



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique



**Université Amar Thelidji- Laghouat**

**FACULTE : TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT : GÉNIE DES PROCÉDÉS**

## **MEMOIRE DE MASTER**

**Présenté par : Horabi Souad**

**DOMAINE : Sciences et Technologies**

**FILIERE : Génie des procédés**

**OPTION : Génie des procédés des matériaux**

### **Thème**

**Etude des cellules photovoltaïques à base  
d'hétérojonction de silicium a-Si/c-Si**

#### **Jury de soutenance :**

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
CHABIRA Salem	Professeur	Président
BELHADJ Soraya	MCB	Examineur
HANNACHI Manelle	MCB	Rapporteur

**Année Universitaire : 2022-2023**

## **Remerciement**

Nous remercions ALLAH qui nous aide et nous donne la patience et le courage durant ces longues, années d'étude. je tiens à remercier grandement mon encadreur. Dr : Manelle Hannachi.

Nous remercions également les membres de jury : monsieur le président Chabira Salem et l'enseignante Belhadj Soraya , d'avoir accepté d'examiner notre travail

Nous remercions Monsieur le professeur Marc Burgelman pour la licence du logiciel SCAPS .

Pour sa grande disponibilité et ses précieux conseils. Nous remercions également tous les enseignants du département génie des procédé d'université de Laghouat .

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos ami(e)s et collègues qui nous ont toujours Soutenu(e) et encouragé(e) au cours de la réalisation de ce mémoire.

Merci à tous

## **DEDICACE**

Je dédie ce Travail en signe de respect et de

Reconnaissance :

A mes Parents.

A toute mA Famille sans exception.

A tous mes Amis.

A ceux qui ont m'Aidé de loin ou de près Durant  
ma carrière.

S.HORABI

# Sommaire

Remerciement.....	I
DEDICACE.....	II
Plan de travail.....	III
Listes des figures.....	V
Liste des Symboles.....	VII
Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I:Les notions fondamentales sur les cellules photovoltaïque</b>	
I-1-Introduction .....	4
I-2-Historique .....	4
I-3-Rayonnement solaire .....	4
I.3.1 Masse d'air.....	5
I.4. Matériaux semi-conducteurs .....	6
I.5. Silicium.....	6
I.5.1. Le silicium cristallin .....	6
I.5.2. Silicium amorphe hydrogéné .....	7
I.5.2.1. Rôle de l'hydrogène dans le silicium amorphe hydrogéné .....	8
I.6. Dopage .....	8
I.6.1. dopage de type n (négatif).....	8
I.6.2.dopage de type p (positif) .....	9
I.7. Jonction PN.....	10
I.8. La cellule photovoltaïque.....	10
I.9. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	10
I.10. Structure d'une cellule solaire Jonction PN.....	11
I.10.1. Couche anti reflet .....	11
I.10.2. Texturation de la surface .....	11
I.10.3. Contact face avant et arrière .....	12
I.11. Les paramètres d'une cellule photovoltaïque .....	12
I.11.1. Courant de court-circuit $I_{CC}$ .....	13
I.11.2.Tension à circuit ouvert $V_{oc}$ .....	13
I.11.3. La puissance maximale $P_{max}$ .....	13
I.11.4. Facteur de forme FF .....	13

I.11.5. Le rendement.....	13
I.12. Les différents types de la cellule photovoltaïque.....	<b>14</b>
I.12.1 Première génération .....	14
I.12.2. Deuxième génération : couche mince « thin-film ».....	14
I.12.3. Troisième génération.....	14
I.13. Conclusion .....	<b>14</b>

## **Chapitre II:Simulation des cellules solaire à base d'hétérojonction de silicium a-si :H(p)/c-si(n)**

II.1. Introduction .....	<b>16</b>
II.2. logiciel SCAPS 1D (Solar Cell Capacitance Simulator).....	<b>17</b>
II.2.1. simulation de la cellule solaire .....	17
II.3.résultats et discussions.....	<b>19</b>
II.3.1.Simulation de la cellule ( a-si :H (p)/c-si(n) ).....	<b>19</b>
II.3.1.1. Influence de l'épaisseur de la couche a-Si :H (P).....	19
II.3.1.2.Influence de l'énergie de gap de la couche émetteur a-Si:H(p).....	20
II.3.1.3.Influence de l'épaisseur de la couche c-si(n).....	21
II.3.2. Simulation de la cellule ( a-si:H (p) / a-si :H (i) /c-si(n) ).....	<b>22</b>
II.3.2.1. Influence de l'épaisseur de la couche a-si :H (i).....	22
II.4.Conclusion.....	<b>24</b>
Conclusion générale .....	<b>25</b>
Références .....	<b>27</b>

## Listes des figures

Figure (I-1) : trois différents types de rayonnement solaire

Figure (I.2) : Représentation schématique du nombre de masse d'air AM.

Figure (I.3) : Matériaux Semi-conducteur.

Figure (I.4) : Structure cristallographique du silicium.

Figure( I.5) : Représentation du silicium amorphe hydrogéné.

Figure (I- 6) : Semi-conducteur de type N .

Figure(I-7) : semi-conducteur de type .

Figure (I-8) : Représentation schématique des liaison électronique pour une jonction PN de semi –conducteurs silicium (si) .

Figure (I.9) : Diagramme d'énergie d'une jonction PN à l'équilibre thermodynamique.

Figure (I-10) : structure d'une cellule photovoltaïque standard en silicium.

Figure (I.11): Trajectoire d'un faisceau de lumière approchant une surface texturée.

Figure (I-12): Caractéristique I(V) d'une cellule solaire définissant les paramètres.

La figure (II.1) : représente la structure de la cellule photovoltaïque de silicium à hétérojonction a-si :H (p)/c-si(n).

Figure (II.2): variation des paramètres photovoltaïque en fonction de l'épaisseur de la couche  
a-si :H (p).

Figure (II.3): variation des paramètres photovoltaïque en fonction de l'énergie de gap.

Figure (II.4): variation des paramètres photovoltaïque en fonction de l'épaisseur de la couche  
c-si(n).

La figure (II.5): représente la structure de la cellule photovoltaïque de silicium à hétérojonction  
a-si :H (p)/a-si :H(i)/c-si(n).

Figure (II.6): variation des paramètres photovoltaïque en fonction de l'épaisseur de la couche  
a-si :H(i).

## Liste des tableaux

Tableau (II.1) : paramètres physiques de la cellule a-Si-H (P)/c-Si (n).

Tableau (II.2) : paramètres physiques d'entrée pour les matériaux des couches a-si :H (p)/a-si :H(i)/c-si(n).

## Liste des Symboles

Si: silicium.

Si:H: silicium hydrogéné.

a-Si:H: Le silicium amorphe hydrogéné.

a-Si: silicium amorphe.

c-Si : silicium cristallin.

P: une couche fenêtre.

i: la couche absorbeur.

n: une couche collectrice.

B : le bore

AL : l'aluminium

GE : le germanium

Ln : l'indium

BSF : Back surface field.

ZnO : L'oxyde de zinc.

ITO : l'oxyde d'indium-étain (ITO , pour l'anglais indium tin oxide ).

TiO<sub>2</sub> : Le dioxyde de titane .

ZnS : Le sulfure de zinc .

SiO<sub>2</sub>: l'Oxyde de Silicium.

MgF<sub>2</sub> :Le fluorure de magnésium .

PV: photovoltaïque.

V<sub>OC</sub>: Tension a circuit ouvert.

JSC :la densité de courant

$I_{CC}$  :courant de court circuit .

FF: Facteur de forme

$\eta$ : Le rendement.

SCAPS ID: Solar Cell Capacitance Simulator.

ZCE: zone de charge d'espace.

$E_g$  : énergie interdite ( l'énergie de gap ).

CIS: le cuivre indium diséléniure .

CdTe: tellure de cadmium.

$I_{ph}$ : Photo-courant [A].

$R_s$ : Résistance série [W].

$R_{sh}$ : Résistance shunt (ou parallèle) [W].

$k$ : Constante de Boltzmann.

$T$ : Température effective de la cellule[kelvin].

FF: Facteur de forme  $n$ : Le rendement.

CIS: séléniure de cuivre et d'indium.

AM: d'air masse.

HET : hétérojonction ( heterojonction with intrinsic thin layer ).

$I_0$ : courant de saturation .

$P_{max}$  : la puissance maximale .

$I_{max}$  :le courant maximale .

$V_{max}$  : la tension maximale.

$P_{inc}$  : la puissance incidente .

SCAPS 1D : Solar Cell Capacitance Simulator unidimensionnel.

# **Introduction générale**

### Introduction générale

L'énergie solaire est l'une des ressources d'énergie renouvelable les plus importantes qui ont le potentiel de faire face à la crise énergétique mondiale à l'avenir [1]. Les cellules solaires photovoltaïques transforment l'énergie de photons du spectre solaire en électricité. Le noyau des cellules solaires est la jonction, une connexion entre un semi-conducteur de type p et un semi-conducteur de type n [2].

Actuellement, la majorité des cellules solaires sont fabriquées à base de silicium : Cristallin, polycristallin et amorphe ; Elles sont différentes dans les performances et dans le coût de fabrication [2].

Le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) a joué un rôle crucial depuis des décennies comme des couches absorbantes intrinsèques avec des couches dopées pour construire des jonctions PIN, et dans une mesure de plus en plus importante en combinaison avec le silicium cristallin dans les cellules solaires à hétérojonction (HIT) [3].

La technologie des cellules solaires en silicium à hétérojonction, également appelées cellules solaires HJT (hétérojonction technologie), combine les avantages du silicium cristallin et amorphe, démontrant la capacité d'atteindre un rendement élevé de conversion de l'énergie solaire ou les températures de fabrication inférieures ne dépassant pas 200–250 ° C [4]. Les premières cellules solaires HJT ont été développées dans les années 1990 par Sanyo Company avec un rendement de 12% [5]. Depuis lors, la technologie HJT a évolué chaque année, atteignant de nouveaux sommets en termes d'efficacité.

