



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE  
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITÉ ABDELHAMID IBN BADIS - MOSTAGANEM



**Faculté des Sciences Exactes et d'Informatique**  
**Département de Physique.**  
**Filière : Physique.**

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES  
Pour l'Obtention du Diplôme de Master en Physique.  
Option : **Physique des matériaux.**

THEME :

**Etude Comparative Des Cellules Solaires SHJ.**

Etudiant(e) : **ZERIFI Imane.**

Encadrant(e): **RAHAL Wassila Leila.**

Année Universitaire 2018-2019

# Dédicace

*A mes parents, mes sœurs et mes chères amies.*

*Z. Imane*

# Remerciements

Avant tout le chose, je remercie **ALLAH** le tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme de présenter ce mémoire.

*Je* tiens aussi à présenter mes sincères remerciements à :

*Mon* encadreur **M<sup>me</sup>.Wassila Leila Rahal** pour la confiance qu'elle m'a accordée en acceptant de m'encadrer, pour sa disponibilité tout au long de l'élaboration de ce mémoire, pour son aide, ses critiques et ses suggestions, ses conseils, qui ont été pour moi un grand apport.

*Je* remercie les membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'examiner mon travail.

Finalement, *je* remercie tous ceux ou celles qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce mémoire.

*A* vous tous, un grand Merci

*L. Imane*

## LISTE DES FIGURES :

<b>Figure N°</b>	<b>Titre de la Figure</b>	<b>Page</b>
Figure I.1	Le rayonnement solaire transmis à la terre.	5
Figure I.2	Spectre du rayonnement solaire.	6
Figure I.3	Différents cas d'Air Mass (AM).	7
Figure I.4	Spectres solaires AM0 (rouge) et AM1.5G (noir).	7
Figure I.5	Principe de conversion photovoltaïque.	9
Figure I.6	Répartition des matériaux pour la conversion photovoltaïque.	10
Figure I.7	Cellule photovoltaïque à base de silicium polycristallin	11
Figure I.8	Cellule photovoltaïque au silicium cristallin.	11
Figure I.9	Structure de base d'une cellule solaire pin à base de silicium amorphe hydrogéné.	11
Figure I.10	Ligne industrielle de production de cellules au silicium.	12
Figure I.11	Structure d'une cellule solaire à base de CdTe.	12
Figure I.12	Structure standard d'une cellule à base de CIGS.	13
Figure I.13	Cellule CIGS.	13
Figure I.14	Cellule souple à base de matériaux organiques.	14
Figure I.15	Diagramme montrant les différentes technologies et l'évolution des rendements des cellules au niveau de laboratoire.	14
Figure II.1	Représentation schématique de la jonction p-n à l'équilibre.	18
Figure II.2	Diagramme de bande de deux semi-conducteurs dopés p et n avant la mise en contact	19
Figure II.3	Formation d'une jonction p-n.	19
Figure II.4	Formation de la Zone de Charge d'Espace.	20
Figure II.5	Diagramme de bande d'une hétérojonction en face avant a-Si:H(n)/c-Si(p).	22
Figure II.6	Diagramme de bande d'une hétérojonction en face avant a-Si:H(p)/c-Si(n).	23

Figure II.7	Structure cristallographique du silicium de type diamant.	24
Figure II.8	Structure de bande du silicium cristallin.	25
Figure II.9	Cristallisation d'un lingot multicristallin par solidification dirigée.	26
Figure II.10	Cristallisation d'un lingot Cz, A : mise en contact du germe, B et C : tirage du corps du lingot.	27
Figure II.11	Cristallisation d'un lingot FZ.	27
Figure II.12	Représentation schématique de la structure du silicium amorphe hydrogéné..	28
Figure II.13	Équilibre de passivation des liaisons pendantes des atomes de silicium par l'hydrogène.	29
Figure II.14	Distribution d'états du silicium cristallin et du silicium amorphe hydrogéné.	29
Figure II.15	Dépôt du a-Si:H par PECVD.	30
Figure II.16	Schéma d'une cellule à hétérojonction a-Si:H/ c-Si.	31
Figure II.17	Structure d'une cellule photovoltaïque silicium à hétérojonctions (de type n ou de type p).	32
Figure III.1	Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.	38
Figure III.2	Caractéristiques J-V sous éclairment et sous obscurité.	39
Figure III.3	Courbes J-V sous éclairment avec représentation du FF.	40
Figure III.4	Courbe de puissance d'une cellule solaire.	41
Figure III.5	Exemple de rendements quantiques interne (RQI) et externe (RQE) avec la réflectance correspondante pour une cellule c-Si.	42
Figure IV.1	Structure SHJ de type N.	48
Figure IV.2	Variation des paramètres photovoltaïques en fonction du dopage de l'émetteur $N_A$	50
Figure IV.3	Champ électrique dans la zone de déplétion au niveau de la jonction p-a-Si :H/ n-c-Si en fonction de la position dans le dispositif pour 2 dopages différents de la couche p-a-Si :H ( $N_A=10^{14} \text{ cm}^{-3}$ $N_A=10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ).	51
Figure IV.4	Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'épaisseur de l'émetteur d.	52

Figure IV.5	Taux de recombinaisons dans l'émetteur pour 2 épaisseurs différents de la couche p-a-Si :H ( $d=20 \text{ \AA}$ et $d=300 \text{ \AA}$ ).	53
Figure IV.6	Réponse spectrale d'une cellule SHJ de type n pour une épaisseur de l'émetteur de $20 \text{ \AA}$ (en bleu) et $300 \text{ \AA}$ (en rose)	53
Figure IV.7	Variation des paramètres photovoltaïques en fonction du dopage de la couche active $N_D$ .	54
Figure IV.8	Structure cellule SHJ de type P.	55
Figure IV.9	Variation des paramètres photovoltaïques en fonction du dopage de l'émetteur $N_A$ .	56
Figure IV.10	Champ électrique dans la zone de déplétion au niveau de la jonction n-a-Si :H/ p-c-Si en fonction de la position dans le dispositif pour 2 dopages différents de la couche p-a-Si :H ( $N_D=10^{15} \text{ cm}^{-3}$ $N_D=10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ).	57
Figure IV.11	Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'épaisseur de l'émetteur d.	58
Figure IV.12	Taux de recombinaisons dans l'émetteur pour 2 épaisseurs différents de la couche n-a-Si :H ( $d=20 \text{ \AA}$ et $d=300 \text{ \AA}$ ).	59
Figure IV.13	Réponse spectrale d'une cellule SHJ de type p pour une épaisseur de l'émetteur de $20 \text{ \AA}$ (en bleu) et $300 \text{ \AA}$ (en rouge)	59
Figure IV.14	Variation des paramètres photovoltaïques en fonction du dopage de la couche active $N_A$ .	60

## Liste des tableaux :

<b>Tableau N<sup>0</sup></b>	<b>Titre du tableau</b>	<b>Page</b>
Tableau II.1	Caractéristiques $J=f(V)$ sur des cellules HIT de surface égale $1\text{cm}^2$ pour une cellule simple HIT et double HIT.	33
Tableau II.2	Caractéristiques $J=f(V)$ sur des cellules HIT de surface égale $1\text{cm}^2$ pour une cellule simple HIT et double HIT.	33
Tableau IV.1	Paramètres caractéristiques de la cellule SHJ de type n étudiée.	49
Tableau IV.2	Paramètres photovoltaïques de la cellule SHJ de type p étudiée.	56
Tableau IV.3	Comparaison de la performance de cellule SHJ de type n et de type p.	61

# Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I: Généralités sur les cellules solaires photovoltaïques. ....	4
I. INTRODUCTION :	4
II. L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE.....	4
II.1. La constante solaire :	4
II.2. Le rayonnement solaire :	4
II.3. Le spectre solaire :	6
II.4. L'indice Masse d'Air (AM):.....	6
II.5 Les conditions STC (Standard Test Conditions) :	8
III. LE PRINCIPE DE CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE :	8
IV. LES FILIERES PHOTOVOLTAÏQUES :	9
IV.1 Les cellules à base de Silicium cristallin :	10
IV.2. Les cellules à base de Silicium amorphe :	11
IV.3. Les cellules solaires à base de couches minces :	12
IV.3.1. Le Tellurure de Cadmium (CdTe) :	12
IV.3.2. Le Sélénium de cuivre indium gallium (CIGS):	13
IV.3.3. Les couches multijonctions (GaAs) :	13
IV.4. Les cellules solaires à base de matériaux organiques :	14
V. CONCLUSION :	15
CHAPITRE II: LES CELLULES SOLAIRES SHJ. ....	17
I.INTRODUCTION :	17
II. RAPPEL SUR LES SEMICONDUCTEURS :	17
II.1. DEFINITION :	17
II.2. DIFFERENTS TYPES DE DOPAGE :	17
II.2.1. Semi- conducteur dopé n :	17
II.2.2. Semi-conducteur dopé p :	18
III. LES JONCTIONS PN :	18



III.1. Définition :	18
III.2. Structure et comportement d'une jonction p-n à l'équilibre :	18
III.3. La zone de charge d'espace (ZCE):	19
III.4. Les caractéristiques d'une jonction PN :	20
III.4.1. le densité de charge $\rho(x)$ :	20
III.4.2. Le champ électrique interne :	20
III.4.3. Le potentiel de diffusion $V_b$ :	21
III.4.4. Répartitions des porteurs majoritaires et minoritaires :	21
III.4.5. Largeur de la zone de charge d'espace :	22
IV. MODELE D'ANDERSON :	22
IV.1. CAS D'UNE CELLULE HIT DE TYPE P :	22
IV.2. CAS D'UNE CELLULE HIT DE TYPE N :	23
V. LE SILICIUM CRISTALLIN :	24
V.1. Généralités :	24
V.2. Les caractéristiques du silicium cristallin :	24
V.3. Le gap du silicium :	24
V.4. Purification du silicium :	25
V.4.1. De la silice au silicium métallurgique :	25
V.4.2. Du silicium métallurgique au silicium électronique :	25
V.5. CRISTALLISATION DES LINGOTS DE SILICIUM :	26
V.5.1 Procédé de solidification dirigée :	26
V.5.2. Procédé Czochralski :	26
V.5.3. Procédé Float Zone :	27
VI. LE SILICIUM AMORPHE HYDROGENE :	28
VI.1. Les caractéristiques:	28
VI.2. Les liaisons pendantes :	28
VI.3. Le rôle de l'hydrogène :	28
VI.3. Diagramme de bandes du silicium amorphe hydrogéné :	29
VI.5. PROCÉDE DE FABRICATION :	29
VII. LES CELLULES SOLAIRES SHJ DE TYPE N ET DE TYPE P :	30
VII.1. La structure des cellules solaires SHJ :	30
VII.2. Procédé de fabrication des cellules solaires SHJ :	31

a) Etapes de texturation de surface : .....	31
b) Nettoyages des surfaces : .....	31
c) Désoxydation des surfaces : .....	31
d) Déposition des couches de silicium amorphe hydrogéné : .....	31
e) Déposition des couches d'oxydes transparents conducteurs : .....	31
f) Métallisation des cellules : .....	32
VII.3. Choix du type de la base dans une cellule SHJ : .....	32
VII.3.1. Structure SHJ comprenant un substrat dopé n : .....	32
VII.3.2. Structure SHJ comprenant un substrat dopé p : .....	33
VII.4. Le rôle de chaque couche d'une cellule SHJ : .....	34
VII.4.1. L'oxyde transparent conducteur: .....	34
VII.4.2. L'émetteur : .....	34
VII.4.3 L'absorbeur c-Si « substrat » de type n ou p.....	34
VII.4.4 Le BS F : .....	34
VII.4.5. Les contacts : .....	34
VIII.CONCLUSION : .....	35
CHAPITRE III: MODELISATION ET SIMULATION DES CELLULES SOLAIRES .....	36
I.INTRODUCTION : .....	37
II.MODELISATION DES CELLULES SOLAIRES : .....	37
II.1.Modèle mathématique équivalent à une cellule photovoltaïque: .....	37
II.1.1. Jonction PN sous obscurité: .....	37
II.1.2. Jonction PN sous éclairement: .....	37
III. CARACTERISTIQUE J-V D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE ..	39
III.1. LA DENSITE DE COURANT DE COURT-CIRCUIT ( $J_{CC}$ ) : .....	39
III.2. LA TENSION DE CIRCUIT OUVERT ( $V_{CO}$ ) : .....	40
III.3. LE FACTEUR DE FORME (FF) : .....	40
III.4. LE RENDEMENT DE CONVERSION : .....	41
III.5. PUISSANCE ELECTRIQUE MAXIMALE : .....	41
III.6. REPOSE SPECTRALE : .....	41

IV. LES EQUATIONS DE BASES POUR LA MODELISATION DES CELLULES SOLAIRES :	42
IV.1. EQUATION DE POISSON :	42
IV.2. EQUATIONS DE CONTINUITE :	43
IV.3. LES EQUATIONS DE TRANSPORT :	43
IV.3 .1. Courant de conduction :	43
IV. 3.2. Courant de diffusion :	44
IV.3.3. Courant total dans le semi-conducteur :	44
V. DESCRIPTION DU MODELE DE SIMULATION :	44
V.1. Méthode de résolution :	45
V. 2. Le logiciel SCAPS :	45
VI. CONCLUSION :	46
CHAPITRE IV: RESULTATS DE SIMULATION ET DISCUSSIONS	48
I. INTRODUCTION :	48
II. ETUDE D'UNE CELLULE SHJ DE TYPE N	48
II.1. Présentation de la cellule :	48
II.2. Effet du dopage de l'émetteur sur la performance de la cellule	49
II.3. Effet de l'épaisseur de l'émetteur sur la performance de la cellule	51
II.4. Effet du dopage de la couche active sur la performance de la cellule	54
III. ETUDE D'UNE CELLULE SHJ DE TYPE P	55
III.1. Présentation de la cellule :	55
III.2. Effet du dopage de l'émetteur sur la performance de la cellule	56
III.3. Effet de l'épaisseur de l'émetteur sur la performance de la cellule	58
III.4. Effet du dopage de la couche active sur la performance de la cellule	60
IV. COMPARAISON ENTRE DEUX CELLULES OPTIMISEES	61
V. CONCLUSION	61
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	63
BIBLIOGRAPHIE :	65



## INTRODUCTION GENERALE

L'augmentation de la consommation énergétique mondiale, associée à l'appauvrissement des ressources fossiles et à la prise de conscience des enjeux environnementaux, poussent les acteurs de la recherche à développer de nouvelles formes d'énergie propres, renouvelables et non polluantes.

A l'heure actuelle, la plupart de l'énergie utilisée dans le monde est issue de combustibles fossiles tels que : le pétrole, le gaz naturel ou bien le charbon avec l'impact environnemental que l'on connaît.

Contrairement à l'énergie produite par les combustibles fossiles, l'énergie solaire photovoltaïque se présente comme une solution non polluante à la problématique de production d'énergie électrique ; cette forme d'énergie n'émet aucun gaz à effet de serre et sa matière première, le soleil, est disponible partout et gratuitement. Ce type d'énergie est indispensable pour freiner le changement climatique et pour protéger l'environnement.

L'énergie solaire PV (photovoltaïque) repose sur l'utilisation de panneaux solaires, constitués eux même de plusieurs cellules solaires, chacune d'elle est capable de convertir l'énergie lumineuse en un courant électrique.

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés à l'étude et à l'optimisation par simulation des cellules solaires à hétérojonctions SHJ de deux types différents.

Les cellules photovoltaïques à hétérojonctions sont obtenues par la mise en contact de deux matériaux de gaps différents. Les cellules solaires à hétérojonction de silicium, nommées SHJ, sont élaborées à partir de la mise en contact de silicium amorphe hydrogéné (a-Si: H) de gap 1.7 eV avec du silicium cristallin (c-Si) ayant un gap de 1.12eV.

Le mémoire est organisé en quatre chapitres comme suit :

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque où nous expliquons l'effet photovoltaïque, puis donnons les caractéristiques du rayonnement solaire, et enfin nous présentons les différentes filières qui existe dans ce domaine.

Dans le second chapitre, nous commençons par rappeler les phénomènes mis en jeu lors de la formation d'une jonction p-n, puis nous expliquons le principe de fonctionnement d'une hétérojonction en détaillant les caractéristiques du silicium cristallin et du silicium amorphe hydrogéné. Nous donnons enfin le rôle et l'intérêt de chaque couche constituant les cellules solaires de type SHJ.

Nous consacrons le troisième chapitre à la modélisation des cellules solaires en présentant le modèle mathématique équivalent et la caractéristique  $J(v)$  à partir de laquelle nous pouvons extraire les paramètres photovoltaïques nécessaires à l'évaluation de la qualité de la cellule solaire et qui sont : la tension de circuit ouvert, la densité de courant de court circuit, le facteur de forme et le rendement de conversion. Nous rappelons ensuite les

différents phénomènes de transport que l'on rencontre dans les semi-conducteurs, puis nous présentons le logiciel de simulation que nous avons utilisé pour réaliser notre travail.

Dans le dernier chapitre, nous présentons et interprétons les résultats de simulation obtenus afin d'optimiser les paramètres photovoltaïques de deux types de cellules SHJ de type n et de type p en faisant varier le dopage et l'épaisseur de l'émetteur ainsi que le dopage de la couche active. Nous comparons ensuite la performance des deux types de cellules.

Nous terminerons notre travail par une conclusion générale et par les perspectives envisagées dans le cadre de l'amélioration de ce travail.

# **CHAPITRE I**

## **Généralités sur les cellules solaires photovoltaïques.**

## CHAPITRE I :

### Généralités sur les cellules solaires photovoltaïques.

#### I. INTRODUCTION :

Actuellement, plus de 85% [1] de l'énergie utilisée dans le monde résulte des gisements de combustible fossile. Comme ces sources d'énergies sont limitées, en plus des crises successives du pétrole et de l'accroissement de la demande d'énergie dans tous les pays industrialisés, ces derniers cherchent à développer de nouvelles sources d'approvisionnement.

Les chercheurs ont développé une autre forme d'énergie dite « énergie renouvelable » qui est définie comme énergie à ressource illimitée. Ces énergies renouvelables ont toutes l'immense avantage d'être d'origines naturelles, inépuisables et non polluantes parce qu'elles n'émettent pas de gaz favorisant l'effet de serre.

Dans ce chapitre, Nous allons faire appel à quelques bases indispensables dans la compréhension de la plus jeune des énergies renouvelables, qui est l'énergie photovoltaïque.

Nous aborderons ainsi en premier lieu quelques notions sur divers types d'énergie solaire photovoltaïque et une brève description de principe de la conversion photovoltaïque et les différentes filières qui existent pour ce type d'énergie.

#### II. L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

##### II.1. La constante solaire :

Le soleil libère de façon continue une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, environ  $4,5 \times 10^{26}$  J chaque seconde. La terre intercepte une toute petite portion de cette énergie rayonnée dans l'espace. On appelle le flux énergétique reçue par une surface d'unité située au bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne terre-soleil de 150 millions kilomètres), la constante solaire qui est égale à  $1360 \text{ W/m}^2$ . Cette constante solaire est variable autour de l'année puisque la distance terre-soleil est elle-même variable [2].

##### II.2. Le rayonnement solaire :

Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique qui se déplace à une vitesse égale à la vitesse de la lumière tel que :  $v = 299\,792\,458 \text{ m/s}$ . La lumière blanche nous parvient alors en très peu de temps (environ 8 mn 19 s à nous parvenir).

Le rayonnement solaire est caractérisé par l'ensemble de photons, particules transportant chacune une quantité d'énergie appelée "quantum d'énergie" et notée " $\Delta E$ ". L'énergie d'un photon de fréquence  $\nu$  (en hertz), dont la longueur d'onde  $\lambda$  (en mètre) est égale à la célérité divisée par  $\nu$ , est exprimée par la relation (I.1):



## CHAPITRE I : Généralités sur les cellules solaires photovoltaïques.

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

Où  $h$  est la constante de Planck =  $6,63 \cdot 10^{-34}$  J/s. Ainsi, les photons composant le rayonnement ultraviolet du fait de leur longueur d'onde transportent un quantum d'énergie plus important que les photons composant le rayonnement infrarouge. L'énergie que transmet le Soleil à la surface de l'atmosphère par rayonnement est égale à  $1\,360 \text{ W/m}^2$  (c'est la constante solaire). En traversant l'atmosphère, des parties de ce rayonnement sont réfléchies, absorbées ou diffusées, ce qui diminue significativement cette valeur. Cette diminution est d'autant plus forte que la couche d'atmosphère est importante.

L'énergie que nous transmet le soleil dépend de plusieurs facteurs comme l'épaisseur de l'atmosphère ou encore la position du soleil, et sa valeur atteint dans les meilleures conditions  $900$  à  $1000 \text{ W/m}^2$ .

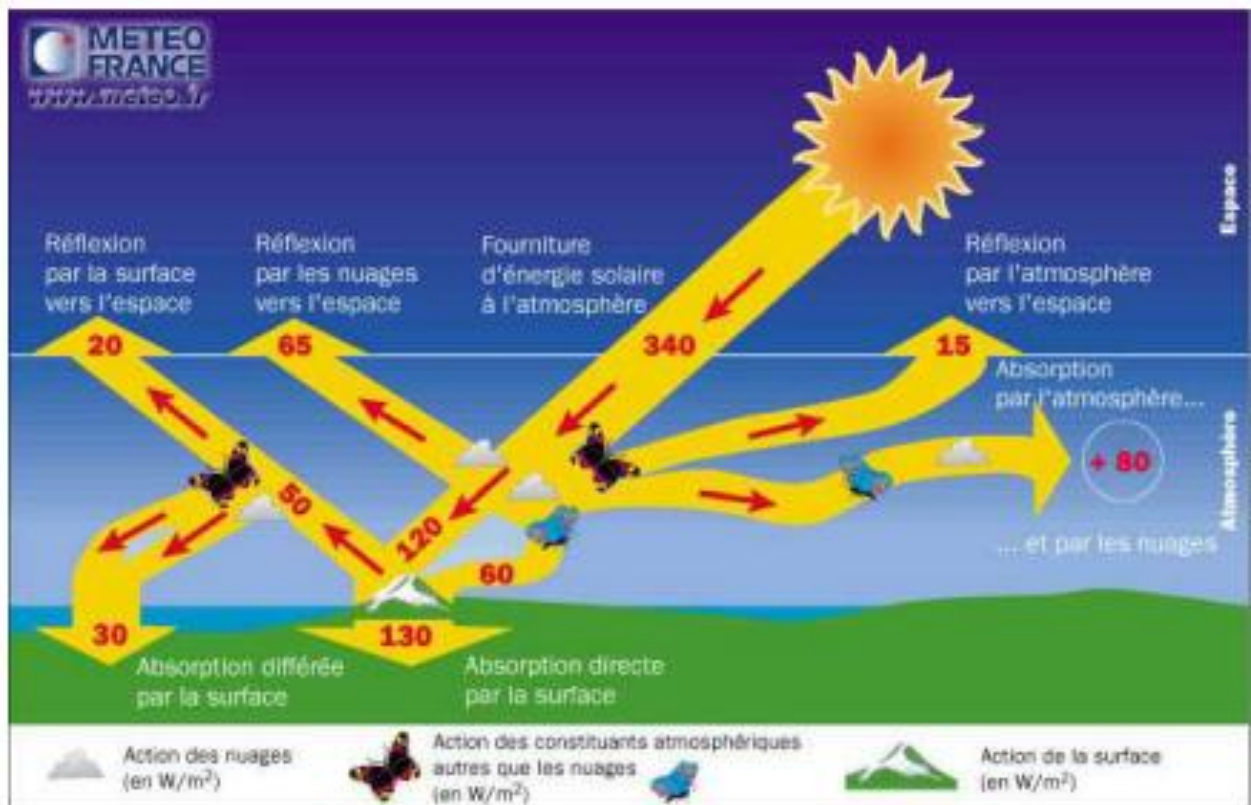


Figure I.1 : Le rayonnement solaire transmis à la terre. [3]

Il existe quatre types de rayonnement :

- **Rayonnement direct** : rayonnement reçu directement du soleil.
- **Rayonnement diffus** : c'est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire global par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages et les aérosols

# CHAPITRE I : Généralités sur les cellules solaires photovoltaïques.

- **Rayonnement solaire réfléchi (Albédo du sol) :** le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).
- **Rayonnement global :** le rayonnement global est constitué des rayonnements direct, diffus et réfléchi par le sol.

