

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

## **UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET**

**FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES**  
**DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**



# **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

**Pour l'obtention du diplôme de Master**

**Domaine : Sciences et Technologie**

**Filière : Génie Electrique**

**Spécialité : Informatique Industrielle**

## **THÈME**

**Optimisation d'une cellule photovoltaïque TF-Si**

**Préparé par : *CHERIGUI Chahrazad.***  
***HADIDI Malika.***

**Devant le Jury :**

| <b>Nom et prénoms</b> | <b>Grade</b> | <b>Qualité</b> |
|-----------------------|--------------|----------------|
| M. R. OTMANI          | MAA          | Président      |
| M.A.GHELLAB           | MCB          | Examineur      |
| M. Y.BELHADJI         | MAA          | Encadreur      |
| M. F. MOULAHCENE      | MCB          | Co-Encadreur   |

**PROMOTION 2015 /2016**





## *Dédicace*

*A nos chers parents*

*A mes chères sœurs*

*A mes chers frères*

*A nos famille, nos amies*

*Et à ceux que nous aimons*





## *REMERCIEMENTS*

*Tous d'abord, nous remercions DIEU tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.*

*Un grand merci s'adresse à nos chers parents, sans leur soutien à tous les niveaux, tout simplement cela ne serait pas possible.*

*Nous sommes heureuses de témoigner à notre encadreur M. Y. BELHADJI l'expression de notre profonde gratitude, pour l'aide précieuse, les conseils éclairés et les encouragements qu'il nous a, sans cesse, prodigué tout au long de ce travail.*

*Nous tenons à remercier vivement les membres du jury M. R. OTMANI, de nous faire l'honneur de présider le jury de ce mémoire et M. A. GHELLAB d'avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Nous exprimons notre profonde gratitude à tous nos enseignants, qui nous ont soutenu et ont toujours étaient présents et patients avec nous, également toute l'équipe de département de Génie Electrique ainsi que tout le personnel de la faculté des sciences appliquées, car chacun d'eux a su trouver un peu de temps pour nous aider durant cinq longues années.*

*Nous éprouvons le besoin de remercier aussi tous les gens qui ont soutenus notre effort de mener bien ce travail*

# SOMMAIRE

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| Table des abréviations..... | 06 |
| Liste des figures.....      | 09 |
| Liste des tableaux.....     | 10 |
| Introduction générale.....  | 11 |

## **Chapitre I : Généralités sur le photovoltaïque**

|   |    |
|---|----|
| I.1 Introduction .....                          | 13 |
| I.2 Pourquoi l'énergie solaire ?.....           | 13 |
| I.2.1 Le soleil .....                           | 14 |
| I.2.2 Le rayonnement solaire.....               | 15 |
| I.2.3 L'exploitation de l'énergie solaire ..... | 15 |
| I.2.3.1 L'énergie thermique .....               | 15 |
| I.2.3.2 L'énergie thermodynamique .....         | 15 |
| I.2.3.3 L'énergie photovoltaïque.....           | 16 |
| I.3 Histoire du photovoltaïque .....            | 16 |
| I.4 La cellule photovoltaïque .....             | 17 |
| I.4.1 Interaction photon/semi-conducteur .....  | 17 |
| I.4.2 Principe de fonctionnement.....           | 19 |
| I.4.3 Description du semi-conducteur.....       | 20 |
| I.4.3.1 Semi-conducteur intrinsèque .....       | 21 |
| I.4.3.2 Les semi-conducteurs extrinsèques.....  | 22 |

# SOMMAIRE

|                          |    |
|--------------------------|----|
| a) Dopage de type N..... | 22 |
| b) dopage de type P..... | 23 |

## **Chapitre II : Physique de la cellule photovoltaïque**

|   |    |
|---|----|
| II.1 Introduction .....   | 24 |
| II.2 les Types des cellules photovoltaïques .....                               | 25 |
| II.2.1 Les cellules photovoltaïques inorganiques.....                           | 25 |
| II.2.1.1 La filière silicium .....  | 25 |
| a. Cellules au silicium monocristallin.....                                     | 26 |
| b. Cellules au silicium poly-cristallin .....                                   | 26 |
| c. Silicium en ruban autosupporté .....   | 27 |
| d. Filière en silicium amorphe .....  | 28 |
| II.2.1.2 Cellules couches minces.....   | 29 |
| II.2.1.2.1 Définition des cellules à hétérojonction.....                        | 29 |
| II.2.1.3 Les filières non silicium en couche mince.....                         | 30 |
| II.2.1.4 Les multi-jonctions en couche mince .....                              | 30 |
| II.2.1.5 Les cellules III-V multi jonctions.....                                | 31 |
| II.2.1.6 Les cellules nanocristallines à colorant (ou cellules de Grätzel)..... | 32 |
| II.2.2 Les cellules photovoltaïques organiques .....                            | 33 |
| II.3 Architecture de la cellule photovoltaïque.....                             | 33 |
| II.4 Caractérisation physique des cellules photovoltaïques .....                | 35 |
| II.4.1 Caractéristique courant/tension et schéma équivalent .....               | 35 |

# SOMMAIRE

|   |    |
|---|----|
| II.4.2 Les paramètres des cellules photovoltaïques..... | 36 |
| <b>a)</b> Courant de court-circuit $I_{cc}$ .....       | 37 |
| <b>b)</b> Tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) .....  | 37 |
| <b>c)</b> Facteur de forme FF .....                     | 37 |
| <b>d)</b> Le rendement .....                            | 38 |
| II.5 Module photovoltaïque .....                        | 38 |
| II.5.1 Encapsulation et encadrement .....               | 38 |

## Chapitre III : Résultat et simulation

|  |    |
|--|----|
| III.1 Introduction .....                                       | 40 |
| III.2 Présentation du logiciel de simulation SCAPS 3.2.01..... | 40 |
| III.2.1 L'utilité de SCAPS .....                               | 41 |
| III.3 Applications.....  | 41 |
| III.3.1 Présentation de la structure .....                     | 42 |
| III.3.2 Résultats et interprétation.....                       | 42 |
| III.3.2.1 L'effet de la température.....                       | 43 |
| III.3.2.2 L'effet de l'épaisseur .....                         | 45 |
| . L'effet de l'épaisseur de l'émetteur $W_n$ .....             | 45 |
| . L'effet de l'épaisseur de la couche tampon.....              | 46 |
| . L'effet de l'épaisseur du collecteur $W_p$ .....             | 48 |
| III.3.2.3 L'effet du dopage.....                               | 48 |
| III.4 Etude comparative .....                                  | 50 |
| III.4.1. Effet de l'épaisseur.....                             | 51 |
| III.4.2. Effet du dopage .....                                 | 51 |
| Conclusion générale.....                                       | 52 |
| Bibliographie.....   | 53 |

# SOMMAIRE

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| Table des abréviations..... | 06 |
| Liste des figures.....      | 09 |
| Liste des tableaux.....     | 10 |
| Introduction générale.....  | 11 |

## **Chapitre I : Généralités sur le photovoltaïque**

|   |    |
|---|----|
| I.1 Introduction .....                          | 13 |
| I.2 Pourquoi l'énergie solaire ?.....           | 13 |
| I.2.1 Le soleil .....                           | 14 |
| I.2.2 Le rayonnement solaire.....               | 15 |
| I.2.3 L'exploitation de l'énergie solaire ..... | 15 |
| I.2.3.1 L'énergie thermique .....               | 15 |
| I.2.3.2 L'énergie thermodynamique .....         | 15 |
| I.2.3.3 L'énergie photovoltaïque.....           | 16 |
| I.3 Histoire du photovoltaïque .....            | 16 |
| I.4 La cellule photovoltaïque .....             | 17 |
| I.4.1 Interaction photon/semi-conducteur .....  | 17 |
| I.4.2 Principe de fonctionnement.....           | 19 |
| I.4.3 Description du semi-conducteur.....       | 20 |
| I.4.3.1 Semi-conducteur intrinsèque .....       | 21 |
| I.4.3.2 Les semi-conducteurs extrinsèques.....  | 22 |

# SOMMAIRE

|                          |    |
|--------------------------|----|
| a) Dopage de type N..... | 22 |
| b) dopage de type P..... | 23 |

## **Chapitre II : Physique de la cellule photovoltaïque**

|   |    |
|---|----|
| II.1 Introduction .....   | 24 |
| II.2 les Types des cellules photovoltaïques .....                               | 25 |
| II.2.1 Les cellules photovoltaïques inorganiques.....                           | 25 |
| II.2.1.1 La filière silicium .....  | 25 |
| a. Cellules au silicium monocristallin.....                                     | 26 |
| b. Cellules au silicium poly-cristallin .....                                   | 26 |
| c. Silicium en ruban autosupporté .....   | 27 |
| d. Filière en silicium amorphe .....  | 28 |
| II.2.1.2 Cellules couches minces.....   | 29 |
| II.2.1.2.1 Définition des cellules à hétérojonction.....                        | 29 |
| II.2.1.3 Les filières non silicium en couche mince.....                         | 30 |
| II.2.1.4 Les multi-jonctions en couche mince .....                              | 30 |
| II.2.1.5 Les cellules III-V multi jonctions.....                                | 31 |
| II.2.1.6 Les cellules nanocristallines à colorant (ou cellules de Grätzel)..... | 32 |
| II.2.2 Les cellules photovoltaïques organiques .....                            | 33 |
| II.3 Architecture de la cellule photovoltaïque.....                             | 33 |
| II.4 Caractérisation physique des cellules photovoltaïques .....                | 35 |
| II.4.1 Caractéristique courant/tension et schéma équivalent .....               | 35 |

# SOMMAIRE

|   |    |
|---|----|
| II.4.2 Les paramètres des cellules photovoltaïques..... | 36 |
| <b>a)</b> Courant de court-circuit $I_{cc}$ .....       | 37 |
| <b>b)</b> Tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) .....  | 37 |
| <b>c)</b> Facteur de forme FF .....                     | 37 |
| <b>d)</b> Le rendement .....                            | 38 |
| II.5 Module photovoltaïque .....                        | 38 |
| II.5.1 Encapsulation et encadrement .....               | 38 |

## Chapitre III : Résultat et simulation

|  |    |
|--|----|
| III.1 Introduction .....                                       | 40 |
| III.2 Présentation du logiciel de simulation SCAPS 3.2.01..... | 40 |
| III.2.1 L'utilité de SCAPS .....                               | 41 |
| III.3 Applications.....  | 41 |
| III.3.1 Présentation de la structure .....                     | 42 |
| III.3.2 Résultats et interprétation.....                       | 42 |
| III.3.2.1 L'effet de la température.....                       | 43 |
| III.3.2.2 L'effet de l'épaisseur .....                         | 45 |
| . L'effet de l'épaisseur de l'émetteur $W_n$ .....             | 45 |
| . L'effet de l'épaisseur de la couche tampon.....              | 46 |
| . L'effet de l'épaisseur du collecteur $W_p$ .....             | 48 |
| III.3.2.3 L'effet du dopage.....                               | 48 |
| III.4 Etude comparative .....                                  | 50 |
| III.4.1. Effet de l'épaisseur.....                             | 51 |
| III.4.2. Effet du dopage .....                                 | 51 |
| Conclusion générale.....                                       | 52 |
| Bibliographie.....   | 53 |

## LISTE DES ABREVIATIONS

| <b>Symbole</b>         | <b>Unité</b> | <b>Signification</b>                                     |
|------------------------|--------------|--|
| <i>Cz</i>              |              | Substrats du silicium                                    |
| <i>Fz</i>              |              | Float Zone   |
| <i>HIT</i>             |              | Hétérojonction intrinsèque thin                          |
| <i>ZCE</i>             |              | Zone de charge d'espace                                  |
| <b>PV</b>              |              | Photovoltaïque   |
| <i>I<sub>obs</sub></i> | A            | Le courant d'obscurité                                   |
| <i>I<sub>s</sub></i>   | A            | Le courant de saturation                                 |
| <i>q</i>               |              | La charge de l'électron                                  |
| <i>K</i>               | K            | La constante de Boltzmann                                |
| <i>T</i>               | K            | La température   |
| <i>n</i>               |              | Le facteur d'idéalité                                    |
| <i>I<sub>ph</sub></i>  | A            | Le courant photo   |
| <i>R<sub>s</sub></i>   | Ω            | Résistance série   |
| <i>R<sub>p</sub></i>   | Ω            | Résistance parallèle                                     |
| <b>d</b>               |              | Une diode  |
| <i>I<sub>cc</sub></i>  | A            | Le courant de cour circuit                               |
| <i>V<sub>co</sub></i>  | V            | La tension de circuit ouvert                             |
| <i>I<sub>s</sub></i>   | A            | Le courant de saturation                                 |
| <i>V<sub>m</sub></i>   | V            | La tension correspondant à la puissance maximale fournie |
| <i>I<sub>m</sub></i>   | A            | Le courant correspondant à la puissance maximale fournie |
| <i>P<sub>m</sub></i>   | W            | La puissance maximale                                    |

## LISTE DES ABREVIATIONS

|              |           |                                      |
|--------------|-----------|--------------------------------------|
| $\eta$       | %         | Le rendement                         |
| $\Delta E_v$ |           | discontinuité de bande de valence    |
| $\Delta E_c$ |           | discontinuité de bande de conduction |
| $V_d$        | V         | la tension de diffusion              |
| $W_p$        | $\mu m$   | La largeur de la région dopé n       |
| $W_n$        | $\mu m$   | La largeur de la région dopé p       |
| $J_{sc}$     | $mA/cm^2$ | courant de court-circuit             |
| $FF$         |           | Facteur de forme                     |

## LISTE DES FIGURES

|  |    |
|--|----|
| <b>Fig.I.1</b> : Le soleil matière première du 21eme siècle.....   | 14 |
| <b>Fig.I.2</b> : représentation des niveaux d'énergie dans un semi-conducteur.....   | 17 |
| <b>Fig.I.3</b> : Transitions inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur. a) semi-conducteur à gap direct, b) Semi-conducteur à un gap indirect ..... | 18 |
| <b>Fig.I.4</b> : $v$ du silicium et profondeur de pénétration des photons en fonction de la longueur d'onde.....   | 19 |
| <b>Fig.I.5</b> : Représentation de la diffusion des porteurs de charges dans une jonction PN.....  | 20 |
| <b>Fig.I.6</b> : Structure de la bande d'énergie.....  | 21 |
| <b>Fig.I.7</b> : Représentation d'un semi-conducteur de type N .....   | 22 |
| <b>Fig.I.8</b> : Représentation d'un semi-conducteur de type P .....   | 23 |
| <b>Fig.II.1</b> : Répartition des matériaux sur le marché mondial du photovoltaïque.....   | 26 |
| <b>Fig.II.2</b> : Tirage d'un Silicium cristallin en ruban .....   | 27 |
| <b>Fig.II.3</b> : Comparatif des différents types de cellules PV à base de silicium.....   | 28 |
| <b>Fig.II.4</b> : Structure d'une cellule photovoltaïque silicium à hétérojonctions.....   | 30 |
| <b>Fig.II.5</b> : Cellule Tandem a-Si/ $\mu$ c-Si & spectre solaire et spectres d'absorption.....  | 31 |
| <b>Fig.II.6</b> : Les cellules nanocristallines à colorant.....  | 32 |
| <b>Fig.II.7</b> : Cellule photovoltaïque organique .....   | 33 |
| <b>Fig.II.8</b> : Schéma d'une cellule solaire standard .....  | 34 |
| <b>Fig.II.9</b> : Caractéristique d'une cellule photovoltaïque .....   | 35 |

## LISTE DES FIGURES

|   |    |
|---|----|
| <b>Fig.II.10</b> : Schéma électrique d'une cellule solaire.....   | 36 |
| <b>Fig.II.11</b> :  |    |
| a) Illustration d'encapsulation des cellules photovoltaïques.....   | 39 |
| b) Module photovoltaïque de 36 cellules.....  | 39 |
| c) vue en coupe d'un module photovoltaïque.....   | 39 |
| <b>Fig.III.1</b> : Interface de travail du logiciel SCAPS .....   | 41 |
| <b>Fig.III.2</b> : Schéma d'une cellule solaire a-SiH PIN.....  | 42 |
| <b>Fig.III.3</b> : Evolution de $J_{sc}$ , $V_{oc}$ et le rendement en fonction de la température.....                  | 44 |
| <b>Fig.III.4</b> : Variation de $J_{sc}$ , $V_{oc}$ et du rendement en fonction de l'épaisseur de l'émetteur.....       | 46 |
| <b>Fig.III.5</b> : Variation de $J_{sc}$ , $V_{oc}$ et le rendement en fonction de l'épaisseur de la couche tampon..... | 47 |
| <b>Fig.III.6</b> : Variation de $J_{sc}$ , $V_{oc}$ et le rendement en fonction du dopage de l'émetteur.....            | 49 |
| <b>Fig.III.7</b> : Structures des deux cellules : 1) a-Si:H/ c-Si:H/a-Si:H ; 2) c-Si:H/a-Si:H/c-Si:H.....               | 50 |

## LISTE DES TABLEAUX

|  |    |
|--|----|
| <b>Tab.III.1</b> : Paramètre du silicium.....  | 43 |
| <b>Tab.III.2</b> : Paramètres physique standard de la cellule.....   | 43 |
| <b>Tab.III.3</b> : Les paramètres de sortie de la cellule de l'effet de la température.....                                  | 44 |
| <b>Tab.III.4</b> : Les paramètres de sortie de la cellule pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche émetteur..... | 45 |
| <b>Tab.III.5</b> : Les paramètres de sortie de la cellule de l'effet de l'épaisseur de la couche tampon (intrinsèque).....   | 47 |
| <b>Tab.III.6</b> : Les paramètres de sortie de la cellule de l'effet de l'épaisseur de la couche de base (n).....            | 48 |
| <b>Tab.III.7</b> : Les paramètres de sortie de la cellule en fonction du dopage de la couche P.....                          | 49 |
| <b>Tab.III.8</b> : Les paramètres de sortie de la cellule de l'effet du dopage Nd du collecteur.....                         | 50 |

# **Introduction Générale**

## Introduction générale

Malgré, l'amélioration des filières des cellules solaires existantes et la création de nouvelles technologies, dans le but d'améliorer l'exploitation de l'énergie solaire, le coût de production des cellules reste encore élevé. Pour cela, plusieurs études et travaux de recherche ont été menés, dans le but de rendre la fabrication, des cellules solaires, plus rentable. Parmi les techniques de fabrication existantes, l'impression des cellules solaires en couches minces « Thin Film » constitue un procédé intéressant. De plus, l'utilisation des cellules solaires, comme des convertisseurs d'énergie, implique l'optimisation de l'exploitation de cette nouvelle source d'énergie. Aussi, Du fait que l'énergie solaire constitue un type d'énergie propre et n'émettant pas de gaz à effet de serre, la branche photovoltaïque mérite d'être mise en contribution.