La simulation numérique est une méthode très utile pour évaluer et comprendre les performances des cellules solaires. Aussi, pour économiser de l'argent et de temps avant de commencer les essais expérimentaux pour fabriquer la cellule solaire.

Il existe plusieurs outils de simulation disponibles pour évaluer et comprendre les performances la cellule solaire, on cite AFORS-HET, AMPS, Sentaurus, Silvaco , Asa, Lumerical FDTD etc [6]. Parmi ces outils, SCAPS-1D (Solar Cell Capacitance Simulator in one dimension) développé au département d'électronique et Systèmes d'Information (ELIS) de L'Université de Gand, Belgique. SCAPS calcule la solution des équations de base des semi- conducteurs : l'équation de Poisons, l'équation de continuité et l'équation de transport de charge pour les électrons et les trous en 1 dimension et en régime permanent [7].

Dans cette étude nous allons étudier les cellules solaires de structures a-Si:H(p)/ c-si (n) et a-Si:H(p)/ a-Si:H(i)/ c-si(n) en utilisant le logiciel SCAPS .

Ce manuscrit est composé de deux chapitres. Le premier d'entre-eux est dédié à une introduction du domaine des cellules solaires tels que les différentes filières des cellules photovoltaïques, les caractéristiques électriques d'une cellule, le principe de fonctionnement...etc. Le deuxième chapitre est consacré à la simulation des cellules :

a-Si:H(p)/ c-si (n) et a-Si:H(p) / a-Si:H(i)/ c-si(n) nos résultats obtenus ont été présentés, discutés et interprétés. Nous terminerons notre étude par une conclusion générale qui résume les différents résultats trouvés.

**Chapitre I**

**Les notions fondamentales sur les  
cellules photovoltaïques**

## I-1-Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque est une source d'énergies renouvelables qui résulte de la lumière du soleil qui est convertie en électricité à l'intérieur des semi-conducteurs (silicium, le germanium, le gallium, etc.) [8].

Les cellules photovoltaïques (PV) jouent un rôle crucial dans la conversion de l'énergie solaire en électricité. Comprendre les principes fondamentaux des cellules PV est essentiel pour optimiser leur performance, concevoir de nouveaux dispositifs plus efficaces et améliorer l'utilisation de l'énergie solaire [9].

Dans ce premier chapitre nous allons donner quelques notions de base du domaine photovoltaïque.

## I-2-Historique

En 1839 la découverte de l'effet photovoltaïque, Antoine-César Becquerel constate les effets électriques que produisent les rayons solaires dans une pile.

En 1905, Einstein découvrit que l'énergie de ces quanta de lumière est proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique. L'utilisation des cellules solaires débute dans les années quarante. Le domaine spatial a besoin d'une énergie sans combustible embarqué. La recherche s'intensifie sur le photovoltaïque [11].

En 1954 la première cellule photovoltaïque est créée avec un rendement de 4%. Le spatial devient le banc d'essai de la technologie photovoltaïque. Les coûts de fabrication élevés des cellules et leurs rendements médiocres ne leur permettent pas encore une exploitation à grande échelle. Il faudra attendre les années 70 pour que les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie photovoltaïque [12].

## I-3-Rayonnement solaire

Le rayonnement émis par le soleil est constitué d'ondes électromagnétiques dont une partie atteint constamment la limite supérieure de l'atmosphère terrestre. Ce rayonnement électromagnétique se situe dans la gamme de longueur d'onde de la lumière visible et dans le proche infrarouge. L'énergie transmise par ce rayonnement, moyenne sur une année et sur la totalité de la limite supérieure de l'atmosphère, correspond à une illumination de  $340 \text{ W.m}^{-2}$  [13].

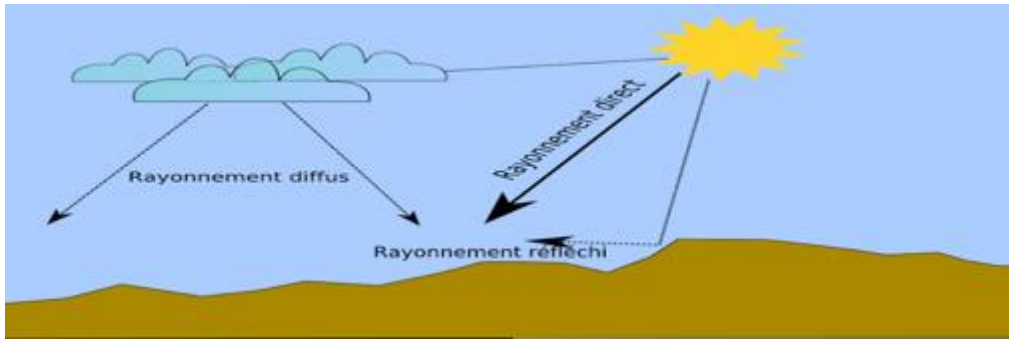


Figure (I-1) : les trois différents types de rayonnement solaire [14]

### I.3.1 Masse d'air

Plus le soleil se trouve au-dessous de l'horizon, plus l'atmosphère sera pénétrée par son rayonnement et plus il y aura de changements. La relation entre l'épaisseur de la atmosphère qui est traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol et l'épaisseur qui est parcourue à la verticale du lieu est connue sous le nom de masse d'air.

Dans les conditions normales et au niveau de la mer, l'expression simplifiée suivante est utilisée [15] :

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)}$$

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

- AM1 = correspond au soleil au zénith ( $\theta = 0$ )
- AM2 = correspond à l'angle  $\theta = 60^\circ$
- AM1.5 = correspond à l'angle  $\theta = 48,19^\circ$
- AM0 est utilisé pour préciser les conditions en dehors de l'atmosphère.

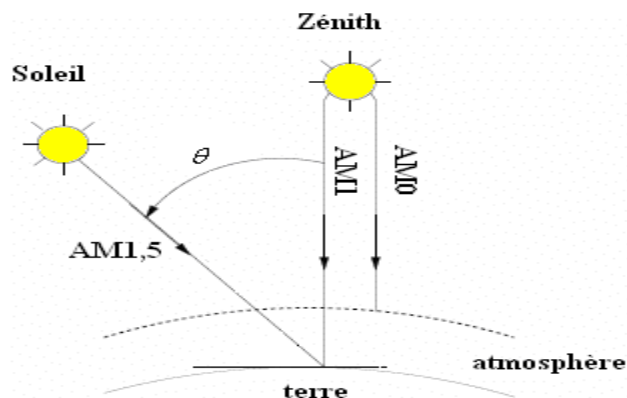


Figure (I.2) : Représentation schématique du nombre de masse d'air AM [16].

## I.4. Matériaux semi-conducteurs

Les matériaux semi-conducteurs sont des objets dont la résistance est moyenne entre ceux trouvés dans les conducteurs et les isolateurs. [17]

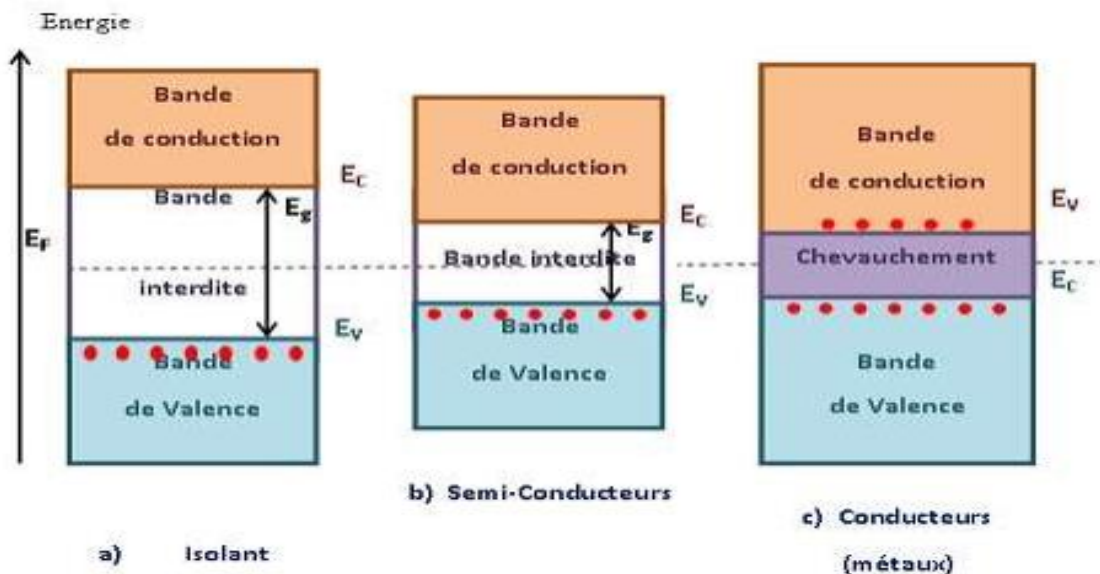


Figure (I.3) : Matériaux Semi-conducteur. [18]

### I.4.1. Semi-conducteurs intrinsèques

Un semi-conducteur intrinsèque est un semi-conducteur non dopé, ce qui signifie qu'il contient peu d'impuretés (atomes étrangers) par rapport au nombre de trous et d'électrons produits thermiquement. Le diagramme énergétique est constitué de deux bandes (conduction et valence) séparé par une bande interdite. Pour franchir cette bande l'électron doit acquérir de l'énergie (thermique, photon). Mais le nombre d'électrons libres dans un semi-conducteur intrinsèque reste très faible. Dans ce cas, le nombre de trous et d'électrons est équivalent [19].