## II.3. Le spectre solaire :

Le rayonnement solaire constitue un spectre continu allant des ultra-violet à l'infrarouge, en passant par le visible où il émet avec le maximum d'intensité. Cependant, en traversant la chromosphère du Soleil et l'atmosphère de la Terre, les atomes qui les composent absorbent certains photons. Le spectre de raies d'absorption est un spectre observable depuis la surface de la terre. Aussi, à la surface de la Terre le rayonnement solaire comprend : 5% d'ultra-violet, 40% de lumière visible et 55% d'infrarouge, les IR étant porteurs de l'essentiel de l'énergie thermique.

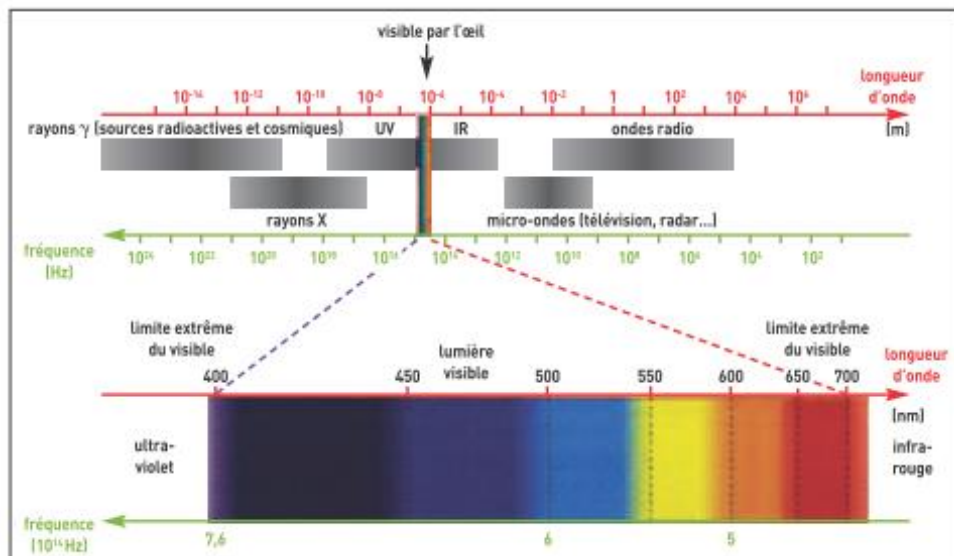


Figure I.2 : spectre du rayonnement solaire. [4]

## II.4. L'indice Masse d'Air (AM):

Pour tenir compte de la position relative du Soleil qui modifie l'épaisseur d'atmosphère traversée, on introduit un coefficient appelé masse atmosphérique ou nombre d'Air Masse (AM).

Dans les conditions normales et au niveau de la mer, l'expression simplifiée suivante est utilisée :

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)}. \quad (I.2).$$

Avec  $\theta$  l'angle que fait le soleil avec le zénith (position verticale).

## CHAPITRE I : Généralités sur les cellules solaires photovoltaïques.

- AM1 = correspond au soleil au zénith ( $\alpha = 0$ )
- AM2 = correspond à l'horizon ( $\alpha = 60^\circ$ )
- AM1.5 = correspond ( $\alpha = 48^\circ$ )
- AM0 utilisé pour préciser les conditions en dehors de l'atmosphère AM

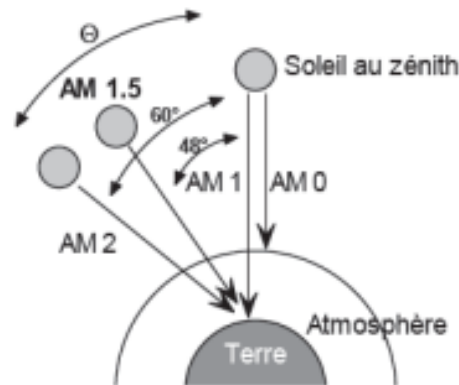


Figure I.3 : Différents cas d'Air Mass (AM) [5]

Cette convention permet d'harmoniser les résultats obtenus dans les laboratoires. En effet, l'utilisation principale des spectres solaires AM0 et AM1.5 est l'évaluation des rendements de conversion des cellules solaires :

- AM0 est le spectre solaire dans l'espace (hors atmosphère) et est utilisé pour évaluer les performances des cellules solaires pour applications spatiales.
- AM 1.5 est le spectre solaire sur terre à une altitude de 0m en plein soleil et avec un angle zénithal  $\theta$  de  $48^\circ$  (valeur de  $\theta$  donnant  $\frac{1}{\cos(\theta)} = 1.5$ )

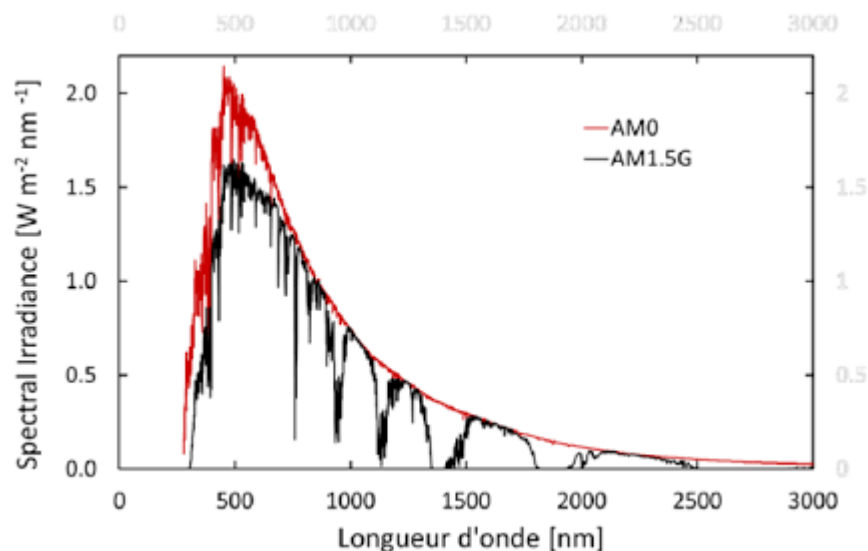


Figure I.4 : spectres solaires AM0 (rouge) et AM1.5G (noir) [6]

# CHAPITRE I : Généralités sur les cellules solaires photovoltaïques.

---

## II.5 Les conditions STC (Standard Test Conditions) :

Il existe des conditions normalisées de test des cellules et des panneaux solaires, appelées conditions STC. Elles sont caractérisées par :

- Un rayonnement instantané de  $1\,000\text{ W/m}^2$ ,
- Un spectre solaire AM 1.5,
- Une température ambiante de  $25\text{ °C}$ .

## III. LE PRINCIPE DE CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE :

L'énergie solaire est convertie en énergie électrique par l'effet photoélectrique, et le principe de conversion peut être résumé en 3 étapes essentielles :

1. Création des porteurs de charge (électrons et trous) grâce à l'absorption de photons par le matériau. En effet, lorsqu'un semi-conducteur est illuminé avec un rayonnement de longueur d'onde appropriée (l'énergie des photons doit être au moins égale à celle du gap énergétique du matériau), l'énergie des photons absorbés permet des transitions électroniques depuis la bande de valence vers la bande de conduction du semi-conducteur générant ainsi des paires électron-trou, qui peuvent contribuer au transport du courant (photoconductivité) par le matériau lorsqu'on le polarise.
2. Séparation des paires électron-trou qui sont créées dans la zone de charge d'espace de la jonction p-n sous l'effet du champ électrique qui règne dans cette région et qui entraîne les électrons et les trous dans les zones neutres de chaque côté de la jonction.
3. Apparition d'une différence de potentiel aux bornes de la jonction (photo tension) lors de l'isolation du dispositif ; s'il est connecté à une charge électrique extérieure, l'observation du passage d'un courant alors que l'on n'applique aucune tension au dispositif.

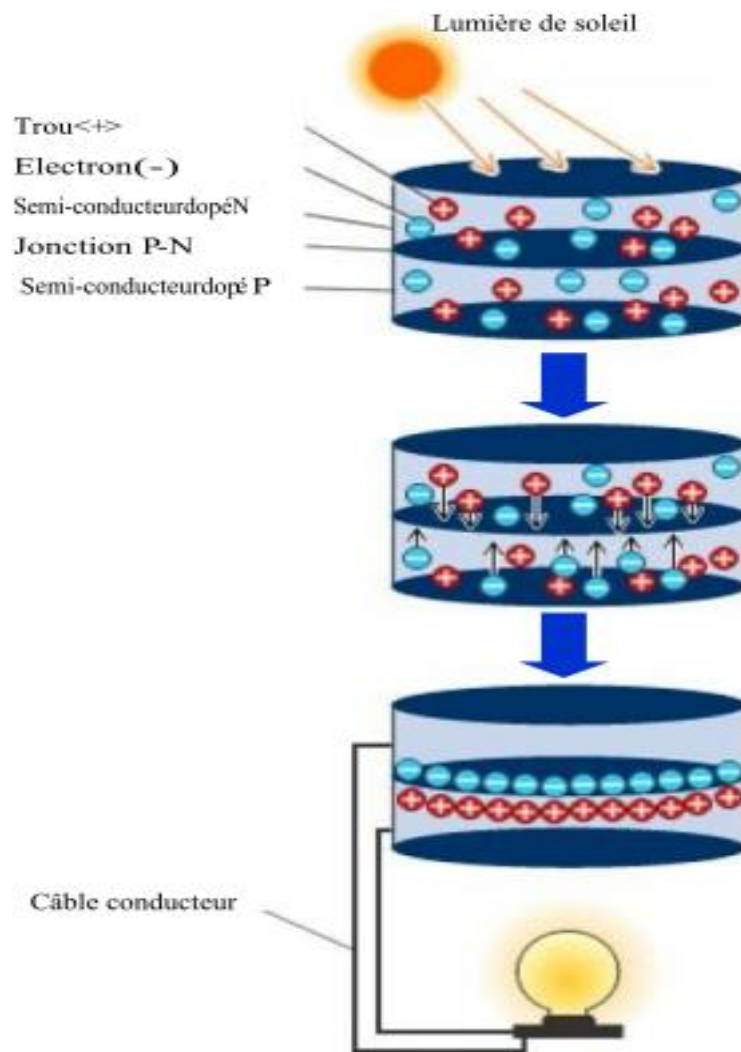
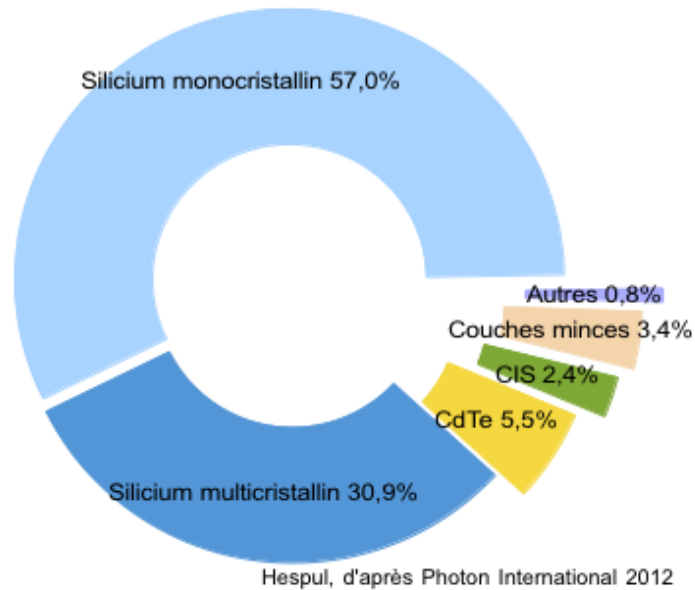


Figure I.5 : Principe de conversion photovoltaïque. [1]

## IV. LES FILIERES PHOTOVOLTAÏQUES :

La première technologie mettant en œuvre l'effet photovoltaïque est basée sur le silicium. Elle constitue actuellement l'essentiel de l'industrie photovoltaïque, comme nous pouvons le constater sur la figure I.6.

Répartition de la production des cellules 2011



**Figure I.6 : Répartition des matériaux pour la conversion photovoltaïque.**

Actuellement, nous pouvons répertorier 4 principales filières photovoltaïques, qui sont :

- Le Silicium cristallin.
- Le Silicium amorphe.
- Les couches minces (GaAs, CdTe, CIGS).
- Les matériaux organiques.

### IV.1 Les cellules à base de Silicium cristallin :

Les cellules solaires élaborées à partir du silicium cristallin représentent près de 90% de production photovoltaïque. Ces cellules peuvent être faites à l'aide de plaquettes de silicium cristallisé (c-Si) obtenu à partir de galets de quartz d'abord convertis en silicium en qualité métallurgique puis traités pour obtenir une pureté de l'ordre de 99%. L'épaisseur de silicium nécessaire à l'absorption du spectre solaire est de l'ordre de la centaine de microns. Le silicium cristallin est subdivisé en deux catégories distinctes ; le silicium monocristallin (mc-Si) et le silicium polycristallin (pc-Si). Le silicium monocristallin est plus cher que le polycristallin, mais permet des rendements plus élevés.

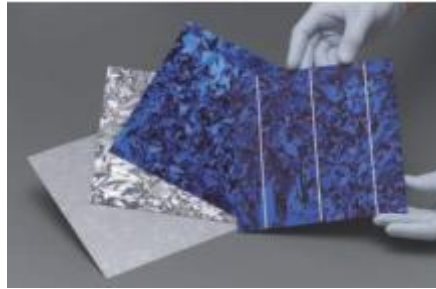


Figure I.7: cellule photovoltaïque à base de silicium polycristallin. [7]

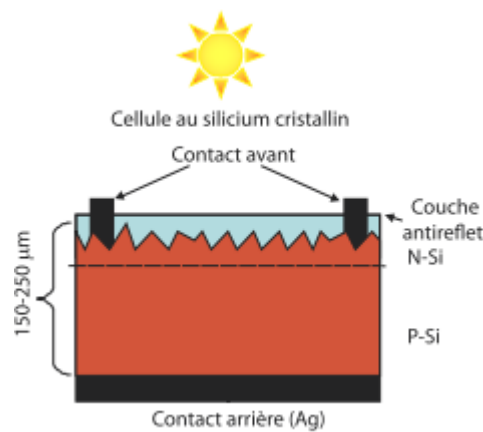


Figure I.8 : cellule au silicium cristallin. [7]

## IV.2. Les cellules à base de Silicium amorphe :

Les cellules à base de silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) ont une structure pin et sont constituées par une couche de type p , une couche intrinsèque non dopé (i) et une couche de type n.

Leurs procédés de fabrication sont plus simples et coutent moins chers que ceux du silicium cristallin, ce qui engendre un coût de production intéressant, mais des rendements relativement faibles (~14%)

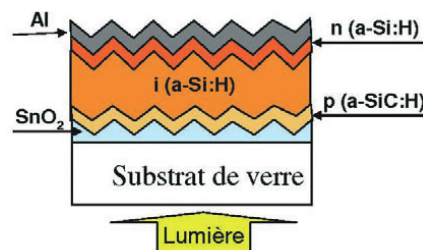


Figure I.9: structure de base d'une cellule solaire pin à base de silicium amorphe hydrogéné [8]





Figure I.10: ligne industrielle de production de cellules au silicium. [7]

### IV.3. Les cellules solaires à base de couches minces :

#### IV.3.1. Le Tellure de Cadmium (CdTe) :

Les cellules à base de CdTe sont basées également sur la formation de jonction PN par mise en contact de deux matériaux différents, on parle donc d'hétérojonction. La couche n est un semi-conducteur de grande bande interdite (le CdS), qui laisse passer la lumière. Les photons sont ensuite absorbés dans la couche de CdTe de type p, appelée absorbeur. La valeur 1,45 eV d'énergie de la bande interdite est idéalement adapté au spectre solaire.

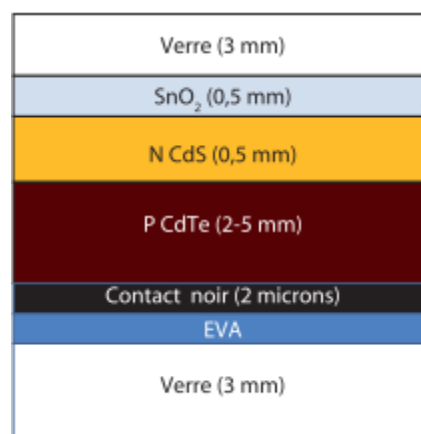


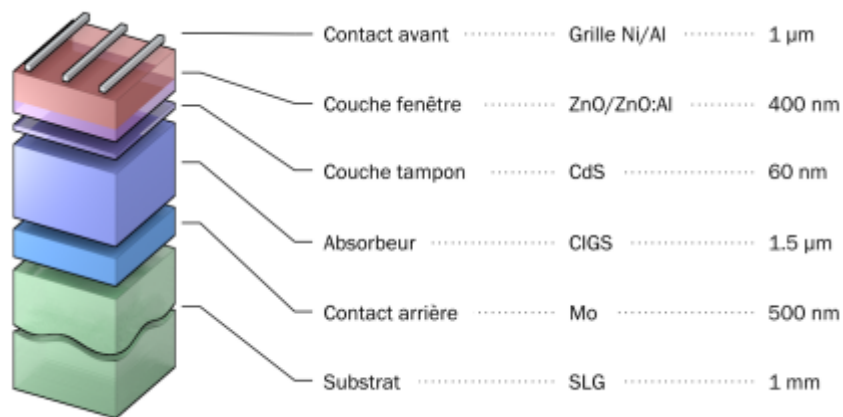
Figure I.11 : Structure d'une cellule solaire à base d'une CdTe. [9]



# CHAPITRE I : Généralités sur les cellules solaires photovoltaïques.

## IV.3.2. Le Séléniure de cuivre indium gallium (CIGS):

La fabrication des couches de CIGS est plus complexe que le CdTe du fait de leur caractère quaternaire, ce qui a nécessité une mise au point plus longue. La contrepartie positive de cette complexité est une grande flexibilité concernant l'optimisation des propriétés. On peut ainsi fixer de façon très modulable, non seulement le gap mais également les autres propriétés (affinité électronique, travail de sortie), en substituant fragmentairement l'indium avec du gallium, de l'aluminium ou le sélénium par du soufre. L'absorbeur est le CIGS et les couches fenêtres sont constituées de sulfure de cadmium, zinc ou indium (en substitution potentielle du cadmium) et d'oxyde de zinc, dopé aluminium.



**Figure I.12 : structure standard d'une cellule à base de CIGS. [10]**



**Figure I.13 : Cellule CIGS. [11]**

## IV.3.3. Les couches multijonctions (GaAs) :

Actuellement, de très bons rendements sont obtenus en utilisant alliages dérivés de l'arséniure de gallium (GaAs). Ces cellules photovoltaïques sont multicouches c'est à dire avec un empilement de plusieurs cellules photovoltaïques convertissant différentes parties du spectre solaire. Cette technologie permet d'optimiser l'absorption du flux solaire par la cellule, et ainsi d'accroître son rendement de conversion de manière significative.

# CHAPITRE I : Généralités sur les cellules solaires photovoltaïques.

## IV.4. Les cellules solaires à base de matériaux organiques :

Une des filières émergentes est celle des cellules organiques. Dans ce cas, on utilise la propriété semi-conductrice de certains polymères, permettant de créer des jonctions analogues aux jonctions p-n, et donc d'obtenir des cellules solaires. Le saut a été franchi avec l'idée de mélanger intimement deux matériaux organiques permettant ainsi aux excitons (paires électron-trou créées lors de l'excitation lumineuse) d'être plus facilement séparés aux nombreuses interfaces. Le concept de cellule organique à jonction interpénétrée était né (BulkHeterojunction).

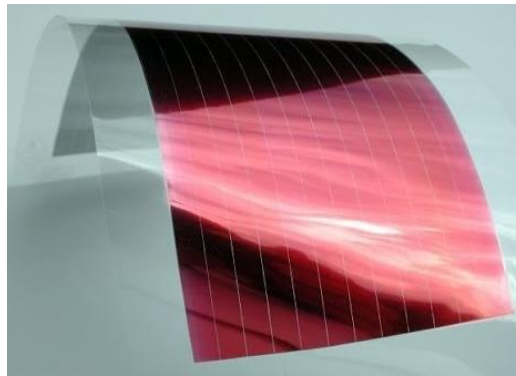


Figure I.14: Cellule souple à base de matériaux organiques. [12]

A partir de la figure I.15, nous pouvons constater que l'évolution et la performance des cellules solaires ne cessent d'augmenter, ainsi que le choix des matériaux entrant dans leurs élaborations.

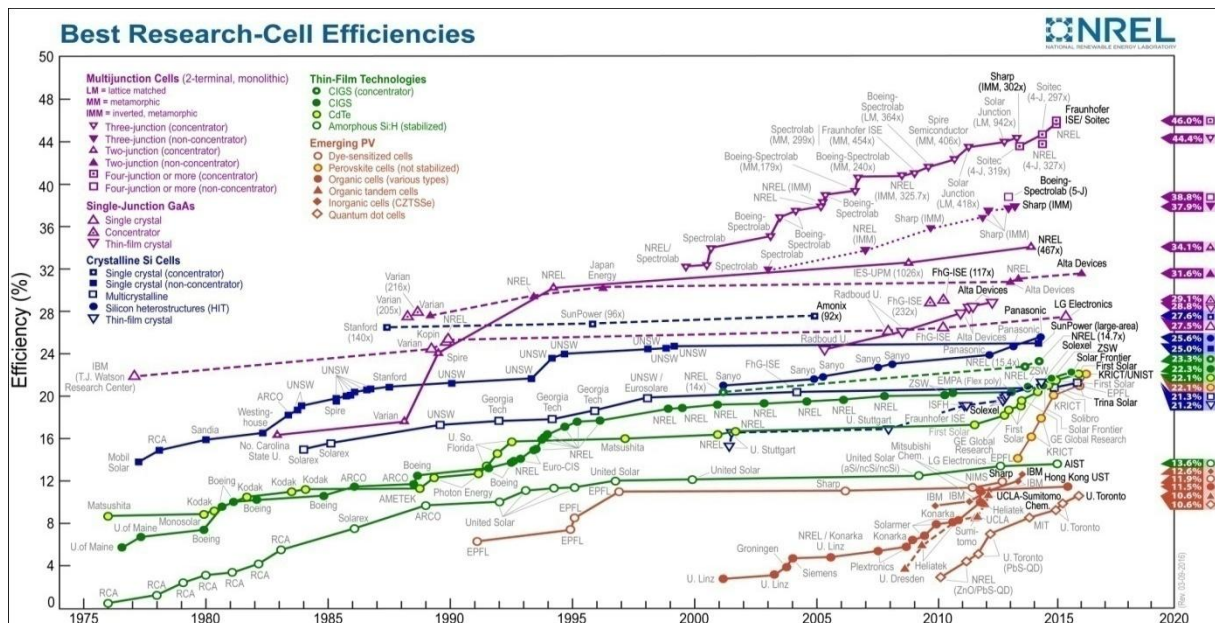


Figure I.15 : Diagramme montrant les différentes technologies et l'évolution des rendements des cellules au niveau de laboratoire. [13]

### V. CONCLUSION :

Dans ce premier chapitre, nous avons d'abord décrit les différents phénomènes physiques qui gouvernent l'énergie solaire photovoltaïque, en présentant les caractéristiques du rayonnement solaire ainsi que les conditions de test standard.

