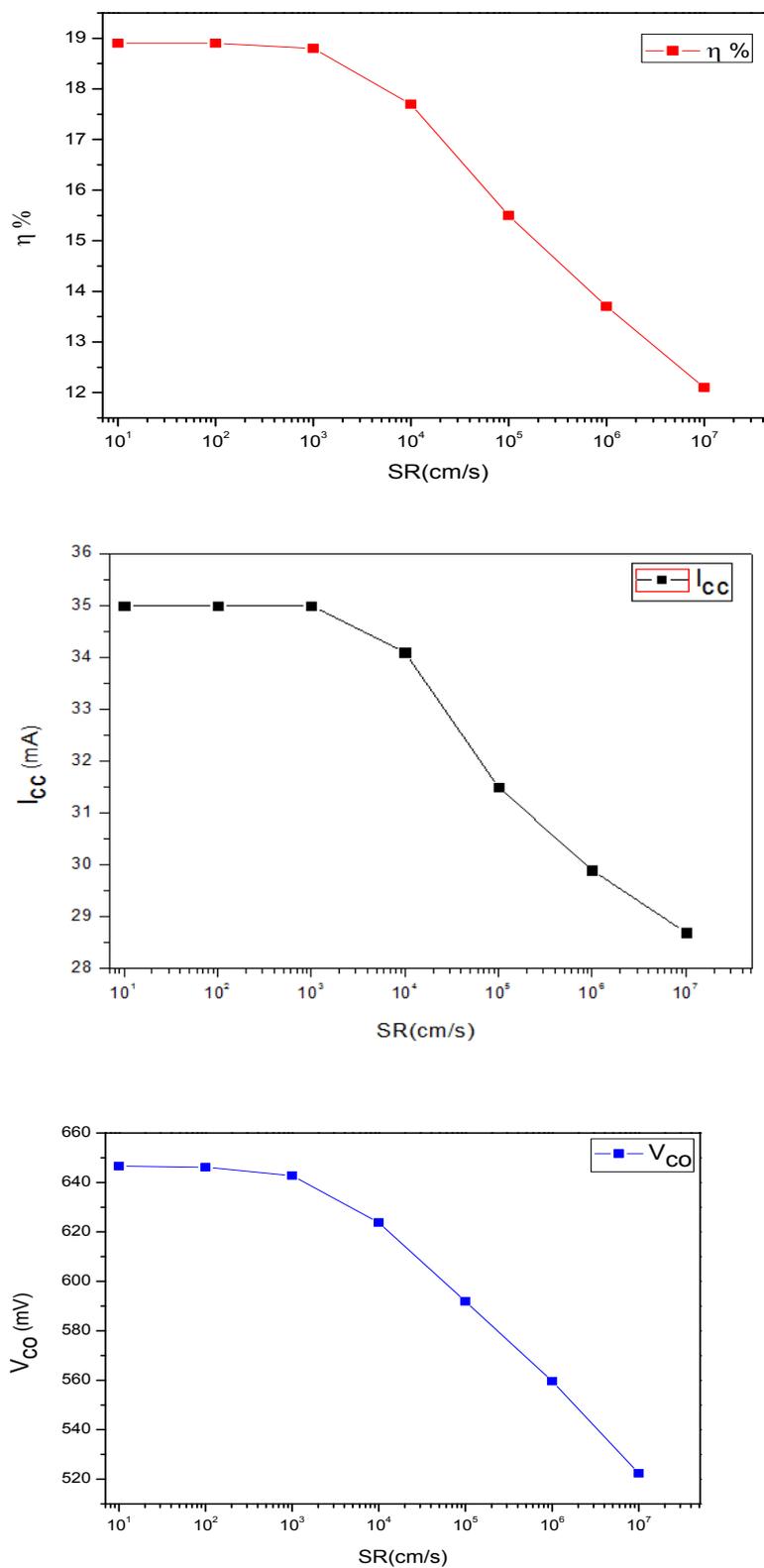




**Figure III.8 :** Variation du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de la vitesse de recombinaison face avant.

L'influence de la vitesse de recombinaison face avant sur les paramètres de la cellule est nettement visible sur la figure IV-8 on constate que la cellule fonctionne bien à une vitesse de recombinaison ( $V_{SR} < 10^3$  cm/s) c'est-à-dire elle aura le maximum du rendement à cette valeur 10 cm/s et dès que celle-ci commence à diminuer.

### III.9.2 Effet de la variation (SR) :



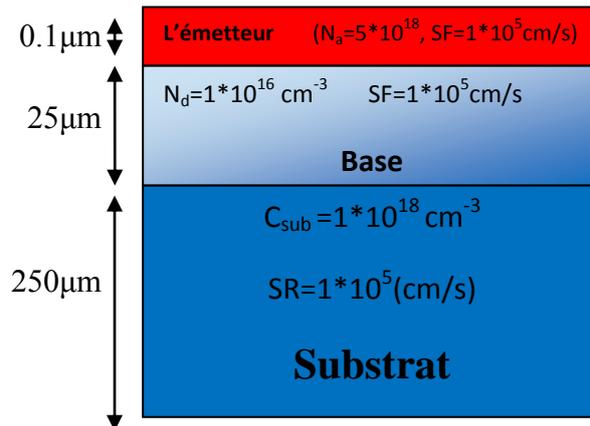
**Figure III.9:** Variation du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de la vitesse de recombinaison face arrière.