### I.4.2. Semi-conducteur extrinsèque

Pour augmenter la conductivité des semi-conducteurs on y introduit des impuretés. Ceci s'appelle le dopage [20].

## I.5. Silicium

### I.5.1. Le silicium cristallin

Le silicium cristallin est une forme de silicone qui a une structure cristalline régulière et ordonnée. le silicium lui-même est un élément chimique du symbole Si et du numéro atomique

14. Il est largement utilisé dans l'industrie électronique et solaire en raison de ses propriétés de semi-conducteur.

La structure cristalline du silicium cristallin est basée sur un réseau tridimensionnel de liaisons covalentes entre les atomes de silicium. Chaque atome de silicium est lié à quatre autres atomes de silicium voisins, formant ainsi une structure en forme de diamant. Cette structure lui confère des propriétés semi-conductrices [20].

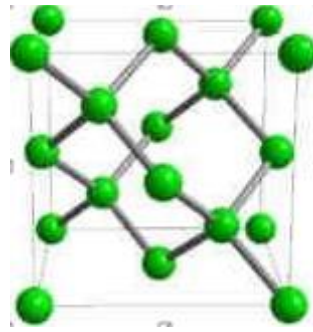


Figure (I.4) : Structure cristallographique du silicium [21]

### I.5.2. Silicium amorphe hydrogéné

Le silicium amorphe, également appelé silicium a-Si, est une forme non cristalline du silicium. Contrairement au silicium cristallin, qui a une structure ordonnée et régulière, le silicium amorphe a une structure désordonnée et aléatoire. Cela signifie que les atomes de silicium dans le silicium amorphe ne sont pas disposés selon un motif régulier, mais plutôt de manière chaotique [22].

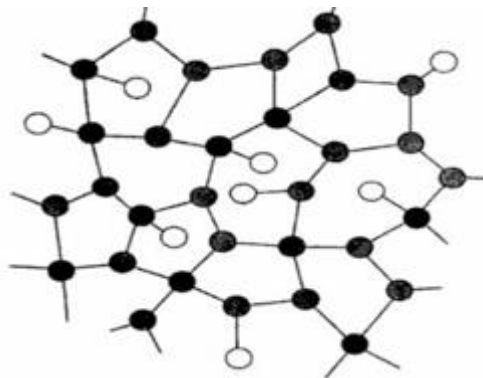


Figure (I.5) : Représentation du silicium amorphe hydrogéné. Les atomes de silicium sont représentés en noir et les atomes d'hydrogène en blanc [23]

### **I.5.2.1. Rôle de l'hydrogène dans le silicium amorphe hydrogéné**

a-Si:H est un matériau semi-conducteur composé de silicium amorphe (qui n'a pas de structure cristalline régulière) et d'atomes d'hydrogène intégrés. L'hydrogène est utilisé dans le processus de fabrication de (a-si:H) pour deux raisons principales :

1. Élimination des défauts : L'hydrogène est introduit pendant pour éliminer les défauts structuraux et les impuretés du silicium amorphe. Il se lie à des atomes indésirables tels que l'oxygène et le carbone, formant des composés volatils qui peuvent être évacués. Cela améliore la qualité du matériau en réduisant la densité des états électroniques indésirables, ce qui est essentiel pour obtenir des performances électriques élevées.
2. Passivation de surface : L'hydrogène est également utilisé pour la passivation de surface, ce qui signifie qu'il se lie aux atomes de silicium à la surface du matériau, formant une couche protectrice d'hydrures de silicium. Cette couche réduit les défauts de surface et les sites de recombinaison des porteurs de charge, améliorant ainsi l'efficacité des dispositifs fabriqués à partir de l'a-Si:H, tels que les cellules solaires [24].

## **I.6. Dopage**

Cette étape permettant de réaliser la jonction P-N. Cela comprend l'introduction d'impuretés dans le cristal pour modifier ces propriétés électriques. Pour ce faire, nous avons deux types de dopage : le type P (positif) et le type N (négatif) [25].

### **I.6.1. dopage de type n (négatif)**

On obtient un semi-conducteur de type N en dopant un cristal de 4 atome dans la couche de valence (silicium) avec des atomes possèdent 5 électrons sur leur couche de valence comme le phosphore (P). Les électrons libres sont majoritaires alors que les trous sont minoritaires [26].

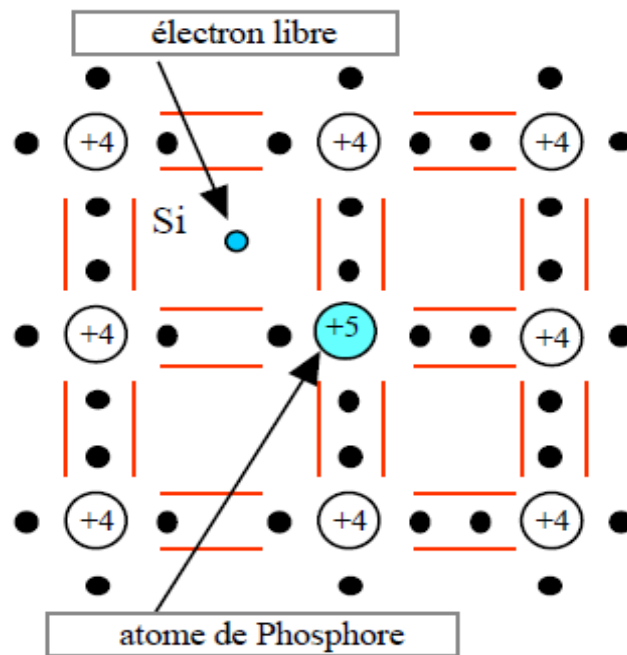


Figure (I-6) : Semi-conducteur de type N [27].

### I.6.2.dopage de type p (positif)

Les semi-conducteurs de type P sont obtenus en utilisant un cristal atomique 4 dans la couche d'équivalence (silicium) avec des atomes contenant 3 électrons dans la couche d'équivalence tels que le bore (B), l'aluminium (Al), le germanium (Ge) et l'indium (In). (troisième colonne de la classification périodique). Dans un semi-conducteur de type P, les trous sont majoritaires alors que les électrons sont minoritaires [26].

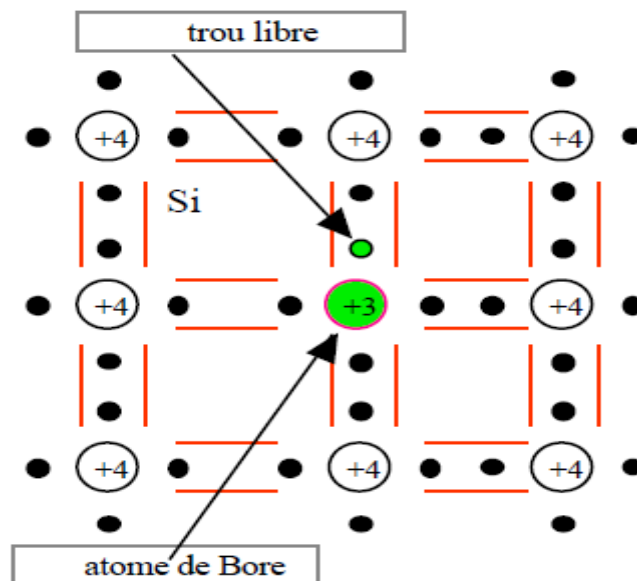
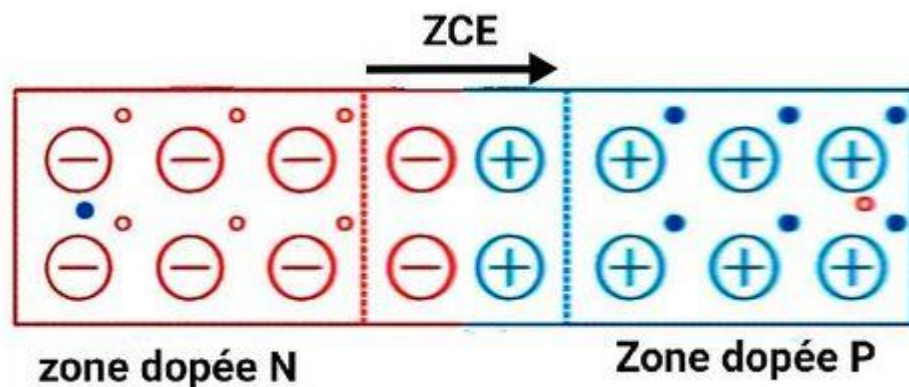


Figure (I-7) : semi-conducteur de type p [27].

## I.7. Jonction PN

La différenciation du dopage entraîne une transition PN abrupte, formant une région cristalline qui passe du dopage p au dopage n. Lorsqu'une région de type p entre en contact avec une région de type n, des trous et des électrons sont involontairement distribués à travers la jonction, ce qui entraîne un espace traversant avec pratiquement aucune concentration de porteurs libres. D'autre part, il existe des conducteurs, qui sont des semi-conducteurs dopés, de sorte que la jonction rend difficile la circulation du courant [28].



**Figure (I-8) :** Représentation schématique des liaisons électroniques pour une jonction PN de semi-conducteurs silicium (Si) [29].

## I.8. La cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est un composant électronique composé essentiellement de semi-conducteurs. Le rôle de ce dernier est de capter la lumière du soleil afin de la convertir en électricité que l'onduleur transformera en courant alternatif pour faire fonctionner les appareils dans vos maisons. Cette puissance peut également être stockée dans une batterie [30].

## I.9. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

L'énergie solaire est une énergie propre permettant de produire de l'électricité. Les trois mécanismes permettent de convertir l'énergie solaire en énergie électrique suivants [31] :

- \* Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap).
- \* Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des couples électron/trou dans le matériau semi-conducteur.
- \* Collecte des particules générées dans le dispositif.