Ensuite, nous avons détaillé les différents phénomènes mis en jeu au niveau de la cellule dans la conversion photovoltaïque.

Enfin, nous avons présenté les principales filières photovoltaïques qui se divisent essentiellement en deux grandes familles : les cellules solaires à base de silicium (monocristallin, polycristallin et amorphe) qui représentent plus de 90% du marché photovoltaïque, et les cellules solaires à base d'autres matériaux (CIGS, CdTe, Organique...etc.). Nous avons à cet effet détaillé leurs structures ainsi que leurs rendements, et en mettant en avant leurs points forts.

# **Chapitre II**

## **Les cellules solaires SHJ**

# CHAPITRE II

## LES CELLULES SOLAIRES SHJ.

### I. INTRODUCTION :

Il existe actuellement beaucoup de technologies de cellules photovoltaïques, parmi lesquelles les cellules à hétérojonction de silicium (SHJ) qui combinent l'efficacité du silicium cristallin et le bas coût du silicium amorphe.

La structure d'une cellule SHJ est formée d'un wafer de silicium cristallin, constituant la couche active, recouvert en face avant par une couche mince de silicium amorphe hydrogéné formant l'émetteur. En face arrière, nous retrouvons un empilement de même type fortement dopé afin de former le champ arrière BSF.

Dans ce chapitre nous commencerons par un rappel sur les semi-conducteurs particulièrement la jonction pn, puis nous aborderons le modèle d'Anderson qui permet de décrire les structures de bandes des hétérostructures que l'on retrouve dans les cellules SHJ. Nous détaillerons par la suite la structure de ce type de cellules en expliquant le rôle de chaque couche ainsi que son procédé de fabrication.

### II. RAPPEL SUR LES SEMICONDUCTEURS :

#### II.1. DEFINITION :

Les semi-conducteurs ont acquis une place importante dans notre société, ils sont à la base de tous les composants électroniques et optoélectroniques comme les diodes et les lasers et entrent dans plusieurs domaines.

Les cristaux se séparent en deux grandes familles grâce à l'étude des corps purs et bien cristallisés : les isolants et les métaux. Par définition un semi-conducteur est un matériau qui a les caractéristiques électriques d'un isolant à une température de 0K, mais qui se rapproche des métaux lorsque la température augmente. En d'autres termes, la conductivité électrique d'un semi-conducteur est intermédiaire entre celle des métaux et celle des isolants.

#### II.2. DIFFERENTS TYPES DE DOPAGE :

##### II.2.1. Semi- conducteur dopé n :

Un semi-conducteur dopé n est un semi-conducteur dont la concentration en électrons est largement supérieure à la concentration en trous. On y a introduit généralement du phosphore, de l'arsenic ou encore de l'antimoine qui possèdent 5 électrons sur la couche extérieure. On y associe un niveau donneur  $E_D$  dans la bande interdite très proche de la bande de conduction. L'intérêt est que pour les températures supérieures à 0K, les atomes dopants sont ionisés ce qui revient à faire passer l'électron du niveau donneur à la bande de

conduction [5]. La concentration des atomes donneurs  $N_D$  sera donc supérieure à la concentration d'atomes accepteurs  $N_A$ . ( $N_D - N_A > 0$ )

A la température ambiante, tous les donneurs sont quasiment ionisés et la densité des porteurs libres du semi-conducteur sera [5]:

$$n = n_0 + ND \quad (II.1)$$

Avec  $n_0$  est appelée la densité d'électrons générés par le processus de rupture de liaisons de covalence qui engendre des paires électrons-trous.

### II.2.2. Semi-conducteur dopé p :

Il s'agit d'un semi-conducteur dont la concentration en trous  $N_A$  est largement supérieure à la concentration en électrons. On y a introduit généralement du Bore, de l'Aluminium, du Gallium ou encore de l'Indium. On associe à l'atome dopant un niveau accepteur  $E_A$  dans la bande interdite très voisin de la bande de valence.

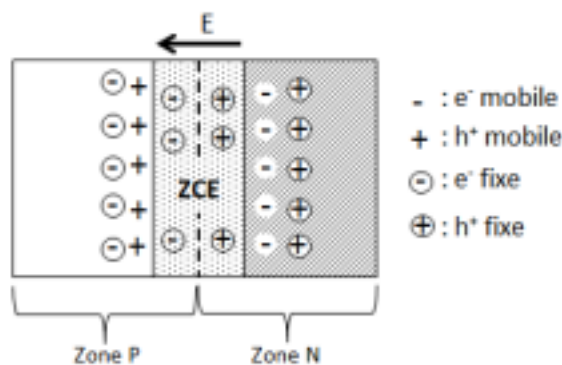
De la même manière que pour le semi-conducteur dopé n, la concentration en trous du semi-conducteur dopé p est [5]:  $p = p_0 + N_A$  (II.2)

## III. LES JONCTIONS PN :

### III.1. Définition :

La collecte des porteurs de charges générés est effectuée grâce à la présence d'un champ électrique qui permet de séparer les paires électron/trou. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction pn, qui consiste à la juxtaposition d'une région de type N et d'une région de type P d'un même cristal (Figure II.1)

Quand les électrons diffusent vers la zone dopée P, les trous diffusent dans la zone N, donc la séparation des charges est induite par le champ électrique produit par la différence des dopages.

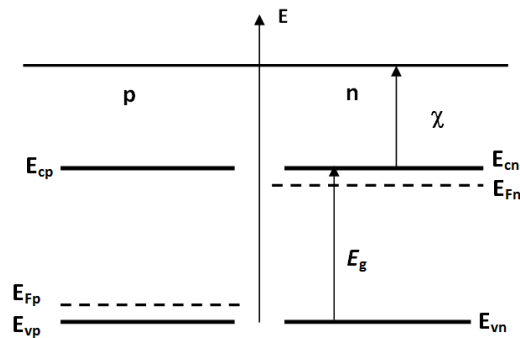


**Figure II.1 : Représentation schématique de la jonction p/n à l'équilibre. [6]**

### III.2. Structure et comportement d'une jonction p-n à l'équilibre :

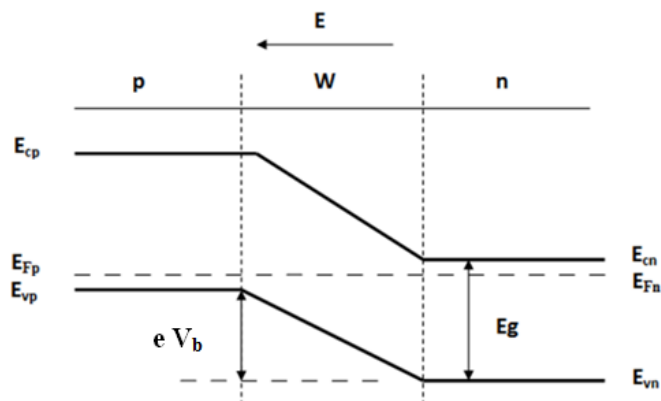
Soient deux semi-conducteurs de type n et p (**figure II.2**) caractérisés par leurs niveaux de Fermi respectifs ( $E_{fp}$  et  $E_{fn}$ ) et ayant un même gap  $E_g$  (cas d'une homojonction).

Tant que les deux semi-conducteurs sont isolés l'un de l'autre, chacun est électriquement neutre.



**Figure II.2 : Diagramme de bande de deux semi-conducteurs dopés p et n avant la mise en contact. [14]**

Lorsqu'on effectue un contact entre ces deux semi-conducteurs, on obtient ce que l'on appelle la jonction PN. En pratique, le contact doit être à une échelle atomique, soit une continuité du cristal de part et d'autre de la surface de la jonction.

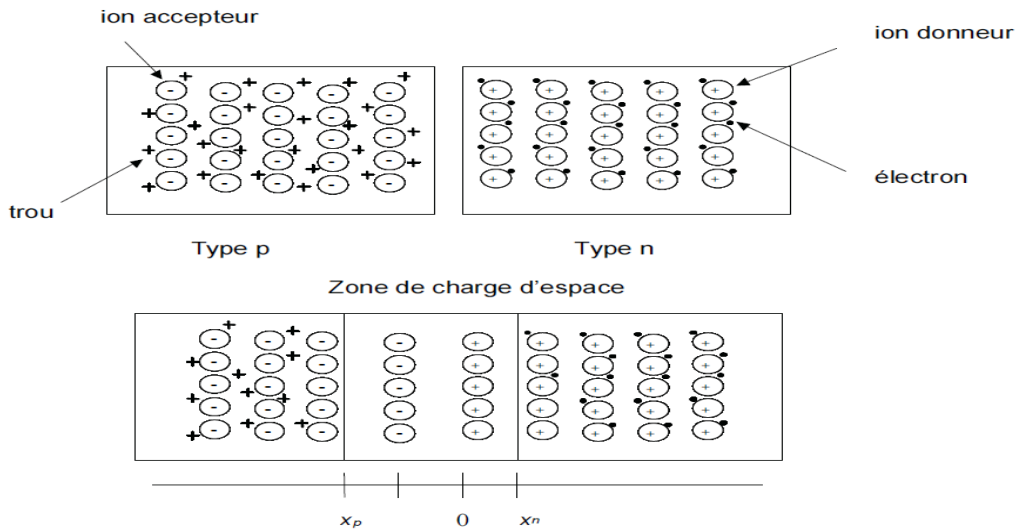


**Figure II.3 : Formation d'une jonction p-n. [14]**

### III.3. La zone de charge d'espace (ZCE):

Un gradient de concentration en électrons et en trous apparaît de part et d'autre de la surface de contact. Lorsque le contact est établi entre la zone n et la zone p. Il y aura une diffusion des porteurs de charge libres (électrons et trous) du côté où ils sont majoritaires vers celui où ils sont minoritaires.

Du côté p, la région dépeuplée aura une charge négative due aux ions négatifs accepteurs et du côté n elle aura une charge positive due aux ions positifs donneurs. On appelle cette région de charges fixes la *Zone de Charge d'Espace* (zone de déplétion, zone désertée). Cette zone est établie de part et d'autre de la surface de contact (jonction métallurgique) sans être forcément symétrique.



**Figure II.4 : Formation de la Zone de Charge d’Espace. [14]**

La formation de la jonction PN résulte un champ électrique  $E$  (champ de diffusion) dirigé du côté n (charge +) vers le côté p (charge -). Donc, Le potentiel correspondant est appelé potentiel de diffusion ou barrière de potentiel  $V_b$ .

Le semi-conducteur reste électriquement neutre en hors de cette de charge.

Le champ interne va s’opposer au phénomène de diffusion. En effet, un champ électrique ne favorise le mouvement des électrons que s’ils ne se bougent dans la direction contraire du champ. Or la diffusion des électrons majoritaires se fait dans la même direction que le champ. De la même manière, on sait que le champ électrique ne favorise le mouvement des trous que s’ils se déplacent dans la même direction que lui alors que la diffusion des trous se fait dans la direction contraire du champ. Alors, le champ s’oppose pareillement à la diffusion des trous. Une situation d’équilibre est atteinte. La jonction pn est entièrement formée avec une zone de charge  $W$  finie.

**III.4. Les caractéristiques d’une jonction PN :**

**III.4. 1.le densité de charge  $\rho(x)$  :**

La densité de charge qui existe au niveau de la zone de charge d’espace est donnée par :

$$\rho(x)=0 \quad (II.3) \quad \text{pour } x < -x_p \text{ et } x > x_n$$

$$\rho(x)= -e N_A \quad (II.4) \quad \text{pour } -x_p < x < 0$$

$$\rho(x)= e N_D \quad (II.5) \quad \text{pour } 0 < x < x_n$$

**III.4.2. Le champ électrique interne :**

➤ Champ électrique du côté "N" :  $(0 < x < x_n)$

Équation de GAUSS :  $dE_n(x)/dx = \rho(x)/\epsilon = e N_D/\epsilon.$  (II.6)

En intégrant et en tenant compte de la condition limite :  $E_n(x_n)=0$  (II.7), on trouve

$$E_n = \frac{eN_D(x - x_n)}{\epsilon} \quad (II.8)$$



➤ Champ électrique du côté "P" :  $(-x_p < x < 0)$

$$\text{Équation de GAUSS : } dE_p(x)/dx = \rho(x)/\varepsilon = -e N_A/\varepsilon \quad (\text{II.9})$$

En intégrant et en tenant compte de la condition limite :  $E_p(-x_p) = 0$  (II.10) on trouve :

$$E_p = \frac{-eN_A(x + x_p)}{\varepsilon} \quad (\text{II.11})$$

Au niveau de la jonction métallurgique, c'est-à-dire pour  $x = 0$  :

$$E_p(0) = E_n(0) \quad (\text{II.12})$$

Le champ électrique est une grandeur continue. On en déduit :

$$E_p(0) = E_n(0) = -q N_A x_p/\varepsilon = -q N_D x_n/\varepsilon = E_{\text{Max}} \quad (\text{II.13})$$

$$N_D X_n = N_A X_p \quad (\text{II.14})$$

### **III.4.3. Le potentiel de diffusion $V_b$ :**

La présence d'une charge d'espace entraîne l'existence d'un champ électrique et d'une variation de potentiel. Le potentiel varie d'une valeur  $V_p$  dans la région neutre de type p, à une valeur  $V_n$  dans la région neutre de type n.

La différence de potentiel entre ces deux régions constitue une barrière de potentiel que l'on appelle tension de diffusion, en raison du fait que c'est la barrière qui équilibre les forces de diffusion.

La hauteur de la barrière de potentiel qui s'oppose au courant majoritaire peut être déduite de la figure II.3 :

$$e V_b = E_{cp} - E_{cn} = E_{vp} - E_{vn} \quad (\text{II.15})$$

Sachant que:

$$n_n = N_c \exp\left[\frac{-(E_{cn} - E_F)}{kT}\right] \quad (\text{II.16})$$

Et

$$n_p = N_c \exp\left[\frac{-(E_{cp} - E_F)}{kT}\right] \quad (\text{II.17})$$

La tension de diffusion est par conséquent donnée par l'expression:

$$V_b = \frac{KT}{e} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \quad (\text{II.18})$$

### **III.4.4. Répartitions des porteurs majoritaires et minoritaires :**

En dehors de la ZCE, les densités de porteurs libres dans chacune des régions N et P sont données par :

- $p_p = N_A =$  densité des trous du côté "P".
- $p_n = n_i^2/N_D =$  densité des trous du côté "N".

- $n_n = N_D$  = densité des électrons du côté "N"
- $n_p = n_i^2/N_A$  = densités des électrons du côté "P". (II.19)

**III.4.5. Largeur de la zone de charge d'espace :**

L'intégration du champ électrique sur toute l'épaisseur de la zone désertée donne la valeur de la tension de la barrière de potentiel. On trouve :

$$V_b = e (N_A x_p^2 + N_D x_n^2) / 2\epsilon \quad (II.20)$$

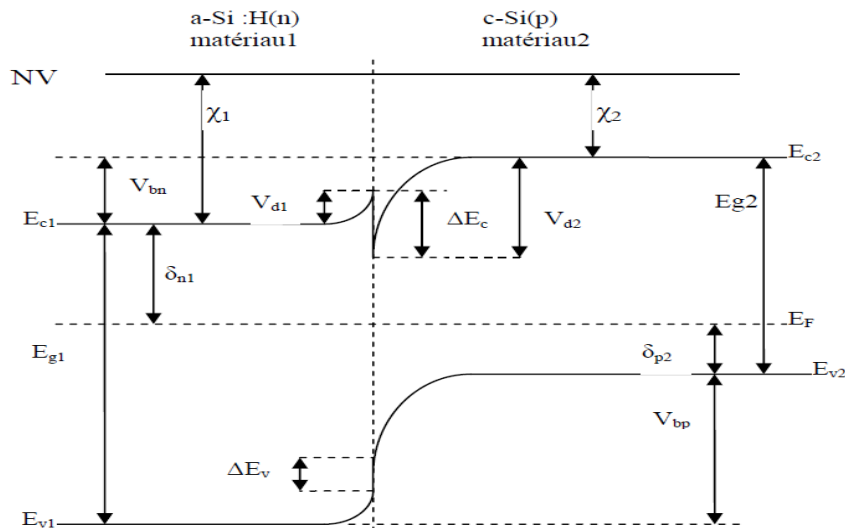
Comme  $W = x_p + x_n$  (II.21)

$$W = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon}{e} \left( \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) V_b} \quad (II.22)$$

**IV. MODELE D'ANDERSON :**

Le modèle d'Anderson (1960) [15] est le modèle de base pour décrire les conditions de mise en contact de deux matériaux semi-conducteurs. Le principe de ce modèle repose sur la prise en compte des propriétés électroniques des matériaux utilisés : permittivité électrique  $\epsilon$ , affinité électronique  $\chi$  et largeur de bande interdite  $E_g$ . Les différences entre les valeurs  $E_{g1}$ ,  $E_{g2}$  et les affinités électroniques  $\chi_1, \chi_2$  engendrent une discontinuité au niveau du raccordement des bandes de conduction et de valence  $\Delta E_c$  et  $\Delta E_v$ , le modèle d'Anderson ne prend pas en considération les états d'interface et s'appuie sur l'hypothèse que le transport du courant se fait par injection dans les régions quasi-neutres ou bien par recombinaison / génération dans la zone de charge d'espace.[16]

**IV.1. CAS D'UNE CELLULE HIT DE TYPE P :**



**Figure II.5 : Diagramme de bande d'une hétérojonction en face avant a-Si : H(n)/c-Si(p).**

Les discontinuités de bandes  $\Delta E_c$  et  $\Delta E_v$  :

$$\Delta E_c = e(\chi_2 - \chi_1) \quad (II.23)$$

$$\Delta E_v = E_{g1} - E_{g2} - e(\chi_2 - \chi_1) \quad (II.24)$$

Calcul du potentiel induit :

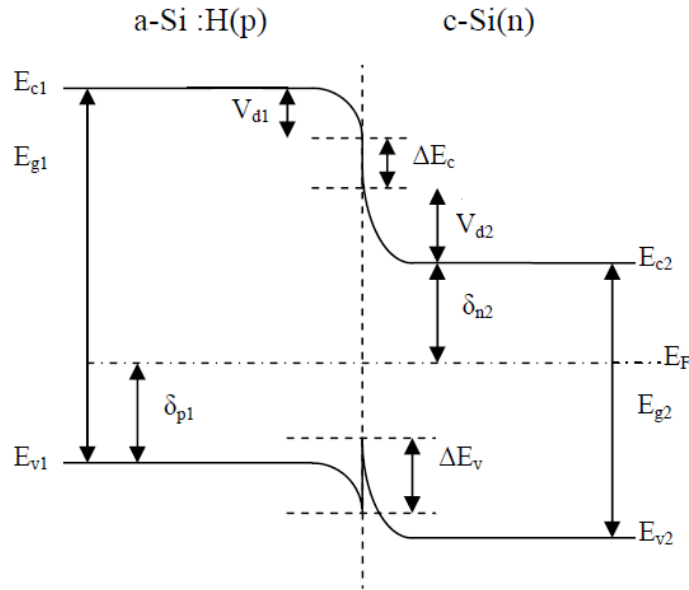
$$V_{bn} + \delta_{n1} = E_{g2} - \delta_{p2} \quad (\text{II.25})$$

$$V_{bn} - V_{d1} = V_{d2} - \Delta E_c \quad (\text{II.26})$$

En tirant  $V_{bn}$  de l'équation (II.24) et en le remplaçant dans (II.25), nous trouvons(II.26) :

$$V_d = V_{d1} + V_{d2} = E_{g2} - \delta_{p2} - \delta_{n1} + \Delta E_c$$

**IV.2. CAS D'UNE CELLULE HIT DE TYPE N :**



**Figure II.6 : Diagramme de bande d'une hétérojonction en face avant a-Si:H(p)/c-Si(n).**

Les discontinuités de bandes  $\Delta E_c$  et  $\Delta E_v$  :

$$\Delta E_c = e(\chi_2 - \chi_1) \quad (\text{II.27})$$

$$\Delta E_v = E_{g1} - E_{g2} - e(\chi_2 - \chi_1) \quad (\text{II.28})$$

Calcul du potentiel induit :

A partir du diagramme, nous avons :

$$E_{g1} = V_{d1} + \Delta E_c + V_{d2} + \delta_{n2} + \delta_{p1}$$

$$\Rightarrow V_{d1} + V_{d2} = E_{g1} - \Delta E_c - \delta_{n2} - \delta_{p1} \quad (\text{II.29})$$

De l'équation (II.28) on trouve  $\Delta E_c = E_{g1} - E_{g2} - \Delta E_v$  (II.30)

On remplace  $\Delta E_c$  dans (II.29) et on trouve : (II.31)

$$V_d = V_{d1} + V_{d2} = E_{g2} - \delta_{n2} - \delta_{p1} + \Delta E_v$$

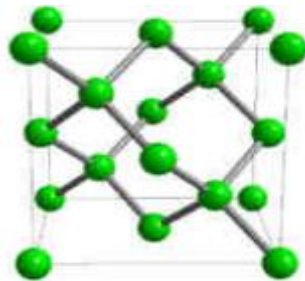
### V. LE SILICIUM CRISTALLIN :

#### V.1. Généralités :

Les cellules solaires à hétérojonctions de silicium sont constituées d'un substrat en silicium cristallin. Le silicium est le 2ème élément le plus abondant sur terre après l'oxygène, il constitue 27% de la croûte terrestre. Il n'existe pas à l'état libre mais sous forme de dioxyde de silicium  $\text{SiO}_2$  dans la silice les silicates. [17]

#### V.2. Les caractéristiques du silicium cristallin :

Le silicium cristallin a une structure cristallographique de type diamant, c'est un système cristallin cubique à face centrée (cfc) avec la moitié des sites tétraédriques occupés (Figure II.7). Le réseau du silicium cristallin peut aussi être décrit comme deux réseaux cfc imbriqués, décalés de  $\frac{1}{4}$  de la diagonale principale. Le motif est donc constitué de deux atomes de silicium en position  $(0,0,0)$  et  $(\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4})$ . [18].



**Figure II.7: structure cristallographique du silicium de type diamant. [18]**

#### V.3. Le gap du silicium :

Dans le silicium cristallin, le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction se situent en des points différents de l'espace réciproque. Dans ce cas, le gap est dit indirect et sa valeur est de 1,12 eV. Dans le cas d'une transition via un gap indirect, la participation d'un phonon est indispensable pour passer de la bande de valence à la bande de conduction (Figure II.8). Réciproquement, pour passer de la bande de conduction à la bande de valence, un électron a besoin de l'assistance d'un phonon pour se recombiner avec un trou.

Cette nécessité de l'ajout d'un phonon implique une diminution du taux de recombinaison radiative par rapport à un matériau à gap direct. [18].