Aussi, les nombreuses études effectuées dans ce cadre, rassurent que le fonctionnement des cellules solaires dépend fortement de plusieurs paramètres architecturaux, liés à la technologie exploitée dans l'élaboration du dispositif photovoltaïque (matériaux, structure, etc.), et des paramètres environnementaux liés aux conditions de fonctionnement tels que l'éclairage, la température, etc. Donc, l'étude de l'influence de ces différents paramètres, sur le fonctionnement des cellules solaires, peut s'effectuer à travers la connaissance de l'effet de chaque paramètre, à part, sur la caractéristique  $I-V$  de la cellule. C'est dans ce cadre se situe l'objectif de ce mémoire. Pour une bonne organisation de ce mémoire, nous avons adopté le plan de travail ci-après :

Un premier chapitre au cours duquel nous rappelons les généralités liées à la source fondamentale de l'énergie photovoltaïque à savoir le soleil, son pouvoir énergétique et ainsi que les propriétés de son rayonnement et les techniques d'exploitation de l'énergie solaire. Par la suite nous décrivons l'élément de conversion photovoltaïque qui est la cellule solaire, tout en discutant sa structure et son principe de fonctionnement. Une description de la physique des semi-conducteurs et des types de dopage utilisés, sera de même présentée dans ce chapitre. Un deuxième chapitre où la physique et les filières des cellules photovoltaïques seront traités. Pour cela nous commençons par la discussion des différentes filières de cellules solaires en illustrant leurs architectures. Nous abordons par la suite, les Caractéristiques physiques et électriques des cellules solaires.

Un troisième chapitre consacré à la présentation et la discussion des résultats obtenus. On note que le logiciel exploité dans cette étude est le SCAPS. Ce dernier est utilisé pour l'analyse des caractéristiques électriques de trois structures différentes de cellules solaires en couches minces. Cette analyse est faite sous l'effet de la variation de certains paramètres physiques et géométriques.

A la fin de ce mémoire une conclusion générale sur le travail réalisé, ainsi que certaines perspectives utiles pour les futurs travaux seront énoncées.

# **Chapitre I**

## **Généralités sur le photovoltaïque**

## **I.1 Introduction :**

L'énergie solaire est l'énergie la plus répandue et la plus répartie dans le monde. En une année, l'humanité entière consomme 10 milliards de Tonnes équivalent pétrole (Tep). En revanche, la quantité d'énergie libérée par le soleil (captée par la planète terre) pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an. [29]

Deux grandes familles d'utilisation de l'énergie solaire à cycle court se distinguent :

- L'énergie solaire thermique : basée sur l'utilisation de la chaleur transmise par rayonnement,
- L'énergie photovoltaïque : s'appuie sur l'utilisation du rayonnement lui-même pour produire de l'énergie électrique.

L'utilisation des cellules photovoltaïque pour la conversion de l'énergie solaire en électricité constitue une voie prometteuse pour exploiter cette source d'énergie durable. Aussi, Les applications photovoltaïques requièrent des présentations spécifiques des caractéristiques du rayonnement. Ces caractéristiques peuvent être différentes selon le niveau de détail des études envisagées, mais aussi selon le système protégé par exemple autonome ou relié au réseau [2].

Dans ce chapitre un aperçu sur l'histoire de l'énergie photovoltaïque, le principe de conversion, le groupement des cellules solaires (parallèles, série ou mixte) sera fourni dans ce chapitre. Les caractéristiques électriques des cellules photovoltaïques tels que le rendement, le facteur de forme, etc., seront aussi discutées.

## **I.2 Pourquoi l'énergie solaire ?**

L'énergie solaire est une source d'énergie liée directement au rayonnement du soleil (figure 1.1). Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires.

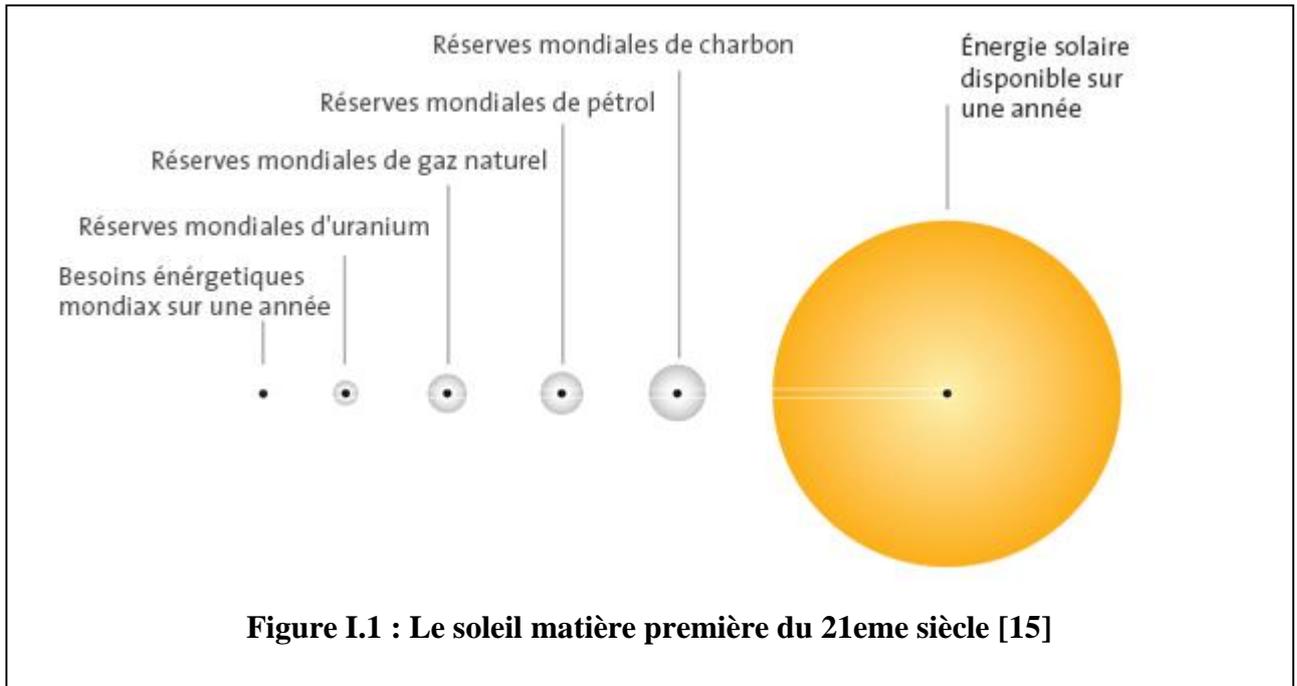


Figure I.1 : Le soleil matière première du 21eme siècle [15]

## I.2.1 Le soleil

Le soleil est une source d'énergie abondante, gratuite et exempte d'émission, il est principalement composé de gaz consistant en 70% d'hydrogène et 28% d'hélium, les 2 % restants représentant la plupart des autres atomes présents dans l'univers. La fusion thermonucléaire dans son centre libère une énergie énorme sous forme de rayonnements. Son diamètre est de 1 391 000 km et se trouve à une distance de 150 000 000 km de la terre [3].

Quant à son volume, il est l'équivalent de 1 300 000 fois le volume de la terre avec une densité de 1,41 contre 5,50 pour la terre, sa masse est de 330 000 fois la masse de la terre soit 2 milliards de tonnes. Il représente 99,867% de la masse totale du système solaire, c'est-à-dire que l'ensemble de toutes les planètes et comètes ne représente presque que le millième du soleil [2].

## **I.2.2 Le rayonnement solaire**

La matière première dans la production de l'énergie photovoltaïque est le rayonnement électromagnétique. Ce dernier comporte notamment les rayons cosmiques, gamma, X, la lumière visible, l'infrarouge, les micro-ondes ainsi que les ondes radios qui dépendent des fréquence d'émission. Tous ces types de rayonnement électromagnétique véhiculent de l'énergie. Le niveau d'irradiance (le flux énergétique) mesuré à la surface de la Terre dépend de la longueur d'onde du rayonnement solaire [30].

## **I.2.3 L'exploitation de l'énergie solaire**

Aujourd'hui le procédé de transformation de l'énergie solaire se divise en trois branches :

### **I.2.3.1 L'énergie thermique [18]**

Ce type d'énergie est basé sur l'exploitation de la chaleur du rayonnement solaire en :

- Usage direct : chauffe-eau et chauffages solaires, cuisinières et sécheuses solaires.
- Usage indirect : la chaleur servant pour un autre usage : rafraîchissement solaire, dessalement, etc.

Donc l'échauffement reste la principale utilisation de l'énergie thermique solaire. Cet échauffement est basé sur l'exploitation de capteurs thermiques. Le principe de base de ces capteur est basé sur l'absorption des photons solaires et de les transformer en chaleur. Celle-ci est ensuite transmise à un liquide ou à un gaz qui la transporte (le gaz est alors dit « caloporteur ») vers un réservoir de stockage de chaleur.

### **I.2.3.2 L'énergie thermodynamique [19]**

En plus de l'échauffement l'énergie thermique solaire permet également la production de l'électricité par voie thermodynamique. Le principe est similaire à celui d'une centrale électrique classique : la production de vapeur ou de gaz à haute pression est turbinée pour être ensuite transformée en électricité. On note que le processus de production de l'électricité nécessite des températures importantes allant de 250°C à plus de 1 000°C.

## Chapitre I \_\_\_\_\_ Généralités sur l'effet photovoltaïque

Ces températures peuvent être atteintes en utilisant des miroirs qui concentrent la lumière solaire vers un fluide caloporteur, afin de stocker une partie de l'énergie sous forme de chaleur. Ce stockage permet de diminuer les conséquences de l'intermittence de la ressource solaire en permettant, par exemple, de continuer à produire de l'électricité après le coucher du soleil.

### I.2.3.3 L'énergie photovoltaïque

L'énergie solaire ou photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire par une cellule photovoltaïque. Ces dernières sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs tel que le silicium.

### I.3 Histoire du photovoltaïque

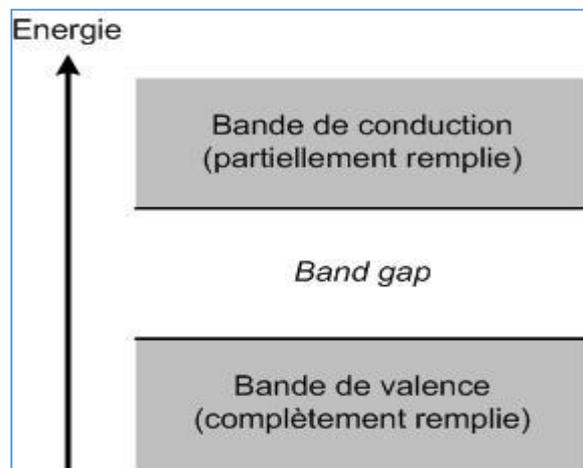
L'effet photovoltaïque a été découvert par Alexandre-Edmund Becquerel en 1839 quand il a observé que l'action de la lumière sur une électrode en platine enduite argentée immergée dans l'électrolyte a produit un courant électrique [9]. Trente-huit ans plus tard, W. J. Adams et R. E. Day ont observé un effet similaire en éclairant un échantillon solide en silicium. En 1954, des chercheurs des laboratoires « Bell Telephone Laboratories » ont fabriqué la première cellule solaire à base de silicium monocristallin, ayant un rendement de conversion en puissance de 6%. Le développement de programmes spatiaux a ensuite entraîné une demande de cellule solaire à base de semi-conducteurs tels que le silicium, qui sont rapidement devenus une source incontournable pour l'alimentation des satellites [2].

En 1970, et suite aux crises pétrolières successives, les industriels ont porté beaucoup d'intérêt aux systèmes photovoltaïques pour les applications terrestres. Actuellement, les rendements ont atteint plus de 32% en laboratoire et entre 8 et 16 % pour les cellules du commerce [2]. Différents matériaux ont été utilisés pour fabriquer ces cellules mais le silicium cristallin occupe la plus grande part avec 87,6% du marché mondial suivi par le silicium à morphe avec 8,3%. [2]

## I.4 La cellule photovoltaïque

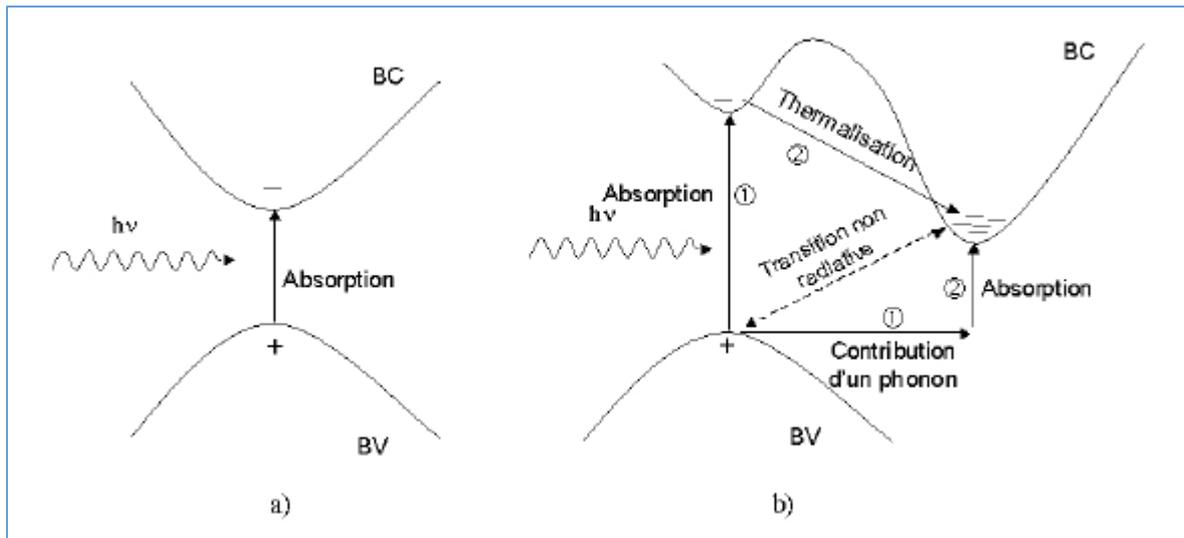
### I.4.1 Interaction photon/semi-conducteur [4]

L'écart entre les bandes de valence et de conduction, ou gap, représente une caractéristique fondamentale des semi-conducteurs (figure I.2). Les figure I.3.a et 1.3.b présente les différentes transitions possibles selon la nature du gap. Quand le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence coïncident dans l'espace des K, il s'agit d'un gap direct.