## I.10. Structure d'une cellule solaire Jonction PN

Une cellule solaire est composée de plusieurs couches. Les éléments de base sont la jonction PN, qui joue un rôle majeur dans les dispositifs solaires, et plusieurs couches qui composent la structure standard de l'industrie illustrée à la figure (I.8) [32].

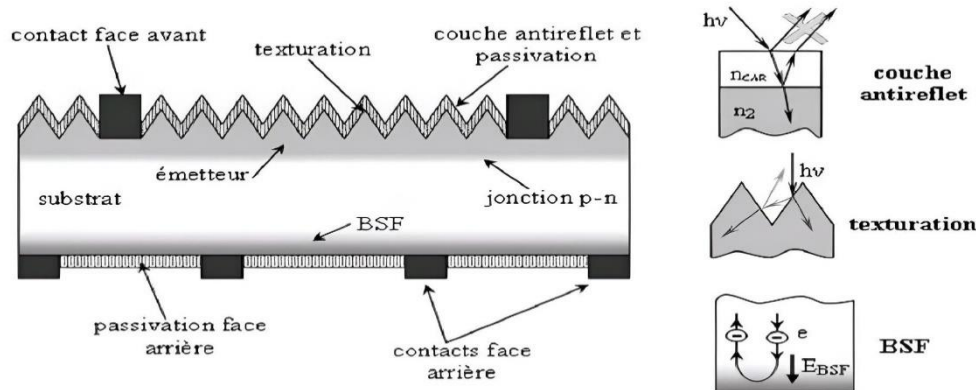


Figure (I-10) : structure d'une cellule photovoltaïque standard en silicium [33].

### I.10.1. Couche anti reflet

une couche anti-réflexe est utilisé pour réduire la réflexion de la lumière au niveau de la face avant. Sans cette couche, la cellule solaire agit comme un miroir et reflète jusqu'à 33% de la lumière qui l'atteint.

Différents revêtements anti-réfléchissants sont utilisés; ils peuvent être conducteurs comme ZnO ou ITO ou isolants comme TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, ZnS, et MgF<sub>2</sub>. La réflectivité dépend de l'indice de réfraction du matériau, l'épaisseur de la couche appliquée, de l'angle d'incidence et la polarisation de la lumière incidente [33].

### I.10.2. Texturation de la surface

La texturation est utilisée pour réduire la réflectibilité de la surface cellulaire. Cette procédure vise à créer un relief micrométrique sur la surface, généralement sous la forme d'une pyramide (figure I-11). [34].

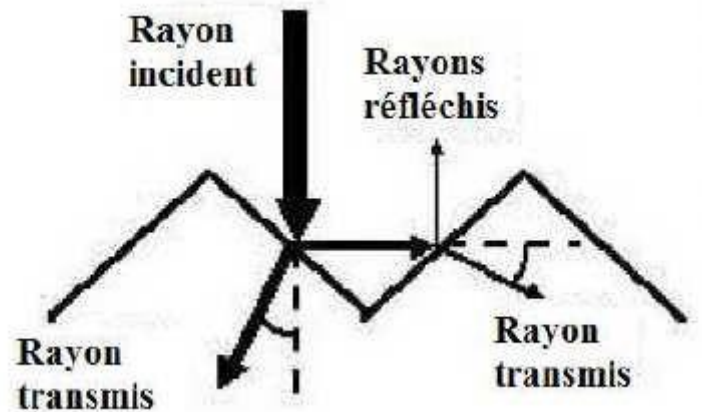


Figure (I.11): Trajectoire d'un faisceau de lumière approchant une surface texturée [35].

### I.10.3. Contact face avant et arrière

Les contacts doivent être ohmiques pour que ce rôle soit effectivement garanti. Les connexions pauvres, c'est-à-dire les contacts avec une série de haute résistance, affecteront principalement le facteur de forme de la cellule et le courant récupéré [36].

### I.11. Les paramètres d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres peuvent être déterminés à l'aide de l'équation caractéristique ou des courants-tension courbes [37].

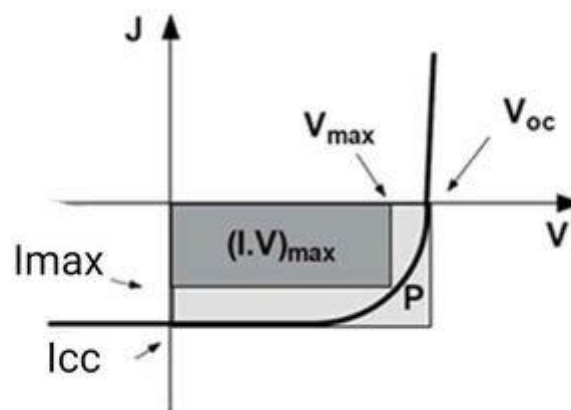


Figure (I-12): Caractéristique I(V) d'une cellule solaire définissant les paramètres [38]

➤ Les plus fréquentes sont les suivantes :

### I.11.1. Courant de court-circuit $I_{cc}$

C'est le courant pour lequel il y a zéro tension au générateur PV. Le cas idéal ( $R_s$  null et  $R_{sh}$  infini) confond ce courant avec le photo-courant  $I_{ph}$ .

$$I_{cc} = I_{ph} \quad (1)$$

$I_{ph}$  : photo-courant.

### I.11.2. Tension à circuit ouvert $V_{oc}$

Cette tension (la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur solaire) est le point où le courant généré par le générateur solaire est nul [39].

$$V_{oc} = \frac{kt}{q} \ln \left[ \frac{I_{cc}}{I_0} + 1 \right] \quad (2)$$

Avec :

$q$  : charge de l'électron =  $1,602 \cdot 10^{-19}$  coulomb.

$K$  : constante de Boltzmann =  $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/k.

$T$  : température effective de la cellule [kelvin].

$I_0$  : courant de saturation.

### I.11.3. La puissance maximale $P_{max}$

Le point de charge idéal pour la cellule (un rectangle arrondi et gris) Figure (I-12) est indiqué par la relation entre le courant et la tension maximale [40] :

$$P_{max} = I_{max} \cdot V_{max} \quad (3)$$

### I.11.4. Facteur de forme FF

Le facteur de forme peut nous apprendre sur le vieillissement de la cellule en représentant l'efficacité de cette cellule. Il s'agit de la relation entre la puissance maximale qu'une cellule peut produire et la force maximale qui est théoriquement réalisable [41].

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} = \frac{I_{max} \cdot V_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (4)$$

### I.11.5. Le rendement

Le rendement, des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente,  $P_{in}$ . [42].

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{incidente}}} = \frac{V_{oc} \cdot I_{cc} \cdot FF}{P_{inc}} \quad (5)$$

## I.12. Les différents types de la cellule photovoltaïque

### I.12.1 Première génération

Ces cellules sont généralement en silicium et ne contiennent qu'une seule jonction p-n. La technologie de fabrication de ces cellules repose sur la production de « wafers » en silicium très pur, encore très énergivore et coûteux. La limite de rendement théorique pour ce type de cellule est de  $\pm 27\%$ . De nouvelles cellules s'approchent de cette limite chaque année [43].

### I.12.2. Deuxième génération : couche mince « thin-film »

Dans le cas de la "couche mince" le semi-conducteur est déposé directement sur le matériau support (ex : verre). Cette génération comprend, entre autres, le silicium amorphe (a-Si) (silicium non cristallisé gris foncé), le tellure de cadmium (CdTe) et le cuivre indium disélénium (CIS). cellule de cette technologie on les trouve dans des choses comme les montres et les calculatrices appelées cellules solaires [43].

### I.12.3. Troisième génération

Les cellules de 3ème génération sont plus flexibles et ultra-minces, elles sont donc un aigle sur les perforations en silicium. Demain, nous pourrons équiper des trains et des voitures, des stores et même un approvisionnement en tentes militaires. Il peut également être équipé d'objets du quotidien, des parasols aux sacs à dos en passant par les vêtements [43].

## I.13. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les étapes de fabrication du silicium, les technologies du système photovoltaïque, les différents types de dopage du silicium, une définition de la structure d'une cellule solaire jonction PN et les types de cette structure, les paramètres de la cellule et ainsi les différents types d'une cellule photovoltaïque.

Finalement nous avons expliqué de façon globale de fonctionnement des cellules photovoltaïque.

## **Chapitre II**

**Simulation des cellules solaire à base  
d'hétérojonction de silicium a-  
si :H(p)/c-si(n).**

## II.1. Introduction

L'utilisation de SCAPS est très pratique, il permet de simuler n'importe quelle structure photovoltaïque, selon les matériaux disponibles en fichiers data, en jouant sur les paramètres variables (largeur, surface, dopage, etc...), Les résultats de la simulation, sont très proches des résultats expérimentaux, donc c'est un gain de temps et d'argent. On obtient comme résultat les courbes  $V_{OC}$ ,  $J_{SC}$ , FF et le rendement  $\eta$  [44].

La cellule solaire étudiée dans notre travail est une jonction p-n en a-si :H(p) /c-si(n). Les paramètres d'entrée de cette cellule sont les épaisseurs. Puisque les cellules solaire à base de silicium sont destinées aux applications spatiales, le spectre du soleil utilisé est l'AM 1.5. Tous ces paramètres sont introduits dans l'interface de SCAPS pour simuler la caractéristique courant-tension de la cellule et son rendement quantique externe et on va étudier l'effet de l'épaisseur des couches : la couche émettrice ( a-si :H(p) ), la couche intrinsèque (a-si :H(i)), et la couche absorbante ( c-si (n)). sur les paramètres photovoltaïque ( $J_{SC}$ ,  $V_{OC}$ , FF,  $\eta$ ) de la cellule solaire dans le but d'aboutir à un rendement maximal de la cellule solaire à base du a-si :H(p)/c-si(n) [ 45].