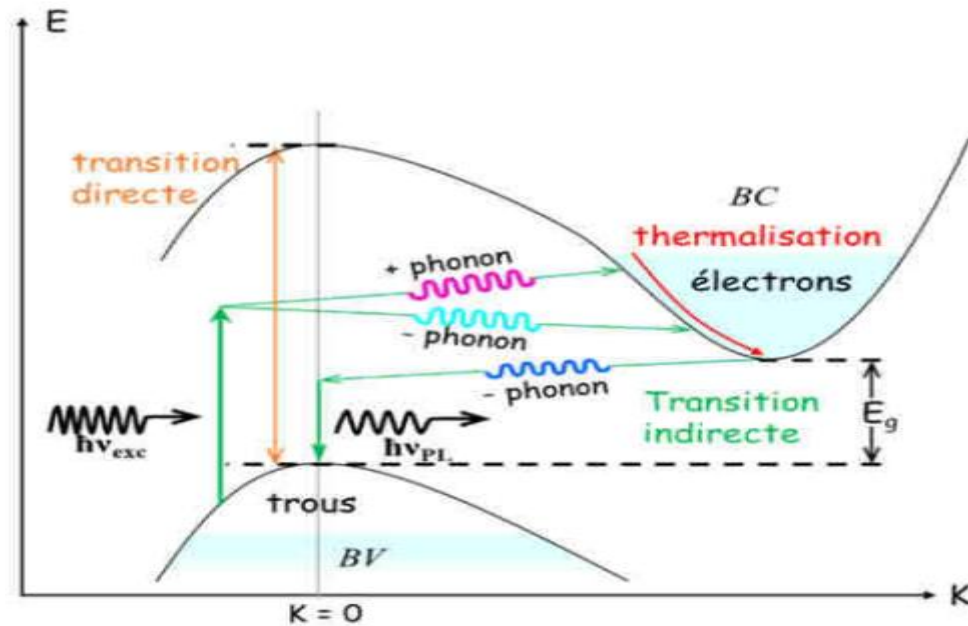


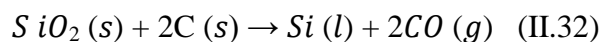
Figure II.8 : Structure de bande de silicium cristallin. [18]

#### V.4. Purification du silicium :

Le silicium extrait des mines n'est pas assez pur pour une application photovoltaïque et a besoin d'être purifié. Ils existent de nombreuses techniques qui permettent d'obtenir du silicium de grade métallurgique (MG-Si) avec une pureté de 98-99%, ensuite de grade solaire (SoG-Si) ou électronique (EG-Si). [19]

##### V.4.1. De la silice au silicium métallurgique :

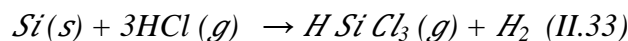
La carboréduction de la silice ( $\text{SiO}_2$ ) à des températures supérieures à  $1900^\circ\text{C}$  permet d'obtenir le MG-Si [18]. L'opération est réalisée dans un four à arcs électriques où des composés fortement carbonés, utilisés comme réducteur, sont mélangés au  $\text{SiO}_2$  :



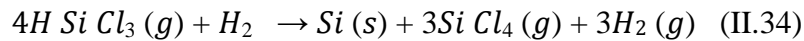
A ce stade, le MG-Si obtenu contient des impuretés en grande quantité dont des carbures de silicium (SiC), du  $\text{SiO}_2$  ou encore des impuretés métalliques. Pour la fabrication de matériaux destinés aux cellules solaires, une étape de purification supplémentaire est nécessaire.

##### V.4.2. Du silicium métallurgique au silicium électronique :

Le procédé SIEMENS est la méthode la plus habituellement utilisée pour diminuer les impuretés dans le silicium. Cette voie de purification est dite chimique (opposée à la voie métallurgique). Elle consiste à la réduction de trichlorosilane ( $\text{HSiCl}_3 = \text{TCS}$ ). Le TCS est formé à partir d'une réaction d'hydrochloration entre le MG-Si et de l'acide Chlorhydrique (HCl) à des températures comprises entre  $300\text{-}350^\circ\text{C}$  [19] :



Les produits de cette première étape doivent être séparés et le TCS purifié avant d'obtenir le silicium. Ce dernier est obtenu par un dépôt chimique en phase vapeur (CVD pour chemical vapor deposition), à haute température ( $\approx 1100^{\circ}\text{C}$ ) et en présence d'hydrogène [17]



Le silicium est alors obtenu sous une forme polycristalline et est prêt à être utilisé pour la cristallisation des lingots [19].

### V.5. CRISTALLISATION DES LINGOTS DE SILICIUM :

La méthode d'élaboration des lingots de silicium est choisie en fonction de son coût et de la qualité du matériau voulu. Dans cette partie, trois principales techniques sont exposées : la solidification dirigée, la méthode Czochralski (Cz) et la méthode de zone fondue (FZ pour float zone), qui produisent du silicium monocristallin.

#### V.5.1 Procédé de solidification dirigée :

La méthode de solidification dirigée consiste à faire fondre une charge de silicium préalablement purifié dans un creuset en silice. Ce dernier est recouvert d'une couche anti-adhérente de nitrure de silicium ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) séparant et limitant toute réaction entre le silicium liquide et la silice solide. La température du bain de silicium est homogénéisée, puis le creuset est progressivement refroidi du bas vers le haut. Un gradient de température se forme et un front de solidification se crée. Des grains de tailles et d'orientations différentes avec une croissance colonnaire se développent et forment un silicium dit « multicristallin » (Figure II.9).

De par sa forte productivité, ce type de cristallisation présente l'avantage d'être peu coûteuse. Les lingots issus de cette méthode ont des masses supérieures à 600Kg.

Cependant, la présence de grains avec différentes orientations cristallines et d'impuretés métalliques font du silicium multicristallin (mc-Si) un matériau avec des propriétés électriques moyennes par rapport à du silicium provenant d'une cristallisation Czochralski.[19]

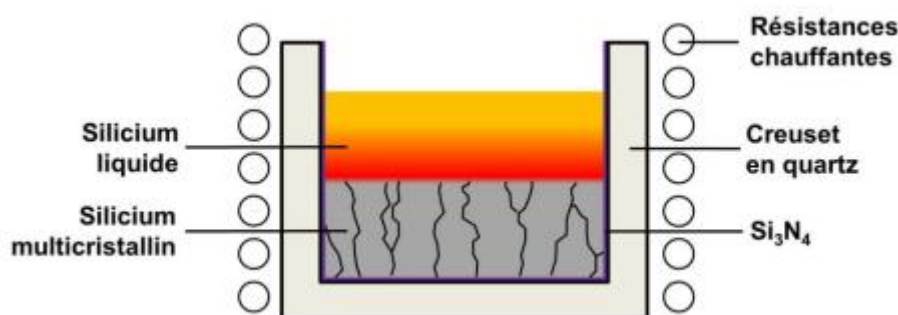
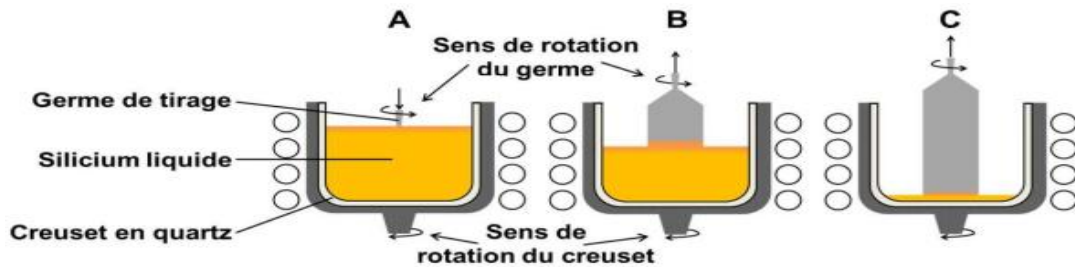


Figure II.9: Cristallisation d'un lingot multicristallin par solidification dirigée. [19]

#### V.5.2. Procédé Czochralski :

Dans la méthode de cristallisation Czochralski, une charge de silicium est fondue dans un bain en quartz mis en rotation. Lorsque la température du silicium est

stabilisée, un monocristal de silicium, également en rotation et appelé germe est mis en contact avec le bain (Figure II.10.A). Le germe permet de tirer un lingot ayant la même orientation cristalline. Dans le cas d'un lingot destiné à la fabrication de cellules solaires, le germe est orienté  $\langle 100 \rangle$  afin de faciliter la texturation de surface. [19]



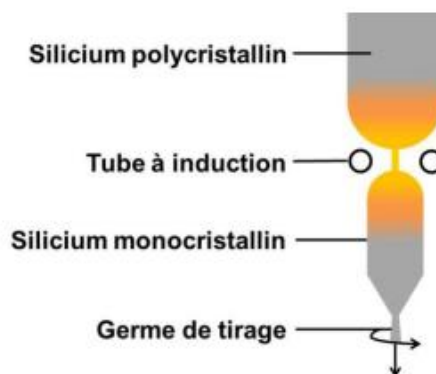
**Figure II.10 : Cristallisation d'un lingot Cz, A : mise en contact du germe, B et C : tirage du corps du lingot. [19]**

Plusieurs étapes sont donc nécessaires pour tirer le lingot. La première étape consiste à former la tête de lingot de manière à obtenir le diamètre souhaité. La formation maîtrisée de cette partie permet d'obtenir un matériau avec peu, voire pas, de défauts cristallographiques. Le corps du lingot est, dans un second temps tiré, et peut atteindre deux mètres de longueur (environ 150-200kg). La fin du tirage se produit lorsqu'il ne reste quasiment plus de silicium dans le creuset (Figure II.10.B et C). [19]

Le matériau obtenu est monocristallin et a des propriétés électriques performantes. Cependant, la durée du procédé et la quantité relativement moyenne de silicium produit en font un matériau coûteux. Par ailleurs, la présence de quantités importantes d'oxygène provenant du creuset peut entraîner la formation de défauts lors de la cristallisation.

### V.5.3. Procédé Float Zone :

La méthode Float Zone (FZ) est une alternative au procédé Cz pour obtenir du silicium monocristallin. Un germe est placé en contact d'un barreau polycristallin de silicium. Le silicium est fondu localement entre le germe et le barreau. La zone fondue est ensuite déplacée le long du barreau. Lors du refroidissement, le matériau prend l'orientation cristalline du germe pour former du silicium monocristallin (Figure II.11).



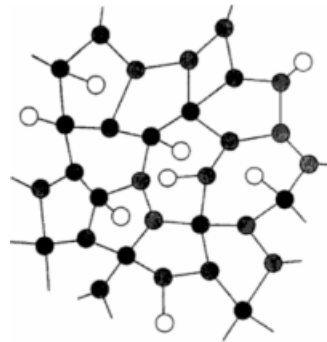
**Figure II.11 : Cristallisation d'un lingot FZ. [19]**

Avec cette méthode de cristallisation, l'absence de creuset en quartz permet de réduire considérablement la concentration en oxygène. Elle permet donc d'obtenir un matériau de très haute qualité. Cependant, son coût de fabrication très élevé n'est pas compatible avec une utilisation à l'échelle industrielle pour le PV. [19]

### VI.LE SILICIUM AMORPHE HYDROGENE :

#### VI.1. Les caractéristiques:

Le silicium amorphe hydrogéné est de structure désordonnée. Les atomes de silicium tétravalents, ne sont plus reliés entre eux formant ainsi des liaisons pendantes. Ces dernières peuvent créer des défauts recombinants qui sont passivés par des atomes d'hydrogène (H). Le gap du matériau est égal à 1.7 eV mais peut varier suivant le ratio des réactifs lors des dépôts. Il est assez simple de doper le silicium amorphe à l'aide de diborane ( $B_2H_6$ ) pour un dopage type p et de phosphine ( $PH_3$ ) pour un dopage type n. Cependant, le dopage introduit des défauts dans la couche pouvant se retrouver à l'interface entre le silicium cristallin et amorphe. [19]



**Figure II.12 : Représentation schématique de la structure du silicium amorphe hydrogéné. Les atomes de silicium sont représentés en noir et les atomes d'hydrogène en blanc. [20]**

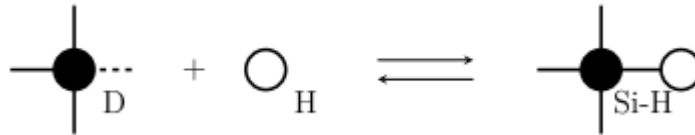
#### VI.2. Les liaisons pendantes :

On observe dans le silicium amorphe des liaisons pendantes, c.-à-d des liaisons d'atomes non liées à leurs atomes voisins. La passivation des liaisons pendantes par l'hydrogène a pour effet de réduire la densité des défauts de plusieurs ordres de grandeur, de  $10^{25}$ -  $10^{26}$  à  $10^{21}$  -  $10^{22}$   $m^{-3}$ [1]. Toutefois, l'existence de l'hydrogène est associée à la dégradation du matériau par exposition prolongée à la lumière.

#### VI.3. Le rôle de l'hydrogène :

Le silicium amorphe non hydrogéné a une densité de défauts profonds dus aux liaisons pendantes de l'ordre de  $10^{19}$   $cm^{-3}$ . L'hydrogène incorporé passive la majorité des liaisons pendantes, le silicium amorphe est donc beaucoup moins défectueux puisque la densité de défauts profonds est de l'ordre de  $10^{16}$   $cm^{-3}$ . Il devient donc bien meilleur photoconducteur. [20]





**Figure II.13 : Équilibre de passivation des liaisons pendantes des atomes de silicium par l'hydrogène. [20]**

La réduction des défauts augmente l'efficacité des atomes dopants. L'introduction d'hydrogène facilite donc la variation du niveau de Fermi avec le dopage des couches.

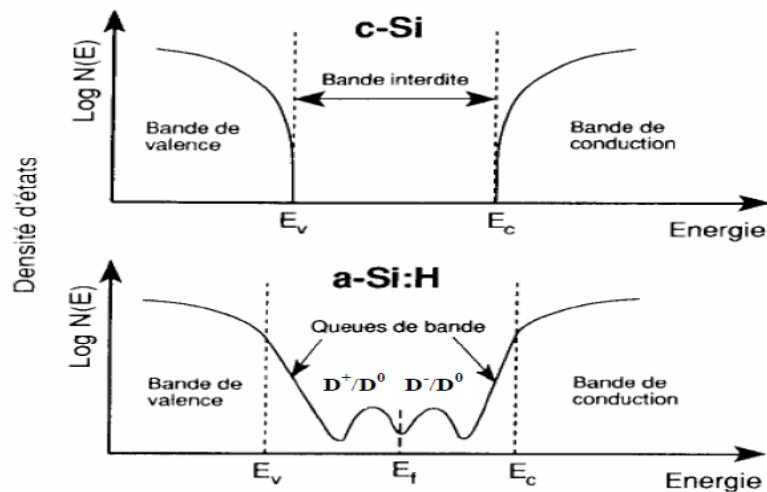
L'hydrogène a également la capacité d'élargir le gap du silicium amorphe. La largeur de bande interdite du a-Si :H vaut environ 1,2 eV et peut atteindre 2,10 eV pour les matériaux a-Si:H comportant une forte concentration d'hydrogène. [20]

Néanmoins l'hydrogène n'a pas que des bienfaits dans le silicium amorphe puis qu'il peut également être à l'origine de la rupture de liaisons faibles Si-Si.

**VI.3. Diagramme de bandes du silicium amorphe hydrogéné :**

La distorsion des angles des liaisons et la variation des distances interatomiques conduisent à la création d'états électroniques localisés dans la bande interdite à proximité des bandes de valence et de conduction que l'on appelle queues de bandes. Ces états localisés participent à l'absorption des photons.

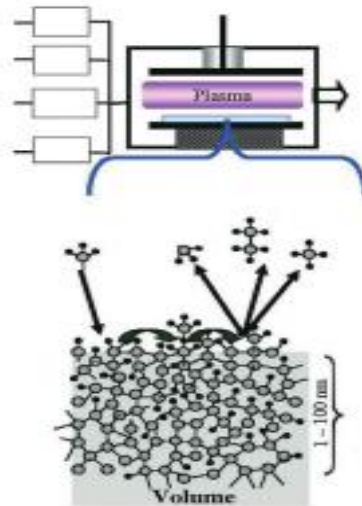
Les liaisons pendantes et les impuretés font apparaître des états électroniques vers le milieu de la bande interdite que l'on appelle défauts profonds.



**Figure II.14 : Distribution d'états du silicium cristallin et du silicium amorphe hydrogéné. [21]**

**VI.5. PROCEDE DE FABRICATION :**

La principale technique de synthèse du silicium amorphe hydrogéné est le dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma radiofréquence dit PECVD (Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition). La figure II.15 représente un schéma de réacteur PECVD. [21]



**Figure II.15: Dépôt du a-Si:H par PECVD. [20]**

Le silane et le dihydrogène sont utilisés comme gaz-sources et sont complétés par un gaz dopant, généralement le diborane  $B_2H_6$  ou la phosphine  $PH_3$ . Dans le plasma, les collisions inélastiques entre les électrons de haute énergie accélérés par le champ électrique radiofréquence et le silane génèrent des radicaux, des ions et des espèces excitées. Les espèces réactives produites dans le plasma se condensent sur le substrat en formant une couche mince désordonnée. Le dépôt se déroule à relativement basse température et peut se réaliser sur une très grande surface.

## VII. LES CELLULES SOLAIRES SHJ DE TYPE N ET DE TYPE P :

### VII.1. La structure des cellules solaires SHJ :

Sanyo a démontré la qualité supérieure de la passivation de surface dans les cellules SHJ avec sa structure HIT (Hétérojonction with Intrinsic Thin Layer). En conséquence, en insérant une couche a-Si:H non dopée (intrinsèque) entre le substrat cristallin et la couche de a-Si:H dopée, on augmente considérablement la passivation de surface. La faible épaisseur de cette couche d'a-Si:H intrinsèque dite « tampon » ne perturbe pas le champ électrique tout en diminuant la densité de défauts à l'interface.

En ce qui concerne l'acheminement des porteurs de charge vers les électrodes métalliques en face avant, une couche d'Oxyde Transparent Conducteur (OTC) déposée sur toute la surface est nécessaire. Elle sert à la fois de couche anti-reflet et permet un transport latéral des porteurs de charge car les couches de a-Si:H ont une conductivité très inférieure à celle du c-Si et ne peuvent assumer ce rôle. Un bon contact avec les électrodes métalliques est assuré également par l'OTC. C'est pour cela en général l'OTC est ainsi utilisé pour le contact de la face arrière (Figure II.16). [22]

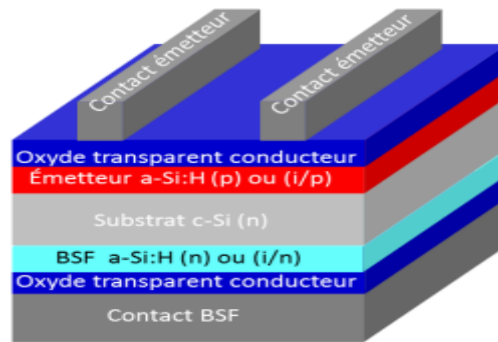


Figure II.16 : Schéma d'une cellule à hétérojonction a-Si:H/ c-Si. [22]

### VII.2. Procédé de fabrication des cellules solaires SHJ :

Nous exposons les étapes du procédé de fabrication des cellules, ensuite nous discuterons de la position de la jonction P/N sur la face avant ou la face arrière des cellules.

#### a) Etapes de texturation de surface :

La première étape des procédés de fabrication des cellules solaires est la texturation des surfaces. Elle a l'avantage d'allier deux étapes en une. La première est la suppression de la zone défectueuse générée sur une profondeur de quelques micromètres durant le sciage des lingots en plaquette. Les texturations se faisant en milieu basique, elles favorisent l'adsorption d'atomes métalliques à la surface des plaquettes. [19]

#### b) Nettoyages des surfaces :

Le nettoyage standard est composé de différentes étapes qui permettent de diminuer la contamination métallique et d'enlever les impuretés présentes sur les surfaces .

#### c) Désoxydation des surfaces :

La désoxydation finale de la surface est réalisée, pour cela on utilise l'acide fluorhydrique HF juste devant les dépôts , l'oxyde de surface est convertie par des liaisons Si-H et Si-F plus ou moins stable conformément la qualité de l'étape.

#### d) Déposition des couches de silicium amorphe hydrogéné :

Les couches d'a-Si:H précédemment décrites sont déposées par voie chimique en phase vapeur assisté par plasma (PECVD). Les couches peuvent être dopées n avec l'ajout de  $\text{PH}_3$  ou p avec l'ajout de  $\text{B}_2\text{H}_6$ . La croissance se fait par physisorption à la surface du substrat à des températures d'environ  $200^\circ\text{C}$ . [19]

#### e) Déposition des couches d'oxydes transparents conducteurs :

Les Oxydes Transparents sont à la fois choisis pour leur propriété optique, en jouant le rôle de couche anti-reflet, et de leur propriété électrique avec une conduction électrique important. L'OTC principalement utilisé est l'oxyde d'étain-indium (ITO pour Indium Tin Oxide) pour ces bonnes propriétés de conduction, absorption et réflectivité. Il

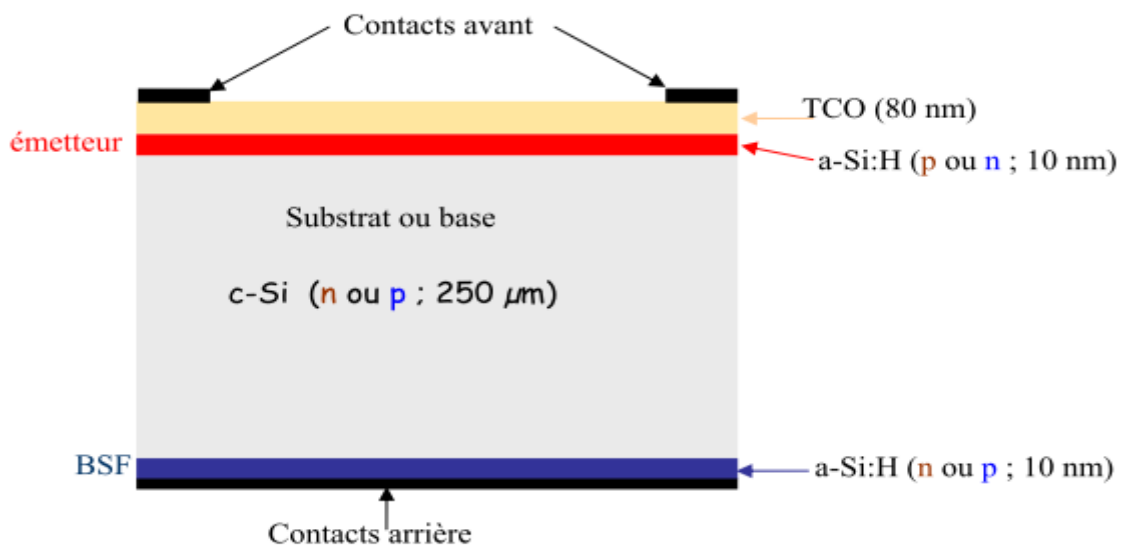
peut être déposé par dépôt physique par phase vapeur (PVD pour Physical Vapor Deposition) à des températures comprises entre 150 et 200°C. [19]

### f) Métallisation des cellules :

Les grilles de métallisation permettent de collecter les charges photogénérées. La technique la plus répandue pour leur fabrication est le dépôt d'une pâte d'argent (Ag) à travers un masque de sérigraphie. La pâte est ensuite recuite autour de 170°C afin d'évaporer les solvants. Cette technique a l'avantage d'être rapide et peu coûteuse. La forme de la grille est un compromis entre une collecte efficace des charges et un ombrage minimal de la surface active. Des pâtes dédiées à la technologie SHJ sont utilisées avec des températures de recuit inférieures à celles utilisées pour des cellules solaires HMJ. [19]

### VII.3. Choix du type de la base dans une cellule SHJ :

Il existe deux types de cellules SHJ selon le dopage du silicium cristallin qui constitue la base (ou bien la couche active) de la cellule.