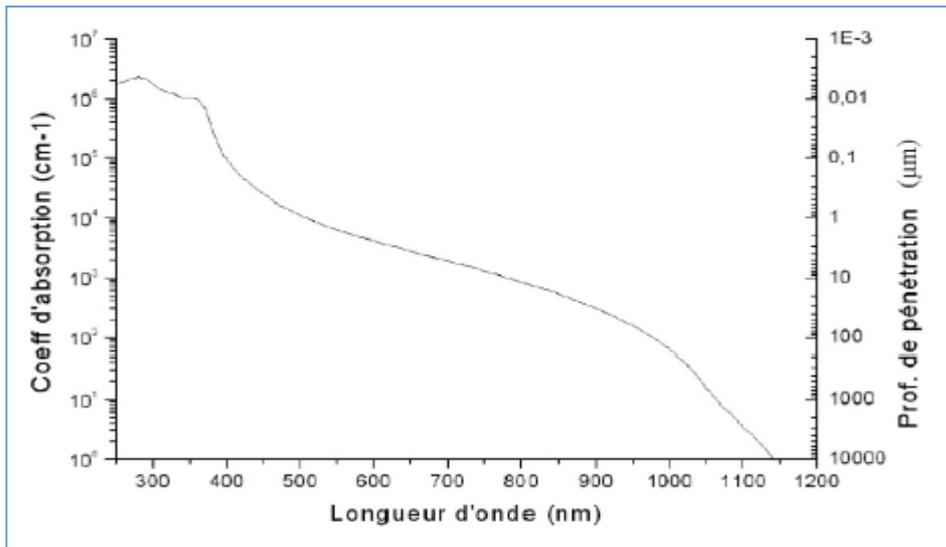
**Figure I.2 : représentation des niveaux d'énergie dans un semi-conducteur [20]**

Les transitions inter-bandes s'effectuent verticalement, et sont donc radiatives (Figure I.3.a). Ceci illustre le fonctionnement des semi-conducteurs binaires. Dans le cas du silicium, le gap est indirect : les transitions électroniques entre les extrema des bandes sont obliques, donc non radiatives puisqu'elles impliquent un changement du vecteur d'onde de l'électron. Les électrons du sommet de la bande de valence peuvent toutefois être directement excités vers le minimum relatif central de la bande de conduction grâce à un photon de plus grande énergie. Pour que la transition s'effectue dans le gap indirect, il faut qu'un photon de plus soit au préalable absorbé (ou émis) par l'électron, afin que le vecteur d'onde de ce dernier corresponde au maximum de la bande de valence, pour absorber un photon (figure I.3.b).



**Figure I.3 : Transitions inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur.**  
**a) semi-conducteur à gap direct, b) Semi-conducteur à un gap indirect [4].**

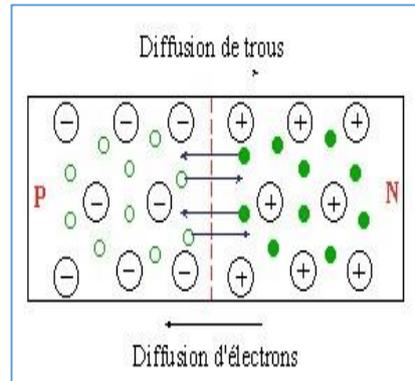
Dans le domaine photovoltaïque, l'interaction photon-semi-conducteur se traduit par un paramètre important caractérisant le semi-conducteur utilisé qui est le coefficient d'absorption. Ce dernier traduit le nombre de photons absorbés par unité d'épaisseur du matériau en fonction de leur longueur d'onde. La figure I.4 nous donne celui du silicium. Il est clair que pour des longueurs d'ondes inférieures à 365 nm, la majorité des photons incidents est absorbée et les transitions directes ne sont plus possibles pour des longueurs d'ondes plus grandes. Donc, pour qu'un électron déplace de la bande de valence vers la bande de conduction il faut alors qu'un photon (au moins) vienne de l'assister en lui cédant son énergie. L'augmentation de la longueur d'onde des photons entraîne donc une diminution du coefficient d'absorption. Lorsque l'énergie du photon devient inférieure à celle du gap du matériau la transition n'est plus possible et le photon ne sera pas absorbé.



**Figure I.4 : Coefficient d'absorption du silicium et profondeur de pénétration des photons en fonction de la longueur d'onde [4].**

## I.4.2 Principe de fonctionnement [11]

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique sous forme d'une plaque mince en semi-conducteur, souvent le silicium dopé (jonction p-n). Le matériau semi-conducteur comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit d'électrons. En absence d'excitation, les charges en excès se diffusent à travers la jonction pour maintenir l'équilibre thermodynamique (voir figure 1.5). Le dopage des cristaux de silicium consiste à leur ajouter d'autres atomes pour améliorer la conductivité du matériau. Les panneaux solaires sont constitués de plusieurs modules. Un module regroupe plusieurs cellules photovoltaïques entre elles, il est composé généralement de 36 cellules solaires c'est le cœur même du système photovoltaïque [21].

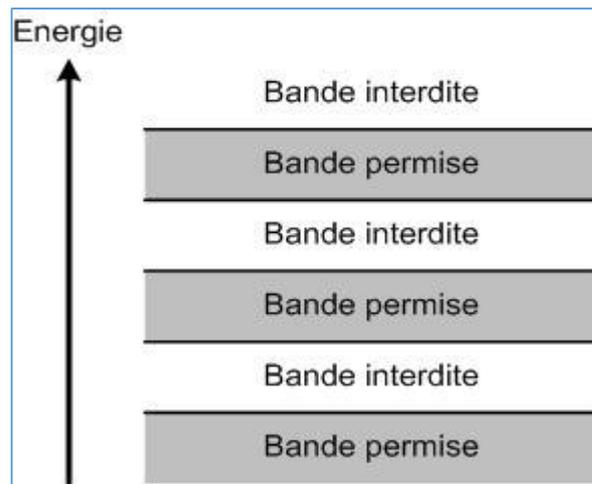


**Figure I.5 : Représentation de la diffusion des porteurs de charges dans une jonction PN**  
[11]

Pour le principe de fonctionnement d'une cellule solaire est assez simple. Lorsqu'une cellule est exposée au rayonnement électromagnétique solaire, les photons de la lumière transmettent leur énergie aux atomes de la jonction. Cette énergie permet de libérer des électrons (charges N) et de libérer des trous (charges P). Ces charges sont alors maintenues séparées par un champ électrique qui constitue une barrière de potentiel. Une fois les charges P et N isolées, il suffit de fermer le circuit entre ces deux zones pour mettre en mouvement les électrons et créer ainsi un courant électrique [17].

### **I.4.3 Description du semi-conducteur**

Les matériaux semi-conducteurs sont des corps dont la résistivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants [10]. Dans un solide l'énergie des électrons peuvent prendre toute valeur à l'intérieur d'un intervalle dépendant de la structure du matériau. Il s'agit des bandes d'énergie. A l'inverse, il ne peut y avoir d'électrons dont l'énergie appartient aux bandes interdites (voir figure ci-dessous).



**Figure I.6 : Structure de la bande d'énergie [20]**

A 0°C deux principaux niveaux d'énergie peuvent se distinguer pour un semi-conducteur :

- La bande de valence : C'est la dernière bande d'énergie complètement remplie d'électrons. Les électrons appartenant à la bande de valence permettent la cohésion locale d'un solide ou d'un matériau : ils interagissent avec les atomes voisins pour rendre la structure stable.
- La bande de conduction : est la bande d'énergie supérieure, de la bande de valence, partiellement remplie. Les électrons de la bande de conduction sont eux dit délocalisés : ils peuvent se déplacer au sein du matériau, d'atome en atome, pour participer à la conduction électrique.

L'énergie qui sépare ces deux bandes est appelée gap, ou bande interdite. Selon l'état du semi-conducteur on distingue :

### **I.4.3.1 Semi-conducteur intrinsèque [20]**

Un semi-conducteur est dit intrinsèque lorsqu'il ne contient aucune impureté c'est-à-dire matériau pur (non-dopé). Dans ce cas les électrons situés sur la couche la plus éloignée du noyau, qui participent aux liaisons covalentes peuvent, sous l'effet de l'agitation thermique, devenir porteur de charge. De plus, L'agitation thermique suffit à fournir l'énergie nécessaire au passage d'un électron de la bande de valence à la bande de conduction. A 0 K, le matériau est isolant.

## I.4.3.2 Semi-conducteur extrinsèque [20]

Afin d'améliorer la conductivité d'un semi-conducteur un procédé de dopage est toujours utile. Ce procédé consiste à introduire des impuretés étrangères dans le semi-conducteur. Dans un semi-conducteur dopé, l'énergie lumineuse des rayons solaires est transformée en électricité par le biais de la production et du transport de charges électrique (électrons / trous). Suivant le type des impuretés introduites dans le semi-conducteur, deux types de dopage se distinguent :

### a) Dopage de type N

La couche supérieure de la cellule est composée de silicium dopé par un élément de valence supérieure dans la classification périodique, c'est à dire qui possède plus d'électrons sur sa dernière couche de valence que le silicium [14]. Puisque le silicium possède 04 électrons sur sa couche périphérique, donc les atomes qui peuvent assurer un dopage de type N sont ceux de la colonne de l'oxygène, comme le Phosphore P (voir figure 1.7).

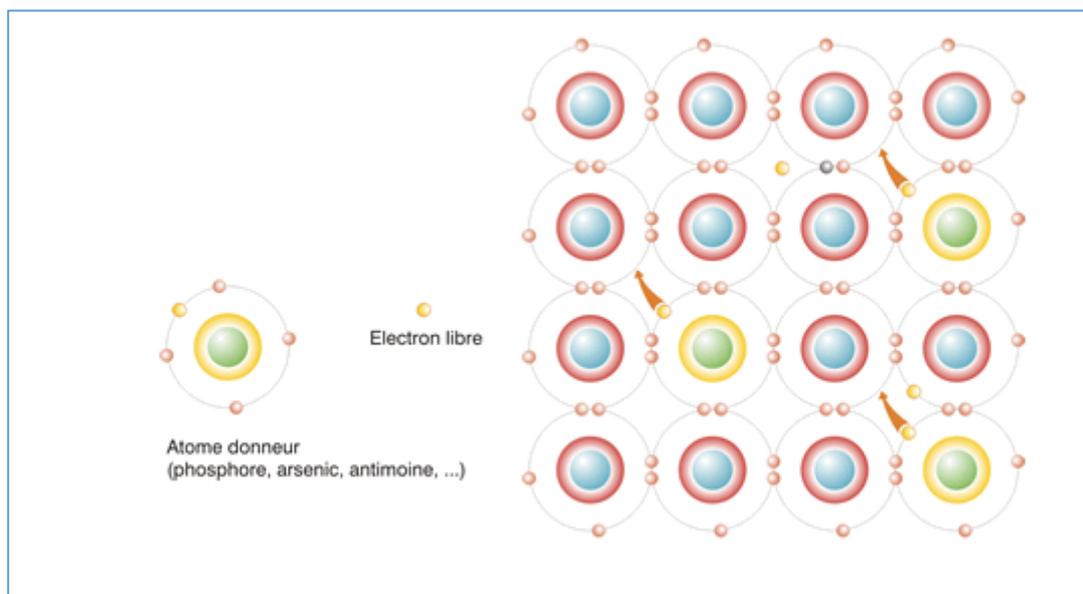


Figure I.7 : Représentation d'un semi-conducteur de type N [16]

## I.6.2.2 Dopage de type P

La couche inférieure de la cellule est composée de silicium dopé par un élément de valence inférieure au silicium. Il peut s'agir de Bore B [14]. Cette couche possédera donc en moyenne une quantité d'électrons inférieure une couche de silicium pur.

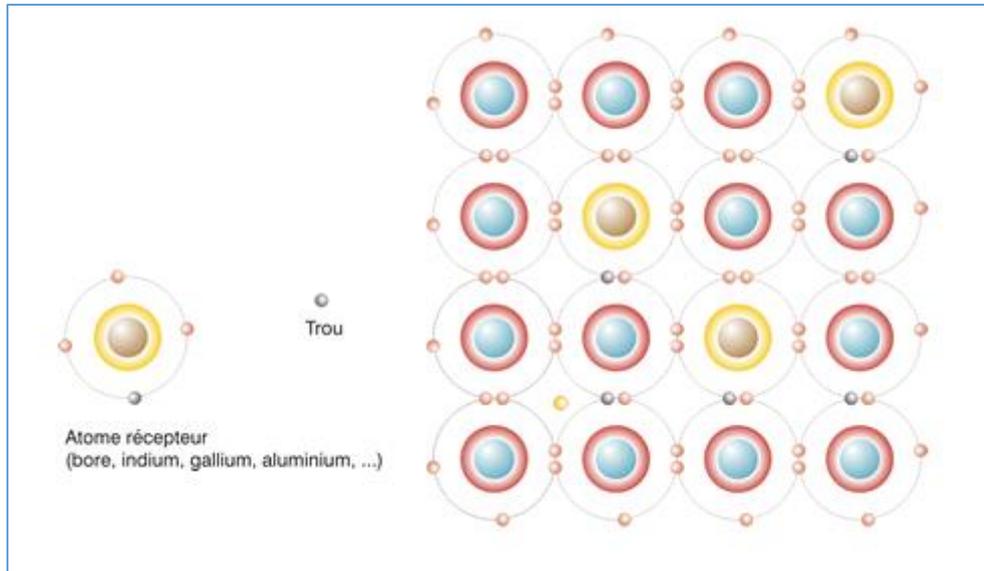


Figure I.8 : Représentation d'un semi-conducteur de type P [16]

# **Chapitre II**

## **Physique de la cellule photovoltaïque**

### II.1 Introduction

Les photopiles ou cellules solaires sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité. Elles sont réalisées à base de matériaux semi-conducteurs [1], Aujourd'hui, plus de 99 % des équipements photovoltaïques utilisent le silicium comme matériau de base. Ce dernier se présente sous différentes formes, les plus répandues étant le silicium cristallin (monocristallin, multi cristallin), et le silicium amorphe [5].

Les alliages ternaires des composés semi-conducteurs III-V, sont considérés comme une classe importante des matériaux et cela grâce à l'ajustement de leur paramètre du réseau, gap énergétique, indice de réfraction, constantes optiques et d'autres paramètres physiques qui peuvent être ajustés et contrôlés pour l'obtention d'un composant optoélectronique bien désiré [6].

Le gap énergétique, les constantes optiques et diélectriques sont des paramètres importants et jouent un rôle important en physique [6]. Une connaissance précise de la structure de bandes du matériau étudié est nécessaire pour l'évaluation de son domaine d'application, les transitions directes et indirectes en fonction de la composition sont particulièrement d'une importance principale pour l'étude et la fabrication des cellules solaires.

Dans ce chapitre nous abordons la physique des cellules photovoltaïque, nous allons faire une bref aperçu sur les différents types de cellules photovoltaïques, selon la qualité du silicium, nous rappelons les performances. Nous parlons ensuite d'une des nouvelles générations de cellules solaires, qui utilise de nouveaux matériaux de type organique. En suite la large filière des cellules PV dites couche mince (« Thin-Film ») qui constitue ce que certains appellent les cellules de seconde génération car elles font historiquement suite aux cellules en silicium cristallin. Nous abordons enfin le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque, la caractéristique  $I(V)$  passant par l'architecture de ces cellules et les paramètres photovoltaïques extraits de la caractéristique I-V permettant d'évaluer les performances et le comportement électriques de la cellule.

### II.2 Types des cellules photovoltaïques

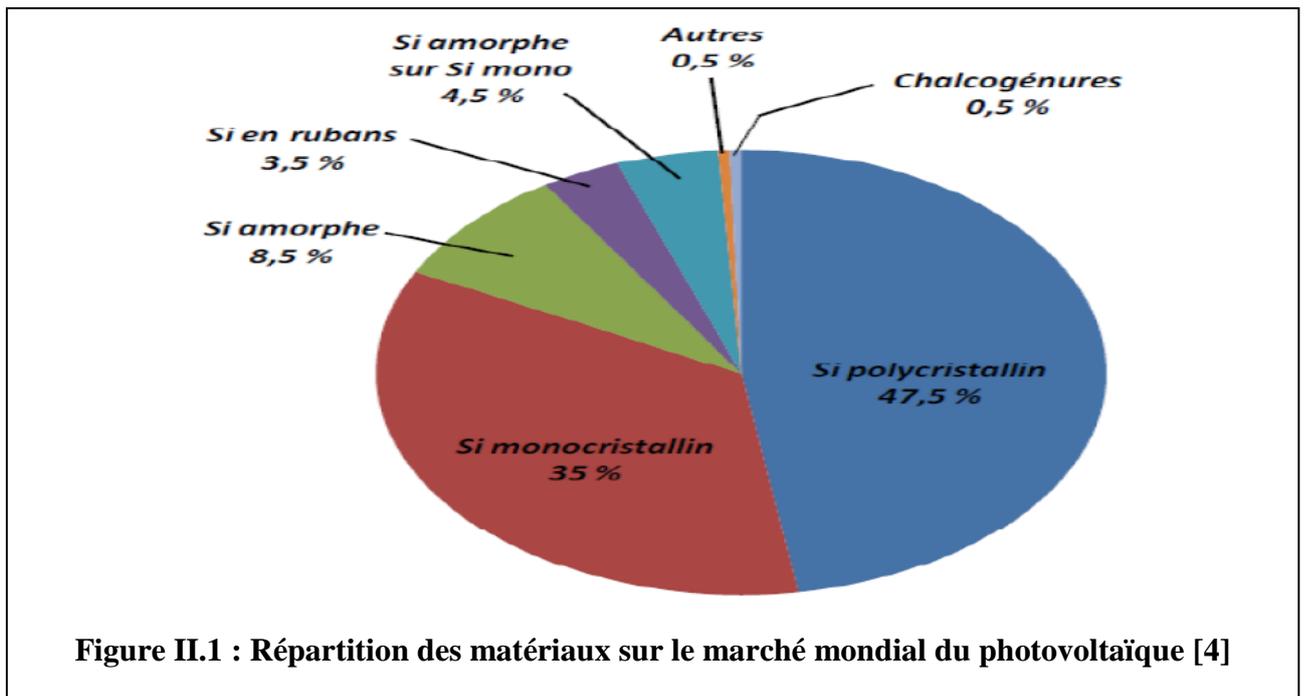
Il existe plusieurs types de cellules photovoltaïques ayant chacune leurs caractéristiques. Mais, toutes ont une fonction unique : capter les calories du soleil et produire du courant électrique. Selon la nature des matériaux utilisés on distingue deux grandes classes : les cellules photovoltaïques inorganiques et les cellules photovoltaïques organiques [4] :

#### II.2.1 Les cellules photovoltaïques inorganiques

Les cellules photovoltaïques inorganiques souvent dites au silicium, représentent 99% des ventes mondiales de panneaux solaires. La technologie de cette filière est la plus avancée. Pour preuve, la faible différence entre le rendement théorique de 27 % et pratique de 20,8 % (à partir des modules de laboratoire d'un pied carré). Ainsi Un meilleur rendement des modules commerciaux de grande taille ( $1m^2$ ), est de 15,3 %. Selon la technologie exploitée plusieurs filières se distinguent :

##### II.2.1.1 La filière silicium

Comme déjà citée la filière silicium représente actuellement 99% du marché des modules photovoltaïques comme le montre la Figure II.14 [12]. Il est l'un des éléments les plus parfaitement stable et non toxique. On trouve plusieurs technologies pour le photovoltaïque silicium détaillées ci-après ; d'une part les cellules à base de silicium massif (monocristallin, poly-cristallin, rubans,...) dites de « première génération » et qui constituent à l'heure actuelle l'essentiel des modules photovoltaïques commercialisés et d'autre part la technologie à base de silicium en couche mince [4].