## Chapitre III : Résultats et discussion

On constate d'après la figure III-9 L'influence de la vitesse de recombinaison face arrière sur les performances de la cellule est significative où nous remarquons une diminution de rendement, courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert à partir ( $10^3$  cm/s)

### III.10 Cellule solaire n-p :

Et la figure III-2 représente la structure et les paramètres de la 2<sup>ème</sup> cellule (p-n) de référence pendant la simulation :



**Figure III.10 :** structure et paramètres de la 2<sup>ème</sup> cellule n-p de référence

### III.11 paramètres de la structure (n-p) simulée :

Le tableau suivant représente les paramètres de la cellule (n-p) de référence :

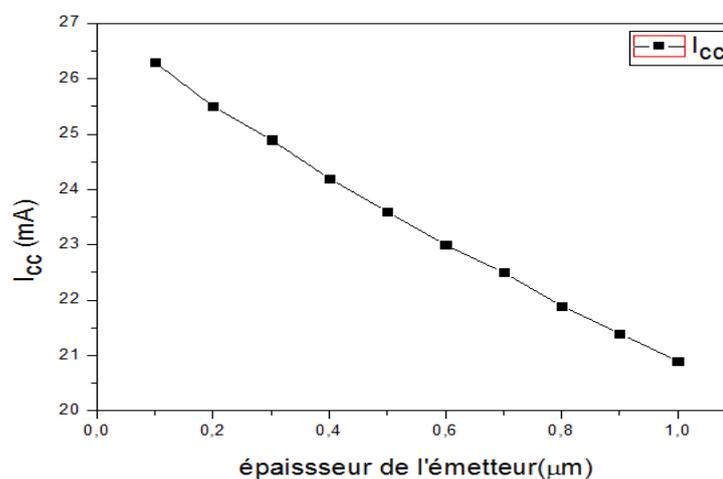
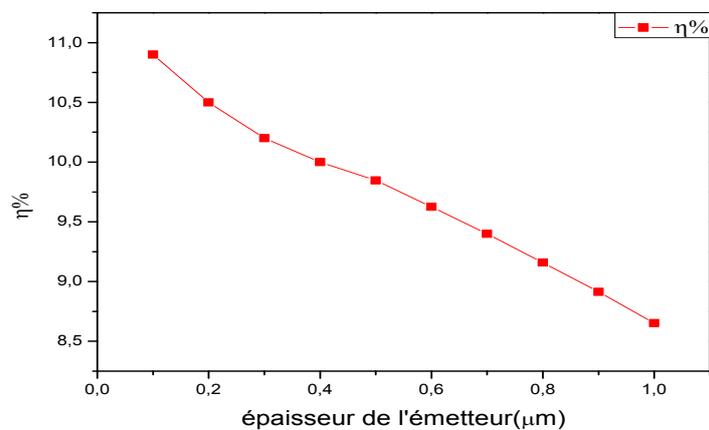
|                              |               |
|------------------------------|---------------|
| <b>Couche anti reflet</b>    |               |
| $n_{car}$                    | 2.05          |
| $d_{car}(nm)$                | 80            |
| <b>Texturisation</b>         |               |
| Angle(°)                     | 54.74°        |
| Depth (μm)                   | 3             |
| <b>Emetteur</b>              |               |
| Epaisseur de l'émetteur (μm) | 0.1           |
| $N_a(cm^{-3})$               | $1 * 10^{16}$ |
| <b>Profil de diffusion</b>   |               |
|                              | Gaussien      |
| <b>Base</b>                  |               |
| $N_d(cm^{-3})$               | $5 * 10^{18}$ |

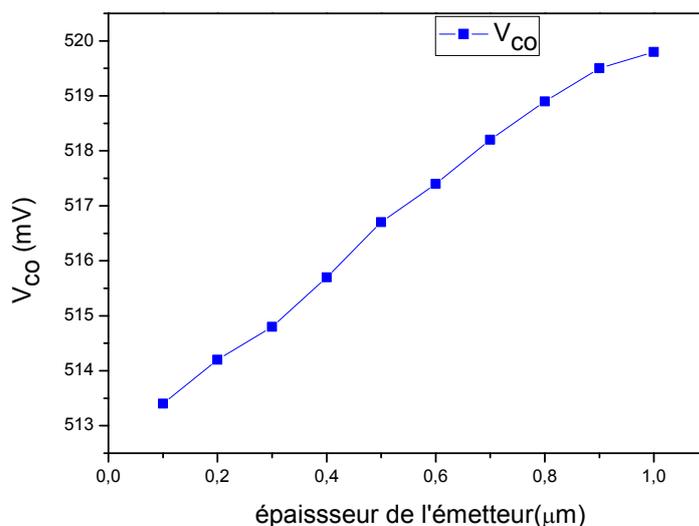
|                                        |                   |
|----------------------------------------|-------------------|
| $\tau$ ( $\mu\text{s}$ )               | 10                |
| Epaisseur de la base ( $\mu\text{m}$ ) | 25                |
| <b>Substrat</b>                        |                   |
| $X_{\text{sub}}$ ( $\mu\text{m}$ )     | 250               |
| $C_{\text{sub}}$ ( $\mu\text{m}$ )     | $1 \cdot 10^{18}$ |
| <b>Passivation</b>                     |                   |
| $S_F$ (cm/s)                           | $1 \cdot 10^5$    |
| $S_R$ (cm/s)                           | $1 \cdot 10^5$    |