On peut citer quelques avantages de la simulations numériques :[46]

- Un gain de temps en évitant la fabrication de plusieurs prototypes avec des paramètres différents.
- Des économies dans la mise au point d'un produit : elle est indépendante de la technologie utilisée (on peut faire varier largement un paramètre donné).
- Un outil d'investigation scientifique car elle permet d'étudier l'influence de chaque zone séparément lorsqu'on a des paramètres interdépendants (mobilité, durée de vie, dopage...) dans une structure donnée.

Dans ce chapitre, après un petit aperçu sur le logiciel de simulation SCAPS (Solar Cell Capacitance Simulator) et l'identification des paramètres physiques utilisés dans cette étude, nous allons simuler des cellules solaires à base de silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) et du silicium cristallin en utilisant le logiciel SCAPS :

🚦 Cellule 01 : a-Si:H(p)/ c-si (n)

🚦 Cellule 02 : a-Si:H(p)/ a-Si:H(i)/ c-si(n)

---

## II.2. logiciel SCAPS 1D (Solar Cell Capacitance Simulator)

Le Département des systèmes électroniques et informatiques (ELIS) de l'Université de Gand en Belgique a développé le logiciel SCAPS pour simuler les cellules solaires unidimensionnelles. Son développement a été aidé par d'autres chercheurs, dont Marc Burgelman, Koen Decock, Johan Verschraegen, Alex Niemegeers et Stefaan Degraeve.

Le logiciel est disponible gratuitement pour la communauté de la recherche de photovoltaïques (établissements et Instituts de recherche). Il fonctionne sur PC sous Windows 95, 98, NT, 2000, XP, Vista, Windows 7, et occupe environ 50 Mo d'espace disque [47].

Initialement conçu pour les architectures cellulaires CuInSe<sub>2</sub> et CdTe. SCAPS a subi de multiples itérations qui ont amélioré sa fonctionnalité au point qu'il peut désormais être utilisé avec les types de cellules solaires cristallines (Si et GaAs) et amorphes (a-Si et cellules Si micro-morphiques [47].

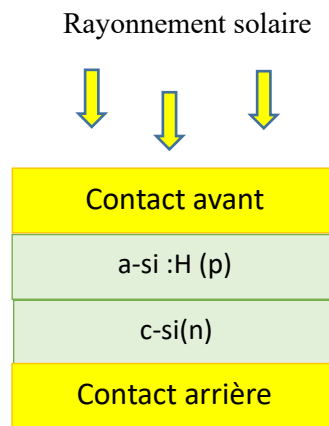
➤ Un aperçu de ses caractéristiques principales est donné ci-dessous [47] :

- Jusqu'à 7 couches semi-conductrices.
- Presque tous les paramètres peuvent être introduits avec variations graduées ( en dépendance de la composition et de la profondeur de la cellule ): Par exemple:  $\chi$ ,  $\epsilon$ ,...
- Mécanismes de recombinaison : bande à bande (direct).
- les niveaux de défauts: en volume ou à l'interface, en considérant leurs états de charge et la recombinaison à leurs niveaux ect.....

### II.2.1. simulation de la cellule solaire

Dans notre simulation de la cellule a-si :H(p)/c-si (n), nous avons utilisé un rayonnement AM 1,5 avec une densité de puissance incidente de 100 W/cm<sup>2</sup>, la température de fonctionnement est fixée à 300 K. Dans ce travail les paramètres physiques utilisés sont représentés dans le tableau (II.1).

Le schéma ci- dessous présente la structure de notre cellule solaire a-si :H(p)/c-si (n).



**La figure (II.1)** : représente la structure de la cellule photovoltaïque de silicium à hétérojonction a-si :H (p)/c-si(n).

**Tableau (II.1)** : les paramètres physiques de la cellule a-Si-H (P)/c-Si (n).

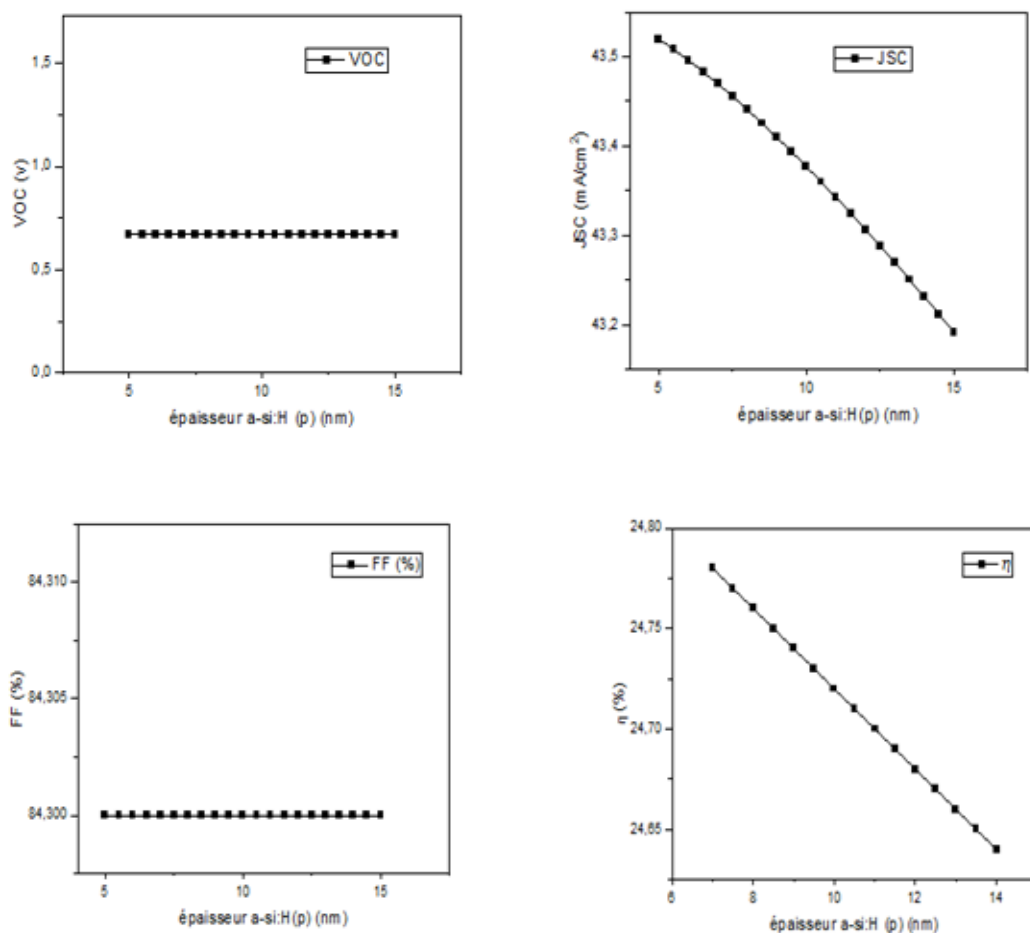
Couche propriété	a-si:H (p) [48 ]	c-si(n) [ 48]
Permittivité diélectrique	11.1	11.1
épaisseur (nm)	5(nm)	250 (µm)
Bande de gap (ev)	1.60 -1.85	1.12
Affinité électronique (ev)	3.9	4.05
Densité des états effective dans la BC ( $N_c(\text{cm}^3)$ )	$6.9 \times 10^{20}$	$2.8 \times 10^{20}$
Densité des états effective dans la BV ( $N_v(\text{cm}^3)$ )	$1.2 \times 10^{21}$	$2.9 \times 10^{19}$
Mobilité d'électron $\mu_n$ ( $\text{cm}^2/\text{V.s}$ )	7	1321
Mobilité du trou $\mu_p$ ( $\text{cm}^2/\text{V.s}$ )	1	461
Densité du donneur $N_d$ ( $\text{cm}^3$ )	0	$5 \times 10^{16}$
Densité de l'accepteur $N_a$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$6.1 \times 10^{21}$	0

## II.3.résultats et discussions

### II.3.1.Simulation de la cellule ( a-si :H (p)/c-si(n) )

#### II.3.1.1. Influence de l'épaisseur de la couche a-Si :H (P)

La figure (II.2) représente l'influence de la variation de l'épaisseur de la couche a-si :H(p) sur les paramètres de la cellule photovoltaïque tension à circuit ouvert  $V_{OC}$ , la densité de courant  $J_{SC}$ , facteur de forme FF, et le rendement  $\eta$ , L'épaisseur de la couche a-si:H(p) est variée de 5 nm à 15 nm, en gardant l'épaisseur de la couche ,c-si(n) fixe à 250  $\mu\text{m}$ .