### a. Cellules au silicium monocristallin [3]

Il existe deux méthodes par lesquelles il est possible d'obtenir du silicium monocristallin de qualité microélectronique. L'inconvénient de ces méthodes est qu'elles nécessitent une dépense d'énergie considérable proche du MWh. Les substrats du silicium obtenus sont appelés Cz (lié à la méthode de Czochralski) et Fz (« Float Zone »). Ces substrats permettent d'obtenir des rendements de conversion record en laboratoire de l'ordre de 25 % pour des cellules de 4 cm<sup>2</sup>. Les inconvénients de cette technologie sont les rendements faibles obtenus sous un faible éclairage et surtout le coût prohibitif de production des matériaux.

### b. Cellules au silicium poly-cristallin

Leur meilleur rapport qualité/prix rend la technologie poly-cristallin la plus représentée sur le marché du photovoltaïque car elle allie à la fois des rendements de conversion élevés avec un coût de production faible par rapport à la filière silicium monocristallin. Afin de limiter les effets néfastes au court de la croissance le silicium poly-cristallin est produit par des techniques de croissance qui assurent la formation de gros cristaux multi-cristallins.

Cependant, le matériau multi-cristallin est d'une part contraint et disloqué, et d'autre part contaminé par des impuretés résiduelles de la matière première de silicium. Cette dernière est en partie constituée par des déchets de l'industrie de la microélectronique, c'est-à-dire le silicium monocristallin Cz ou FZ. Les rendements de conversion industriels, qui étaient de l'ordre de 8 à 10% avant 1980, sont actuellement de 16 à 17 % pour des grandes plaquettes de 200  $m^2$ [13]. Aussi, comme pour les cellules monocristallines, le rendement de ce type de cellules est limité sous un faible éclairement.

### c. Silicium cristallin en ruban

Les techniques de production de silicium cristallin en rubans autosupportés ont été très attractives sur le plan technologique. La plus connue est basée sur l'effet de capillarité entre deux couches de carbone (Figure II.2). Ces rubans ont connu de nombreux développements au niveau de la recherche et, pour certains d'entre eux, jusqu'à la conception de chaînes de production pré industrielles. Cependant, la vitesse de croissance linéaire extrêmement lente (quelques cm/min) pousse les industriels à abandonner progressivement cette technologie. Les meilleurs rendements obtenus sont néanmoins de l'ordre de 15 % [3].

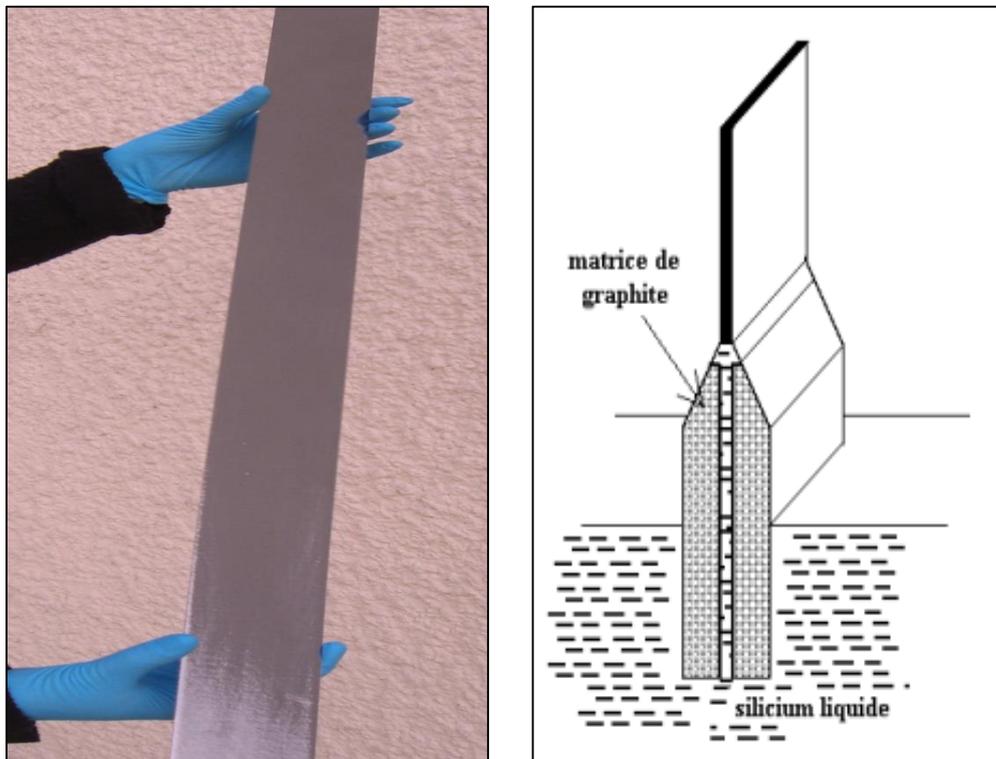


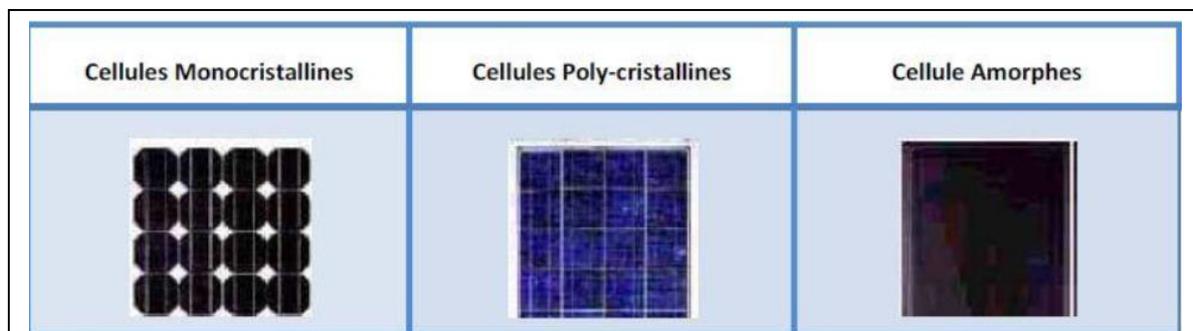
Figure II.2 : Tirage d'un Silicium cristallin en ruban [24,25]

### d. Filière en silicium amorphe

Depuis les années 1970, des recherches intensives ont été entreprises pour utiliser du silicium amorphe. Ce sont les cellules des calculatrices ou des montres dites « solaires ». Le silicium amorphe présente plusieurs avantages, en particulier son fonctionnement possible en intérieur sous faible éclairage contrairement Au silicium cristallin, son fort coefficient d'absorption, sa faible consommation énergétique durant le cycle de production et son aptitude à être déposé sur des grandes surfaces (de l'ordre de  $1m^2$ ). Cependant, les cellules photovoltaïques à base de silicium amorphe présentent de faibles rendements (inférieurs à 10 % au niveau industriel) et une diminution assez rapide de leurs performances au cours du temps [13]. L'avenir des couches de silicium amorphe passera probablement, par un mariage avec le silicium cristallin. En effet, les hétéro-structure à base de silicium amorphe/silicium cristallin (structure HIT de Sanyo) présentent des rendements de laboratoire de plus de 21% et de 16% en production industrielle [3].

Un avantage remarquable de ce type des cellules est son aptitude de fonctionner sous faible éclairage. Son inconvénient reste le rendement faible en plein soleil (environ 6%) [4].

La figure ci-dessous montre un comparatif entre quelque filière citée précédemment.



**Figure II.3 : Comparatif des différents types de cellules PV à base de silicium [3]**

#### II.2.1.2 Cellules couches minces

Les cellules PV en couches minces (Thin-film) sont souvent appelés cellules de seconde génération puisqu'elles font historiquement suite aux cellules en silicium cristallin relativement épaisses. L'intérêt de la technologie couches minces vient de la faible quantité de matériaux nécessaire à la fabrication d'une cellule en comparaison avec les cellules classiques. Contrairement aux cellules de première génération, on ne dépose que la quantité de matériau photosensible efficace pour absorber l'essentiel du rayonnement solaire (quelques microns

d'épaisseurs suffisent) [3]. Par ailleurs, on utilise des méthodes de fabrication moins coûteuses des cellules qui permettent une intégration totale. Dans ce contexte les trois technologies émergentes sont aujourd'hui [3] :

- Le silicium amorphe et microcristallin noté TF-Si (Thin-Film Silicons).
- Le semi-conducteur poly-cristallin CdTe (Tellurure de Cadmium).
- L'alliage CuIn, Ga Se<sub>2</sub> (Cuivre-Indium/Gallium-Sélénium) noté dans la littérature CIGS.

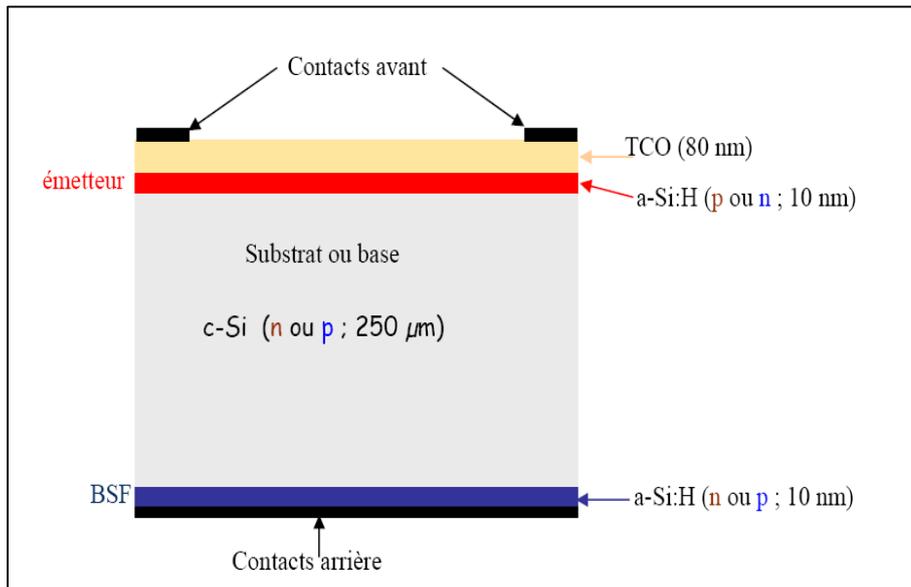
### II.2.1.2.1 Définition des cellules à hétérojonction

Les cellules à hétérojonctions sont des jonctions formées par la juxtaposition de deux matériaux de natures différentes ayant des énergies de bande interdite. Ces cellules sont constituées d'une base en silicium massif (cristallin) avec également des dépôts de couches ultra-minces de silicium amorphe ou polymorphe, afin de former l'émetteur de la cellule en face avant et le champ de surface à l'arrière [22].

L'aspect hétérojonction (due à la différence de gaps des deux semi-conducteurs) confère des propriétés intéressantes grâce à l'existence de discontinuité de bande (discontinuité de bande de valence ( $\Delta E_v$ ) et discontinuité de bande de conduction ( $\Delta E_c$ )).

Lorsque les deux semi-conducteurs, sont mis en contact, il y a transfert des électrons du semi-conducteur à plus fort niveau de Fermi, vers le semi-conducteur à plus faible niveau de Fermi, de manière à réaliser l'alignement des niveaux de Fermi, cet échange se fait au voisinage de la jonction et fait apparaître une charge d'espace à la quelle est associée une barrière de potentiel (la tension de diffusion  $V_d$ ) qui arrête la diffusion des porteurs de charge est définit l'état d'équilibre [23]. L'hétérojonction est de plus en plus utilisée dans l'industrie des semi-conducteurs afin de créer des composants plus performants. On cite quelques avantages de cellules solaires à hétérojonction :

- Procédés d'élaboration à basses températures
- Possibilité de dépôt de grande surface
- Meilleur coefficient de température
- Possibilité d'utiliser des wafers de silicium plus minces.



**Figure II.4 : Structure d'une cellule photovoltaïque silicium à hétérojonctions [23].**

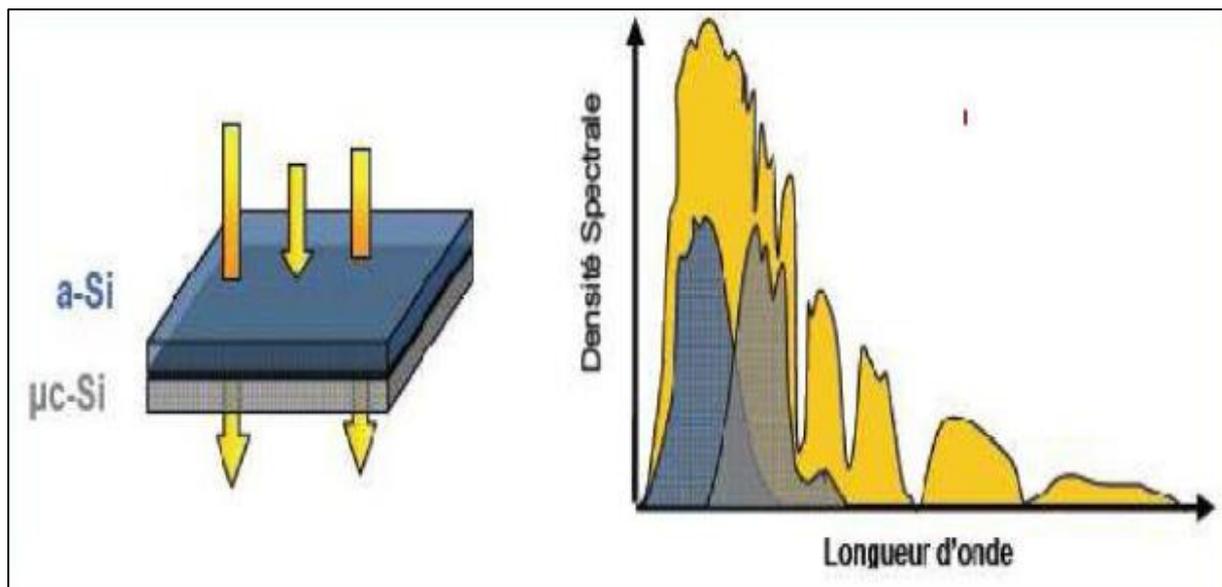
### II.2.1.3 Les filières non silicium en couche mince

Les cellules sans silicium en couche mince sont des cellules solaires dernière génération appelées aussi semi-conducteur CIS. Constituées de films minces pareils à des films de type cuivre-indium-sélénium (CIS) utilisés comme semi-conducteurs. Ces matières premières servant à fabriquer ces cellules solaires sont, pour certaines, plus difficiles à trouver comme c'est le cas de l'indium. Ce type de cellules permet d'avoir de bons rendements et de ne pas dépendre du silicium.

### II.2.1.4 Les multi-jonctions en couche mince

Afin d'améliorer les performances des cellules en couches-minces, des architectures à double et triple jonctions ont été développées. Elles sont inspirées des cellules multi-jonctions développées initialement pour le spatial pour bénéficier au maximum du spectre solaire. Aujourd'hui ces architectures présentent une mise en œuvre plus simple et mieux maîtrisée pour le marché terrestre. Nous pouvons citer par exemple les cellules tandem à base de silicium amorphe et poly-cristallin (a-Si/ $\mu$ c-Si) [20]. Le meilleur rendement enregistré en laboratoire, pour ce type de cellules est de l'ordre de 12%.