**Tableau III.3** : les paramètres de la cellule (n-p) de référence

### III.12 Influence de l'émetteur sur le rendement des cellules solaires utilisées :

#### III.12.1 Effet de l'épaisseur :



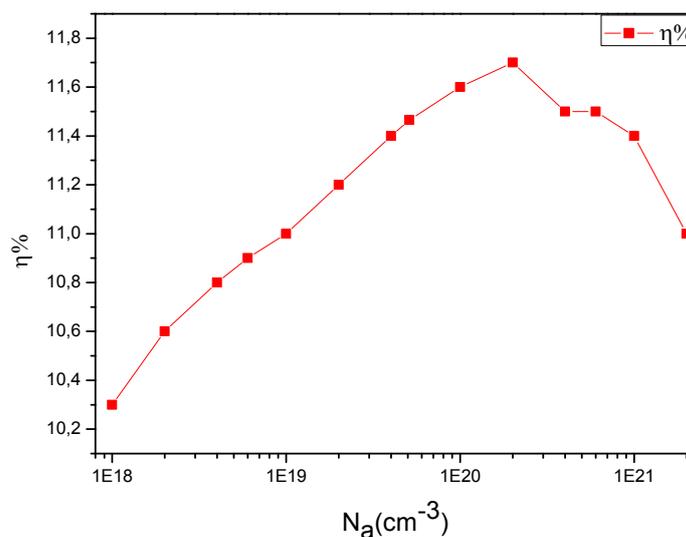


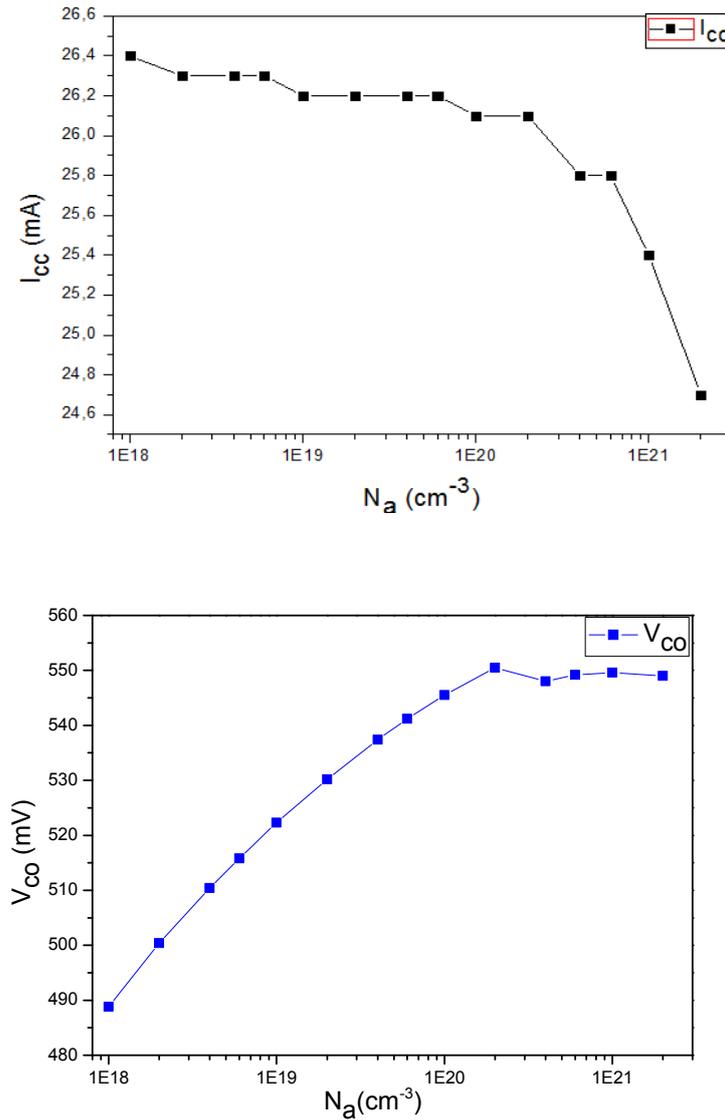
**Figure III.11** : Variation du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur de l'émetteur.

Dans la figure (III -11), Avec l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur, on remarque une petite diminution dans  $I_{cc}$ , cependant une très légère augmentation dans  $V_{oc}$  est remarquée. Le rendement de conversion de la cellule diminue de 10.9% à 8.7

L'explication de ce résultat est que la couche d'émetteur doit faire passer toute l'intensité de la lumière qu'elle reçoit à la base ce qui empêche ce passage lorsqu'elle sera épaisse.