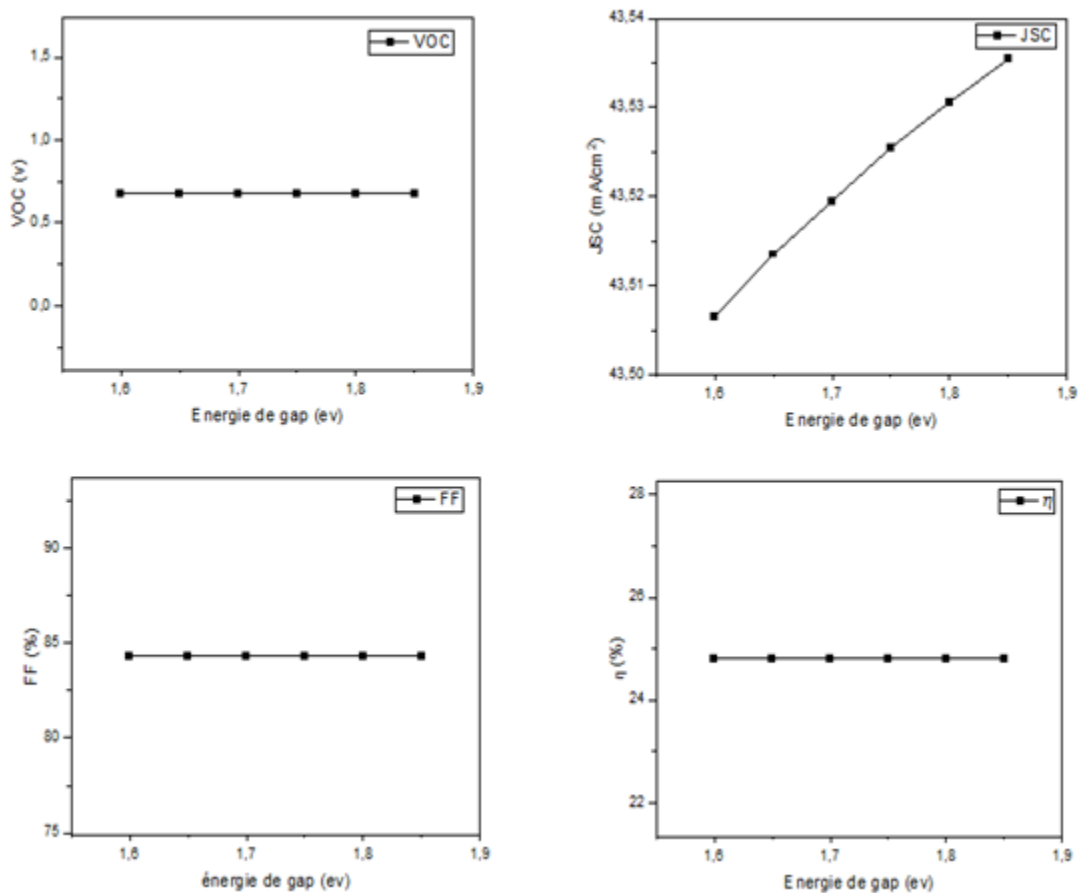
**Figure (II.2) :** variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'épaisseur de la couche a-si :H (p)

D'après la figure (II.2) on observe que la tension de circuit-ouvert et le facteur de forme ne présentent aucune variation remarquable en fonction de la variation de la couche a-si:H (p)  $FF \approx 84.31\%$ ,  $V_{OC} \approx 0.68\text{Volt}$ . Tandis que le rendement et le courant de court-circuit diminuent avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche a-si :H(p) de 24.78 % jusqu'à 24.61% et de

43.519 mA/cm<sup>2</sup> jusqu'à 43.19 mA/cm<sup>2</sup> respectivement. Par conséquent, la couche émettrice a-Si:H(p) doit être aussi mince que possible pour inhiber la recombinaison et pour permettre aux photons absorbés de passer à la couche c-Si(n) [49].

### II.3.1.2. Influence de l'énergie de gap de la couche émetteur a-Si:H(p)

La figure (II.3) montre les paramètres de la cellule solaire en fonction de la variation de l'énergie du gap de la couche émetteur a-Si:H(p), dans l'intervalle 1,6 à 1,85 eV. Tandis que l'énergie de gap de la couche c-Si:H est fixé à 1,12 eV, les épaisseurs a-si :H(p)/c-si(n) des deux couches sont fixé à 5 nm et 250  $\mu$ m respectivement.

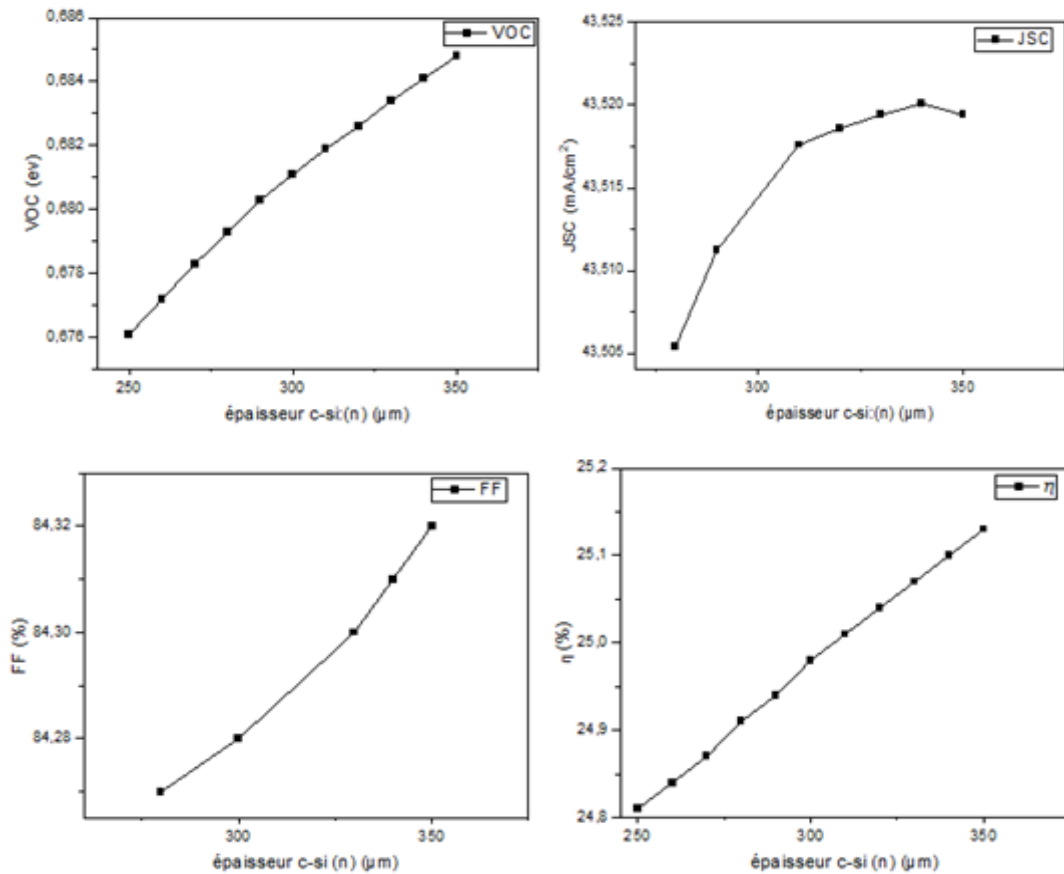


**Figure (II.3) :** variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'énergie de gap

On observe que la tension de circuit ouvert  $V_{OC}$ , le facteur de forme et le rendement  $\eta$  sont constants dans la plage d'énergie de gap 1,6 à 1,85 eV. Ces paramètres n'ont pas été affecté par la variation de l'énergie de gap ( $E_g$ ). On observe aussi un très petit changement dans les valeurs de la densité du courant  $J_{SC}$  de (43.5065 jusqu'à 43.5354) mA/cm<sup>2</sup>.

### II.3.1.3. Influence de l'épaisseur de la couche c-si(n)

La figure (II.4) représente l'effet de la variation de l'épaisseur de la couche c-si(n) sur les quatre paramètres de la cellule photovoltaïque la tension de circuit ouvert  $V_{OC}$ , la densité de courant  $J_{SC}$ , facteur de forme, et le rendement  $\eta$ . L'épaisseur de la couche c-si(n) est variée de 250  $\mu\text{m}$  à 350  $\mu\text{m}$ , en gardant l'épaisseur de la couche a-si :H(p) fixe à 5 nm.



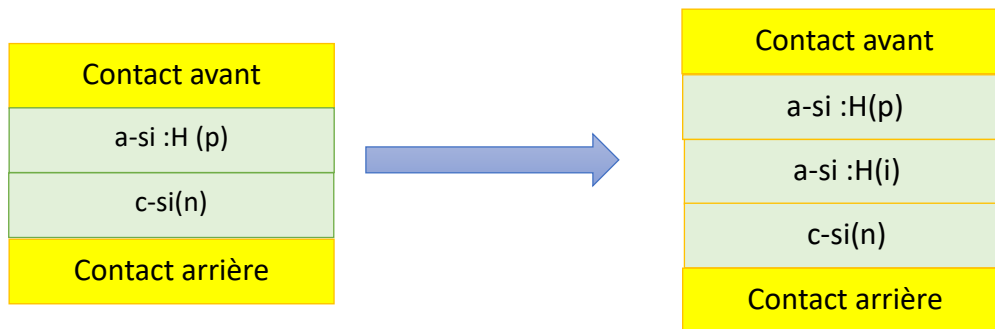
**Figure (II.4) :** variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'épaisseur de la couche c-si(n).

D'après la figure (II.4) on observe que la tension de circuit ouvert  $V_{OC}$ , la densité de courant  $J_{SC}$ , le facteur de forme FF, et le rendement  $\eta$  augmentent en fonction de la variation de l'épaisseur de la couche c-si(n). Notre couche active est constituée à partir du silicium cristallin qui a une très peu densité de défauts ce qui réduit le taux de recombinaison électron-trou, induisant une bonne génération de courant.

### II.3.2. Simulation de la cellule ( a-si:H (p) / a-si :H (i) /c-si(n) )

#### II.3.2.1. Influence de l'épaisseur de la couche a-si :H (i)

Dans le but d'étudier l'effet de l'insertion de la couche a-si :H (i), ( a-si :H (i) une couche de silicium amorphe hydrogéné non dopé dite couche active ou couche intrinsèque), nous allons simuler une seconde cellule a-si:H (p) / a-si :H (i) /c-si(n). La structure de la seconde cellule est schématisée dans la figure suivante.



**La figure (II.5) :** représente la structure de la cellule photovoltaïque de silicium à hétérojonction a-si :H (p)/a-si :H(i)/c-si(n).