L'architecture de ces cellules consiste à empiler deux cellules photovoltaïques permettant l'absorption des photons de longueurs d'onde différentes donc absorber un plus large spectre lumineux et produire ainsi, plus d'énergie qu'une cellule simple jonction. La première couche en silicium amorphe absorbe une partie du spectre alors que l'autre partie, qui la traverse, est absorbée par la seconde couche en silicium microcristallin. Le procédé de fabrication est le même que pour les couches minces, les différentes couches qui composent la cellule sont déposées par plasma(PECVD) sur un substrat de verre.



**Figure II.5 : Cellule Tandem a-Si/μc-Si & spectre solaire et spectres d'absorption [3]**

### II.2.1.5 Les cellules III-V multi jonctions

La filière des dispositifs multi-jonctions, dite de « troisième génération » permet d'accéder aux rendements records dans le domaine de l'énergie photovoltaïque. Cette technologie repose sur l'utilisation de plusieurs matériaux à différentes bandes interdites dont chacune est optimisée pour absorber une partie du spectre solaire. Un rendement maximum a été obtenu avec des structures basées sur des empilements, par épitaxie, de composés III-V. Ces cellules permettent d'atteindre un rendement de 32 % avec un système triple-jonction à base du GaInP/GaAs/Ge sous un spectre standard [4]. Grâce à des concentrateurs de lumière, permettant de décupler la puissance solaire reçue par la cellule, des rendements de plus de 40 % [3] ont même été obtenus avec cette technologie ce qui constitue un record absolu en terme de conversion photovoltaïque.

### II.2.1.6 Les cellules nanocristallines à colorant : Cellules de Grätzel

Inspirée par la photosynthèse, les cellules de Grätzel sont composées d'un électrolyte, d'un colorant et d'un oxyde semi-conducteur inorganique. Le meilleur rendement certifié reporté est de 10,4 % pour une cellule de 1 cm<sup>2</sup> et est à mettre au profit de la société Sharp [12]. Des tests de stabilités montrent que la durée de vie des cellules s'étale à 20 ans en fonctionnement. Ainsi, à cause de fuites possibles de l'électrolyte liquide, celui-ci est remplacé par des électrolytes solides pour lesquels les rendements chutent alors à 6,7 % [3].



Figure II.6 : Les cellules nanocristallines à colorant [26]

### II.2.2 Les cellules photovoltaïques organiques

L'effet photovoltaïque a été observé dans les matériaux organiques depuis plus de 30 ans, les premières cellules présentaient des rendements de conversion en énergie très faibles. Aujourd'hui, le record au niveau industriel est détenu par la firme Konarka avec un rendement qui dépasse les 5 % [12]. L'équipe de **Heeger** a même obtenu un rendement de 6,7 % avec des cellules de type « tandem » [3]. L'intérêt potentiel majeur des cellules solaires organiques réside dans une réduction drastique du coût de l'électricité PV par rapport aux cellules à base de silicium. La cellule photovoltaïque organique repose sur la création d'une hétérojonction à l'interface de deux matériaux respectivement donneur et accepteur d'électrons. Un atout majeur des matériaux actifs organiques réside dans leur possible mise en œuvre par voie humide, ce qui permet de réduire fortement l'empreinte carbone de la fabrication par rapport à la filière silicium.

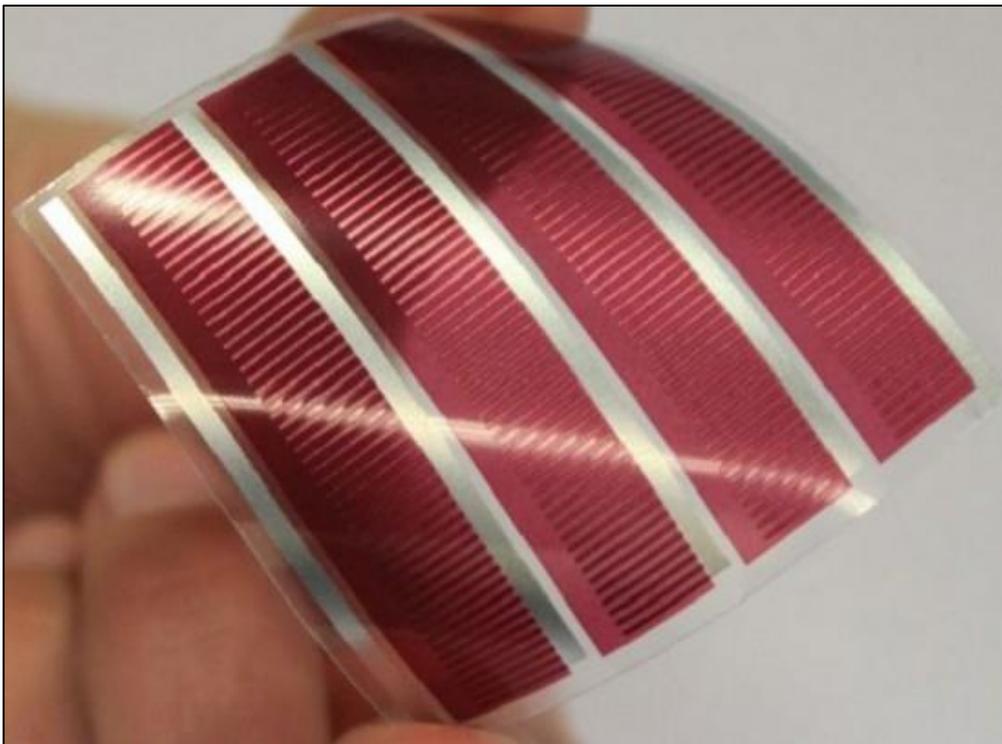


Figure II.7 : Cellule photovoltaïque organique [28]

### II-3-Architecture de la cellule photovoltaïque

Les premières cellules solaires c-Si réalisées dans les années 1950 [6] utilisaient des substrats de type n (dopés Phosphore). À cette époque, leur première application n'était pas terrestre, mais spatiale, pour l'alimentation de satellites.

## Chapitre II \_\_\_\_\_ Physique de la cellule photovoltaïque

Les substrats de type p se révélant plus résistants aux radiations, les cellules PV ont ensuite été développées sur du c-Si dopé Bore. Ces premières cellules étaient seulement constituées d'une jonction diffusée (émetteur) et d'un contact ohmique. Par rapport à ces simples photodiodes, l'architecture des cellules PV a ensuite rapidement évolué, et abouti à une architecture dite « standard » schématisée sur la figure II.3.

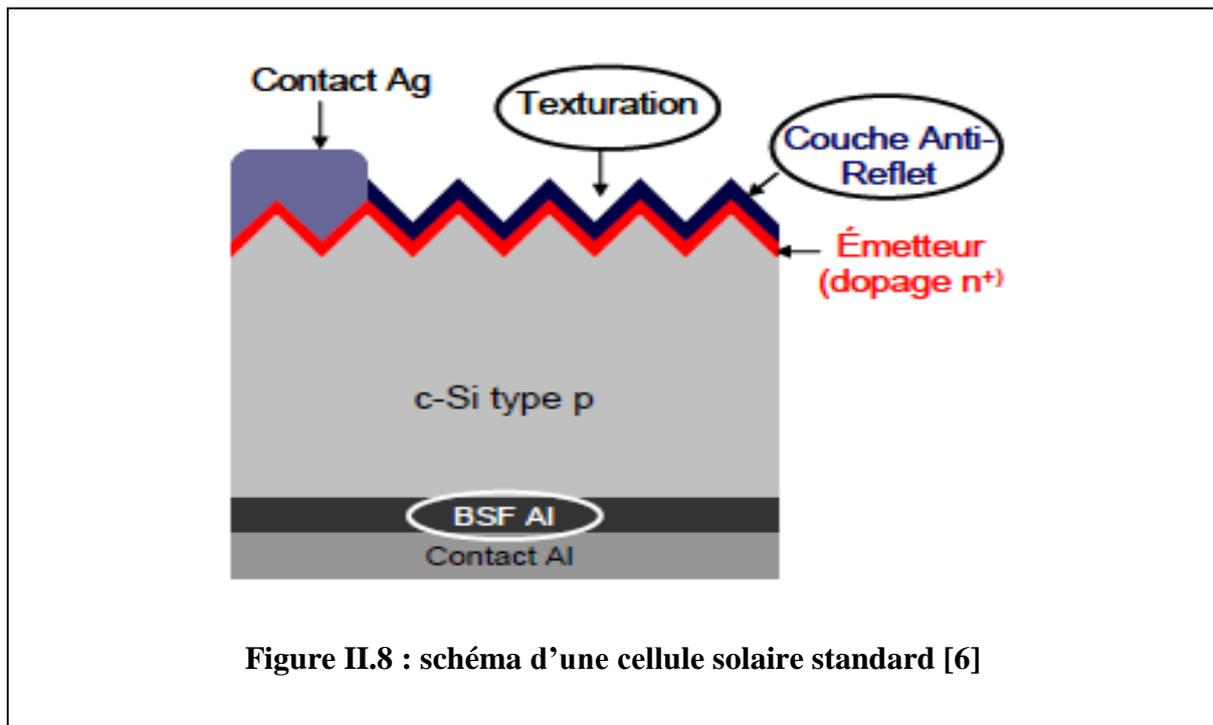


Figure II.8 : schéma d'une cellule solaire standard [6]

A la différence des dispositifs réalisés pour la microélectronique, la totalité du substrat de silicium cristallin est utilisé. Ces substrats (wafers) sont découpés à la scie à fil dans des lingots cristallisés selon différents procédés (CZ, FZ, Block-cast). Une épaisseur de  $80\mu\text{m}$  suffit théoriquement pour que la quasi-totalité des photons soit absorbée [6]. Cependant les techniques actuelles de découpe de wafers ne permettent pas d'atteindre des épaisseurs inférieures à  $100\mu\text{m}$ . De plus, la réduction des épaisseurs fragilise les plaques et augmente le taux de casse tout au long du procédé de fabrication (cellules et modules). Les substrats multicristallins les plus utilisés au niveau industriel ont une forme carrée d'approximativement 15 cm de côté, alors que pour le monocristallin c'est la forme pseudo-carrée de 12.5 cm de côté qui est la plus répandue [20].

## II.4 Caractéristiques physiques des cellules photovoltaïques

### II.4.1 Caractéristique courant/tension et schéma équivalent [4]

La figure II.4 représente les caractéristiques courant-tension d'une cellule photovoltaïque sous obscurité et sous éclairement.

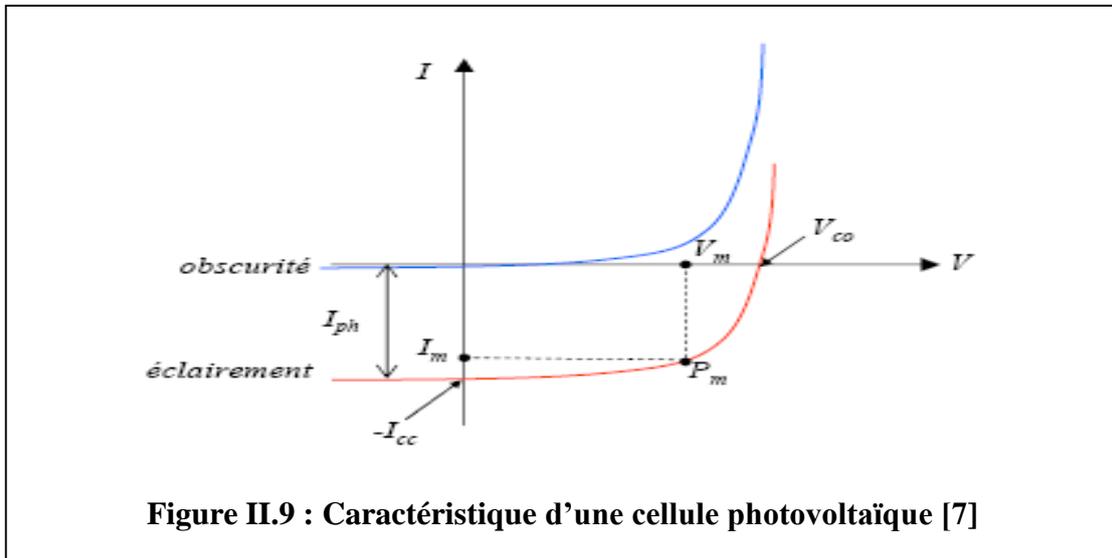


Figure II.9 : Caractéristique d'une cellule photovoltaïque [7]

Pour une cellule solaire sous obscurité et polarisée par une tension  $V$ , la courbe obéit à l'équation de **Shockley** suivante :

$$I_{obs} = I_s \left( \exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.1})$$

Où  $I_{obs}$  est le courants d'obscurité,  $I_s$  est le courant de saturation,  $q$  la charge de l'électron,  $k$  la constante de Boltzmann,  $T$  la température et  $n$  le facteur d'idéalité de la diode qui tient compte des recombinaisons (dans le cas idéal, il est égale à 1). Sous éclairement, les paires électron-trou créées dans le semi-conducteur, sont balayées par le champ électrique interne et produisent un courant  $I_{ph}$ . Le courant  $I_{ph}$  passe dans le circuit extérieur à travers une résistance de charge  $R_{ch}$ , ce qui induit une auto-polarisation  $V$  de la cellule. Dans le modèle le plus simple (modèle linéaire), qui stipule la superposition des courants d'obscurité et d'illumination,  $I$  et  $V$  sont reliés par :

$$I(V) = I_{obs}(V) \quad (\text{II.2})$$

Dans le cas réel, des résistances de contacts dues à la résistivité des électrodes et des interfaces métal-matériaux organiques et des pertes ohmiques ainsi que des courants de fuite (des courants de court-circuit) apparaissent à travers la cellule. Dans la figure II.5 un modèle électrique de la cellule photovoltaïque. On y retrouve le générateur de courant  $I_{ph}$  correspondant au courant photo généré ainsi que les résistances complémentaires,  $R_s$  (résistance série) et  $R_p$  (résistance parallèle), et une diode ( le courant diode représente le courant d'obscurité  $I_{obs}$ ).

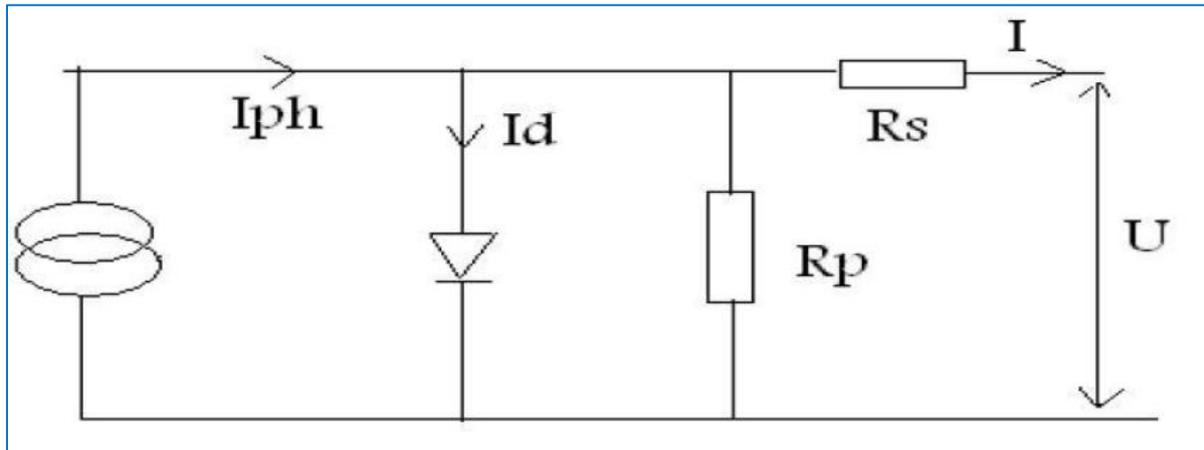


Figure II.10 : Schéma électrique d'une cellule solaire [3]

La résistance série est une résistance liée à la résistivité propre aux contacts entre les différentes régions constitutives de la cellule, à savoir l'émetteur, la base et l'impédance des électrodes. La résistance parallèle  $R_p$  est également connue sous le nom de résistance de court-circuit. Elle traduit l'existence de shunts à travers l'émetteur. Ces résistances donnent dans le cas réel une évaluation des imperfections de la diode.