### III.12.2 Effet du dopage ( $N_a$ ) de l'émetteur :





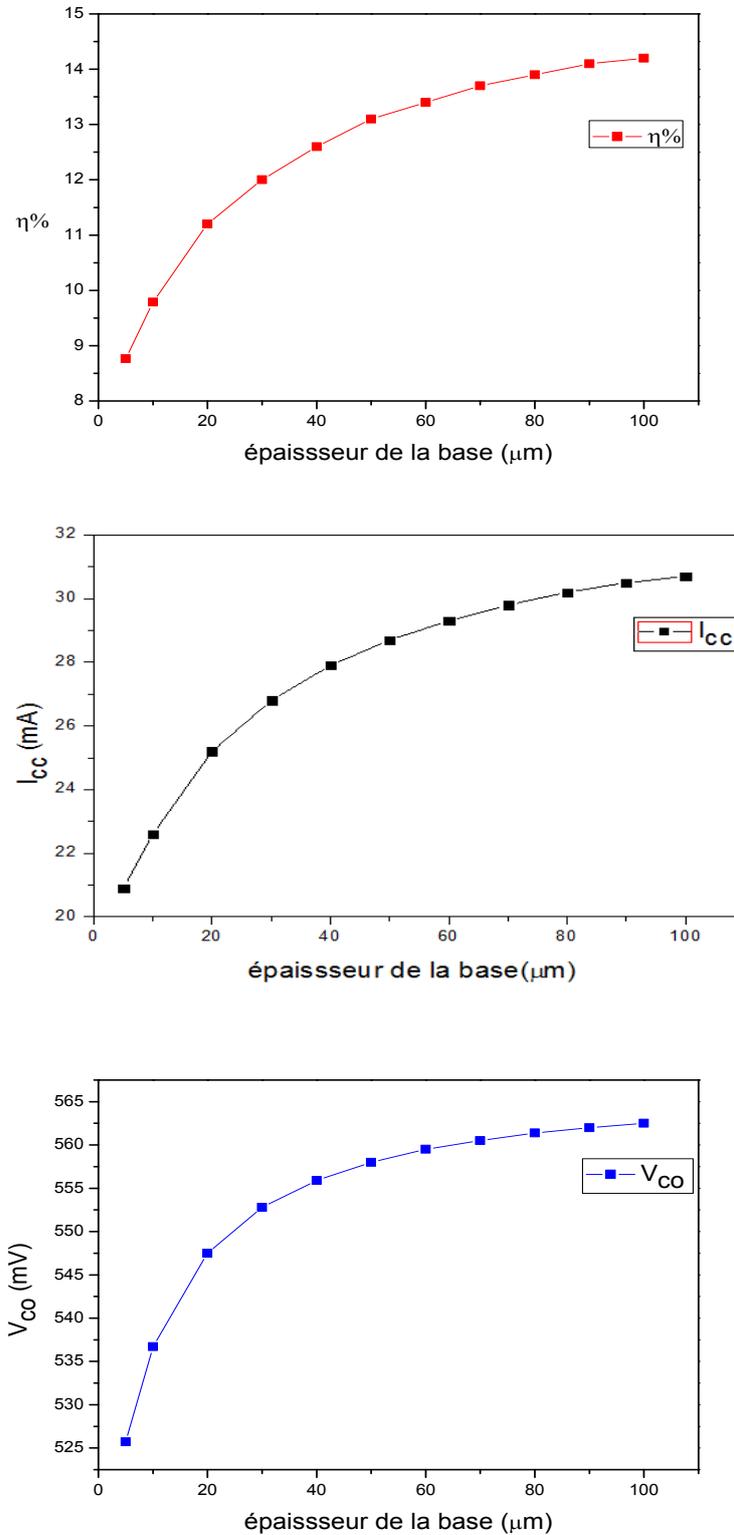
**Figure III.12 :** Variation du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction du dopage de l'émetteur.

Nous avons remarqué que le courant de court circuit varie très peu en fonction du dopage de l'émetteur, par contre la variation du rendement et de la tension du circuit ouvert est remarquable.

De cette figure nous constatons que le rendement prend sa valeur optimale pour un dopage de l'émetteur de  $N_D = 2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ .

### III.13 Influence de la base (collecteur) sur le rendement des cellules solaires utilisées :

### IV.13.1 Effet de l'épaisseur :

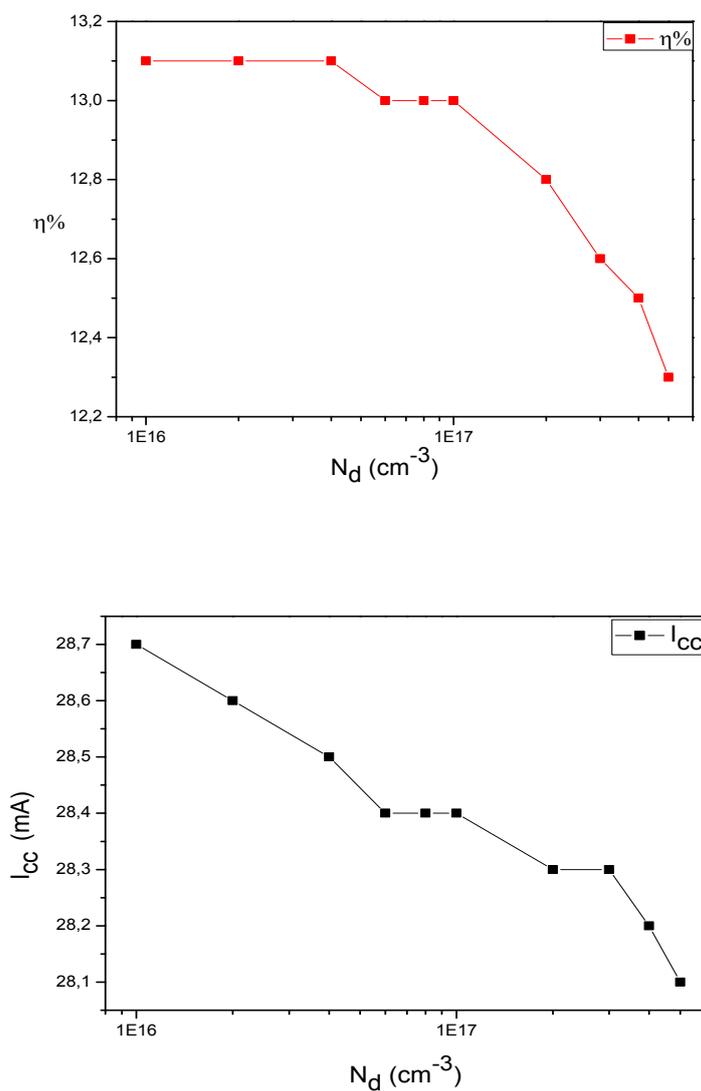


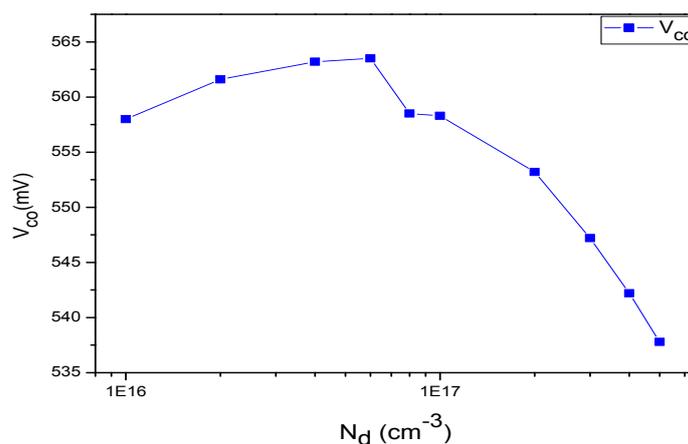
**Figure III.13:** Variation du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur de la base.