**Figure II.17 : Structure d'une cellule photovoltaïque silicium à hétérojonctions (de type n ou de type p). [16]**

#### VII.3.1. Structure SHJ comprenant un substrat dopé n :

La structure à hétérojonction créée par le groupe de recherche SANYO possède un avantage principal par rapport aux cellules conventionnelles : l'utilisation de silicium amorphe déposé à basse température et l'obtention de rendements supérieurs à 20% en laboratoire sur du silicium monocristallin dopé n à des températures inférieures à 300°C. En effet, après une recherche de plusieurs années, cette équipe a su trouver les solutions pour développer des cellules photovoltaïques dont l'intérêt principal se trouve au niveau de l'hétérojonction silicium amorphe/silicium cristallin. De simples cellules de type a-Si:H(p)/c-Si(n) ont été fabriquées. Ces hétérojonctions avaient des tensions en circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) et facteur de forme (FF) toujours inférieurs à ceux des cellules conventionnelles. Cela s'est

## CHAPITRE II : LES CELLULES SOLAIRES SHJ.

expliqué par la forte recombinaison à l'intérieur de la zone de déplétion et plus exactement à l'interface amorphe/cristallin. De plus, le silicium amorphe hautement dopé possède une forte densité de défauts autour du milieu du gap, qui augmente par effet tunnel le courant de fuite. Ce phénomène a été largement diminué en insérant une couche de silicium amorphe intrinsèque qui possède moins de niveaux pièges. Cela améliore la tension en circuit ouvert et en conséquence le rendement de la cellule. Le tableau ci-dessous (II.1) présente les valeurs de tension en circuit ouvert  $V_{oc}$ , densité de courant de court-circuit  $J_{sc}$ , facteur de forme FF et rendement  $\eta$  sur des cellules de surface égale à  $1 \text{ cm}^2$  avec et sans couche intrinsèque. [23]

Nous remarquons l'amélioration apportée par la couche intrinsèque.

HIT	$V_{oc}$ (mV)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	$\eta$ (%)
ITO/p-a-Si:H/n-c-Si/métal	570	30.0	72.0	12.3
ITO/p-a-Si:H/i-a-Si:H/n-c-Si /métal	600	33.5	74.0	14.8

**Tableau II.1 : Caractéristiques  $J=f(V)$  sur des cellules HIT de surface égale à  $1 \text{ cm}^2$  avec et sans couche intrinsèque de silicium amorphe. [15]**

La mise en place d'un champ de surface arrière (BSF : Back Surface Field) ainsi qu'une texturation de surface permettent d'obtenir un haut courant de court-circuit donc un meilleur rendement. (Voir Tab. II.2). La texturation de surface confinant la lumière augmente le nombre de porteurs photogénérés et donc le courant de court de circuit, tandis que le champ de surface arrière forme une barrière de potentiel à l'arrière de la cellule empêchant les porteurs minoritaires d'aller se recombinaison sur la surface arrière [15]

HIT	$V_{oc}$ (mV)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	FF(%)	$\eta$ (%)
ITO/p-a-Si:H/i-a-Si:H/n-c-Si/BSF/métal + texturation	638	37.9	77.5	18.7
ITO/p-a-Si:H/i-a-Si:H/n-c-Si/i-a-Si/ n <sup>+</sup> -a-Si:H/métal + texturation	644	39.4	79.0	20.0

**Tableau II.2: Caractéristiques  $J=f(V)$  sur des cellules HIT de surface égale à  $1 \text{ cm}^2$  pour une cellule simple HIT et double HIT.[15]**

### VII.3.2. Structure SHJ comprenant un substrat dopé p :

Suite au succès obtenu par l'entreprise SANYO, plusieurs laboratoires européens ont débuté des recherches en se basant sur le même type de structure mais en utilisant un substrat de type p, plus largement utilisé dans l'industrie photovoltaïque. Le silicium de type p utilisé vient en majeure partie du recyclage du silicium de l'industrie microélectronique.

Le groupe le plus avancé est constitué du laboratoire allemand de Hahn-Meitner-Institut de Berlin en collaboration avec l'Université de Hagen. Ce groupe est parvenu à fabriquer des cellules sur substrat non texturé d'une épaisseur de  $350\mu\text{m}$  avec BSF (Back Surface Field), possédant un rendement de 16.2%. Ce résultat laisse penser que ce type de cellule avec une texturation de surface et un champ arrière (BSF) fait de silicium amorphe est très susceptible d'atteindre de très hauts rendements. [23]

### VII.4. Le rôle de chaque couche d'une cellule SHJ :

#### VII.4.1. L'oxyde transparent conducteur:

Dans la structure standard d'une cellule photovoltaïque, un oxyde transparent conducteur est placé sur la face avant (face éclairée) de la cellule. Il doit être avoir une excellente transparence optique. Etant placé sur la face avant, cette condition est nécessaire pour avoir le maximum de lumière qui pénètre dans la cellule pour générer des paires électron-trou. Il doit avoir également une bonne conductivité pour assurer la collecte des porteurs. Et enfin, il doit avoir une bonne adhérence sur une variété de substrats.

Les oxydes transparents conducteurs sont des matériaux à grand gap. Il existe une grande variété d'oxydes transparents conducteurs possibles : Les oxydes de zinc, les oxydes d'étain et les oxydes d'indium qui peuvent être dopés avec un grand nombre d'éléments atomiques (selon les cas : Al, In, Ga, F, Sn).

#### VII.4.2. L'émetteur :

L'émetteur est constitué par une fine couche de silicium amorphe hydrogéné de dopage opposé au substrat. L'émetteur permet de créer une jonction p-n afin de séparer les paires électron-trou photogénérés. Il doit être pris très mince pour minimiser l'absorption dans cette couche. Pourtant, c'est une couche qui a une résistance carrée importante d'où la nécessité de la couvrir d'un excellent conducteur (métal ou oxyde transparent conducteur) pour assurer la collecte des porteurs.

#### VII.4.3 L'absorbeur c-Si « substrat » de type n ou p

L'absorbeur, appelé également couche active, est réalisé à partir de silicium cristallin sur une épaisseur  $\sim 300\mu\text{m}$ . C'est dans cette couche que la transformation des photons incidents en paires électrons/ trous est réalisée. Le silicium cristallin étant un matériau qui présente peu de défaut, le taux de recombinaison  $\gamma$  est faible, induisant une bonne génération de courant photogénéré. [14]

#### VII.4.4 Le BSF :

Le BSF est une couche qui crée un champ électrique arrière et qui permet également de passiver la face arrière de la cellule. Le BSF est une couche fortement dopé ( $p^+$  ou  $n^+$ ) avec le même type de dopage que le substrat. Avec une jonction  $p^+ - p$  ou  $n^+ - n$ , une barrière de potentiel est induite par la différence de niveau de dopage entre le substrat et le BSF. Cette barrière de potentiel sur la face arrière de la structure permet de confiner les porteurs minoritaires dans le substrat et aussi d'éviter qu'ils ne se recombinent sur la face arrière de la cellule. La structure BSF permet de diminuer les recombinaisons sur la face arrière et d'assurer une meilleure collecte des porteurs majoritaires. [16]

#### VII.4.5. Les contacts :

Les contacts métalliques sont placés sur les deux faces de la cellule pour les structures standards. Ces contacts permettent de collecter le courant photogénéré. Les contacts métalliques de type ohmique constituent un cas idéal car le maximum de courant sera collecté avec ce type de contact.

### VII. CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons présenté une description générale sur les semi-conducteurs puis nous avons décrit les différents phénomènes que l'on rencontre dans la jonction p-n, considérée comme le cœur de la cellule solaire.

Ainsi, nous avons défini un modèle appelée le modèle d'Anderson qui caractérise les conditions de contact de deux matériaux semi-conducteurs de type n et de type p, ensuite nous avons présenté les propriétés de chaque type de silicium : le cristallin et l'amorphe.

Enfin, nous avons fait une recherche concernant les cellules SHJ qui contiennent un substrat de type n ou bien un substrat de type p, puis nous avons présenté la structure et le procédé de fabrication de ce type de cellule ainsi que le choix du type de la base et le rôle de chaque couche qui constitue la cellule SHJ.

**CHAPITRE III :**  
**MODELISATION ET SIMULATION DES**  
**CELLULES SOLAIRES**



**CHAPITRE III :  
MODELISATION ET SIMULATION DES CELLULES SOLAIRES**

**I.INTRODUCTION :**

La simulation numérique des cellules solaires est une méthode incontournable pour la technologie photovoltaïque. Elle permet de prédire les performances des cellules solaires grâce à la résolution des équations de base des semi-conducteurs.

L'étude des phénomènes de transport des charges dans les cellules solaires est un critère clé pour expliquer leur fonctionnement, à cet effet, en utilisant un modèle mathématique, il est possible d'extraire les propriétés optiques et électriques des cellules solaires.

**II.MODELISATION DES CELLULES SOLAIRES :**

Dans le but de modéliser les cellules solaires, il est nécessaire de développer un circuit équivalent précis en analysant la configuration physique des éléments de la cellule ainsi que leurs caractéristiques électriques. A cet effet, il existe plusieurs modèles électriques pour représenter la cellule photovoltaïque.

**II.1.Modèle mathématique équivalent à une cellule photovoltaïque:**

Le modèle mathématique associée à une cellule se calcul à l'aide de celui d'une jonction p-n.

**II.1.1. Jonction PN sous obscurité:**

Une polarisation inverse de la diode (tension négative appliquée à la zone p) entraîne une augmentation de la hauteur de barrière. Le flux de majoritaires est alors réduit au courant de fuite ou bien courant de saturation de la diode qui injecte les électrons de l'émetteur dans la base pour compenser les pertes en minoritaires dues aux recombinaisons. Donc, On dit que la jonction est sous obscurité.

$$J_{obsc} = J_0 \left( e^{\frac{qV}{nKT}} - 1 \right) \quad (III.1)$$

Avec V : tension aux bornes de la jonction (V)

$J_0$  : densité de courant de saturation de la diode ( $A.cm^{-2}$ )

n : facteur d'idéalité de la diode

**II.1.2. Jonction PN sous éclairement:**

La caractéristique d'une jonction éclairée est identique à celle de la même jonction dans l'obscurité avec une densité de courant ( $J_{ph}$ ) qui vient s'ajouter au courant

## CHAPITRE III : MODELISATION ET SIMULATION DES CELLULES SOLAIRES

d'obscurité ( $J_{obs}$ ). Le flux de porteurs minoritaires photogénérés va à l'inverse du flux de majoritaires (courant de diffusion) considéré comme le courant positif dans la convention électrique des composants passifs. Une diode sous éclairement voit donc sa caractéristique J-V décalée vers les valeurs négatives de courant (relation III.2). [22]

$$J_{\text{éclairage}} = J_{ph} - J_{obs} = J_{ph} - J_0 \left( e^{\frac{qv}{nkT}} - 1 \right) \quad (III.2)$$

Avec  $J_{obs}$  : Densité de courant d'obscurité.

$J_{ph}$  : Densité de courant photo-généré.

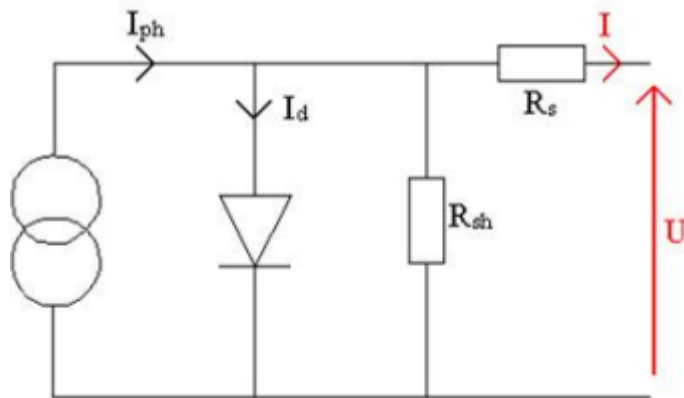
On peut encore formuler qui circule dans le circuit en fonction de appliquée entre ses bornes en prenant en compte les pertes qui se exprime par la relation suivante :

$$J = J_{ph} - J_0 \left( e^{\frac{qv}{nkT}} - 1 \right) - \frac{V + R_s J}{R_{sh}} \quad (III.3)$$

Avec  $R_s$  : Résistance en série.

$R_{sh}$  : Résistance shunt ou Résistance en parallèle.

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque sous éclairement est représenté par le schéma électrique équivalent représenté ci-dessous :



**Figure III.1 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.** [23]

Le comportement de la cellule dans l'obscurité est modélisé par la diode. Le générateur de courant modélise le courant  $I_{ph}$  généré par un éclairement et finalement, les deux résistances modélisent les pertes internes.

La résistance série  $R_s$  modélise les pertes ohmiques du matériau. Idéalement, elle est nulle. Lorsqu'elle augmente, le facteur de forme diminue rapidement.

La résistance shunt  $R_{sh}$  modélise les courants parasites qui passent la cellule, elle est d'autant plus faible qu'il y a de court-circuit. Elle réduit la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$ . Pour cela, elle faut être la plus grande possible.

## III. CARACTERISTIQUE J-V D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

La principale technique utilisée pour caractériser une cellule solaire est la caractéristique courant-tension sous éclairement. Elle permet de calculer la puissance fournie par la cellule et son rendement de conversion. La courbe J-V (Figure III.2) permet également de déterminer les paramètres électriques de la cellule.

La densité de courant que l'on veut collecter dans une cellule photovoltaïque est

$J_{\text{éclairement}}$ , que l'on marquera  $J$  et qui est caractérisée par la somme de densité de courant d'obscurité de la diode et la densité de courant photo-généré :

$$J(V) = J_{ph} - J_{obsc}(V) \quad (III.4)$$

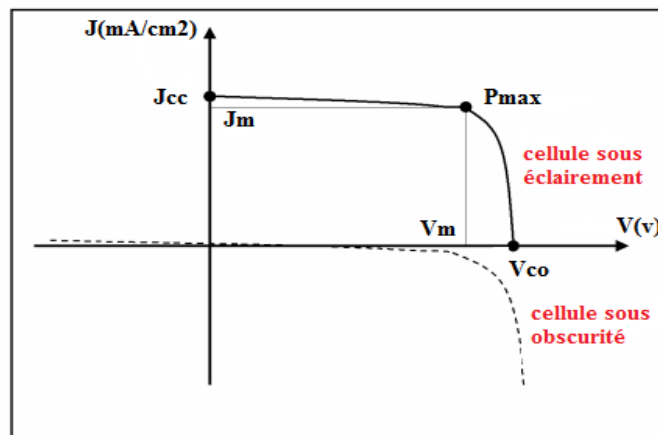


Figure III.2 : Caractéristiques J-V sous éclairement et sous obscurité. [24]

Une caractéristique fondamentale des cellules PV est que pour une irradiance et une température donnée, c'est la valeur de la charge  $R$  qui va déterminer le point de fonctionnement. La puissance électrique produite sous éclairement est égale au produit de l'intensité délivrée et de la tension à ses bornes. Il faut donc adapter  $R$  à ces bornes pour la faire fonctionner à une puissance maximale  $P_{max}$ . [22]

### III.1. LA DENSITE DE COURANT DE COURT-CIRCUIT ( $J_{CC}$ ) :

C'est la valeur maximum de la densité de courant débitée par la cellule, Dans ce cas les deux électrodes qui contactent la zone p et n sont en court-circuit et les porteurs minoritaires vont être drainés par le champ interne.

C'est ce courant de porteurs minoritaires qui forme le courant de court-circuit. La valeur de densité de courant de court-circuit est limitée par des aspects optiques et par la

## CHAPITRE III : MODELISATION ET SIMULATION DES CELLULES SOLAIRES

longueur effective de diffusion des porteurs minoritaires. A distribution spectrale donnée, ce paramètre dépend aussi de l'irradiance du rayonnement incident.

### III.2. LA TENSION DE CIRCUIT OUVERT ( $V_{co}$ ) :

C'est la valeur de tension qui permet de réduire suffisamment la barrière de potentiel  $V_D$  pour obtenir un courant global nul. La  $V_{co}$  est reliée au rapport entre  $J_{cc}$  et  $J_0$  par la relation (III.5).

$$V_{co} = \frac{nKT}{q} \ln\left(\frac{J_{ph}}{J_0} + 1\right) \approx \frac{nKT}{q} \ln\left(\frac{J_{cc}}{J_0}\right) \quad (III.5)$$

Avec  $\frac{kT}{q}$  : La potentielle thermodynamique.

T : la température absolue.

### III.3. LE FACTEUR DE FORME (FF) :

Le facteur de forme FF de la courbe J-V est la différence entre la puissance réelle débitée par la cellule et sa puissance idéale équivalente au produit  $J_{cc} * V_{co}$ . Le FF est limité dans la plupart des cas par des résistances parasites, il s'écrit :

$$FF = \frac{V_{max} J_{max}}{V_{co} J_{cc}} = \frac{\text{Aire A}}{\text{Aire B}} \quad (III.6)$$

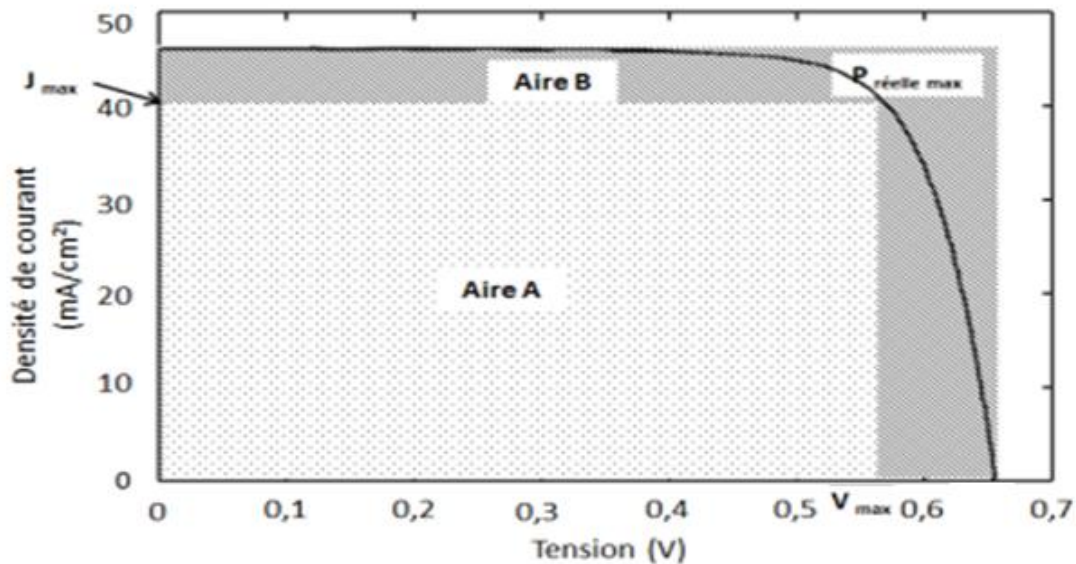


Figure III.3 : Courbes J-V sous éclairage avec représentation du FF. [6]

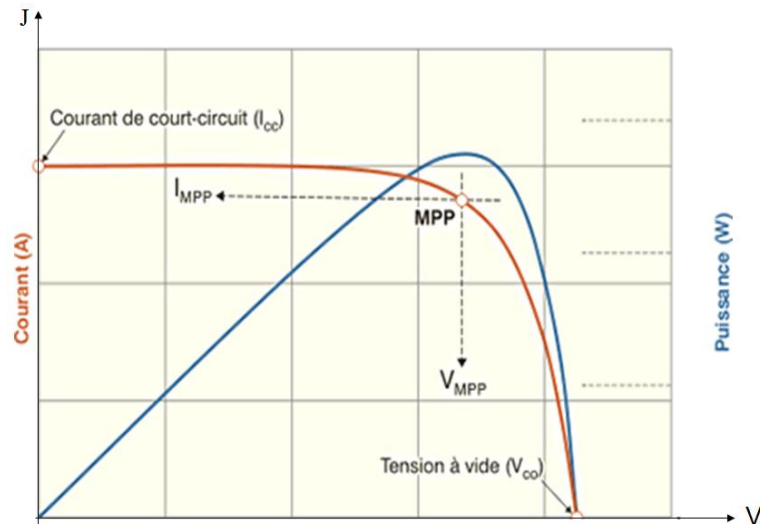
### III.4. LE RENDEMENT DE CONVERSION :

Le rendement de conversion est défini par le rapport entre la puissance fournie par la cellule et la puissance incidente. Il est calculé selon la relation III.7 en fonction des paramètres extraits de la courbe J-V sous éclairage. Dans l'industrie photovoltaïque, les rendements des dispositifs sont présentés à 25°C sous une illumination de 1 soleil=1kW.m<sup>-2</sup> selon le spectre de référence AM1.5G. [22]

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{incidente}} = \frac{V_{max}.J_{max}}{P_{incidente}} = \frac{V_{co}.J_{cc}.FF}{P_{incidente}} \quad (III.7)$$

### III.5. PUISSANCE ELECTRIQUE MAXIMALE :

Le produit VxJ définit la puissance électrique fournie par la cellule. La courbe P(V) permet de déduire la puissance réelle maximale du système PV.



**Figure III.4: Courbe de puissance d'une cellule solaire. [20]**

Cette courbe nous donne alors accès à la puissance théorique maximale, délivrée par la cellule sous éclairage selon la relation suivante:

$$P_{théorique\ max} = J_{cc} \times V_{co} \quad (III.8)$$

### III.6. REPONSE SPECTRALE :

La réponse spectrale RS ( $\lambda$ ) est définie comme la densité de courant de court-circuit  $J_{cc}(\lambda)$  issue d'une seule longueur d'onde de lumière normalisée par la densité de puissance incidente  $P(\lambda)$ .

$$RS(\lambda) = \frac{J_{cc}(\lambda)}{P(\lambda)} \quad (III.9)$$

La réponse spectrale est plus communément mesurée en tant que rendement de collecte interne ou externe. Le rendement quantique externe RQE est issue de la pondération de l'énergie à chaque longueur d'onde sur la réponse spectrale tel que :

$$RQE(\lambda) = RS(\lambda) \times \frac{hc}{q\lambda} \quad (\text{III.10})$$

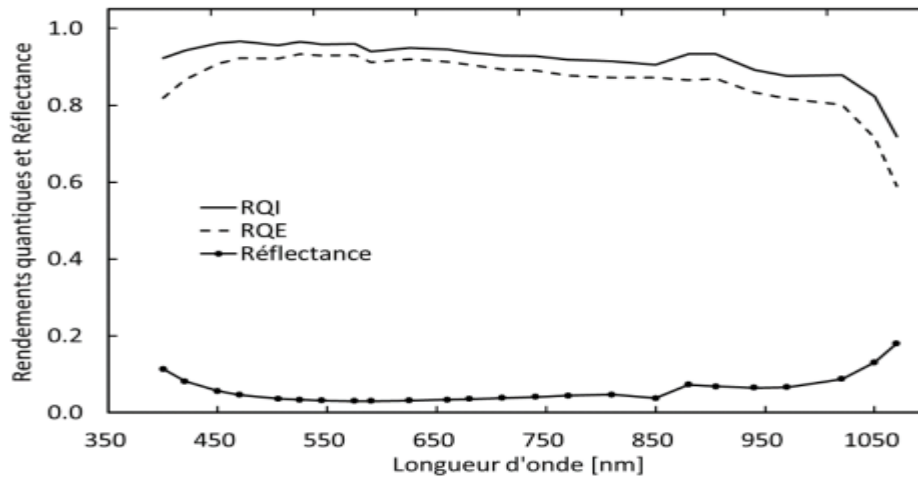
Le rendement quantique interne RQI s'obtient en soustrayant la part des photons incidents n'atteignant pas la jonction p/n c'est-à-dire les photons réfléchis, transmis ou absorbés dans les couches autres que le substrat. La réflectance des photons incidents étant la majeure partie des pertes optiques, on peut négliger les pertes par absorption et transmittance.

$$RQI(\lambda) = \frac{RQE(\lambda)}{1-R(\lambda)-A(\lambda)-T(\lambda)} \approx \frac{RQE(\lambda)}{1-R(\lambda)} \quad (\text{III.11})$$

$R(\lambda)$  est la réflectance de la cellule

$A(\lambda)$  est l'absorption des photons dans les couches non actives pour la photoconversion

$T(\lambda)$  est la transmittance des photons à travers la cellule



**Figure III.5 : Exemple de rendements quantiques interne (RQI) et externe (RQE) avec la réflectance correspondante pour une cellule c-Si. [6]**

## IV. LES EQUATIONS DE BASES POUR LA MODELISATION DES CELLULES SOLAIRES :

### IV.1. EQUATION DE POISSON :

L'équation de poisson relie les variations du potentiel électrostatique (champ électrique) aux densités locales de charge. Elle est donnée par :

$$\text{div}(\vec{E}) = \frac{\partial E(x)}{\partial x} = \frac{\rho(x)}{\epsilon} = -\frac{\partial^2 \Psi(x)}{\partial x^2} \quad (\text{III.12})$$

Avec  $\rho = e(N_D^+ + p - N_A^- - n)$  (III.13) est la densité totale des charges électriques.