### II.4.2 Les paramètres électriques des cellules photovoltaïques

Les paramètres des cellules photovoltaïques, extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques. Ces paramètres sont :

### a) Courant de court-circuit $I_{cc}$ :

Le courant de court-circuit est le courant qui circule à travers la jonction sous illumination sans application de tension. Il croît avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

### b) Tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) :

La tension de circuit ouvert est la tension mesurée en absence de courant électrique dans la cellule. Cette tension dépend essentiellement du type de cellule solaire (à jonction PN ou jonction Schottky), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts couche active-électrode. De plus, elle dépend de l'éclairement de la cellule. On peut facilement avoir l'expression de  $V_{co}$  dans le cas d'un courant nul :

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{I_{cc}}{I_s} + 1\right) \quad (\text{II.3})$$

- $I_{cc}$  : courant de court-circuit, courant lorsque  $V = 0$ .
- $I_s$ : courant de saturation

### c) Facteur de forme FF :

On peut définir le facteur de remplissage ou facteur de forme FF par la relation suivante :

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (\text{II.4})$$

- $V_m$ : tension correspondante à la puissance maximale fournie.
- $I_m$ : courant correspondant à la puissance maximale fournie.

On note que le point de fonctionnement est imposé par la résistance de charge et non pas par la cellule elle-même. Un choix judicieux de la résistance de charge permettra donc d'obtenir la puissance maximale, soit  $P_m = I_m \cdot V_m$ .

### d) Le rendement

C'est l'un des paramètres clés caractérisant une cellule solaire. C'est le rendement énergétique externe de conversion de puissance. Il est défini la relation suivante :

$$\eta = \frac{V_m \cdot I_m}{P_{\text{incidente}}} \quad (\text{II.5})$$

Ce rendement peut être optimisé en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. C'est un paramètre essentiel, car la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule.

## II.5 Module photovoltaïque

Dans le but de produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module photovoltaïque. Deux modes d'arrangement des cellules solaires sont envisagés [3] :

- ✚ En série : pour un même courant, cet arrangement permet d'augmenter la tension.
- ✚ En parallèle : ce type de connexion accroît le courant en conservant la même tension.

Le module standard commercialisé, connectant 36 cellules en série pour des applications en 12V, protégées de l'humidité par un capsulage de verre et de plastique. L'ensemble est ensuite muni d'un cadre et d'une boîte de jonction électrique, a généralement une tension à vide supérieure à 20 V et le point optimal de fonctionnement est au voisinage de 16 V à 25°C. Mais la température du module sous rayonnement est souvent supérieure à 40°C, et les performances des cellules sont réduites. On compte en général par cellule une baisse de 2 mV/°C, soit 72 mV/°C par module de 36 cellules. La tension du module tombe alors aux alentours de 14 V ce qui est idéal pour la charge d'une batterie.

### II.5.1 Encapsulation et encadrement [27]

L'encapsulation a pour but de regrouper les cellules en série ou en parallèle afin de permettre leur utilisation à des tensions et des courants pratiques tout en assurant leur isolation électrique et leur protection contre les facteurs extérieurs tels que l'humidité, la pluie, les poussières, la corrosion, les chocs mécaniques. En pratique, l'encapsulation consiste à la mise en sandwich de l'ensemble constitué par les cellules et le matériau encapsulant (EVA) entre deux plaques de verre ou entre une plaque de verre et un ensemble constitué de couches minces de polymère (tedlar, mylar) et d'aluminium (voir figure II.6).

## Chapitre II \_\_\_\_\_ Physique de la cellule photovoltaïque

- **Le verre** : Il s'agit d'un verre trempé de 4 mm d'épaisseur. La face extérieure du verre est recouverte de nano pores qui piègent la lumière incidente et réduisent la réflexion en surface.
- **L'EVA** : L'EVA est une résine transparente enrobant les cellules photovoltaïques.
- **Le Mylar** : est un film polymère transparent utilisé pour isoler électriquement les connexions de sortie de la face arrière des cellules.
- **Le Tedlar** : est un polymère fluoré. Le rôle majeur du tedlar, dans un module photovoltaïque, est la protection de surface. En effet, le TEDLAR résistent particulièrement bien aux agressions extérieures.
- **Cadre en aluminium** : Le cadre en aluminium se justifie par la haute résistance de celui-ci à l'humidité ainsi qu'aux chocs mécaniques.

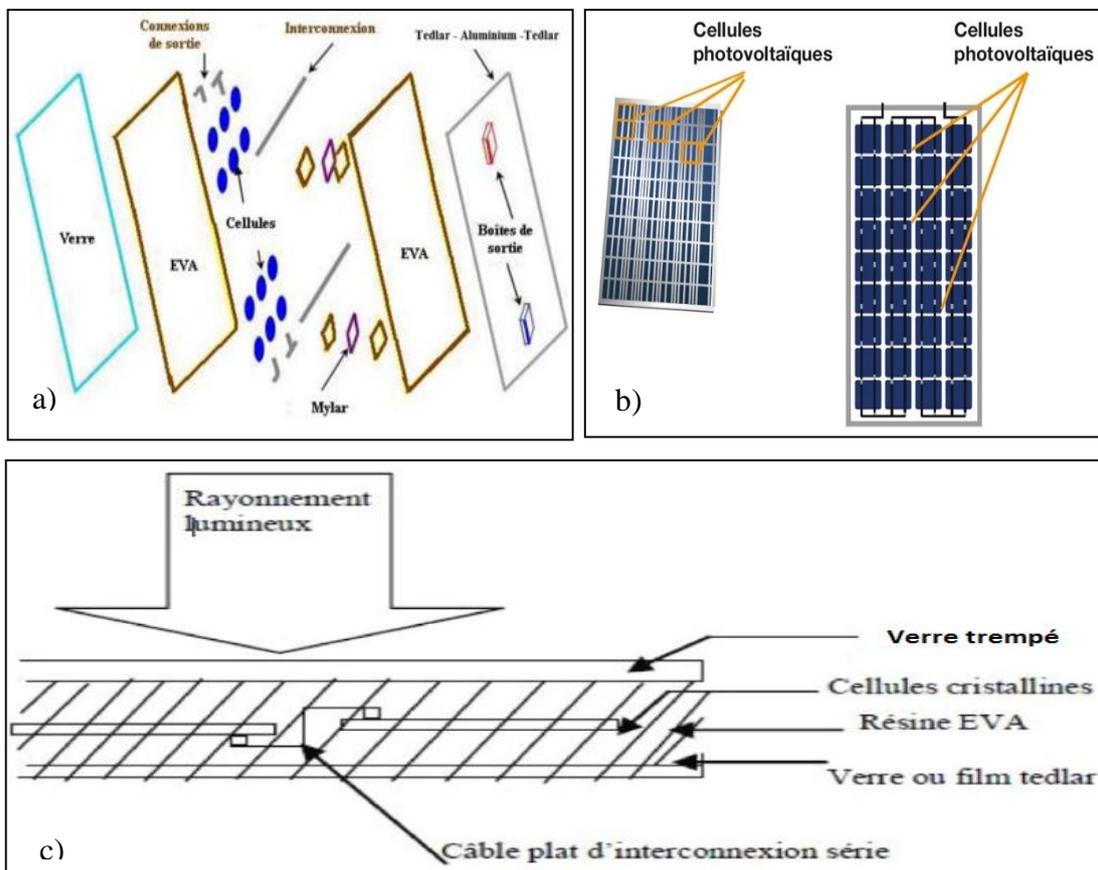


Figure II.11 :

a) Illustration d'encapsulation des cellules photovoltaïques [27]

b) Module photovoltaïque de 36 cellules [27]

c) vue en coupe d'un module photovoltaïque [3]

# **Chapitre III**

## **Résultats & Discussions**

## II.1 Introduction

Durant les dernières années, à cause des coûts élevés de l'expérimentation (techniques de fabrication des cellules), les chercheurs se sont orientés vers la simulation. Il existe principalement quatre types de simulateurs, nous citons à titre d'exemple les simulateurs fonctionnels ou logiques, les simulateurs électrique ou analogiques, les simulateurs technologiques et ceux de composant ou composant ou dispositifs comme : AFORS-HET, PC1D, SILVACO et SCAPS. Dans notre travail nous somme servi du dernier logiciel (SCAPS) pour effectuer cette étude.

A travers ce chapitre nous allons présenter les résultats, de la simulation numérique, des caractéristiques électriques de trois structures différentes, de cellules solaires en couches minces TF-Si (amorphe et cristallin). Pour chacune des structures simulée, nous avons effectué des analyses de l'effet de la température, de l'épaisseur ainsi que l'effet du dopage des deux contacts de la cellule (Emetteur et Collecteur), sur les différentes caractéristiques de sortie de la CPV qui sont, la tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ), le courant de court-circuit ( $J_{sc}$ ), le facteur de forme( $FF$ ) et le rendement de conversion( $\eta$ ). Les résultats obtenus sont en bon accord avec de nombreux travaux de recherche disponibles dans la littérature.

## III.2 Présentation du logiciel de simulation SCAPS 3.2.01

SCAPS (Solar Cell Capacitance Simulator) est un logiciel de simulation numérique des cellules solaires unidimensionnelles développé par le département des systèmes électroniques et informatiques (ELIS), à l'université de Gent en Belgique. Plusieurs chercheurs ont contribué au développement de ce logiciel comme : Alex Niemegeers, Marc Burgelman, Koen Decock, Johan Verschraeagen, Stefaan Degrave. SCAPS est un logiciel à application sur Windows. Il a été développé pour simuler les caractéristiques électriques des cellules solaires à hétérojonction et à couches minces. Il a été extensivement, testé sur des cellules solaires à base de CdTe et Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>.

### III.2.1 L'utilité de SCAPS

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). Les différents profils de dopage avec les distributions énergétiques des niveaux donneurs et accepteurs (dans le volume et aux interfaces) sont considérés.

En fait, n'importe quel programme de simulation, capable de résoudre les équations de transport électronique dans les semi-conducteurs, peut toujours être employé pour modéliser les piles solaires. Cependant, puisqu'il est assez puissant et donne des résultats plus précis, SCAPS reste un logiciel conviviale pour la modélisation des cellules en couches minces [8]. L'interface de travail du logiciel SCAPS est donnée dans la figure ci-dessous. Plus de détails sur le logiciel SCAPS se trouve dans son manuel.

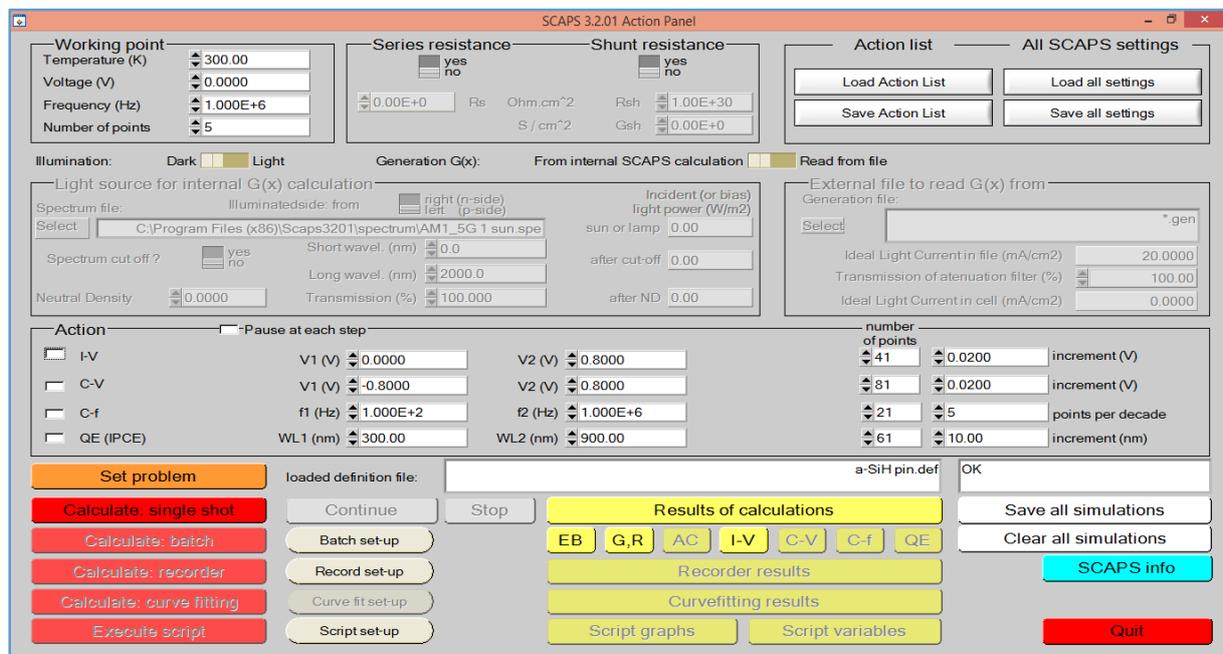


Figure III.1 : Interface de travail du logiciel SCAPS

### III.3 Applications

Dans cette partie nous allons présenter les différentes caractéristiques extraites du logiciel SCAPS. Les structures étudiées sont à hétérojonctions PIN de type **a-Si:H/a-Si:H/a-Si:H** ; **a-Si:H/ c-Si:H/a-Si:H** ; **c-Si:H/a-Si:H/c-Si:H**. Une comparaison entre ces trois structures est aussi effectuée.

### III.3.1 Présentation de la structure

La figure III.2 montre la structure PIN adoptée dans cette étude. Elle est à base de Silicium amorphe hydrogéné (a-Si : H). L'importance des atomes d'hydrogène provient de leurs grandes mobilités dans le plasma ainsi que leurs réactivités avec le silicium.

L'effet de l'incorporation de l'hydrogène dans le silicium amorphe peut s'interpréter de la façon suivante : les atomes d'hydrogène qui ont un faible rayon de covalence peuvent venir se greffer sur les liaisons de silicium en formant des liaisons SiHn. Ceci se traduit par la disparition des états électroniques correspondants aux liaisons brisées.

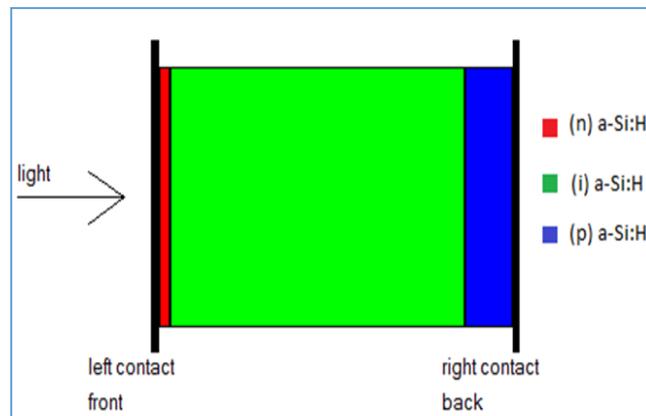


Figure III.2 : Schéma d'une cellule solaire a-SiH PIN.

### III.3.2 Résultats et interprétation

Dans cette section, nous présenterons les résultats de simulation, des trois structures étudiées par le logiciel SCAPS sous les différents effets considérés. Une comparaison entre ces trois structures est effectuée dans le but de concevoir une cellule ayant le rendement optimal. Les paramètres physiques du silicium inclus dans le logiciel SCAPS sont présentés ceux donnés dans le tableau III.1 :

| Paramètres            | Définitions  | valeurs          |
|-----------------------|--|------------------|
| $\epsilon_r$          | Permittivité relative                                  | 11.9             |
| $E_g$ (eV)            | Gap d'énergie  | 1.12             |
| $\chi$ (eV)           | Affinité électrique                                    | 4.05             |
| $N_c$ ( $cm^{-3}$ )   | La densité d'état efficace dans la bande de conduction | $2.8 * 10^{19}$  |
| $N_v$ ( $cm^{-3}$ )   | La densité d'état efficace dans la bande de valence    | $1.04 * 10^{19}$ |
| $\mu_n$ ( $cm^2/Vs$ ) | La mobilité des électrons                              | 1500             |
| $\mu_p$ ( $cm^2/Vs$ ) | La mobilité des trous                                  | 450              |

**Tableau III.1 : Paramètre du silicium.**

### III.3.2.1 Effet de la température

Pour mettre en évidence l'effet de la température, nous avons effectué certaines essais pour des températures allant de 0°C jusqu'au 60°C. Les autres paramètres de la cellule sont fixés aux valeurs indiqués dans le tableau III.2 :

| Couche       | Epaisseur ( $\mu m$ ) | Dopage ( $1/cm^3$ ) |           |
|--------------|-----------------------|---------------------|-----------|
|              |                       | Na                  | Nd        |
| a-Si : H (p) | 0,02                  | 1.000E+17           | 1.000E+6  |
| a-Si : H (i) | 0,5                   | 1.000E+6            | 1.000E+6  |
| a-Si : H (n) | 0,08                  | 1.000E+6            | 1.000E+17 |