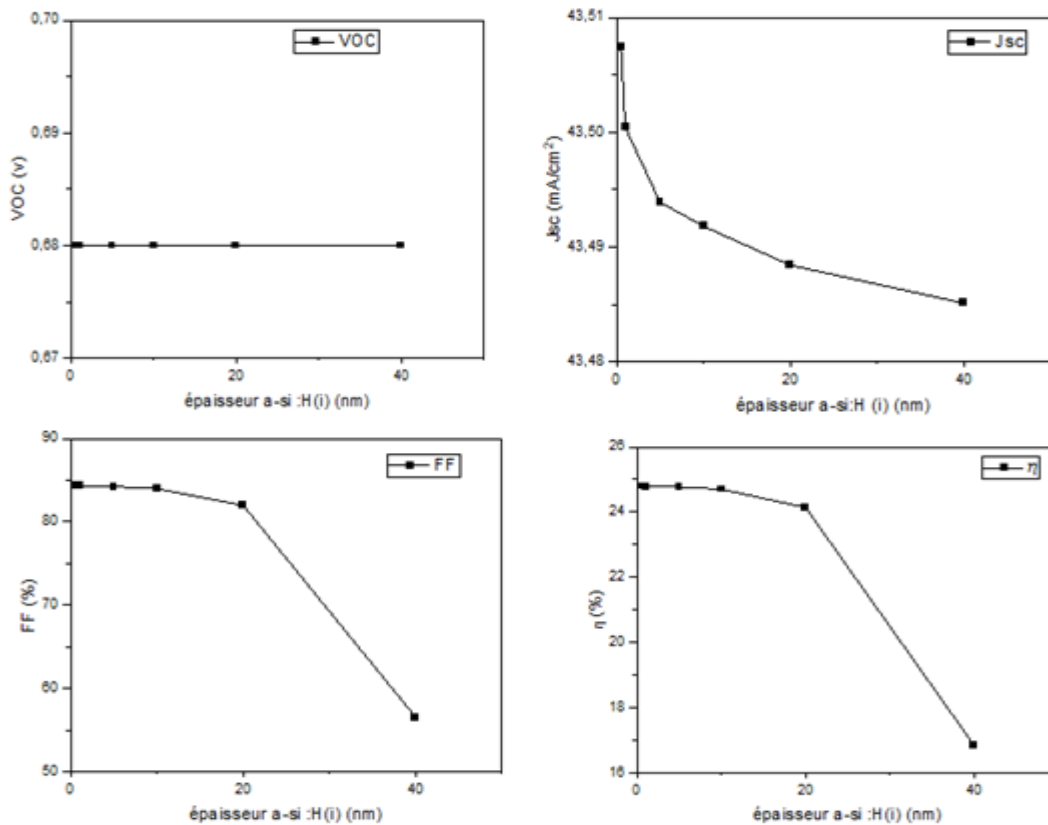
Dans ce travail les paramètres physiques utilisés sont représentés dans le tableau (II.2) :

**Tableau (II.2) :** les paramètres physiques d'entrée pour les matériaux des couches a-si :H (p)/a-si :H(i)/c-si(n).

Couche propriété	a-si:H (p)	a-si :H(i)	c-si(n)
Permittivité diélectrique	11.1	11.1	11.1
épaisseur (nm)	5 (nm)	5 (nm)	250 (μm)
Bande de gap (ev)	(1.60 -1.85)	1.72	1.12
Affinité électronique (ev)	3.9	3.9	4.05
Densité des états effective dans la BC (Nc(cm <sup>3</sup> ))	6.9 ×10 <sup>20</sup>	6.9 ×10 <sup>20</sup>	2.8 ×10 <sup>20</sup>
Densité des états effective dans la BV (Nv(cm <sup>3</sup> ))	1.2 ×10 <sup>21</sup>	1.2 ×10 <sup>21</sup>	2.9 ×10 <sup>19</sup>
Mobilité d'électron μn (cm <sup>2</sup> /V.s)	7	7	1321
Mobilité du trou μp (cm <sup>2</sup> / V.s)	1	1	461
Densité du donneur Nd (cm <sup>3</sup> )	0	0	5 ×10 <sup>16</sup>

Densité de l'accepteur Na (cm <sup>-3</sup> )	6.1 × 10 <sup>21</sup>	0	0
---	------------------------	---	---

La figure (II.5) représente l'influence de la variation de l'épaisseur de la couche a-si :H(i) sur les paramètres de la cellule photovoltaïque a-si:H (p) / a-si :H (i) /c-si(n). L'épaisseur de la couche a-si :H(i) est variée de 0.5 nm à 40 nm, en gardant les épaisseurs des couches a-si :H(p) et c-si(n), fixe à 5 nm et 250 μm respectivement .



**Figure (II.6) :** variation des paramètres photovoltaïque en fonction de l'épaisseur de la couche a-si :H(i)

D'après la figure (II.5) on observe que la tension de circuit-ouvert  $V_{OC}$  ne présente aucune variation en fonction de l'épaisseur de la couche a-si :H(i), tandis que le facteur de forme et le rendement diminuent de 84.3 % jusqu'à 56,55% et de 24.8% jusqu'à 16,85% , les valeurs de la densité de courant diminuent aussi de 43.5074 jusqu'à 43.4851% . Cette diminution peut être attribuée à l'augmentation de la densité des défauts Structure aux dans la

couche active a-Si:H(i). Plus la densité des défauts est importante elle affecte la collecte des porteurs de charges.

#### **II.4.Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons étudié les cellules solaires : a-Si:H(p)/ c-si (n) , a-Si:H(p)/ a-Si:H(i)/ c-si(n) par simulation en utilisant le logiciel SCAPS (Solar Cell Capacitance Simulator). La température de fonctionnement est réglée initialement à 300 K , le rayonnement AM 1,5 avec une densité de puissance incidente de 100 mW/cm<sup>2</sup> est utilisé comme source d'éclairage dans cette simulation. nos résultats aboutis ont été présenté, discuté et interprété.

# **Conclusion générale**

### Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire est une étude par simulation d'une cellule solaire a-si:H (p)/c-si(n) de type pn, puis d'une cellule solaire a-si:H (p) / a-si:H (i) /c-si(n) de type p-i-n, la simulation est fait par le logiciel SCAPS (Solar Cell Capacitance Simulator). La température de fonctionnement est réglée initialement à 300 K , le rayonnement AM 1,5 avec une densité de puissance incidente de 1000 W/m<sup>2</sup> est utilisé comme source d'éclairage dans cette simulation.

Dans un premier temps, nous avons simulé la cellule : a-si:H (p)/c-si(n), premièrement nous avons étudié l'influence de l'épaisseur de la couche a-si:H (p), puis l'effet de l'épaisseur de la couche c-si(n) sur les paramètres de sortie de la cellule. Les résultats montrent que le rendement diminue de façon significative lorsque l'épaisseur de la couche a-si:H (p) , en revanche le rendement croit avec l'accroissement de l'épaisseur de la couche c-si(n) ces résultats peuvent être expliquer par le taux de recombinaison électron-trou et la densité des défauts très peu qui possède le silicium cristallin, contrairement au silicium amorphe qui possède un taux de recombinaison électron-trou très élevé.

La variation de l'énergie du gap de la couche émetteur a-Si:H(p) dans un intervalle allant de 1,6 eV jusqu' à 1,85 eV n'a pas affecté le rendement de la cellule a-si:H (p)/c-si(n).

En second lieu, nous avons étudié une deuxième cellule a-si:H (p) / a-si:H (i) /c-si(n) ou une couche a-si:H (i) a été insérer entre les deux premières couches. La variation de l'épaisseur de la couche a-si:H (i) dans l'intervalle de 0.5 nm à 40 nm est accompagné par une diminution de rendement. La couche insérée est de silicium amorphe très connu par sa grande densité des défauts qui affecte la collecte des porteurs de charges.

# Références

---

**Références**

- [1] Hussain, S., Cao, C., Usman, Z., Chen, Z., Nabi, G., Khan, W. S., ... & Mahmood, T. (2012). Fabrication and photovoltaic characteristics of Cu<sub>2</sub>O/TiO<sub>2</sub> thin film heterojunction solar cell. *Thin Solid Films*.
- [2] Zhu, L. (2012). *Development of Metal Oxide Solar Cells Through Numerical Modeling* (Doctoral dissertation, University of Bolton).
- [3] Stuckelberger, M., Biron, R., Wyrsh, N., Haug, F. J., & Ballif, C. (2017). Progress in solar cells from hydrogenated amorphous silicon. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- [4] Chuchvaga, N., Zholdybayev, K., Aimaganbetov, K., Zhantuarov, S., & Serikkanov, A. (2023). Development of Hetero-Junction Silicon Solar Cells with Intrinsic Thin Layer: A Review. *Coatings*.
- [5] Tanaka, M.; Taguchi, M.; Matsuyama, T.; Sawada, T.; Tsuda, S.; Nakano, S.; Hanafusa, H.; Kuwano, Y. Development of new a-si c-si heterojunction solar-cells-acj-hit (artificially constructed junction-heterojunction with intrinsic thin-layer). *Jpn. J. Appl. Phys. Part 1-Regul. Pap. Short Notes Rev. Pap.* 1992, 31, 3518–3522.
- [6] Kanneboina, V. (2021). Influence of Defect States and Thickness of Interface Layer On High Efficiency of c-Si/a-Si: H Heterojunction Solar Cells With Higher Bandgap a-Si: H (p) Layer By Simulation.
- [7] Badyakar, S., & Das, C. (2022). Numerical simulations on a-Si: H/SnS/ZnSe based solar cells. *Materials Today: Proceedings*.
- [8] LAHMIRA, H., & CHIBA, Y. (2019). Contribution à l'étude d'un panneau solaire photovoltaïque: fabrication, technologie et impact environnemental.
- [9] Belarbi, M. (2015). *Contribution à l'étude d'un générateur solaire pour site autonome* (Doctoral dissertation, University of sciences and technology in Oran).
- [10] MAHAMMEDI, M., & DEGLA, B. *Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base d'hétérojonction de structure HIT: a-Si: H (n)/a-Si: H (i)/c-Si (p)* (Doctoral dissertation, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA).
- [11] Hamoudi, Y. (2018). *Résolution numérique de la caractéristique I(V) et étude des paramètres d'une cellule photovoltaïque*. [http://e-biblio.univ-mosta.dz/handle/123456789/4007?fbclid=IwAR0yZ5mhODp\\_xnGA-WTbHJmYUGCCVmNxIqd5inYPWW4LLHtCvz7FwMLkqeM](http://e-biblio.univ-mosta.dz/handle/123456789/4007?fbclid=IwAR0yZ5mhODp_xnGA-WTbHJmYUGCCVmNxIqd5inYPWW4LLHtCvz7FwMLkqeM)
- [12] Belalem, A., & Sandali, W. (2016). *Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base de Cu<sub>2</sub>ZnSn (S, Se) 4* (Doctoral dissertation).
- [13] Belfihadj, N. (2020). *Étude et simulation d'un émetteur de type p pour les cellules photovoltaïques à hétérojonction en silicium* (Doctoral dissertation).
- [14] potentiel solaire note sur la méthodologie employée pour le calcul de l'isolation, centre d'études techniques de l'équipement méditerrané , [www.centre-mediterranee.fr](http://www.centre-mediterranee.fr)