$\vec{E}$  : Le champ électrique.

## CHAPITRE III : MODELISATION ET SIMULATION DES CELLULES SOLAIRES

---

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (\text{III.14}),$$

tel que :  $\varepsilon_0$  est la permittivité électrique du vide et  $\varepsilon_r$  est la permittivité relative du matériau.

$n$  et  $p$  sont les densités des porteurs libres.

$N_A^-$  et  $N_D^+$  sont les densités des accepteurs et donneurs ionisés respectivement.

### IV.2. EQUATIONS DE CONTINUITÉ :

Les équations de continuité permettent de déterminer les concentrations des porteurs dans un semi-conducteur, elles s'expriment par :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \text{div} \vec{j}_n + G_n - R_n \quad (\text{III.15})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \text{div} \vec{j}_p + G_p - R_p \quad (\text{III.16})$$

Avec  $G_n$  et  $G_p$  : les taux de génération optique des électrons et des trous respectivement

$R_n$  et  $R_p$  : les taux de recombinaisons pour les électrons et les trous respectivement.

$\vec{j}_n$  et  $\vec{j}_p$  : les densités de courants des électrons et des trous respectivement.

### IV.3. LES EQUATIONS DE TRANSPORT :

Le déplacement des porteurs de charge (électrons et trous) engendre des courants dans le semi-conducteur sous l'action d'un champ électrique ou d'un gradient de concentration. Dans le premier cas, le courant est appelé courant de conduction, dans le deuxième cas le courant est appelé courant de diffusion.

#### IV.3.1. Courant de conduction :

En présence d'un champ électrique, les électrons sont soumis à une force constante :

$$J_{cn} = q \cdot n \cdot \mu_n \cdot E \quad (\text{III.17})$$

$$J_{cp} = q \cdot p \cdot \mu_p \cdot E \quad (\text{III.18})$$

Ces relations sont valables pour des champs électriques suffisamment faibles pour que la vitesse des porteurs reste proportionnelle au champ. Le courant total est []:

$$J_{tot} = q (n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p) E \quad (\text{III.19})$$

Ainsi, la conductivité  $\sigma(T)$  et la résistivité  $\rho(T)$ , sont données par :

$$\sigma(T) = q (n \cdot \mu_n(T) + p \cdot \mu_p(T)). \quad (\text{III.20})$$

$$\rho(T) = \frac{1}{q(n \cdot \mu_n(T) + p \cdot \mu_p(T))} \quad (\text{III.21})$$

Avec  $\mu_n$ ,  $\mu_p$  les mobilités électroniques des électrons et des trous respectivement.

### IV.3.2. Courant de diffusion :

Quand les porteurs libres ne sont pas répartis uniformément dans le semi-conducteur, ils sont soumis au processus général de diffusion de la région de forte concentration vers la région de faible concentration. Considérons un semi-conducteur dopé dont la concentration en trous varie suivant un axe x. La densité de courant de diffusion en un point d'abscisse x est [5]:

$$J_{Dp} = -qD_p \frac{dp(x)}{dx} \quad (\text{III.22})$$

Avec  $D_p$  est le coefficient de diffusion des trous,

$$D_p = \mu_p \frac{KT}{q} \quad (\text{III.23})$$

Il en est de même dans le cas des électrons de concentration  $n(x)$  et on a:

$$J_{Dn} = qD_n \frac{dn(x)}{dx} \quad (\text{III.24})$$

Avec  $D_n$  est le coefficient de diffusion des électrons.

$$D_n = \mu_n \frac{KT}{q} \quad (\text{III.25})$$

### IV.3.3. Courant total dans le semi-conducteur :

Quand les deux phénomènes existent simultanément la densité totale de courant pour les électrons et les trous est donnée en explicitant la relation de dépendance avec la température par :

$$J_n = q \cdot n \cdot \mu_n \cdot E + qD_n \frac{dn(x)}{dx} \quad (\text{III.26})$$

$$J_p = q \cdot p \cdot \mu_p \cdot E - qD_p \frac{dp(x)}{dx} \quad (\text{III.27})$$

Le courant total est donné par :

$$J_{\text{tot}} = J_n + J_p \quad (\text{III.28})$$

Les constantes  $D_p$  et  $D_n$  sont liées aux mobilités  $\mu_n$  et  $\mu_p$  par la relation d'Einstein [5]:

$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{D_n}{\mu_n} = \frac{KT}{q} \quad (\text{III.29})$$

## V. DESCRIPTION DU MODELE DE SIMULATION :

Pour étudier les propriétés optoélectroniques fondamentales d'un dispositif, nous devons utiliser un modèle de simulation qui est constitué d'un modèle électrique et d'un modèle optique.

.La partie électrique du modèle, résout simultanément l'équation de Poisson (III.12) avec des conditions aux limites appropriées et les équations de continuité des électrons (III.15) et des trous (III.16) qui sont résolues simultanément dans des conditions d'état d'équilibre et hors équilibre. Ces équations sont :



## CHAPITRE III : MODELISATION ET SIMULATION DES CELLULES SOLAIRES

---

Avec L'équation de Poisson est : 
$$\frac{\partial^2 \Psi(x)}{\partial x^2} = \frac{\rho(x)}{\varepsilon} \quad (\text{III.12})$$

L'équation de continuité des trous est : 
$$G(x) - R(p(x), n(x)) - \frac{1}{q} \frac{\partial J_p(x)}{\partial x} = 0 \quad (\text{III.16})$$

L'équation de continuité des électrons est 
$$G(x) - R(p(x), n(x)) + \frac{1}{q} \frac{\partial J_n(x)}{\partial x} = 0 \quad (\text{III.15})$$

La densité de charge effective : 
$$\rho(x) = q[p(x) - n(x) + p_T(x) - n_T(x) + N_{net}^+] \quad (\text{III.30})$$

Le champ électrique : 
$$E = \frac{\partial \Psi(x)}{\partial x} \quad (\text{III.31})$$

avec  $\varepsilon$  est la constante diélectrique,  $\psi(x)$  le potentiel électrostatique,  $x$  la position dans le dispositif,  $p$  et  $n$  sont les densités des trous et des électrons dans la bande de valence et de conduction,  $q$  la charge électronique,  $R$  le taux de recombinaison,  $p_T$  et  $n_T$  la densité des trous et des électrons piégés respectivement,  $N_{net}^+$  la densité de dopage effective,  $G$  le taux de génération de paires électron-trou,  $J_p$  et  $J_n$  sont les densités de courant des trous et des électrons respectivement et  $E_{F_p}$  et  $E_{F_n}$  représentent les quasi niveaux de Fermi des trous et des électrons.

### V.1. Méthode de résolution :

A l'équilibre thermodynamique, l'équation de Poisson c'est la seule équation à résoudre. Il s'agit d'une équation différentielle non linéaire du second ordre.

Hors l'équilibre thermodynamique,  $\psi(x)$ ,  $E_{F_p}$  et  $E_{F_n}$  sont les variables inconnues.

L'équation de Poisson  $\psi = \psi(x)$  et les équations de continuité sont résolues simultanément à l'aide de la méthode des différences finies et de Newton-Raphson afin d'obtenir le potentiel électrostatique, et le quasi-niveau de Fermi des trous et des électrons à tout point dans le dispositif. [14]

### IV.2. Le logiciel SCAPS :

La simulation des dispositifs à base de semi-conducteurs est devenue de plus en plus utilisée ces dernières années. Ainsi divers logiciels de calcul et de simulation ont été développés par la communauté des chercheurs dans ce domaine, on peut citer par exemple le logiciel SCAPS.

SCAPS est un simulateur solaire orienté Windows, il a été conçu pour simuler les caractéristiques électriques des dispositifs photoniques tels que les cellules solaires à couches minces. SCAPS a été développé à l'origine pour des structures des cellules CIS et CdTe. Cependant, Plusieurs versions ont amélioré ses capacités de façon à devenir applicable pour des cellules solaires cristallines (Si et GaAs) et des cellules

## CHAPITRE III : MODELISATION ET SIMULATION DES CELLULES SOLAIRES

---

amorphes (a-Si et Si micro-morphe). Avec SCAPS, il est possible de simuler des structures constituées d'un nombre définis de couches (jusqu'à 7 couches intermédiaires ainsi que les contacts avant et arrière), avec des profils de dopage différents, et avec des distributions énergétiques des niveaux donneurs ou accepteurs donnés, dans le volume et aux interfaces pour un spectre de lumière arbitraire.

Le logiciel SCAPS possède trois grandes fenêtres :

1. Fenêtre d'exécution (action panel) : elle contient deux blocs : Le premier bloc permet de spécifier les conditions de la simulation et les points de fonctionnement tel que la température et le deuxième bloc permet de sélectionner les grandeurs voulues afin de les simuler à savoir: la caractéristique J-V, la réponse spectrale...etc.
2. Fenêtre de conception de dispositif (Définition panel) : Cette fenêtre permet de définir le dispositif photovoltaïque par l'ajout de couches successives. Pour chaque couche, il existe un grand nombre de paramètres électriques comme l'énergie de gap, la densité de dopage, l'épaisseur, l'affinité électronique...etc.
3. Fenêtre des résultats : Cette fenêtre affiche les résultats de la simulation sous forme de graphe avec la possibilité de les sauvegarder ou exporter leurs valeurs.

Les avantages du SCAPS sont multiples à savoir : la grande vitesse d'exécution, les fichiers d'entrée sont accessibles à l'utilisateur en format texte tel que les données spectrales et les paramètres décrivant le dispositif, la possibilité d'introduire des interfaces et prise en compte du phénomène de recombinaison, l'introduction de résistances série et shunt, et l'obtention des caractéristiques capacité-tension et capacité-fréquence. [25]

### VI. CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons analysé les phénomènes physiques qui interviennent dans le transport des charges dans une cellule solaire.

Nous avons d'abord expliqué les phénomènes qui interviennent dans la cellule solaire SHJ à l'aide d'un modèle mathématique équivalent qui est utilisée pour dégager les paramètres fondamentaux caractérisant ce type de cellule.

Ensuite, nous avons détaillé les équations de base et de transport dans les semi-conducteurs : l'équation de Poisson, les équations de continuité des électrons et des trous, nécessaires à la modélisation des cellules photovoltaïques.

Finalement, nous avons présenté brièvement le logiciel de simulation SCAPS, que nous avons choisi d'utiliser pour réaliser notre étude et qui nous a permis d'obtenir les résultats présentés dans le prochain chapitre.

**CHAPITRE IV  
RESULTATS DE SIMULATION ET  
DISCUSSIONS**

## CHAPITRE IV RESULTATS DE SIMULATION ET DISCUSSIONS

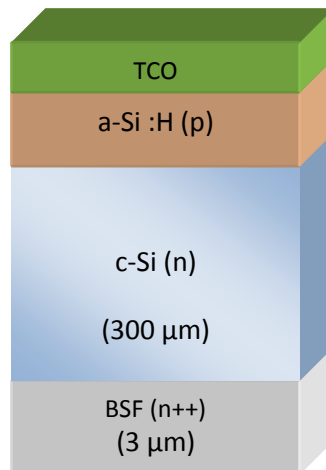
### I. INTRODUCTION :

Dans ce dernier chapitre, nous avons effectué une étude comparative entre deux cellules solaire à hétérojonction de silicium (c-Si / a-Si :H), l'une SHJ de type n (dont le substrat est dopé n) et l'autre SHJ de type p (dont le substrat est dopé p) et étudié les différents paramètres qui ont un impact direct sur les performances de ces cellules, tel que les épaisseurs des différentes couches ainsi que leur dopage.

### II. ETUDE D'UNE CELLULE SHJ DE TYPE N

#### II.1. Présentation de la cellule :

Le dispositif utilisé dans cette partie du travail se compose de la structure suivante : TCO/a-si :H(p) /c-si(n)/c-si(n<sup>++</sup>).



**Figure IV.1 : Structure SHJ de type N**

Les paramètres importants de la cellule SHJ de type n que nous avons utilisés dans nos simulations sont résumés dans le tableau IV.1.

Avec :

d : Epaisseur de la couche

$E_g$  : Energie du gap (eV)

$\chi$  : Affinité électronique (eV)

$\epsilon$  : permittivité électrique du matériau

$N_C$  : Densité d'états effective dans la bande de conduction (cm<sup>-3</sup>)

## CHAPITRE IV : RESULTATS DE SIMULATION ET DISCUSSIONS

$N_V$  : Densité d'états effective dans la bande de valence ( $\text{cm}^{-3}$ )

$V_n$  : vitesse thermique des électrons (cm/s)

$V_p$  : vitesse thermique des trous (cm/s)

$\mu_n$  : Mobilité des électrons ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )

$\mu_p$  : Mobilité des Trous ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )

$N_D$  : Densité de dopage des donneurs ( $\text{cm}^{-3}$ )

$N_A$  : Densité de dopage des accepteurs ( $\text{cm}^{-3}$ )

Paramètres	Emetteur a-Si :H(p)	BULK c-Si (n)	BSF c-Si ( $n^{++}$ )
<b>d</b>	20 – 300 Å	300 $\mu\text{m}$	3 $\mu\text{m}$
<b><math>E_g</math> (eV)</b>	1.72	1.12	1.12
<b><math>\chi</math>(eV)</b>	3.90	4.05	4.05
<b><math>\epsilon</math></b>	11.90	11.70	11.70
<b><math>N_c(\text{cm}^{-3})</math></b>	$1.10^{20}$	$2,80.10^{19}$	$2,80.10^{19}$
<b><math>N_v(\text{cm}^{-3})</math></b>	$1.10^{20}$	$1,04.10^{19}$	$1,04.10^{19}$
<b><math>V_n(\text{cm/s})</math></b>	$1.10^7$	$1.10^7$	$1.10^7$
<b><math>V_p</math> (cm/s)</b>	$1.10^7$	$1.10^7$	$1.10^7$
<b><math>\mu_n</math> (<math>\text{cm}^2/\text{Vs}</math>)</b>	20	1500	1500
<b><math>\mu_p</math> (<math>\text{cm}^2/\text{Vs}</math>)</b>	5	450	450
<b><math>N_D</math> (<math>\text{cm}^{-3}</math>)</b>	0	$10^{13}-10^{18}$	$1.10^{19}$
<b><math>N_A</math> (<math>\text{cm}^{-3}</math>)</b>	$1.10^{14}-1.10^{20}$	0	0

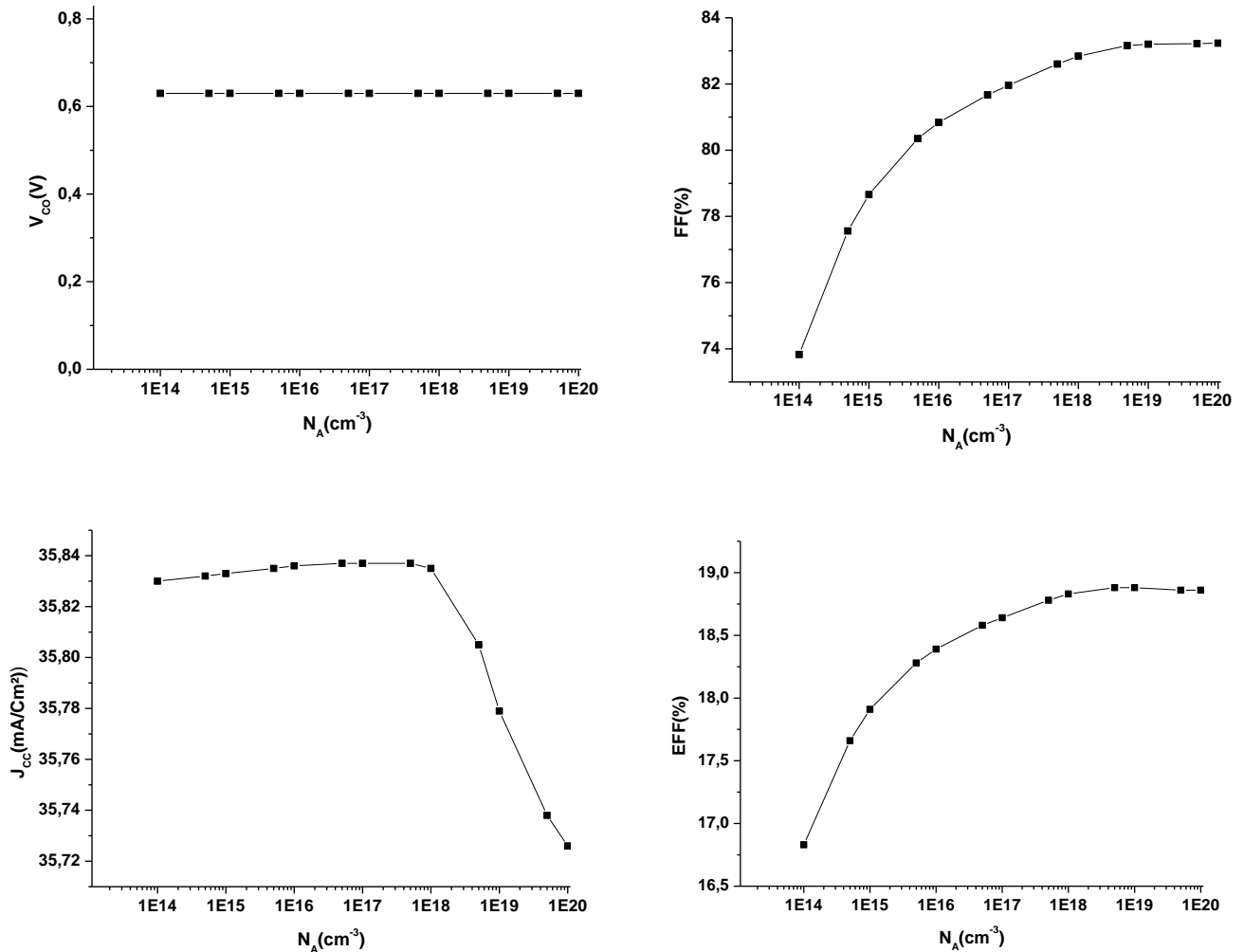
**Tableau IV.1 : paramètres caractéristiques de la cellule SHJ de type n étudiée.**

### II.2. Effet du dopage de l'émetteur sur la performance de la cellule

Dans un premier temps, nous avons étudié l'influence de la densité de dopage de l'émetteur sur les différents paramètres photovoltaïques, à savoir la tension en circuit ouvert  $V_{co}$ , le densité de courant de court circuit  $J_{cc}$ , le facteur de forme FF et le rendement de puissance  $\eta$ .

## CHAPITRE IV : RESULTATS DE SIMULATION ET DISCUSSIONS

Nous avons fait varier la densité de dopage  $N_A$  de  $10^{14}$  à  $10^{20}$   $\text{cm}^{-3}$ , et nous avons tracé la variation des paramètres photovoltaïques en fonction du dopage. Les graphes obtenus sont représentés sur la figure IV.2.



*Figure IV.2: Variation des paramètres photovoltaïques en fonction du dopage de l'émetteur  $N_A$ .*

### Interprétation des résultats :

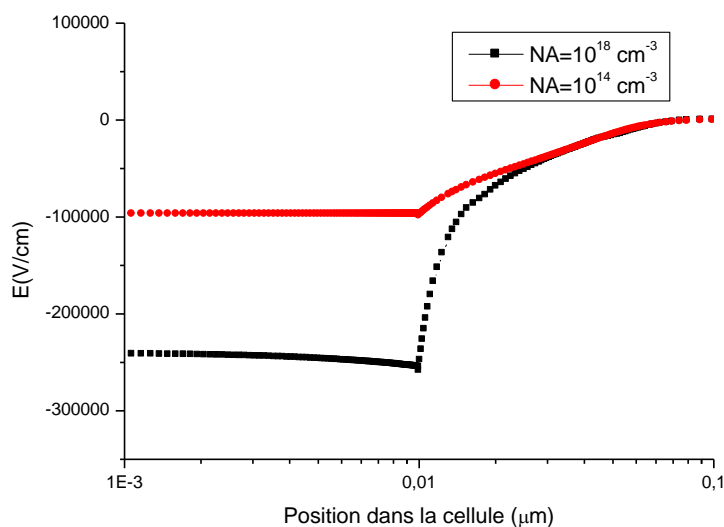
Nous pouvons constater à partir des graphes que lorsque nous augmentons le dopage de l'émetteur a-Si :H(p), nous constatons que la tension en circuit ouvert  $V_{co}$  et la densité de courant de court-circuit  $J_{cc}$  restent quasiment inchangées, alors que le Facteur de Forme augmente de 73,83% à 83,22%.

Le facteur de forme est un paramètre qui permet de déterminer la qualité d'une cellule solaire, et il est représentatif du nombre de porteurs photogénérés collectés. Son augmentation implique une forte collecte, qui peut être expliquée par un faible taux de recombinaisons.

Le rendement étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente  $\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot V_{co} \cdot J_{cc}}{P_{in}}$ , il dépend de la variation du FF, c'est pour cette raison que le rendement augmente de 16.83% à 18.88%.

Sachant que plus le dopage de l'émetteur est élevé, plus le champ électrique généré au niveau de la jonction p-a-Si :H/n-c-Si est important (voir équation II.19 et II.22). C'est cette augmentation du champ électrique qui a engendré la diminution des recombinaisons et par conséquent une meilleure collecte des porteurs photogénérés.

Afin de confirmer cela, nous avons tracé, sur la figure IV.3, le champ électrique dans la zone de déplétion au niveau de la jonction p-a-Si :H/ n-c-Si en fonction de la position dans le dispositif pour 2 dopages différents de la couche p-a-Si :H ( $N_A=10^{14} \text{ cm}^{-3}$   $N_A=10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ).