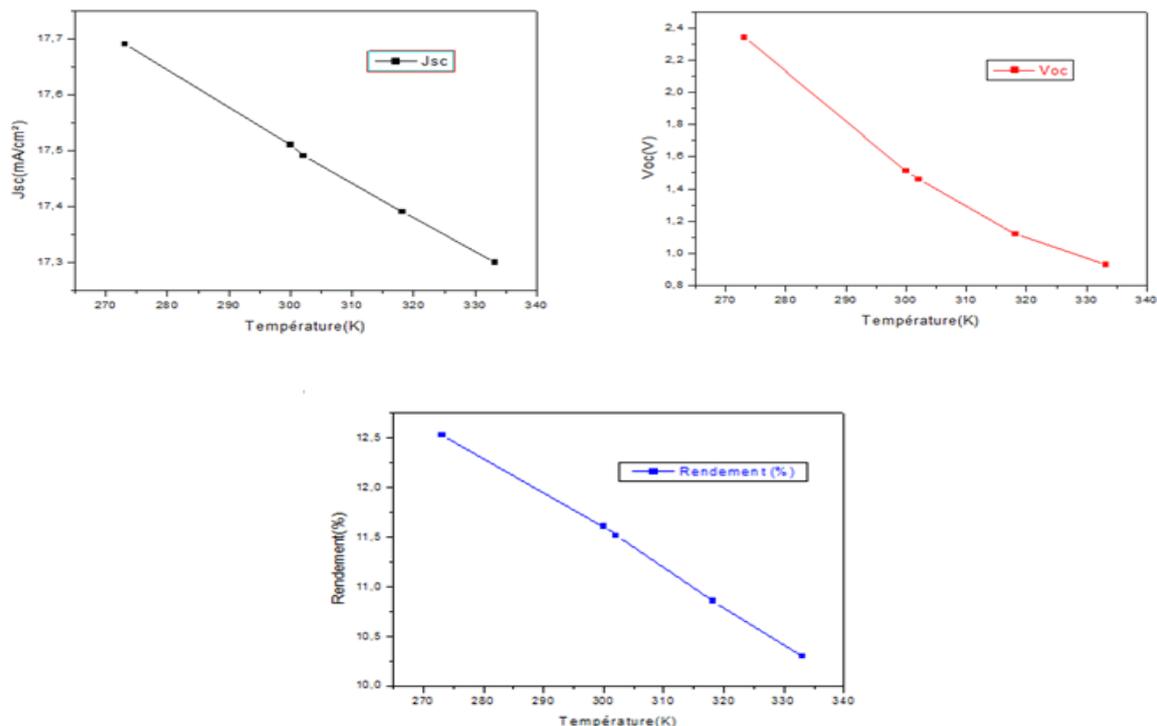
**Tableau III.2 : Paramètres physique standard de la cellule.**

Le tableau III.3 montre les valeurs de la simulation obtenues pour différentes valeurs de température, on constate que le courant de court-circuit  $J_{sc}$ , la tension  $V_{oc}$  et le rendement décroissent quand la température augmente (Voir figure III.3)

| Température (°K) | $J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> ) | $V_{oc}$ (V) | FF%   | $\eta\%$ |
|------------------|--------------------------------|--------------|-------|----------|
| 273,15           | 17,69                          | 2,34         | 30,25 | 12,53    |
| 300              | 17,51                          | 1,51         | 43,65 | 11,61    |
| 302,15           | 17,49                          | 1,46         | 45,03 | 11,52    |
| 318,15           | 17,39                          | 1,12         | 55,46 | 10,86    |
| 333,15           | 17,30                          | 0,93         | 63,48 | 10,30    |

**Tableau III.3 : Les paramètres de sortie de la cellule de l'effet de la température**

Aussi, l'effet de l'augmentation de la température est remarquable sur les caractéristiques électriques de la cellule. Cette augmentation a pour effet de favoriser de plus en plus l'agitation thermique des électrons qui entraîne par la suite une réduction du courant de sortie de la cellule. De même, l'agitation thermique favorise plus de collisions entre les électrons qui entraînent le freinage de ces derniers et par conséquent la diminution des paires électrons/trous qui doivent arriver aux contacts métalliques de la CPV. Les différentes caractéristiques  $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$  et  $\eta$  obtenus sont présentées dans la figure suivante :



**Figure III.3 : Evolution de  $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$  et le rendement en fonction de la température**

### III.3.2.2 Effet de l'épaisseur

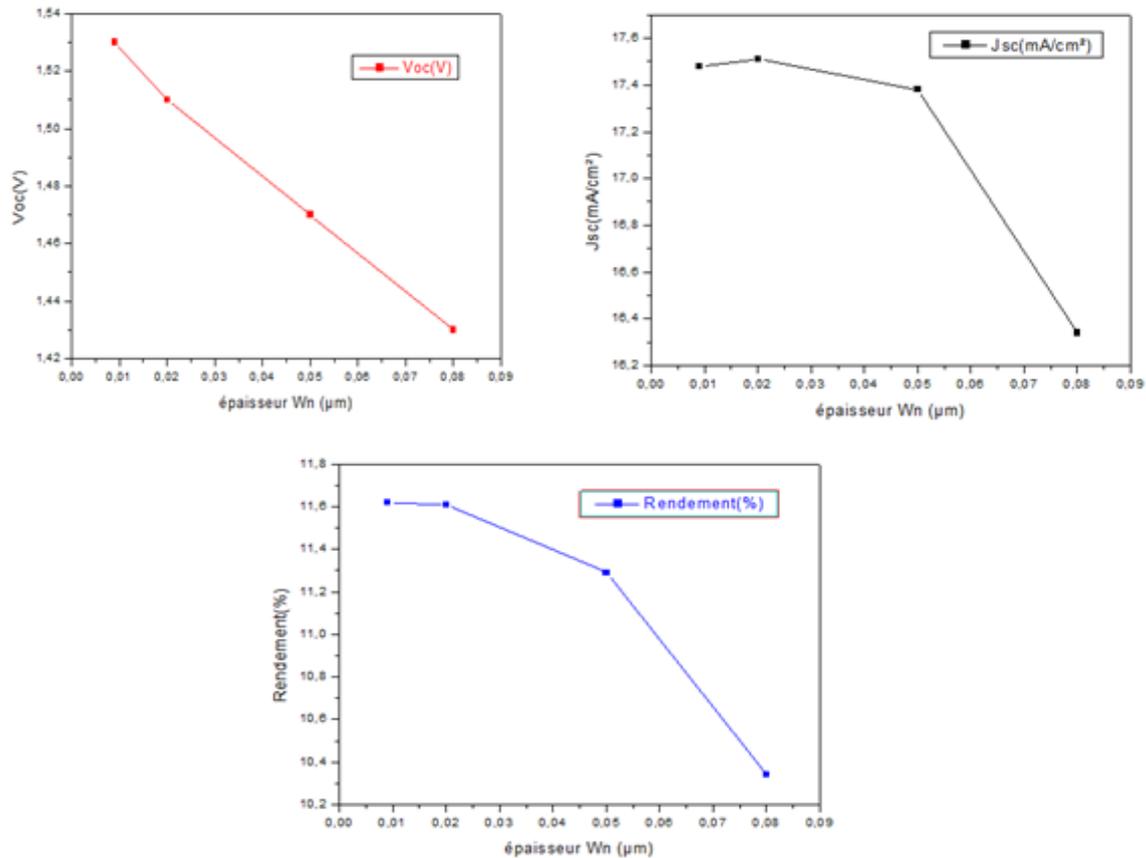
Dans cette partie nous présentons les résultats de la simulation de l'effet de la variation de l'épaisseur de la couche absorbante (Emetteur), de la couche intrinsèque (tampon) et de la couche de base (collecteur).

#### ➤ Effet de l'épaisseur de l'émetteur $W_n$

On note que la simulation est effectuée sous la température ambiante. L'épaisseur de la couche tampon ainsi que celle du collecteur sont respectivement  $0,5(\mu m)$  et  $0,08(\mu m)$ . Le tableau III.4 regroupe les résultats enregistrés, pour les différentes valeurs de l'épaisseur de l'émetteur  $W_n$ , en analysant ces résultats on peut constater que l'augmentation de l'épaisseur entraînera une décroissance notable au niveau des caractéristiques de la cellule. Cette décroissance est due principalement à la quantité de photons lumineux absorbés qui reste fortement dépendante de l'épaisseur de l'émetteur et donc la distance traversée par le photon. La diminution de ces photons absorbés réduira par la suite le nombre de paires-électrons photo-générés et donc le courant de sortie de la cellule diminuera. Les différentes caractéristiques donnant la variation de  $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$  et  $\eta$  sont présentées dans la figure III.4.

| $W_n(\mu m)$ | $J_{sc}$<br>( $mA/cm^2$ ) | $V_{oc}$ (V) | FF%   | $\eta$ % |
|--------------|---------------------------|--------------|-------|----------|
| 0.009        | 17,48                     | 1,53         | 43,34 | 11,62    |
| 0,02         | 17,51                     | 1,51         | 43,65 | 11,61    |
| 0,05         | 17,38                     | 1,47         | 44,07 | 11,29    |
| 0,08         | 16,34                     | 1,43         | 44,22 | 10,34    |

**Tableau III.4 : Les paramètres de sortie de la cellule pour différentes valeurs de l'épaisseur de la couche émetteur.**



**Figure III.4 : Variation de  $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$  et du rendement en fonction de l'épaisseur de l'émetteur.**

#### ➤ Effet de l'épaisseur de la couche tampon

Maintenant nous présentons les résultats de simulation de l'effet de l'épaisseur de la couche tampon sur les caractéristiques de la cellule. Pour cela la température est fixée à 300(K) et l'épaisseur de l'émetteur ainsi que celle du collecteur sont respectivement 0,02( $\mu\text{m}$ )et 0,08( $\mu\text{m}$ ).Le tableau III.5 rassemble les valeurs obtenues pour les différents paramètres de la cellule en fonction de l'épaisseur de la couche tampon. De même et suivant les résultats obtenus les paramètres de la cellule sont inversement proportionnelles à la variation de l'épaisseur de la couche tampon c'est-à-dire que lorsque l'épaisseur décroît, le rendement de la cellule augmente et vis versa.

| Tampon ( $\mu\text{m}$ ) | $J_{sc}$ ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ ) | $V_{oc}$ (V) | $FF\%$ | $\eta\%$ |
|--------------------------|--------------------------------------|--------------|--------|----------|
| 0,8                      | 17,59                                | 1,17         | 50,37  | 10,37    |
| 0,5                      | 17,51                                | 1,51         | 43,65  | 11,61    |
| 0,3                      | 16,87                                | 2,08         | 34,47  | 12,13    |
| 0,03                     | 13,21                                | 8,40         | 9,27   | 10,29    |

Tableau III.5 : Les paramètres de sortie de la cellule de l'effet de l'épaisseur de la couche tampon (intrinsèque).

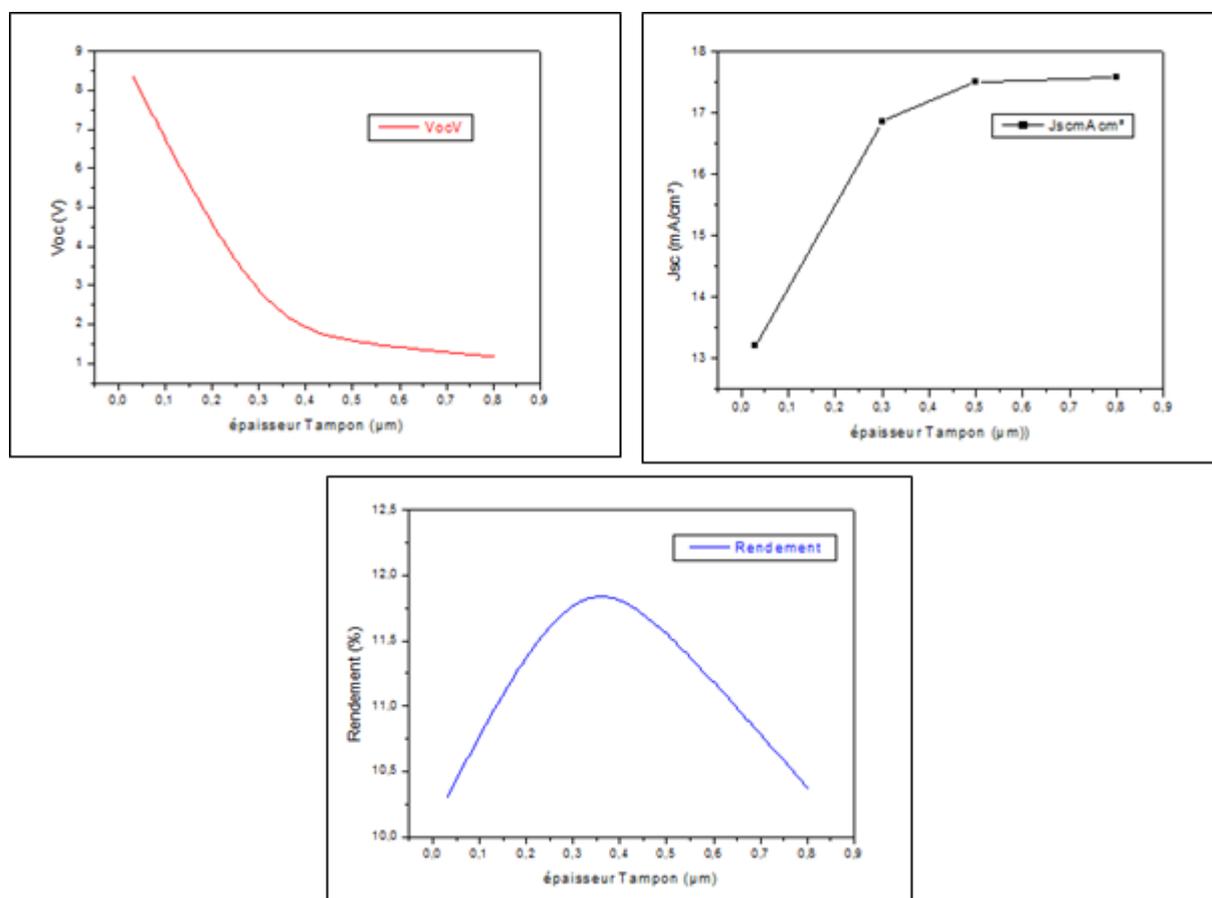


Figure III.5 : Variation de  $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$  et le rendement en fonction de l'épaisseur de la couche tampon.

➤ **Effet de l'épaisseur du collecteur  $W_p$**

De même que pour les essais précédents, on fixe la température à 300(K) et l'épaisseur de la couche tampon ainsi que l'émetteur respectivement à 0,5( $\mu m$ ) et 0,02( $\mu m$ ) puis on fait varier l'épaisseur du collecteur. Les valeurs enregistrées du courant de court-circuit, de la tension de circuit ouvert, du facteur de forme ainsi que du rendement sont regroupées dans le tableau III.6. Suite à ces valeurs, on constate que de plus en plus que l'épaisseur augmente, le rendement de la cellule s'améliore légèrement. Donc ceci ne permet de dire que l'effet de l'épaisseur de la couche collecteur est limité. Aussi, plus que l'épaisseur est grand plus de liberté est attribuée aux charge électriques pour se déplacer librement avec des collisions fortement limitées.

| $W_p(\mu m)$ | $J_{sc}$<br>(mA/cm <sup>2</sup> ) | $V_{oc}$ (V) | FF%   | $\eta\%$ |
|--------------|-----------------------------------|--------------|-------|----------|
| 0,05         | 17,45                             | 1,52         | 43,64 | 11,59    |
| 0,08         | 17,51                             | 1,51         | 43,65 | 11,61    |
| 0,2          | 17,61                             | 1,52         | 43,42 | 11,68    |
| 0,5          | 17,63                             | 1,52         | 43,37 | 11,69    |

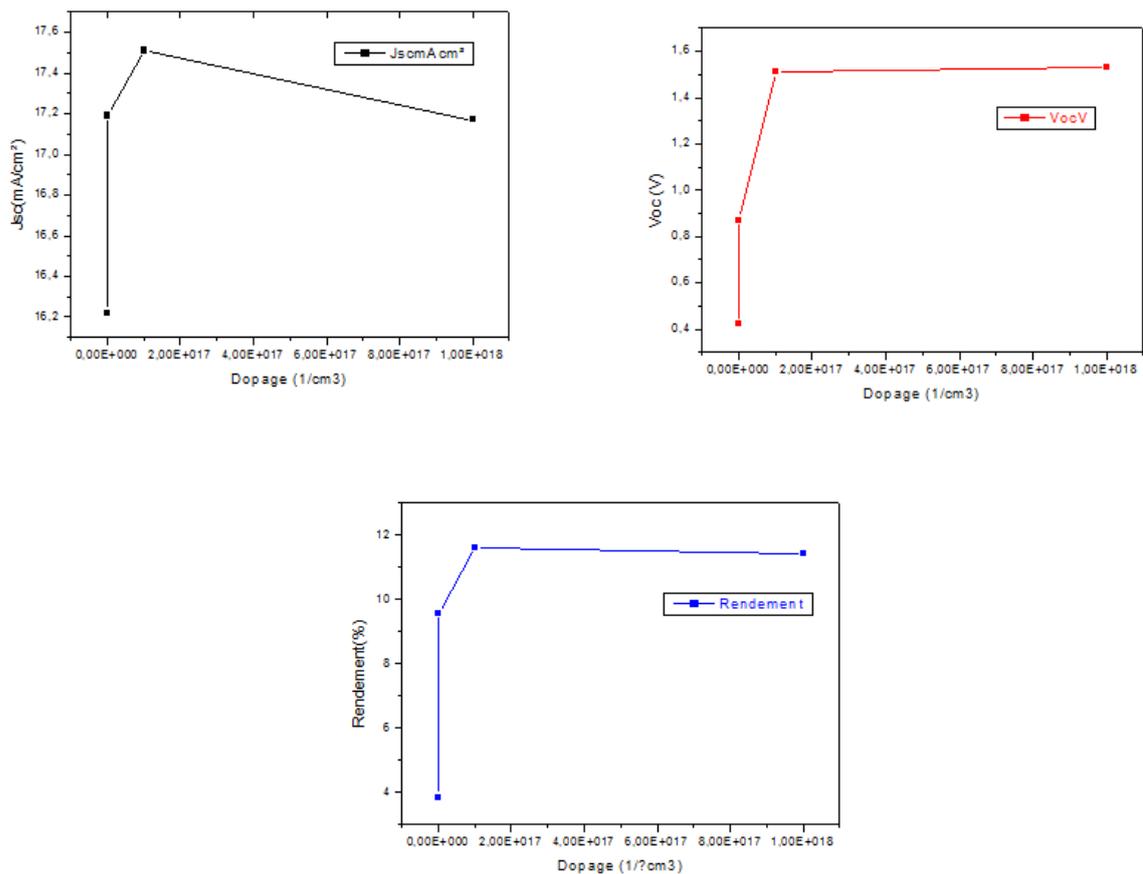
**Tableau III.6 : Les paramètres de sortie de la cellule de l'effet de l'épaisseur de la couche de base (n).**

