



**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET  
POPULAIRE**

**Ministère de L'Enseignement Supérieur Et de la Recherche Scientifique  
UNIVERSITE Saad DAHLAB –BLIDA1**



**Faculté de technologie  
Département des énergies Renouvelables**

*Projet tutorat d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master  
conversion : photovoltaïque*

***Thème :***

**Caractérisation et Optimisation des cellules  
photovoltaïque à hétérojonction de silicium HIT**

**par :**

**Mr. Al HAMRANI Abdelmadjid**

Soutenu le 09/10/2016 devant le jury compose de :

DOMAZ Moustafa	président
KAHLAN Hamza	Examineur
BEDIA Asma	Examineur
BEDIA Fatima	promoteur

**Année universitaire : 2015 /2016**

# *Dédicaces*

*À toute ma famille*

*À mes amis*

*À tous ceux et celles qui me sont cher(e)s*

## REMERCEMENTS

*Nous louons en premier lieu Dieu qui nous a donné la force et la patience pour terminer ce travail.*

*Nous tenons à exprimer nos remerciements à notre encadreur Dr. F. Bedia qui a proposé et dirigé ce travail.*

*Nous tenons à remercier les responsables et tout le personnel du département des énergies renouvelable de l'université Blida 1 pour les facilités qu'ils nous ont accordées pour terminer ce travail. qui doit aussi beaucoup à certaines personnes que nous tenons à remercier sincèrement.*

*Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à notre formation et à l'élaboration de ce modeste mémoire.*

## Abstract

Optimization of thicknesses of n-type a-Si:H emitter layer, front a-Si:H-layer and p-type c-Si base wafer as well as optimum heterojunction HJ (a-Si:H(n)/c-Si(p)), HIT (Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p)), HITBSF(Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p)/BSF) solar cells are performed using SCAPS simulation software. All cell structures generated highest efficiency at emitter layer and front i-layer thicknesses of 6 nm and 3 nm, respectively. By optimization, we realized record efficiency of 21.32% in HIT solar cell with Back Surface field layer (BSF) layer at emitter layer, front i-layer, c-Si base wafer and p+-type a-Si:H BSF layer thicknesses of 6 nm, 3 nm and 300  $\mu\text{m}$ , respectively.

## Keywords:

Simulation; Silicon solar cells; HIT Structure.

## Résumé

L'optimisation des paramètres géométrique et électronique (l'épaisseurs d'émetteur a-Si: H (n), la couche intrinsèque a-Si: H (i), substrat c-Si(p)) des cellules solaires à hétérojonction HJ (a-Si: H (n) / c-Si (p)), HIT (Si: H (n) / a-Si: H (i) / c-Si (p)), HITBSF (Si: H (n) / a-Si: H (i) / c-Si (p) / BSF) est effectuée en utilisant le logiciel de simulation SCAPS. Toutes les structures présentent une efficacité maximum avec un émetteur d'épaisseur 6 nm et une couche intrinsèque d'épaisseur 3 nm. L'introduction de la couche BSF donne un rendement de l'ordre 21,32% de la cellule HIT avec l'épaisseur du substrat, de la couche émetteur a-Si:H(n) et BSF sont respectivement 300  $\mu\text{m}$ , 6 nm et 3 nm.

## Keywords :

Simulation; cellule solaire de silicium; HIT Structure.

## المخلص

التغيرات على العوامل الهندسية والالكترونية (سمك الباعث, a-Si: H (n), الطبقة الجوهرية a-Si: H (i), الاساس c-Si(p)) للخلية الشمسية المتغايرة HJ (a-Si:H(n) / a-Si(p)), HIT, (a-Si:H(n) / a-Si(p)), HITBSF, (a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/a-Si(p)) باستخدام برنامج المحاكاة SCAPS, كل الهياكل توضح ان أكبر مردودية عندما يكون سمك طبقة الباعث 6nm والطبقة الجوهرية ذات السمك 3nm. عند وضع طبقة BSF تصل المردودية الي 21.32% في الخلية الشمسية HIT مع ان سمك الاساس, طبقة الباعث و BSF على التوالي. 300  $\mu\text{m}$ , 6 nm, 3nm

الكلمات الرئيسية: محاكاة, خلية شمسية من السليكون, هيكل HIT

# *Introduction générale*

L'électricité photovoltaïque est obtenue par la transformation directe de la lumière du soleil en électricité, au moyen des cellules photovoltaïques. L'élément le plus utilisé pour la fabrication des cellules solaires est le silicium (plus de 95% du marché mondial). En effet, c'est un élément très abondant sur la croûte terrestre. Le coût des cellules photovoltaïques à base de silicium est donc moins élevé que celui des cellules basées sur certains composites (CdTe, InSe<sub>2</sub> ...). Le silicium cristallin est d'une grande performance. La technologie qui se base sur ce matériau permet de fabriquer des cellules avec de hauts rendements (~24%), mais avec un coût de production élevé. Par ailleurs, la qualité du matériau nécessaire pour réaliser des cellules solaires doit être d'une grande pureté, et représente une grande partie du prix de revient total.