## Chapitre III : Résultats et discussion

Dans la figure III-13., nous avons reporté l'influence de l'épaisseur de la base. où nous avons vu que l'augmentation de l'épaisseur de la base donne une amélioration importante de toutes les caractéristiques de la cellule solaire car l'augmentation de l'épaisseur du collecteur favorise l'absorption et la photo-génération des porteurs libres par la lumière.

### III.13-2 Effet du dopage ( $N_d$ ) de la base:

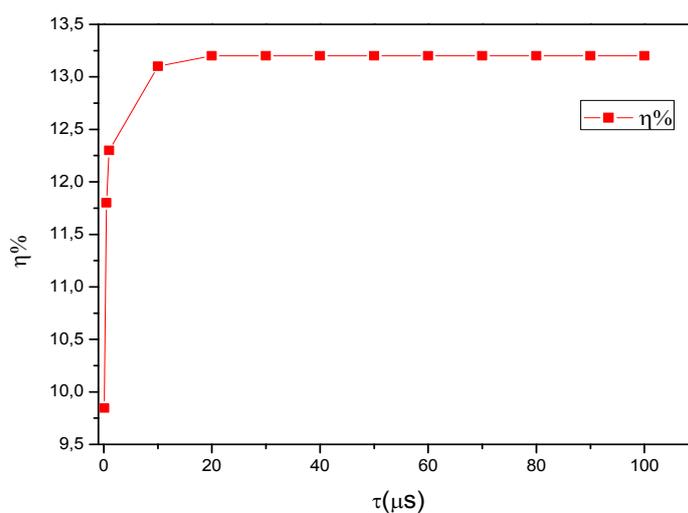


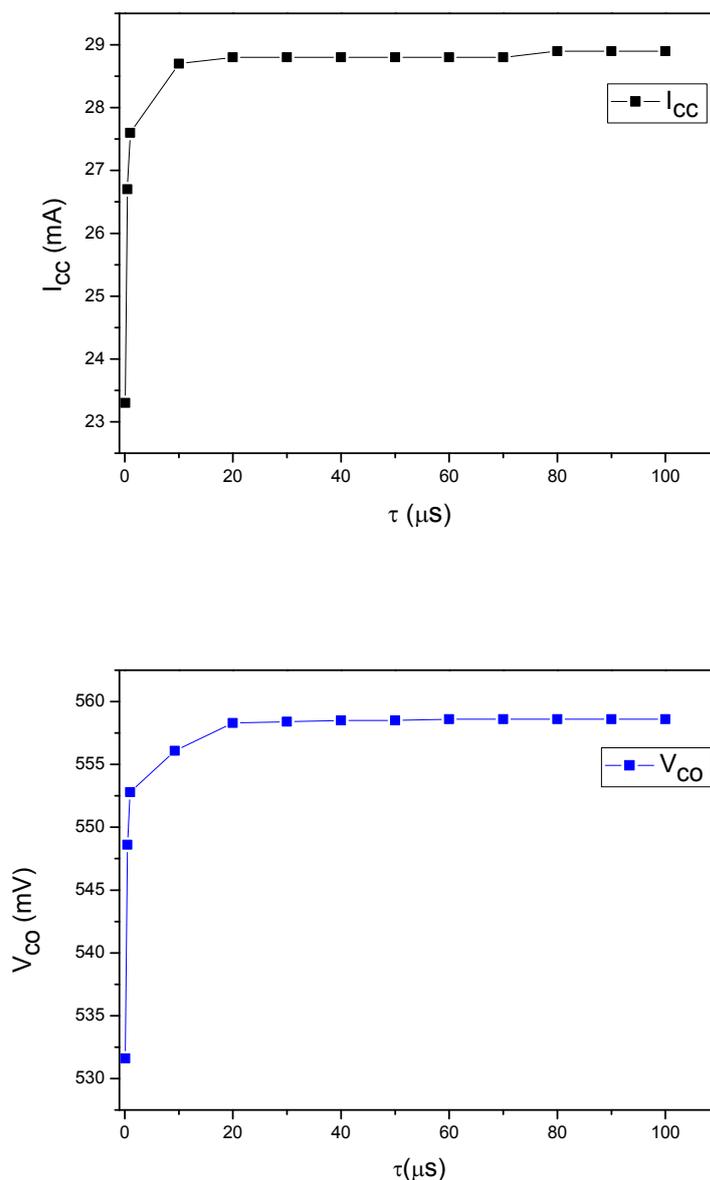


**Figure III.14 :** Variation du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction du dopage de la base.

d'après la figure IV-14 Lorsqu'on augmente le dopage de la base, le rendement et le courant de court circuit diminuent et par conséquent la tension de circuit ouvert croit jusqu'à 565.7 (mV) et après on voit une diminution légèrement et ceci grâce à l'augmentation de la mobilité des électrons et de la durée de vie des porteurs de charges, ces résultats sont obtenus pour des dopages moyens alors que pour les forts dopages le rendement de la cellule diminue à cause de la croissance des recombinaisons Auger.