- [15] PECH, S. D. (2006). *Etude du comportement anti-corrosion de revêtements amorphes base Si élaborés par dépôt chimique en phase vapeur assisté plasma* (Doctoral dissertation, Ecole Polytechnique).
- [16] Slama, F. (2018). *Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique* (Doctoral dissertation).
- [17] AMINA, B., & Nouredine, P. S. Etude comparative entre les cellules solaire de type p-AlGaAs/p-GaAs/n-GaAs et une autre de type n-AlGaAs/n-GaAs/p-GaAs. *Magister en physique, UNIVERSITE MOHAMED KHEIDER-BISKRA*.
- [18] MAROUF, Y. (2019). *Etude et simulation des cellules solaires multi-jonctions à base de matériaux semi-conducteurs III-V* (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra).
- [19] Oghi, Z. (2014). *Mesure automatisée du spectre d'absorption optique des cellules solaire* (Doctoral dissertation).
- [20] MERZOUGUI, A. (2016). *Etude préliminaire de stabilité de défauts ponctuels dans la surface de silicium* (Doctoral dissertation, Université Mohamed BOUDIAF de M'Sila).
- [21] Fatiha, A. Z. Z. E. M. O. U. (2022). *En vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat en Sciences* (Doctoral dissertation, Université de Mostaganem).
- [22] Milat, H., Mender, M., Remmouche, R. E., & Fates, R. (2019). *Modélisation de la distribution de la densité d'état des pièges dans le silicium polycristallin* (Doctoral dissertation, Université de Jijel).
- [23] Fatiha, A. Z. Z. E. M. O. U. (2022). *En vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat en Sciences* (Doctoral dissertation, Université de Mostaganem).
- [24] PECH, S. D. (2006). Etude du comportement anti-corrosion de revêtements amorphes base Si élaborés par dépôt chimique en phase vapeur assisté plasma (Doctoral dissertation, Ecole Polytechnique).
- [25] BESSAAD,R.NASSRI,M.(2022). Simulation des cellules solaires à base de silicium Amorphe.mémoire de master.univ-amar thelidji-laghouat
- [26] NOEL SERVAGENT ,captures à semi-conducteurs et application, physique des semi-conducteurs : fondamentaux ,OPI ressource numériques.
- [27] Tabbi, H. (2014). *Caractérisation automatisée des diodes électroluminescentes* (Doctoral dissertation).
- [28] Hamza, B., & Elhassane, B. (2022). *Etude comparative des performances photovoltaïques des différentes technologies de cellules photovoltaïques* (Doctoral dissertation, faculté des sciences et de la technologie univ bba).
- [29] Zimmer, T. 5. Semi-conducteurs et jonction pn.
- [30] AHMED, R. D'étude d'un Fauteuil Roulant Electrique Adapté par Panneau Solaire.

- [31] MAHAMMEDI, M., & DEGLA, B. *Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base d'hétérojonction de structure HIT: a-Si: H (n)/a-Si: H (i)/c-Si (p)* (Doctoral dissertation, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA).
- [32] CHABANE, H. (2015). *Etude d'une cellule solaire à base de structure PIN* (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).
- [33] Abderrahmane, R. (2017). Selmani kadda «Etude des performances d'une cellule photovoltaïque à hétérojonctions». *Mémoire de Master. Université Dr. Moulay Tahar-Saida.(2016-2017)*.
- [34] Lalam, D. (2016). *Etude et optimisation des cellules solaires en couches minces CdTe/CdS* (Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI TIZI-OUZOU).
- [35] Lalam, D. (2016). *Etude et optimisation des cellules solaires en couches minces CdTe/CdS* (Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI TIZI-OUZOU).
- [36] ] Djedjiga, L. (2016). *Etude et optimisation des cellules solaires en couches minces CdTe/CdS* (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [37] Djedjiga, L. (2016). *Etude et optimisation des cellules solaires en couches minces CdTe/CdS* (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [38] Douha, A. (2008). Etude de l'effet de la température sur les paramètres d'une cellule solaire organique. *Université de Béchar-Ingénieur d'état en science de Matériaux*.
- [39] Amara,Med .Mehdi harrat.(2020). étude de panneau photovoltaïque (Mémoire de licence, UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR)
- [40] Djedjiga, L. (2016). *Etude et optimisation des cellules solaires en couches minces CdTe/CdS* (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [41] HAMOUDI Youness Sujet : « Résolution numérique de la caractéristique I(V) et étude des paramètres d'une cellule photovol ,Année Universitaire 2017-2018
- [42] Kamelia, H. (2012). Modélisation d'une cellule photovoltaïque: Etude comparative. *Mémoire de Magistère, UMMTO*.
- [43] HALLOUMI,Z.(2021).Mini projet les cellules photovoltaïque ,Master traitement de l'information,univ-hassan II de casablanca.
- [44] Mme CHADEL ASMA. Optimisation et simulation numérique du profil de la couche absorbante et des différentes couches des cellules photovoltaïques à base de CIGS.Mémoire de Doctorat.
- [45] Wafa, G. etude et simulation d'une cellule solaire à base de CIGS par SCAPS .
- [46] CHEHBOUB, W. (2016). *Simulation numérique de la cellule solaire à hétérojonction Ni/a-Si: H (p)/c-Si (n)/Al par SCAPS-1D* (Doctoral dissertation, Ecole Nationale Supérieure des Mines et de la Métallurgie. Amar Laskri. Annaba).
- [47] BOUMAMI, Y. (2022). *Simulation et optimisation des cellules solaires hybrides CH3NH3PbI3/CIGS par le logiciel SCAPS* (Doctoral dissertation, university of M'sila).

- [48] Kanneboina, V. (2021). The simulated performance of c-Si/a-Si: H heterojunction solar cells with nc-Si: H,  $\mu$ c-Si: H, a-SiC: H, and a-SiGe: H emitter layers. *Journal of Computational Electronics*, 20(1), 344-352.
- [49] Naceur, S., Cheknane, A., & HILAL, H. S. (2020). A numerical simulation to achieve a high efficiency: Influence and optimization of thickness and doping concentration of emitter layer of heterojunction solar cells. *Revue des sciences et sciences de l'ingénieur*.

## RESUME

Dans ce travail nous avons simulé la cellule solaire a-si:H(p) /c-si:H(n) en étudiant l'effet de la variation de l'épaisseur des couches a-si:H(p) , c-si:H(n) et la variation de l'énergie de gap de la couche a-si:H(p) sur les paramètres de la cellule photovoltaïque : tension du circuit ouvert  $V_{OC}$  ,la densité de courant  $J_{SC}$  , facteur de forme FF et le rendement  $\eta$  . Nous avons aussi simulé une deuxième cellule a-si:H(p) /a-si:H(i)/c-si(n) en examinons l'effet de la variation de l'épaisseur de la couche a-si:H(i). Cette la simulation a été réalisée par le logiciels SCPAS-1D.

**Mots clés:** Cellule solaire ,Silicium, Simulation , SCAPS-1D.

## Summary

In the present study, the role of a-si:H(p) , c-si:H(n) layers thickness and a-si:H(p) band gaps on the photovoltaic cell parameters: open circuit voltage  $V_{OC}$ , current density  $J_{SC}$ , form factor FF and efficiency  $\eta$  of a-si:H(p) /c-si:H(n) solar cell is investigated theoretically by one dimensional SCAPS computer software. In this work , we have also simulated a second solar cell a-si:H(p)/a-si:H(i)/c-si(n) , where the influence of the variation in the thickness of the a-si:H(i) layer is examined .

**Keywords:** Solar cell, Silicon, Simulation, SCAPS-1D.

## ملخص

في هذا العمل قمنا بمحاكاة الخلية الشمسية a-si:H(p) /c-si:H(n) حيث قمنا بدراسة تأثير التغيير في سمك الطبقات a-si:H(p) و c-si:H(n) وطاقة فجوة الطبقة a-si:H(p) على خصائص الخلية الكهروضوئية : جهد الدائرة المفتوحة  $V_{OC}$  ، كثافة التيار  $J_{SC}$  ، عامل الشكل FF و كفاءة الخلية  $\eta$ . قمنا أيضًا بمحاكاة خلية ثانية a-si:H(p) /a-si:H(i)/c-si(n) حيث درسنا تأثير تغيير سمك الطبقة a-si:H(i) على خصائص الخلية. تم تنفيذ هذه المحاكاة بواسطة برنامج المحاكاة احادي البعد SCPAS-1D.

الكلمات المفتاحية : الخلية الشمسية , سيليسيوم ، محاكاة ، برنامج المحاكاة سكايس .