**Figure IV.3 : Champ électrique dans la zone de déplétion au niveau de la jonction p-a-Si :H/ n-c-Si en fonction de la position dans le dispositif pour 2 dopage différents de la couche p-a-Si :H ( $N_A=10^{14} \text{ cm}^{-3}$   $N_A=10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ).**

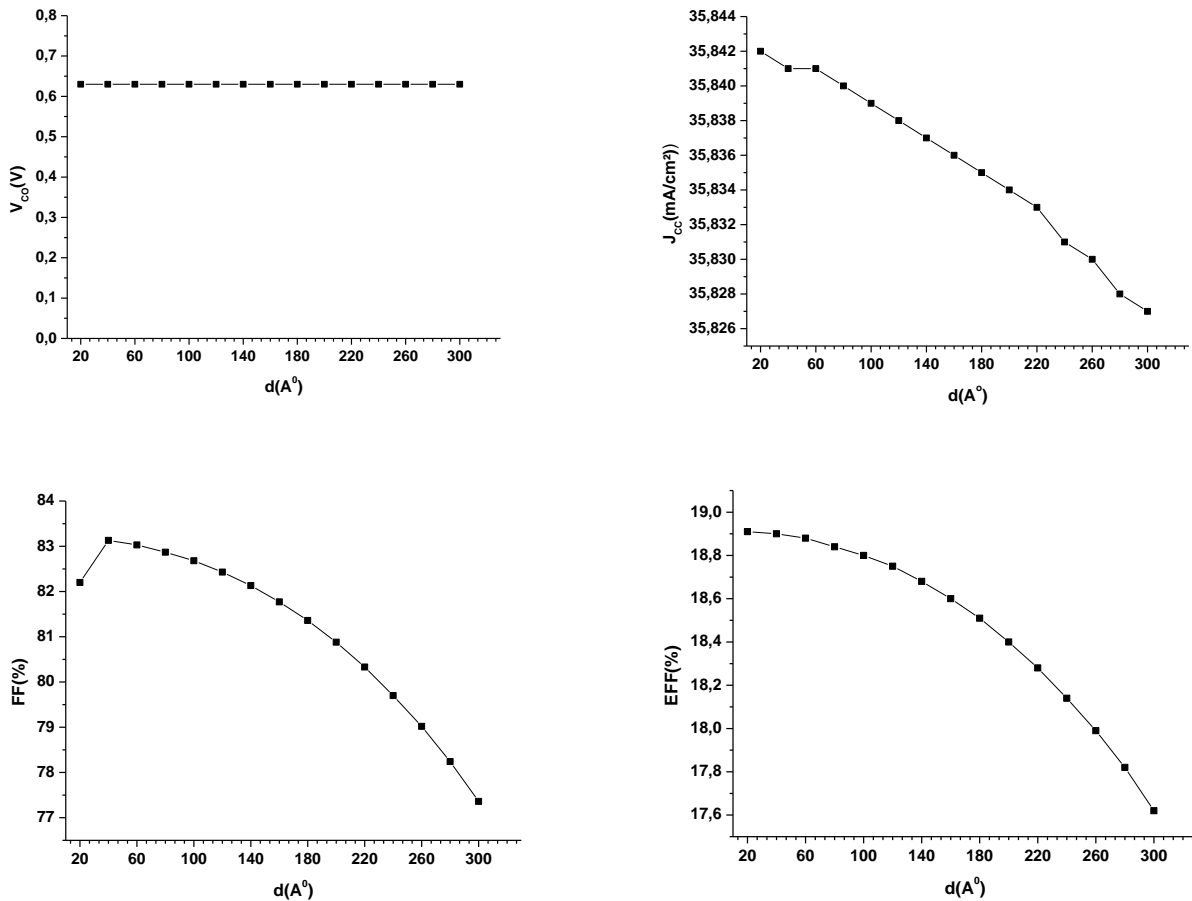
A partir de la figure IV.3. nous pouvons constater que le champ électrique au niveau de la jonction p-a-Si :H/n-c-Si augmente considérablement avec l'augmentation du dopage, en passant de  $10^5 \text{ V/cm}$  à  $2.5 \cdot 10^5 \text{ V/cm}$ , ce qui confirme l'interprétation donnée précédemment.

### II.3. Effet de l'épaisseur de l'émetteur sur la performance de la cellule

Nous allons maintenant étudier l'influence de l'épaisseur de l'émetteur sur les différents paramètres photovoltaïques.

## CHAPITRE IV : RESULTATS DE SIMULATION ET DISCUSSIONS

Nous avons fait varier l'épaisseur de la couche a-Si :H (p) de 20Å° à 300Å°, et nous avons tracé la variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'épaisseur. Les graphes obtenus sont représentés sur la figure IV.3.



*Figure IV.4 : Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'épaisseur de l'émetteur  $d$ .*

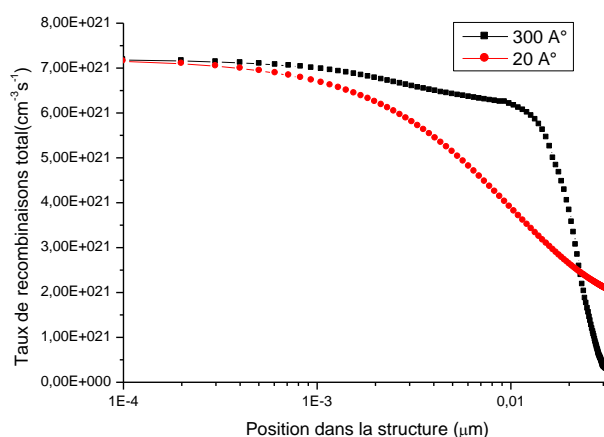
### Interprétation des résultats :

D'après les graphes de la figure IV.4, nous constatons qu'avec l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur le  $V_{co}$  reste quasiment constant, alors que la densité de courant de court circuit diminue légèrement de 35.84 mA/cm<sup>2</sup> à 35.82 mA/cm<sup>2</sup>.

Le FF diminue considérablement de 83,22% à 77,66% impliquant une diminution du rendement en puissance de 18.92% à 17.62%

Pour comprendre ces résultats, nous avons tracé, sur la figure IV.5, le taux de recombinaisons au niveau de l'émetteur (p-a-Si :H) pour les deux épaisseurs extrêmes  $d = 20\text{Å}^\circ$  et  $d = 300\text{Å}^\circ$ .

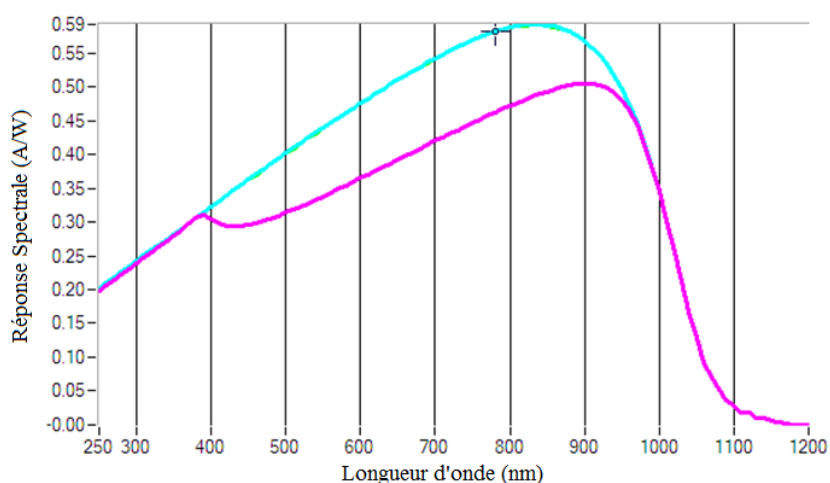




**Figure IV.5 : Taux de recombinaisons dans l'émetteur pour 2 épaisseurs différents de la couche p-a-Si :H ( $d=20 \text{ \AA}$  et  $d=300 \text{ \AA}$ ).**

D'après les courbes obtenues, nous remarquons, que plus l'épaisseur de l'émetteur augmente, plus le taux de recombinaisons est important. Ces résultats peuvent être expliqués par le fait qu'il existe une grande densité de défauts dans le silicium amorphe hydrogéné qui participe fortement à augmenter le taux de recombinaison lorsque l'épaisseur de la couche p-a-Si :H augmente. D'autre part, la longueur de diffusion des porteurs photogénérés devient trop petite par rapport à l'épaisseur de l'émetteur, ce qui implique qu'ils vont se recombiner avant d'être collectés.

Nous avons également tracé, sur la figure IV.6, la réponse spectrale du dispositif pour des longueurs d'ondes allant de 250 nm à 1200nm, et pour deux épaisseurs de l'émetteur.



**Figure IV.6: Réponse spectrale d'une cellule SHJ de type n pour une épaisseur de l'émetteur de  $20 \text{ \AA}$  (en bleu) et  $300 \text{ \AA}$  (en rose)**

La réponse spectrale obtenue est caractéristique des cellules solaires à base de silicium avec un maximum situé vers les longueurs d'ondes de 900 nm. Nous pouvons remarquer que la réponse spectrale est plus faible lorsque l'épaisseur de l'émetteur augmente. Ceci peut être expliqué par le

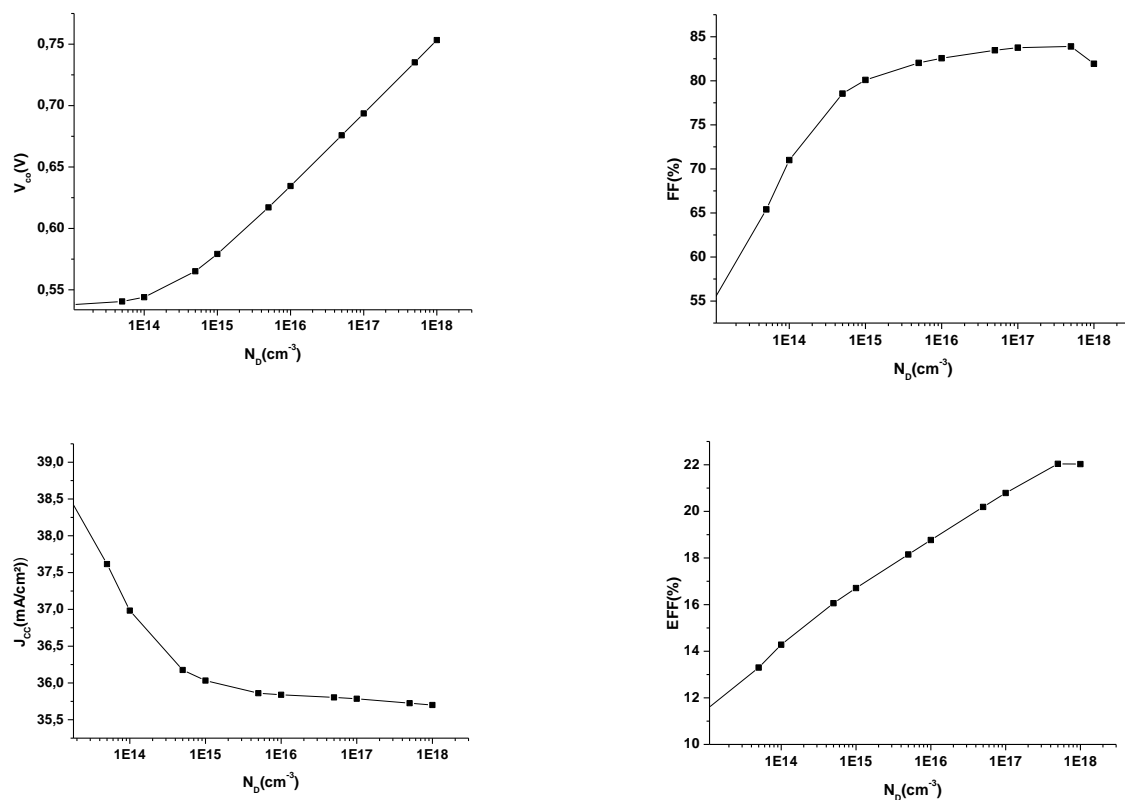
fait que l'absorption des photons va se faire majoritairement au niveau de l'émetteur lorsque son épaisseur augmente, et qu'il y aura moins de photons qui vont arriver à la couche active.

La réponse spectrale (ou sensibilité spectrale) qui est égale au rapport du photocourant généré  $I_{ph}$  / puissance incidente va donc diminuer avec l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur, ce qui va engendrer la diminution de la densité de courant de court-circuit, du Facteur de Forme et du rendement.

### II.4. Effet du dopage de la couche active sur la performance de la cellule

Nous avons étudié l'influence de la densité de dopage  $N_D$  de la couche active (Bulk) à base de silicium cristallin dopé n (n-c-Si) sur les différents paramètres photovoltaïques.

Nous avons fait varier le dopage  $N_D$  de  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$  à  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , et nous avons tracé la variation des paramètres photovoltaïques en fonction du dopage. Les graphes obtenus sont représentés sur la figure IV.7.



**Figure IV.7 : Variation des paramètres photovoltaïques en fonction du dopage de la couche active  $N_D$ .**

#### Interprétation des résultats :

Nous pouvons constater à partir des graphes que lorsque nous augmentons le dopage de la couche active de  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$  à  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , la tension en circuit ouvert  $V_{co}$  augmente considérablement de 0.53 V à 0.75V, induisant une forte augmentation du Facteur de Forme

## CHAPITRE IV : RESULTATS DE SIMULATION ET DISCUSSIONS

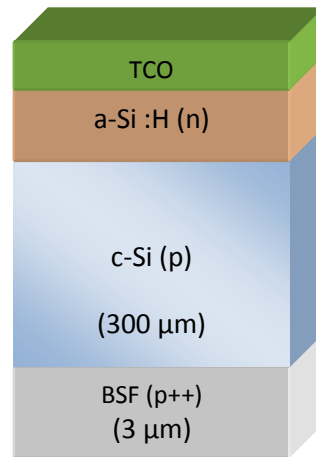
(de 54,99% à 81,93%), ainsi qu'une augmentation considérable du rendement de puissance qui passe de 13% à 22%.

Contrairement à l'émetteur réalisé à partir de a-Si :H, la couche active est constituée à partir d'un wafer de silicium cristallin ayant une structure cristalline ordonnée avec peu de défauts, réduisant ainsi les recombinaisons malgré le fort dopage. Lorsque le dopage de la couche active augmente, cela provoque un accroissement du champ électrique au niveau de la jonction p-a-Si :H/n-c-Si améliorant la collecte des porteurs photogénérés et ainsi la performance de la cellule.

### III. ETUDE D'UNE CELLULE SHJ DE TYPE P

#### III.1. Présentation de la cellule :

Le dispositif utilisée dans cette partie du travail se compose de la structure suivante : TCO/a-si :H(n) /c-si(p)/c-si(p<sup>++</sup>).



*Figure IV.8 : Structure d'une cellule SHJ de type P.*

Les paramètres importants de cellule SHJ de type p que nous avons utilisés dans nos simulations sont résumés dans le tableau IV.2 :

Paramètres	Emetteur a-Si:H(n)	BULK c-Si(p)	BSF c-Si (p <sup>++</sup> )
<b>D (A<sup>0</sup>)</b>	20-300	$3 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^4$
<b>E<sub>g</sub> (eV)</b>	1.72	1.12	1.12
<b>χ(eV)</b>	3.90	4.05	4.05
<b>ε</b>	11.90	11.70	11.70
<b>N<sub>c</sub> (cm<sup>-3</sup>)</b>	$1 \cdot 10^{20}$	$2,80 \cdot 10^{19}$	$2,80 \cdot 10^{19}$

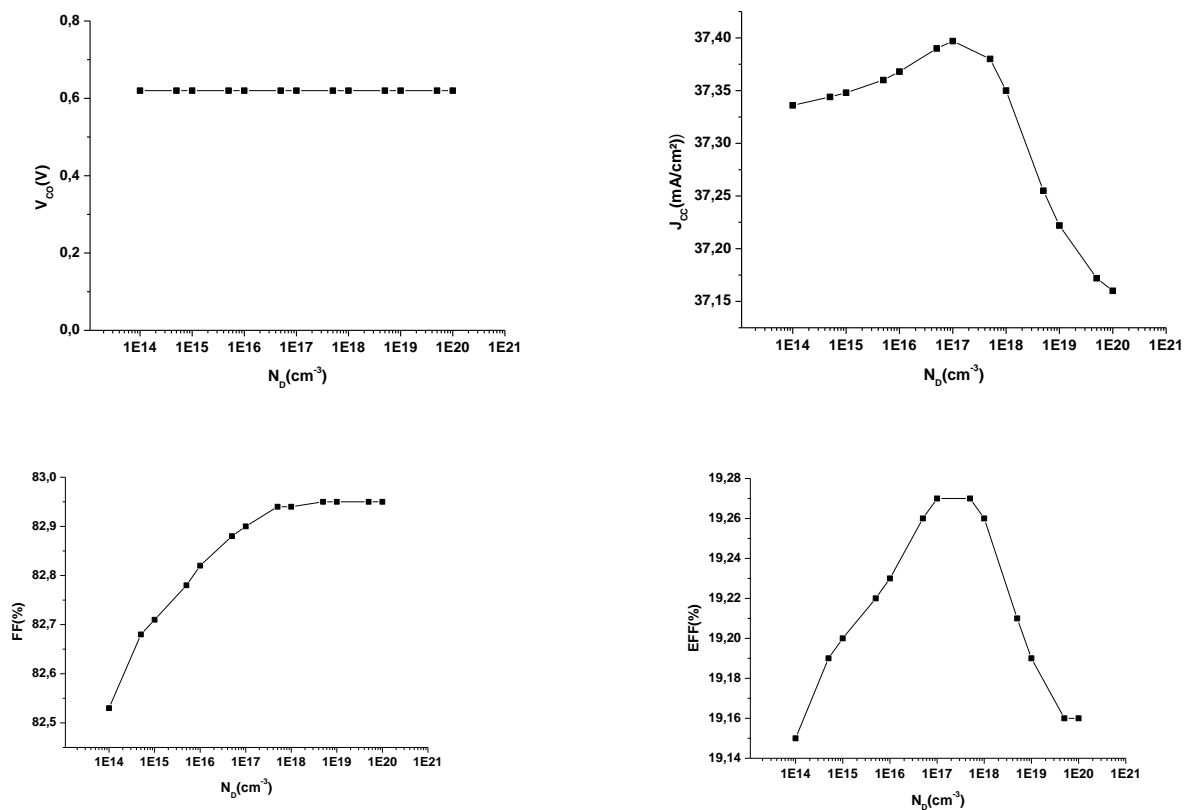
## CHAPITRE IV : RESULTATS DE SIMULATION ET DISCUSSIONS

$N_v$ (cm <sup>-3</sup> )	$1.10^{20}$	$1,04.10^{19}$	$1,04.10^{19}$
$V_n$ (cm/s)	$1.10^7$	$1.10^7$	$1.10^7$
$V_p$ (cm/s)	$1.10^7$	$1.10^7$	$1.10^7$
$\mu_n$ (cm <sup>2</sup> /Vs)	20	1500	1500
$\mu_p$ (cm <sup>2</sup> /Vs)	5	450	450
$N_D$ (cm <sup>-3</sup> )	$1.10^{14}$ - $1.10^{20}$	0	0
$N_A$ (cm <sup>-3</sup> )	0	$1.10^{13}$ - $10^{19}$	$1.10^{19}$

*Tableau IV.2 : Paramètres photovoltaïques de la cellule SHJ étudiée.*

### III.2. Effet du dopage de l'émetteur sur la performance de la cellule

Nous avons étudié l'influence du dopage de l'émetteur sur les différents paramètres photovoltaïques, en faisant varier la densité de dopage  $N_D$  de  $10^{14}$  à  $10^{20}$  cm<sup>-3</sup>, et nous avons représenté les résultats obtenus sur la figure IV.9.



*Figure IV.9: Variation des paramètres photovoltaïques en fonction du dopage de l'émetteur*

$N_A$ .

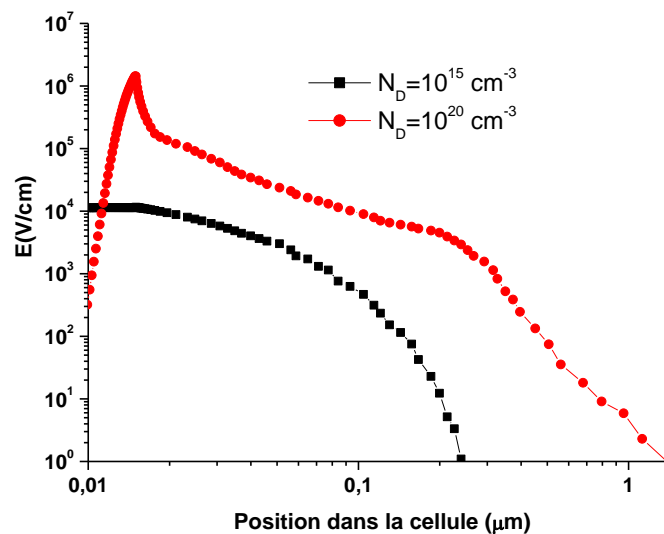
### Interprétation des résultats :

Nous pouvons constater à partir des graphes que lorsque nous augmentons le dopage de l'émetteur a-Si :H(n), nous constatons que la  $V_{co}$  reste quasiment inchangée et la densité de courant de court-circuit  $J_{cc}$  augmente légèrement de lorsque la densité de dopage augmente de  $10^{14}$  à  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  puis diminue à partir de cette dernière valeur. Le Facteur de Forme augmente légèrement de 82,53% à 82,95% avec l'augmentation de la densité de dopage.

Le rendement suit l'allure du  $J_{cc}$  et du FF, il augmente de 19,15% à 19,27% pour  $N_D=10^{18} \text{ cm}^{-3}$  ensuite diminue jusqu'à la valeur 19,16% .

Lorsque le dopage de l'émetteur est élevé, le champ électrique généré au niveau de la jonction p-a-Si :H/n-c-Si est important impliquant une meilleure collecte des porteurs photogénérés. Cependant lorsque ce dopage augmente au-delà de  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , les défauts dans le silicium amorphe deviennent plus important favorisant ainsi un fort taux de recombinaison.

Nous avons tracé, sur la figure IV.10, le champ électrique au niveau de la jonction p-a-Si :H/ n-c-Si en fonction de la position dans le dispositif pour 2 dopages différents de la couche p-a-Si :H ( $N_D=10^{15} \text{ cm}^{-3}$   $N_D=10^{20} \text{ cm}^{-3}$  ).



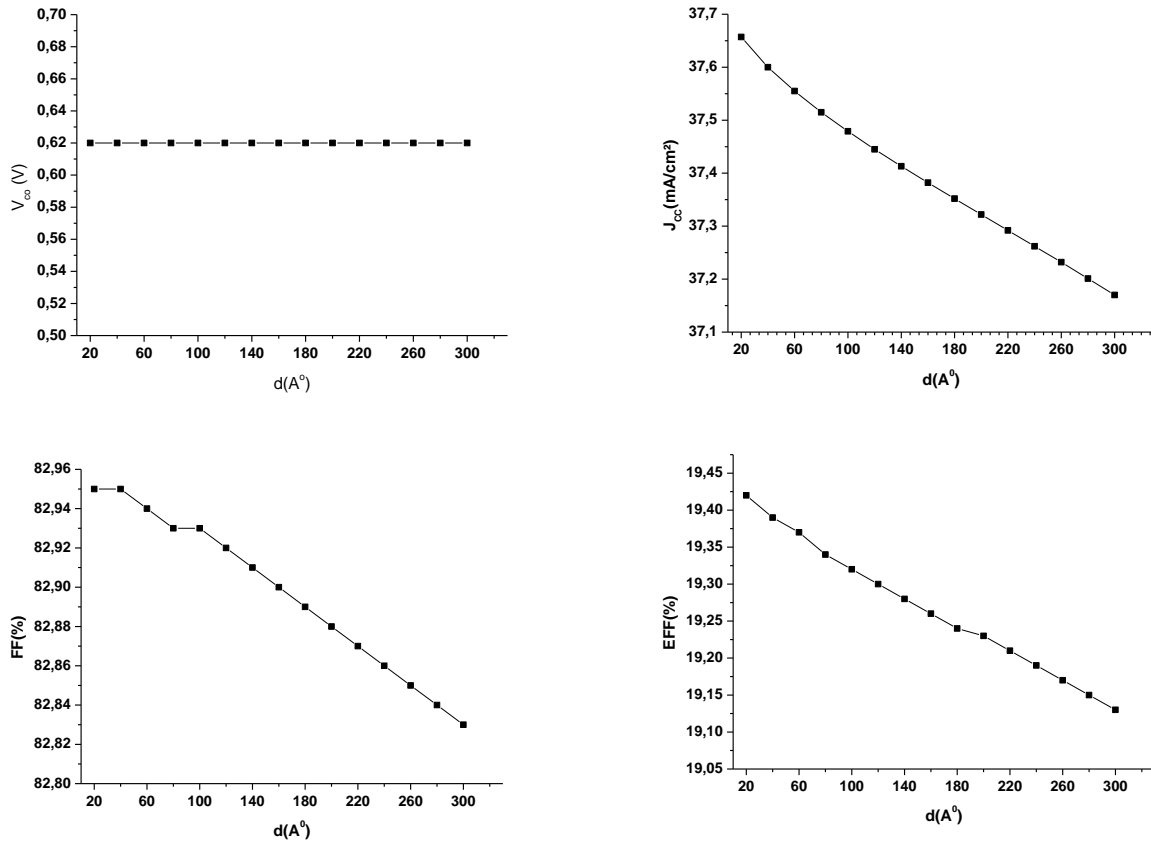
**Figure IV.10 : Champ électrique dans la zone de déplétion au niveau de la jonction n-a-Si :H/ p-c-Si en fonction de la position dans le dispositif pour 2 dopage différents de la couche p-a-Si :H ( $N_D=10^{15} \text{ cm}^{-3}$   $N_D=10^{20} \text{ cm}^{-3}$  ).**

A partir de la figure IV.10. nous pouvons constater que le champ électrique au niveau de la jonction n-a-Si :H/p-c-Si augmente considérablement avec l'augmentation du dopage, en passant d'une valeur maximale de  $10^4 \text{ V/cm}$  pour  $N_D=10^{15} \text{ cm}^{-3}$  à  $10^6 \text{ V/cm}$  pour  $N_D=10^{20} \text{ cm}^{-3}$ .