### III.14 Effet de la durée de vie des porteurs minoritaires :



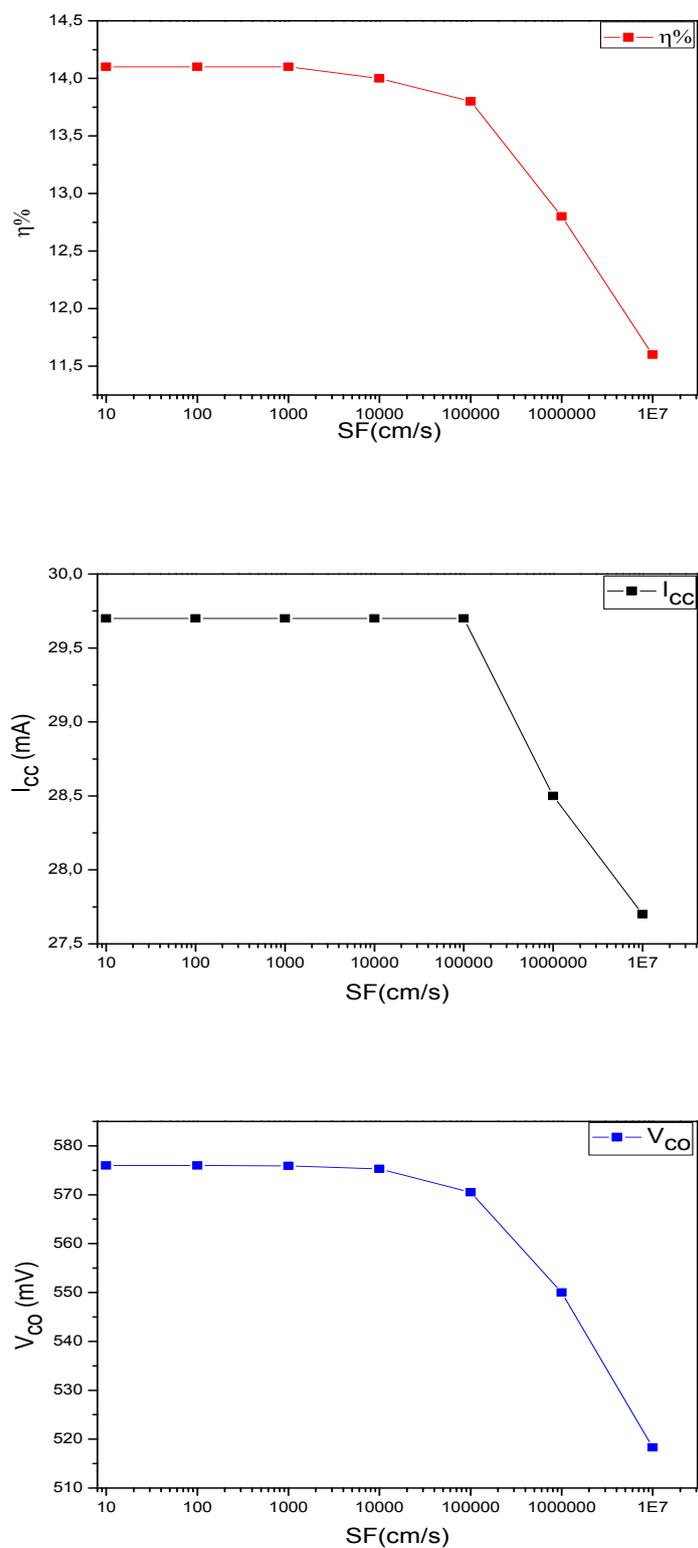


**Figure III.15 :** Variation du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction la durée de vie.

On remarque que les paramètres de la cellule (rendement,  $I_{cc}$  et  $V_{co}$ ) lié fortement de la durée de vie ( $\tau$ ) sur la figure III -7 on voit dans l'intervalle de 0.1 $\mu$ s et 20  $\mu$ s que le rendement de nos cellules augmente car il ny a pas de recombinaison des porteurs de charge , ensuite le rendement va d'être constant ,il y a présence de recombinaison des porteur de charges en volume.

### III.15Influence de la couche de passivation :

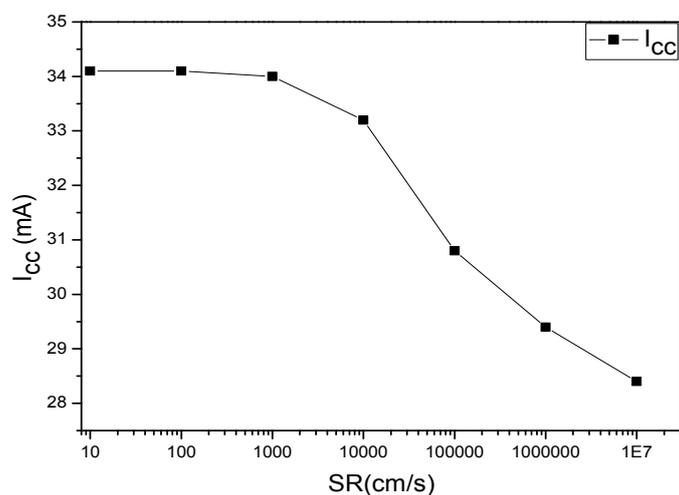
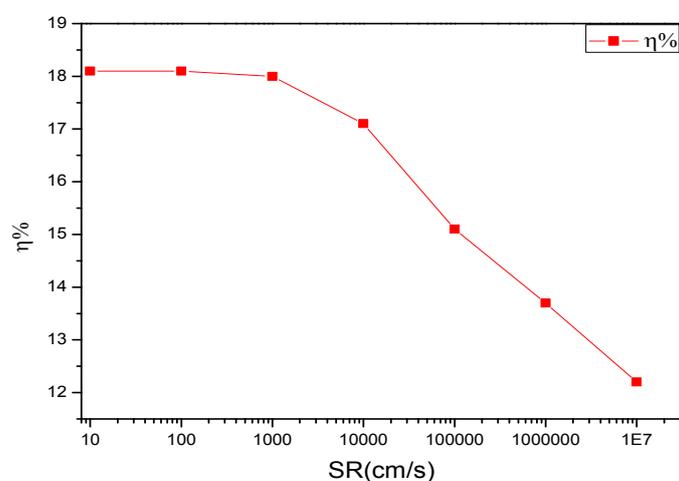
### IV.15.1 Effet de la variation (SF) :