### III.3.2.3 Effet du dopage

L'effet de dopage est étudié sous la température ambiante et pour les dimensions géométriques suivantes : l'épaisseur du collecteur égale à 0,08( $\mu m$ ), épaisseur de la couche tampon égale à 0,5( $\mu m$ ) et l'épaisseur de l'émetteur égale à 0,02( $\mu m$ ). Les caractéristiques obtenues pour les différentes valeurs du dopage en accepteurs sont exposées dans la figure III.5. Le tableau III.7 rassemble les valeurs obtenues lors de la variation du dopage de la couche P (Na). D'après les résultats ci-après, le meilleur rendement est obtenu pour un dopage  $N_a = 1.000E+17$  qui constitue un point optimal dans cette simulation.

| Dopage $W_n$ |           | $J_{sc}$<br>(mA/cm <sup>2</sup> ) | $V_{oc}$ (V) | FF%   | $\eta$ % |
|--------------|-----------|-----------------------------------|--------------|-------|----------|
| Nd           | Na        |                                   |              |       |          |
| 1.000E+6     | 1.000E+18 | 17,17                             | 1,53         | 43,30 | 11,44    |
| 1.000E+6     | 1.000E+17 | 17,51                             | 1,51         | 43,65 | 11,61    |
| 1.000E+6     | 1.000E+12 | 17,19                             | 0,87         | 63,95 | 9,58     |
| 1.000E+6     | 1.000E+6  | 16,22                             | 0,42         | 55,28 | 3,83     |

**Tableau III.7 : Les paramètres de sortie de la cellule en fonction du dopage de la couche P.**



**Figure III.6 : Variation de  $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$  et le rendement en fonction du dopage de l'émetteur.**

Le tableau III.8 regroupe les valeurs enregistrées lors de la variation du dopage de la couche N (Nd).

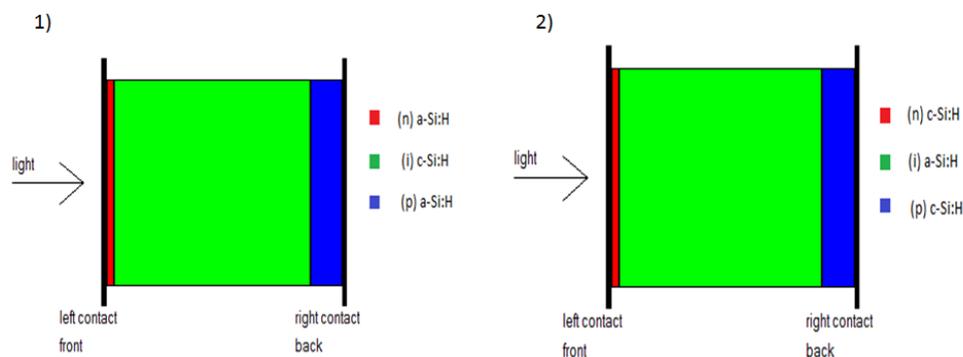
| Dopage $W_p$ |          | $J_{sc}$<br>(mA/cm <sup>2</sup> ) | $V_{oc}$ (V) | FF%   | $\eta$ % |
|--------------|----------|-----------------------------------|--------------|-------|----------|
| Nd           | Na       |                                   |              |       |          |
| 1.000E+20    | 1.000E+6 | 17,48                             | 1,60         | 41,94 | 11,77    |
| 1.000E+18    | 1.000E+6 | 17,49                             | 1,58         | 42,32 | 11,72    |
| 1.000E+17    | 1.000E+6 | 17,51                             | 1,51         | 43,65 | 11,61    |
| 1.000E+12    | 1.000E+6 | 17,35                             | 1,19         | 50,98 | 10,59    |

**Tableau III.8 : Les paramètres de sortie de la cellule de l'effet du dopage Nd du collecteur.**

L'augmentation du dopage de la région N, provoque une légère diminution du courant  $J_{sc}$  et tandis que  $V_{oc}$  augmente faiblement. Dans ce cas le rendement de la cellule passe de 10,59 à 11,77%. Cela explique que l'augmentation du dopage Nd entraîne une amélioration notable du rendement.

### III.4. Etude comparative

Dans cette partie nous allons exposer une étude comparative entre la cellule étudiée précédemment (a-Si:H/a-Si:H/a-Si:H) deux autres cellules PIN ayant les structures présentés dans la figure III.6.



**Figure III.7 : Structures des deux cellules : 1) a-Si:H/ c-Si:H/a-Si:H ;  
2) c-Si:H/a-Si:H/c-Si:H.**

#### III.4.1. Effet de l'épaisseur

L'effet de l'épaisseur sur le rendement des deux cellules 1) et 2) à été étudié. On se basant sur les résultats précédemment discutés nous pouvons constater que l'effet de l'épaisseur est toujours remarquable. De ce fait nous avons enregistré un rendement, pour une même épaisseur de l'émetteur égale à  $W_n = 0,009\mu m$ , de  $\eta = 11,62\%$ , tandis qu'il est égale  $\eta = 13,87\%$ , et  $\eta = 13,88\%$  dans les structures 1 et 2 respectivement. Par conséquent le meilleur rendement est donc obtenu pour la structure c-Si:H / a-Si:H / c-Si:H. Cela nous conduira de dire que cette dernière est considérée comme une meilleure structure. Dans le cas de l'épaisseur du collecteur, et pour une valeur de  $W_p = 0,5\mu m$ , les rendement enregistrés dans la première, la deuxième et la troisième structure sont respectivement donné  $\eta = 11,69\%$ ,  $\eta = 13,76\%$  et  $\eta = 14,32\%$ . De même l'effet de la couche tampon à été analysé. Donc pour un épaisseur égale à  $0,8\mu m$ , les rendement enregistrés pour les trois structures sont respectivement :  $\eta = 10,37\%$ ,  $\eta = 14,36\%$  et  $\eta = 14,37\%$ .

Par conséquent, on peut dire que le meilleur rendement obtenu lors de la variation de l'épaisseur de l'émetteur, le collecteur et la couche tampon, est toujours enregistré pour la structure de type c-Si:H/a-Si:H / c-Si:H. Alors, comme nous l'avons souligné cette dernière structure est considérée comme un meilleur choix dans le cas d'une cellule solaire TF-Si.

#### III.4.2. Effet du dopage

L'effet du dopage est aussi considéré dans cette partie. En comparant le rendement des trois structures pour un dopage  $N_a = 1.000E+18(1/cm^3)$ , il en résulte, qu'après une forte densité de dopage, le rendement se stabilise vers 11,44%, 13,83% et 13,83% respectivement. Cette stabilisation est résultat de la saturation des porteurs de charge dans le matériau. Plus le dopage est fort plus le risque d'endommager la structure du matériau augmente. Dans le cas du dopage du collecteur, les résultats obtenus sont similaires aux ceux obtenus dans le cas de l'émetteur. Une stabilisation remarquable du rendement été enregistrée quel que soit l'augmentation du dopage du collecteur.

# **Conclusion Générale**

## Conclusion générale & Perspectives

Notre étude à portée sur l'optimisation d'une cellule photovoltaïque TF-Si à travers la simulation de trois structures différentes. Notre objectif c'était donc de démontrer laquelle de ces structures constitua le choix optimal c'est-à-dire celle qui a le meilleur rendement dans les différents paramètres critiques qui conditionnent les performances de la cellule. Dans la première partie de notre travail, un aperçu sur l'énergie solaire, le domaine de la photovoltaïque ainsi sur le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque ordinaire, est évoquée.

Dans la deuxième partie nous avons exploré quelques filières existantes sur le marché du photovoltaïque leur avantages et inconvénients. Ensuite, nous avons présenté les paramètres essentiels pour le calcul du rendement d'une cellule solaire à partir de la caractéristique courant-tension. De même, des notions sur le module photovoltaïque : rendement, nombre des cellules dans un module, leur encapsulation et leur encadrement, sont discutées.

La troisième partie de ce travail été destinée à l'étude l'influence de la température, de l'épaisseur et ainsi que du dopage sur les paramètres ( $J_{sc}$ ,  $V_{co}$  et  $\eta$ ) de trois structures à hétérojonction de type : **a-Si:H/a-Si:H/a-Si:H** ; **a-Si:H/ c-Si:H/a-Si:H** ; **c-Si:H/a-Si:H/c-Si:H** sur la caractéristique  $I-V$ . Cette étude à été effectuée par une série de simulations, basée sur le logiciel SCAPS. Aussi nous somme servi de l'outil ORIGIN 6.0 pour le tracé des courbes. Suite aux résultats obtenus nous avons remarqué que l'augmentation de la température entraine une décroissance du rendement, du courant de court-circuit ainsi que la tension de circuit ouvert. Cette décroissance à été justifiée par le freinage du mouvement des électrons causé par les collisions entre eux. De même, l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur entrainera une décroissance remarquable du rendement. Cependant, de plus que l'épaisseur du collecteur augmente, un bon rendement à été enregistré. De plus les résultats enregistrée rassurent que l'effet du dopage est aussi important. Après les différentes simulations effectuées sur les trois structures étudiées, On peut constater que le meilleur rendement est obtenu pour une cellule de type c-Si:H/a-Si:H / c-Si:H.

Comme perspective pour cette étude, une étude comparative des résultats obtenus sur d'autres logiciels de simulation de cellules solaires est toujours intéressante

# **Bibliographie**

## Bibliographie

- [1] **BENMACHICHE Samira** « Etude des paramètres limitant le rendement d'une photopile à base d'une structure MIS » Thèse de Magister, 2009, Université Hadj Lakhdar de Batna.
- [2] **Farida Nemmar BELHOCINE** « Etude et réalisation des cellules solaires photovoltaïques à base de matériaux organiques ». Thèse de Doctorat, 2013, Université Mouloud Mammeri-Tizi-Ouzou.
- [3] **MEKELLECHE Sidi mohammed** « Modélisation et simulation de nouveaux matériaux destinés à la production d'énergie photovoltaïques ». Diplôme de Master professionnel, 2014-2015, Université Abou-bekr Belkaid-Tlemcen.
- [4] **MAOUCHA abdelhak** « Etude et identification paramétrique d'une cellule photovoltaïque organique » Thèse de Magister, 2011, Université de Batna.
- [5] **Malika MADANI** « Réalisation des couches antireflets dans les cellules solaires à couches minces », Thèse de Magister, 2006, Université Abou-bekr Belkaid-Tlemcen.
- [6] **DJERIOUAT Khadidja** « Optimisation du rendement des cellules photovoltaïque à hétérojonction GaInP/GaAs ». Thèse de Magister, 2011, Université Abou-bekr Belkaid-Tlemcen
- [7] **BENSALEM Salaheddine** « Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires ». Thèse de Magister, 2011, Université Ferhat Abbas – Setif.
- [8] **A. Darga**. Formation : Introduction à la simulation de cellules photovoltaïque. Thèse de Doctorat.2015. HAL.
- [9] **Stephen T. Thornton et Andrew F. Rex**, Physique moderne, p404-405, groupe de Boeck s.a.2010.
- [10] **MORNAY Thomas, VERNAY Alexis, VOLLE Marion**, 2005, Classes préparatoires CPE, Institution des Chartreux.
- [11] **Jean-Marie KALALA** « Energie photovoltaïque et son impact sur la stabilité dans la distribution de l'énergie électrique à Lubumbashi ». Décembre 2015, Institut technique Salama/Lubumbashi.
- [12] **A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa et W. Warta**, Progress in photovoltaics: Research and applications 2009; 17: 85–94.

## Bibliographie

- [13] **Jean Claud MILEER**, Techniques de l'ingénieur, dossier BE8579. Archive ressources énergétiques et stockage, 2007.
- [14] [www.tpepanneauxsolaires.fr/TPE%20textes%20.../fonctionnement%20avantages.doc](http://www.tpepanneauxsolaires.fr/TPE%20textes%20.../fonctionnement%20avantages.doc)
- [15] <http://www.solarworld.fr/energie-solaire/pourquoi-lenergie-solaire/>.
- [16] <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16679>.
- [17] <http://www.nouveauxobjets.com/solaire>.
- [18] <http://www.lebourgetdulac.fr/page.php?page=DT1216588768&lang=fr&codej=france&time=20100109020318>.
- [19] <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-solaire-exploitation>
- [20] <https://openclassrooms.com/courses/l-electronique-de-zero/introduction-aux-semi-conducteurs>.
- [21] <http://www.sundous.com/Energie.html>.
- [22] <http://lenergeek.com/2012/02/17/lheterojonction-expertise-technologique-de-photowatt/>.
- [23] [http://eer.in2p3.fr/Favre\\_W.pdf](http://eer.in2p3.fr/Favre_W.pdf)
- [24] <http://energies-renouvelables.consoneo.com/actualite/2012-04-12/developper-une-filiere-silicium-cristallin-rubans-minces/7461/>.
- [25] <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00870335/document>.
- [26] <http://www.arcinfo.ch/articles/suisse/des-panneaux-solaires-couleurs-sur-une-facade-de-l-epfl-297586>.
- [27] [http://www.photovoltaique.guidenr.fr/II\\_1\\_constitution-module-photovoltaique.php](http://www.photovoltaique.guidenr.fr/II_1_constitution-module-photovoltaique.php).
- [28] <http://www.photovoltaique-organique.com/tag/cellule-photovoltaique-organique/>.
- [29] <http://www.mtaterre.fr/dossier-du-mois/archives/595/Comment-ca-marche-l-energie-solaire>.
- [30] [https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie\\_renouvelable](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_renouvelable).

## ملخص

إن أزمة الطاقة لعام 1970 دفعت حكومات العالم الى التفكير في موارد طاقة أخرى تكون موثوقة وقابلة للاستخدام على المدى الطويل. لذا فإن الطاقة الشمسية كانت الخيار الصحيح المتبع من طرف العديد من الصناعات قصد الإستثمار في هذا المورد وتحسين التكنولوجيا الضوئية واستغلالها جيدا. هذه التقنية شهدت آنذاك فترة ازدهار في كل أنحاء العالم، والتي ترجمت بعدد الاستغلالات الممكنة من خلال دراستها وتجربتها أملا في تسويقها في المستقبل. إن تقنية السيليكون الرقيق هي اليوم أحد المحاور الأكثر تحفيزا من حيث التكلفة و المردود الخ . لهذا الغرض نقترح تحسين فيزيائي و هندسي - في إطار مقارنة - لخلية ضوئية من فيلم السيليكون الرقيق.

## Résumé

La crise énergétique de 1970<sup>1</sup>, a poussé les gouvernements mondiales de réfléchir à d'autres ressources d'énergie fiables et exploitables à long terme. L'énergie solaire était alors le choix judicieux à suivre par de nombreux industriels pour investir dans cette ressource afin d'améliorer la technologie photovoltaïque permettant la bonne exploitation. Cette technologie a connu alors une période de plein essor. Partout dans le monde, de nombreuses possibilités d'exploitation sont alors étudiées puis expérimentées dans l'espoir d'une commercialisation future. La technologie TF-Si (Thin Film silicon) est aujourd'hui, l'un des axes les plus motivants en termes de coût, rendement, faible recombinaison et d'autres. Dans ce but nous proposons de faire une optimisation physique et géométrique, dans un cadre comparatif, d'une cellule PV à base du film mince de silicium.

## Abstract

The energy crisis of 1970 has boosted world governments to think about other alternative energy resources that are more reliable and exploitable for a longer term. Solar energy was the right choice to follow by many industrials to invest in this resource in order to improve photovoltaic technology. This technology has known a booming period. Around the world, great exploitation possibilities have been studied and experimented in hope of future commercialisation. TF-SI technology (thin film silicon) is today one of the most motivating axes in terms of cost, productivity and low recombination. In comparative framework, we propose to optimize physical and geometric parameters of a thin film silicon based PV cell.