En faisant une comparaison avec les résultats obtenus avec la cellule SHJ de type n, nous pouvons supposer que le silicium amorphe hydrogéné répond mal à de fort dopage de type n, car le rendement de la cellule a baissé pour de forts dopages.

### III.3. Effet de l'épaisseur de l'émetteur sur la performance de la cellule

Afin d'étudier l'influence de l'épaisseur de l'émetteur sur la performance de la cellule, nous avons fait varier l'épaisseur de la couche a-Si :H (n) de 20Å à 300Å, et nous avons tracé la variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'épaisseur. Les graphes obtenus sont représentés sur la figure IV.11.



*Figure IV .11: Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'épaisseur de l'émetteur d.*

#### Interprétation des résultats :

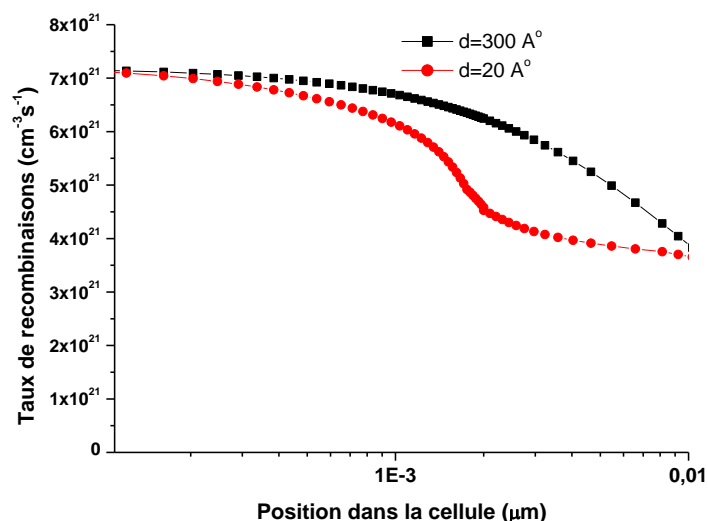
D'après les graphes de la figure IV.11, nous constatons qu'avec la variation de l'épaisseur de l'émetteur le  $V_{CO}$  reste quasiment constant, alors que la densité de courant de court circuit diminue légèrement de 37.65 mA/cm<sup>2</sup> à 37.17 mA/cm<sup>2</sup>.

Le FF diminue légèrement de 82,95% à 82,83% impliquant une diminution du rendement en puissance de 19.44% à 19.13%

Pour comprendre ces résultats, nous avons tracé le taux de recombinaisons au niveau de l'émetteur pour les deux épaisseurs extrêmes (20Å et 300Å).

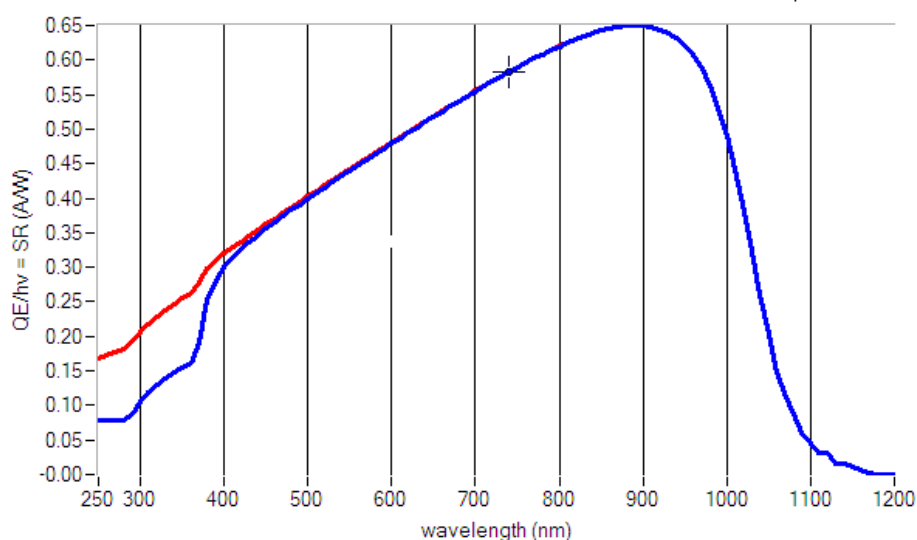
## CHAPITRE IV : RESULTATS DE SIMULATION ET DISCUSSIONS

D'après les courbes obtenues, nous avons remarqué que plus l'épaisseur de l'émetteur augmente, plus le taux de recombinaisons est important. Cela est expliqué par la grande densité de défauts dans le silicium amorphe hydrogéné qui participe fortement à augmenter le taux de recombinaison et à la trop grande épaisseur de cette couche par rapport à la longueur de diffusion des porteurs photogénérés.



*Figure IV.12 : taux de recombinaisons dans l'émetteur pour 2 épaisseurs différentes de la couche n-a-Si :H (d=20 Å et d=300Å).*

Nous avons également tracé, sur la figure IV.12, la réponse spectrale du dispositif pour des longueurs d'ondes allant de 250 nm à 1200nm pour deux valeurs de l'épaisseur.



*Figure IV.13: Réponse spectrale d'une cellule SHJ de type p pour une épaisseur de l'émetteur de 20Å (en bleu) et 300Å (en rouge)*

## CHAPITRE IV : RESULTATS DE SIMULATION ET DISCUSSIONS

Nous pouvons remarquer que la réponse spectrale est plus faible lorsque l'épaisseur de l'émetteur augmente, ce qui va engendrer la diminution de la densité de courant de court-circuit, du Facteur de Forme et du rendement.

En comparant la réponse spectrale obtenue par rapport à celle de la cellule SHJ de type n, nous remarquons qu'elle est meilleure et qu'elle atteint une valeur de 0.65 au lieu de 0.59, ce qui explique le meilleur rendement obtenu pour la SHJ de type p. (19.13% au lieu de 18.9%)

### III.4. Effet du dopage de la couche active sur la performance de la cellule

Nous avons également étudié l'influence de la densité de dopage de la couche active (Bulk) à base de silicium cristallin dopé p (p-c-Si) sur les différents paramètres photovoltaïques.

Nous avons fait varier le dopage  $N_A$  de  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$  à  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , et nous avons tracé la variation des paramètres photovoltaïques en fonction du dopage. Les graphes obtenus sont représentés sur la figure IV.14.

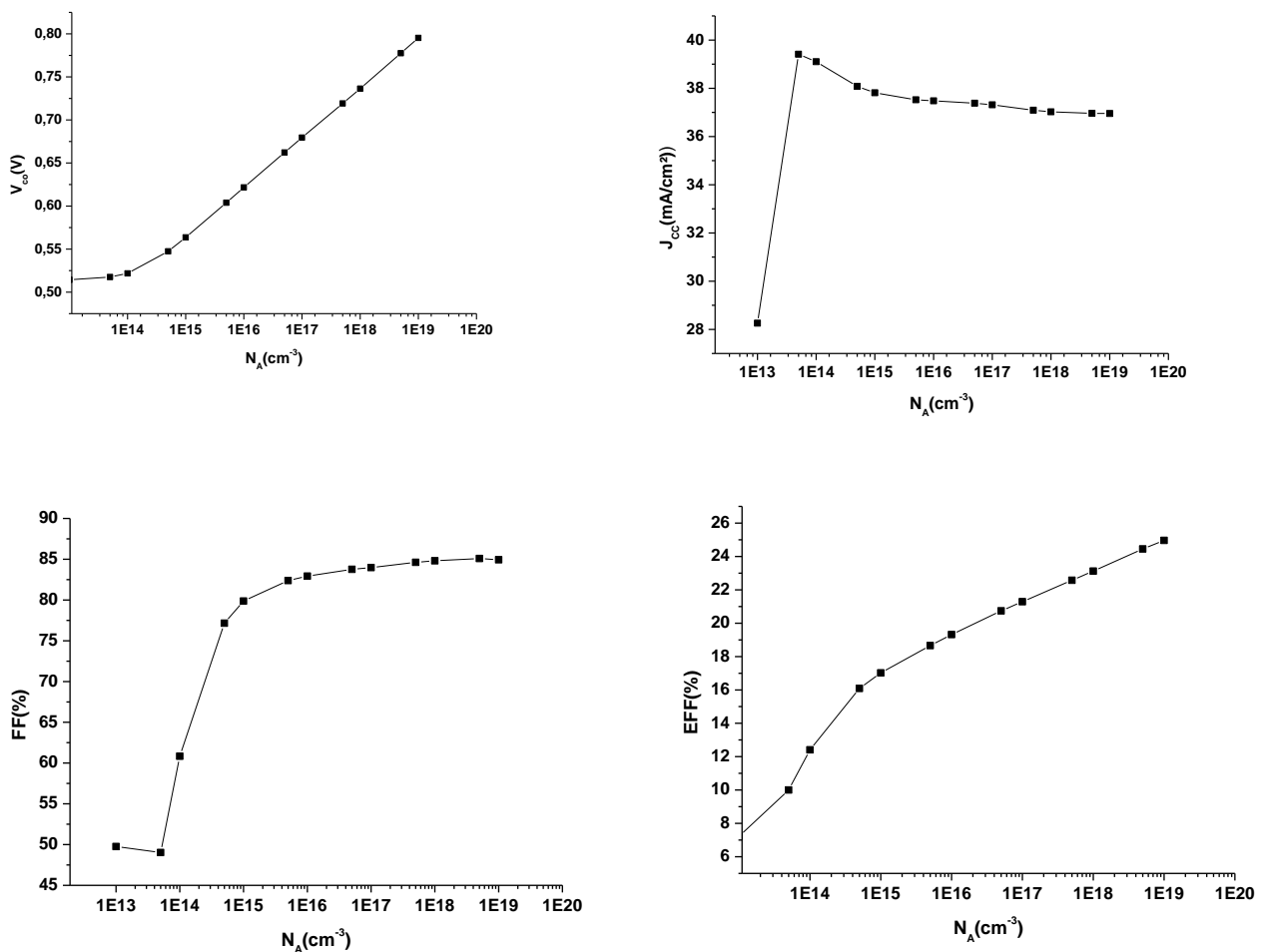


Figure IV.14: Variation des paramètres photovoltaïques en fonction du dopage de la couche active  $N_A$



### Interprétation des résultats :

Nous pouvons constater à partir des graphes que lorsque nous augmentons le dopage de la couche active de  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$  à  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , la tension en circuit ouvert  $V_{co}$  augmente considérablement de 0.51V à 0.79V, induisant une forte augmentation du Facteur de Forme (de 49,76% à 84,93%), ainsi qu'une augmentation considérable du rendement de puissance qui passe de 7.23 à 24.96%.

Lorsque le dopage de la couche active constitué de silicium cristallin augmente, cela induit un champ électrique plus grand au niveau de la jonction n-a-Si :H/p-c-Si améliorant la performance de la cellule.

## IV. COMPARAISON ENTRE DEUX CELLULES OPTIMISEES

Après avoir analysé tous les résultats de simulation obtenus dans ce chapitre, nous pouvons résumer les paramètres optimaux des deux types de cellules comme suit :

Cellule	$N_A (\text{cm}^{-3})$	$d(\text{Å}^0)$	$N_D (\text{cm}^{-3})$	$\eta(\%)$
SHJ type N	$10^{19}$	20	$5.10^{17}$	22,35
SHJ type P	$10^{19}$	20	$5.10^{17}$	25.22

Tableau IV.3 : comparaison de la performance de cellule SHJ de type n et de type p.

## V. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons étudié le comportement de deux types de cellules solaires à hétérojonctions de silicium (a-Si:H/c-Si) selon la variation des paramètres des différentes couches.

Nous avons montré que pour optimiser les cellules SHJ de type n, il était nécessaire d'augmenter le dopage de la couche active afin d'augmenter le champ électrique au niveau de la jonction et de diminuer celui de l'émetteur qui est à base de silicium amorphe et qui est détérioré par le dopage. L'épaisseur de l'émetteur doit être la plus fine possible afin de diminuer le taux de recombinaison et d'améliorer ainsi la performance de la cellule.

Concernant les cellules SHJ de type p, où l'émetteur est dopé n, nous avons constaté le même comportement vis-à-vis du dopage de la couche active (p-c-Si), ainsi que pour l'épaisseur de l'émetteur. Néanmoins, lorsque le dopage de l'émetteur augmente jusqu'à  $N_D=10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , le rendement augmente jusqu'à une valeur de 19.27%, puis redescend pour des valeurs de dopage supérieures à  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , car le silicium amorphe hydrogéné dopé n est détérioré par le dopage induisant une augmentation du taux de recombinaison.

## **CHAPITRE IV : RESULTATS DE SIMULATION ET DISCUSSIONS**

---

En comparant les deux types de cellules, nous avons trouvé que la cellule de type p donne de meilleurs résultats par rapport à celle de type n, notamment grâce à une meilleure réponse spectrale.

## **CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES**

Le principal but des recherches effectuées dans le domaine des énergies renouvelables est d'atteindre de hauts rendements tout en diminuant le coût de fabrication. Les cellules solaires à hétérojonctions de silicium (SHJ) combinent le haut rendement du silicium cristallin et le faible coût de la technologie du silicium amorphe.

Dans ce mémoire nous nous intéressons à l'optimisation des cellules solaires SHJ sur substrat n et sur substrat p puis à la comparaison entre la performance des deux types de cellules.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté des généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque à savoir : le rayonnement et le spectre solaire, puis la notion d'air masse AM qui tient compte de la position relative du soleil, puis nous avons défini les conditions STC nécessaires à la détermination du rendement en puissance des cellules solaires. Nous avons ensuite décrit le principe de conversion photovoltaïque qui est basé sur l'effet photoélectrique. Nous avons enfin clôturé ce chapitre en répertoriant les différentes filières photovoltaïques qui sont réparties en quatre grandes familles : le silicium cristallin, le silicium amorphe hydrogéné, les couches minces et les matériaux organiques.

Dans le deuxième chapitre, nous avons rappelé les propriétés des semi-conducteurs qui sont à la base de l'élaboration des photopiles, puis nous avons décrit les différents phénomènes physiques qui gouvernent les jonctions pn. Le modèle d'Anderson qui permet de mettre en évidence les discontinuités de bandes au niveau des hétérojonctions a été décrit. Nous avons parlé des principales caractéristiques du silicium cristallin et le silicium amorphe hydrogéné ainsi que leur procédé de fabrication. Nous avons expliqué le rôle de chaque couche constituant les cellules SHJ.

Le chapitre suivant a été entièrement consacré à la modélisation des cellules solaires. Nous avons d'abord expliqué les phénomènes qui interviennent dans la cellule solaire SHJ à l'aide d'un modèle mathématique équivalent qui permet de trouver les paramètres PV définissant toutes les cellules solaires. Nous avons par la suite détaillé les équations de transport dans les semi-conducteurs : l'équation de Poisson, les équations de continuité des électrons et des trous qui sont utilisées et résolues par tous les logiciels de simulation existants. Nous avons d'ailleurs présenté brièvement le logiciel SCAPS que nous avons choisi d'utiliser pour réaliser nos simulations.

Dans le dernier chapitre, nous avons présenté les résultats obtenus et nous avons montré que pour optimiser les cellules SHJ de type n, il était nécessaire d'augmenter le dopage du bulk pour augmenter le champ électrique au niveau de l'interface p-a-Si :H/n-c-Si et de diminuer la densité de dopage de l'émetteur qui dégrade ce type de matériau. L'épaisseur de l'émetteur doit être la plus fine possible afin de diminuer le taux de recombinaison et d'améliorer la qualité de la cellule.

Nous avons constaté le même comportement pour les cellules SHJ de type p concernant le dopage de la couche active (p-c-Si), ainsi que pour l'épaisseur de l'émetteur.

Cependant, lorsque le dopage de l'émetteur augmente jusqu'à  $N_D=10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , le rendement augmente jusqu'à 19.27%, puis diminue pour des densités de dopage supérieures à  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .

Nous avons également déduit que le rendement de conversion des cellules SHJ de type p est meilleur par rapport à celles de type n ( 25,22% pour type p et 22,35% pour type n), ces résultats sont principalement associés à la réponse spectrale des cellule SHJ de type p ( 0,65 pour  $\lambda=300\text{nm}$ ) qui est meilleure par rapport à l'autre type de cellule (0,59 pour  $\lambda=300\text{nm}$ ).

Comme perspectives, il serait intéressant d'étudier l'apport d'une couche tampon intrinsèque disposée entre l'émetteur et la couche active, obtenant ainsi une cellule HIT et sa comparaison avec une cellule SHJ. Il serait également nécessaire d'optimiser la couche BSF et de voir l'influence de son épaisseur et son dopage sur la caractéristique  $J=f(V)$  de la même cellule. Une étude sur le choix du matériau pour constituer le TCO serait également intéressante.

## BIBLIOGRAPHIE :

- [1] Asma Ouanoughi, « Amélioration d'absorption des cellules solaires par l'utilisation des cristaux photoniques en couches minces », Doctorat en troisième cycle en électronique, option : systèmes électro-énergétique et énergies renouvelables, Université de M'sila, 2016.
- [2] Khayra Bendahmane, « Optimisation des paramètres photovoltaïques à l'aide de PCID de cellules solaires au silicium à émetteur de type N et leur comparaison avec celles de type P. », Master en Physique, spécialité : Modélisation et Caractérisation des Matériaux, Université de Mostaganem, 2016.
- [3] José Miguel Navarro, « cellules photovoltaïques organiques transparentes dans le visible », Doctorat en matériaux, technologies et composants de l'électronique, université de Toulouse, 2008.
- [4] Commissariat à l'énergie atomique, « Le soleil », Revue : De la recherche à l'industrie, n°13, 2009.
- [5] Naima Bedda, « Etude de propriétés physiques des semi-conducteurs : Si, GaAs et GaAlAs. Simulation des cellules solaires à base de Si et GaAs », Magister en Physique, Option : Physique des Matériaux Métalliques et semi-conducteurs, Université de Batna, 2011.
- [6] Vincent Guiheneuf, « Approche multi-physique du vieillissement des matériaux pour application photovoltaïque, Doctorat en sciences de l'Ingénieur, spécialité : énergétique, Université de Paris-Est, 2017.
- [7] Daniel Lincot, « la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire », Découverte n°344-345, 2007.
- [8] Jean-Eric Marie Bourée, Père Roca Cabarrocas, « Cellules solaires en couches minces à base de silicium », Revue Reflets de la Physique n°6, 2007.
- [9] Daniel Lincot, « les filières photovoltaïques en couches minces et leurs perspectives d'application à l'habitat », 2008.
- [10] Charles Roger, « Développement de cellules photovoltaïques à base de CIGS sur substrats métalliques », Doctorat en Matériaux, Mécanique, Génie civil, Electrochimie, Université de Grenoble, 2013.
- [11] Dariga Meekhun, « Réalisation d'un système de conversion et de gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque pour l'alimentation des réseaux de capteurs sans fils autonome pour l'application aéronautique », Doctorat en génie électrique, Université de Toulouse, 2011.
- [12] Mohamed Nadjib Mechalikh, Hamada Charaf Eddine , « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau », Master en Génie Electrique, Université de Ouargla, 2013.
- [13] <https://www.energy.gov/eere/solar/downloads/research-cell-efficiency-records>. consultée le 20/02/2019.

- [14] Djamaia Boughanem, « Influence de propriétés du silicium amorphe sur la performance d'une cellule solaire HIT », Master en physique, Option : modélisation et caractérisation des matériaux, Université de Mostaganem, 2018.
- [15] Yannik Vaschetti, « Modélisation, caractérisation et réalisation de nouvelles structures photovoltaïques sur substrat de silicium mince », Doctorat en physique des semi-conducteurs, Université de Louis Pasteur Strasbourg I, 2005.
- [16] Diouf Djicknoum, « Cellules photovoltaïques Silicium à hétérojonctions et à structure interdigitée en face arrière », Doctorat en physique, Université de Paris-Sud, 2010.
- [17] Guillaume Levaufre, « Circuits photoniques intégrés incluant des lasers hybrides III-V sur silicium pour application en télécommunication très haut débit », Doctorat en Electronique, Université Paris-Saclay, 2016.
- [18] Alice Defresne, « Amélioration de la passivation de cellules solaires de silicium à hétérojonction grâce à l'implantation ionique et aux recuits thermiques », Doctorat en science des matériaux, Université de Paris Saclay, 2016.
- [19] Frederic Jay, « Nouveaux substrats de silicium cristallin destinés aux cellules photovoltaïques à haut rendement –cas du silicium mono-like et du dopage aux donneurs thermiques liés à l'Oxygène pour les cellules à hétérojonction de silicium », Doctorat en Matériaux, Mécanique, Génie Civil, Electrochimie (2MGE), Université de Grenoble Alpes, 2016.
- [20] David Reaux, « Cellules photovoltaïques à hétérojonction de silicium (a-si:H/c-si) : modélisation des défauts et de la recombinaison à l'interface », Doctorat en physique, Université de Paris Saclay, 2017.
- [21] Mawahib Rahmouni, « Etude des cellules photovoltaïques 'HIT' en vue d'améliorer leur rendement », Doctorat en sciences, Option : rayonnement et matière, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, 2010.
- [22] Silvain de Vecchi, « Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonction de silicium et contacts interdigités en face arrière », Doctorat en science des matériaux, Université de Lyon, 2013.
- [23] Djaaffar Rached, « Etude et modélisation d'une cellule HIT à base de silicium polyamorphe », Doctorat en sciences, Option : Traitement et structure des matériaux, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, 2010.
- [24] Hanifa Belghoul, « Effet de l'épaisseur de la couche fenêtre sur les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque à hétérojonction », Master en physique, Option : Modélisation et caractérisation des matériaux, Université de Mostaganem, 2017.
- [25] Naïma Touafek, « Contribution à l'étude d'une cellule solaire en couches minces à base de  $\text{CuIn}_{1-x}\text{GaxSe}_2$  », Doctorat en sciences en Electronique, Option : semi-conducteurs en biomédecine, Université de Constantine, 2015.