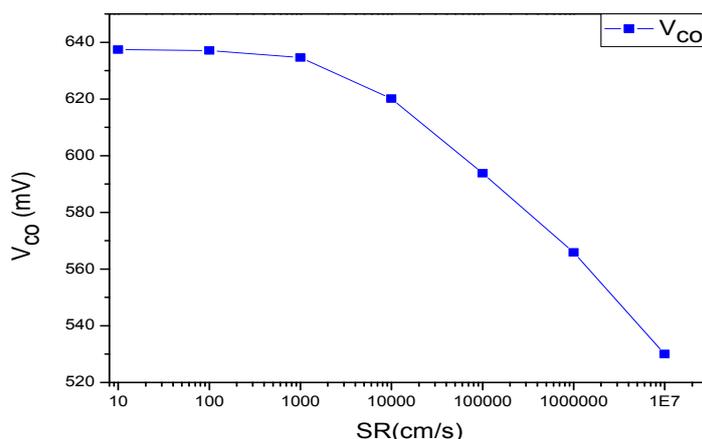


**Figure III.16 :** Variation du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de la vitesse de recombinaison face avant.

D'après les résultats présentés sur la figure III-16 On observe que la vitesse de recombinaison en surface est un paramètre très influant du rendement des cellules solaires. La grande vitesse de recombinaison en face avant peut dégrader complètement le rendement. On remarque aussi que pour les faibles valeurs de la vitesse de recombinaison à la jonction, le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert est maximale. et après décroît avec l'augmentation de la vitesse de recombinaison.

### III.15.2 Effet de la variation (SR) :





**Figure III.17 :** Variation du rendement, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert en fonction de la vitesse de recombinaison face arrière.

D'après les résultats de la simulation, nous avons remarqué que lorsque la vitesse de recombinaison augmente, il y a une décroissance dans la tension de circuit ouvert et légère décroissance dans le courant de court circuit et par conséquent le rendement diminue.

Ce résultat est montré que la vitesse de recombinaison est un facteur dominant et très important pour optimiser le rendement de notre cellules.

### III.16 Comparaison entre les deux cellules optimales :

|                                                     | Cellule solaire type p              | Cellule solaire type n              |
|-----------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Couche antireflet</b>                            | $n_{car} = 2.01$<br>$d_{car} = 75$  | $n_{car} = 2.03$<br>$d_{car} = 75$  |
| <b>Texturisation</b>                                | Angle (°) = 54.74<br>Depth (μm) = 3 | Angle (°) = 54.74<br>Depth (μm) = 3 |
| <b>Profil de diffusion</b>                          | Erfc                                | Gaussien                            |
| <b>Epaisseur de l'émetteur</b>                      | 0.1 μm                              | 0.1 μm                              |
| <b>Dopage de l'émetteur</b>                         | $10^{20} \text{ cm}^{-3}$           | $2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$   |
| <b>Epaisseur de la base</b>                         | 50 μm                               | 50 μm                               |
| <b>Dopage de la base</b>                            | $2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$   | $10^{16} \text{ cm}^{-3}$           |
| <b>de la durée de vie des porteurs minoritaires</b> | 20 μs                               | 20 μs                               |

## Chapitre III : Résultats et discussion

|                                       |             |             |
|---------------------------------------|-------------|-------------|
| vitesse de recombinaison face avant   | $10^3$ cm/s | $10^3$ cm/s |
| vitesse de recombinaison face arrière | 10 cm/s     | 100 cm/s    |
| Rendement $\eta$ (%) optimale         | 18.9 %      | 18.1 %      |

Tableau III.4 : comparaison entre les deux cellules p et n.

### III.17 Conclusion :

A partir de cette étude et les résultats que nous avons obtenus, on trouve que:

- La cellule **p-n** présente un rendement optimum de 18.9% pour un émetteur de 0.1  $\mu\text{m}$  d'épaisseur et de dopage de  $2 \cdot 10^{20} \text{cm}^{-3}$  et un collecteur de 50  $\mu\text{m}$  avec un dopage de  $10^{16} \text{cm}^{-3}$  et durée de vie ( $\tau$ ) de 20 $\mu\text{s}$  et de vitesse de recombinaison face avant 10 cm/s et de vitesse de recombinaison face arrière 1000cm/s. Ces derniers paramètres constituent également les paramètres optimaux de la cellule **n-p** mais son rendement est plus faible, 18.1%. Ceci est dû au fait que dans la cellule **n-p** les porteurs minoritaires injectés depuis la région **n** vers la région **p** sont les trous qui ont une mobilité plus faible que celle des électrons dans la cellule **p-n**.
- L'effet du collecteur est plus important par rapport à celui l'émetteur dans les deux cellules.
- L'augmentation de l'épaisseur du collecteur de 10 à 100  $\mu\text{m}$  améliore le rendement de conversion puisque elle favorise une absorption supplémentaire des photons incidents.
- L'augmentation du dopage du collecteur de  $10^{16}$  à  $5 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$  entraîne aussi une amélioration dans le rendement des deux cellules, bien qu'il induit aussi une certaine diminution dans le courant de court circuit.
- L'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur de 0.1 à 0.1 $\mu\text{m}$  a un effet notable sur le courant de court circuit de la cellule **n-p et p-n**.

### Référence :

- [1] <<ZIANI Nora>>.Mémoire de Magister Thème :Effet de l'épaisseur de la couche antireflet à base d'un TCO sur les cellules solaires a hétérojonction à base de silicium.Université de mouloud Mammeri TIZI-OUZOU-2013.
- [2] <<MEKELLECHE SIDI MOHAMED >>. Mémoire de master Thème : Modélisation et Simulation de Nouveaux Matériaux Densités à la production d'nergie Photovoltaïque.Université Abou Baker belkaid-2015.
- [3] <<BEDDA NAIMA>>.Mémoire de magister .Thème : Etude des propriétés physique des semi-conducteur Si GaAlAs simulation des cellules soalires a base de Si et GaAs. Université EL-Hadjilakhder-batna-2011.

# Conclusion Générale

---

### Conclusion générale :

Nous avons effectué dans ce mémoire la simulation numérique des caractéristiques électriques, courant-tension et le rendement, d'une cellule solaire en silicium cristallin par le logiciel PC1D. Une comparaison entre la structure **n-p** et **p-n** de la cellule est faite pour constater laquelle des deux structure présente le meilleur rendement de conversion. Pour chaque structure, on a fait également une étude de l'effet de l'épaisseur et du dopage de l'émetteur et du collecteur et la durée de vie  $\tau$  ( $\mu\text{s}$ ) et la vitesse de recombinaison de surface face avant et arrière sur les paramètres de sortie de la cellule qui sont, la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$ , le courant de court circuit  $I_{cc}$ , et le rendement de conversion  $\eta$ .

Le bilan de cette étude est présenté dans les quatre chapitres de ce mémoire. Dans le premier chapitre, nous avons présenté une synthèse théorique sur l'effet photovoltaïque, les propriétés physiques et chimiques des matériaux semi-conducteurs, en prenant le silicium comme un exemple, ensuite la structure et le principe de fonctionnement des cellules solaires sont exposé en détail avec l'effet des différents paramètres d'excitation.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté tout d'abord une étude bibliographique sur la technologie de fabrication des cellules solaire à base du silicium. Après voir les différents types de silicium et les caractéristiques de chaque type, le rendement des cellules solaires à base de silicium est détaillé pour chaque type, en suite les travaux effectués pour l'amélioration de ces composants sont présentés et discutés, et nous avons présenté une étude sur les couches minces et leurs propriétés et les techniques des dépôts des couches mince.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude simulatrice des cellules n-p et p-n à base de silicium cristallin, l'influence des différents paramètres sur les performances des cellules est présenté et discuté pour chaque paramètre. Les résultats obtenus sont adapté à ceux de la théorie.

Et Comme conclusion, on a trouvé que:

➤ La cellule **n-p** présente un rendement optimum de 18.9% pour un émetteur de  $0.1 \mu\text{m}$  d'épaisseur et de dopage de  $.10^{16} \text{ cm}^{-3}$  et un collecteur de  $50 \mu\text{m}$  avec un dopage de  $2.10^{16} \text{ cm}^{-3}$  et durée de vie ( $\tau$ ) de  $20\mu\text{s}$  et de vitesse de recombinaison face avant  $10 \text{ cm/s}$  et de vitesse de recombinaison face arrière  $1000\text{cm/s}$ . Ces derniers paramètres constituent également les paramètres optimums de la cellule **p-n** mais son rendement est plus faible, 18.1%.

## *Conclusion générale*

---

- L'effet du collecteur est plus important par rapport à celui l'émetteur dans les deux cellules.
- L'augmentation de l'épaisseur du collecteur de 10 à 100  $\mu m$  améliore le rendement de conversion puisque elle favorise une absorption supplémentaire des photons incidents.
- L'augmentation du dopage du collecteur de  $10^{16}$  à  $5.10^{17} \text{ cm}^{-3}$  entraîne aussi une amélioration dans le rendement des deux cellules, bien qu'il induit aussi une certaine diminution dans le courant de court circuit.
- L'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur de 0.1 à 0.1  $\mu m$  a un effet notable sur le courant de court circuit de la cellule **n-p et p-n**.

Nous pensons que cette étude est un pas important pour faire des études plus approfondies en future.

## ملخص

الطاقة الشمسية هي مصدر الطاقة الواعدة والأكثر قوة بين الطاقات المتجددة. يتم الحصول على الكهرباء الضوئية عن طريق التحويل المباشر لأشعة الشمس إلى كهرباء بواسطة الخلايا الكهروضوئية.

الهدف من هذا العمل هو المقارنة بواسطة محاكاة عددية بين خلية شمسية سليكونية بلورية من النوع P و خلية شمسية سليكونية بلورية من النوع n.

استخدمنا برنامج محاكاة PC1D لمحاكاة خصائص الجهد الحالي (I-V) وحساب الكفاءة في ظل الظروف القياسية لخلية شمسية من النوع n و p .

**الكلمات المفتاحية:** سليكون بلوري , PC1D , خلية شمسية , محاكاة .

## Résumé :

L'énergie solaire est la source d'énergie la plus prometteuse et la plus puissante parmi les énergies renouvelables. L'électricité photovoltaïque (PV) est obtenue par transformation directe de la lumière du soleil en électricité, au moyen de cellules PV.

L'objectif de ce travail est la comparaison par simulation numérique entre une cellule solaire **n-p** et une cellule solaire **p-n** en silicium cristallin.

Nous avons utilisé le logiciel de simulation PC1D pour simuler les caractéristique courant tension (I-V) et calculer le rendement dans les conditions standards d'une cellule solaire de type n et de type p.

**Mots-Clés :** simulation-cellules solaires, silicium cristallin. PC1D.