Le silicium amorphe est beaucoup moins cher que le silicium cristallin. Mais il est aussi bien moins performant à cause de sa structure désordonnée qui conduit à des défauts dans le gap. La technologie se basant sur le silicium amorphe permet de réduire le coût de production des cellules (matériau moins cher, faible budget thermique, possibilité d'utiliser des couches minces). Mais les rendements obtenus sont faibles relativement à ceux obtenus avec le silicium cristallin. L'entreprise japonaise Sanyo a commencé une production de masse de modules photovoltaïques nommés 'structure HIT' (Heterojunction with Intrinsic Thin layer). En combinant la bonne performance du silicium cristallin et le bas coût de production du silicium amorphe, cette technologie a permis d'atteindre de hauts rendements tout en diminuant le prix de revient (budget thermique plus bas, épaisseur des couches plus mince, ce qui conduit à un prix du matériau moins cher etc..).

L'objectif de ce mémoire consiste à mettre en place un modèle de simulation numérique et une maîtrise de la technologie silicium à hétérojonctions c-Si/a-Si:H. La simulation numérique effectuée avec le logiciel SCAPS a permis de reproduire correctement les caractéristiques de sortie des cellules HIT. L'influence des paramètres physiques sera menée afin de mieux comprendre le fonctionnement de ce type de cellule et de déterminer les paramètres critiques. Ce mémoire est organisé de la façon suivante :

- Dans le premier chapitre, nous présentons les notions fondamentales sur les cellules solaires (Historique du photovoltaïque, le rayonnement solaire et le principe de la conversion photovoltaïque et paramètres caractéristiques d'une cellule photovoltaïque ainsi que les différentes technologies).
- Dans le deuxième chapitre, nous présentons la filière silicium et plus particulièrement les cellules photovoltaïques à hétérojonctions c-Si/a-Si:H en décrivant les deux matériaux utilisés (c-Si et a-Si:H) et les composants de ce type de cellule. Puis, nous avons présenté la technologie silicium à hétérojonctions.
- Dans le troisième chapitre nous présentons le logiciel de simulation SCAPS et les résultats de la simulation obtenus.
- Nous terminerons ce manuscrit par une conclusion générale ou seront résumés les principaux résultats.

## *Chapitre I*

# **Généralités sur les cellules photovoltaïques**

## I.1 Historique de l'effet photovoltaïque

La conversion photovoltaïque repose sur l'effet photovoltaïque qui consiste en la transformation de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Le préfixe Photo vient du grec « phos » qui signifie lumière. « Volt » vient du patronyme d'Alessandro Volta (1745-1827), physicien qui a contribué aux recherches sur l'électricité. Photovoltaïque (PV) signifie donc littéralement électricité lumineuse.

L'effet photovoltaïque a été mise en évidence pour la première fois en 1839 par le français *Alexandre Edmond Becquerel* (1820/1891) découvre l'effet photoélectrique. Avec son père *Antoine César Becquerel* (1788/1878), ils présentent devant l'Académie des sciences l'effet photoélectrique expérimenté avec des électrodes de platine et de cuivre plongées dans une solution électrolytique acide [1]. En 1875, *Ernst Werner Von Siemens* (1816/1892), ingénieur et industriel allemand, expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. *Albert Einstein* (1879/1955), physicien allemand, reçoit le prix Nobel de physique pour son apport à la physique théorique et particulièrement son explication de l'effet photoélectrique en 1921. En 1939, *Russel Ohl* (1898/1987), ingénieur américain, découvre la jonction p-n et ses travaux le conduisent à développer la première cellule solaire en silicium. La première photopile a été développée aux États-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell (*D.M. Chapin, C.S. Fuller, et G. L. Pearson*), qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés" [2]. C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs. Leur cellule solaire a un rendement de conversion de 6 %. Cette découverte constitue pour l'industrie spatiale naissante une solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites. En fin 1958 : Une cellule avec un rendement de conversion de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

## I.2 Rayonnement solaire

Le soleil est une étoile distante de 150 millions de km de la terre. Il est constitué d'environ 85% d'hydrogène et de 15% d'hélium. Sa température interne est de 15 à 20 millions de degrés Celsius. Ce flot continu de chaleur provient d'une fusion nucléaire qui transforme l'hydrogène en hélium. L'énergie libérée dans les profondeurs du soleil rayonne ensuite dans l'espace sous forme de lumière et de chaleur principalement. Le spectre solaire, en première

approximation, s'apparente plutôt au spectre d'émission d'un corps noir de température 5 900 K. Le soleil émet donc un spectre dans des longueurs d'onde de 290 à 2770 nm qui comprend les rayons ultraviolets, les couleurs de l'arc-en-ciel et les rayons infrarouges. L'atmosphère terrestre joue le rôle de filtre et ne laisse passer qu'une partie de ce spectre. Outre l'absorption dans les différentes couches de l'atmosphère, la latitude du lieu d'observation, les conditions climatiques (saison, temps) et aussi les gaz présents dans l'atmosphère (l'ozone O<sub>3</sub>, le dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> et l'eau H<sub>2</sub>O) constituent des obstacles limitant la diffusion de la lumière.



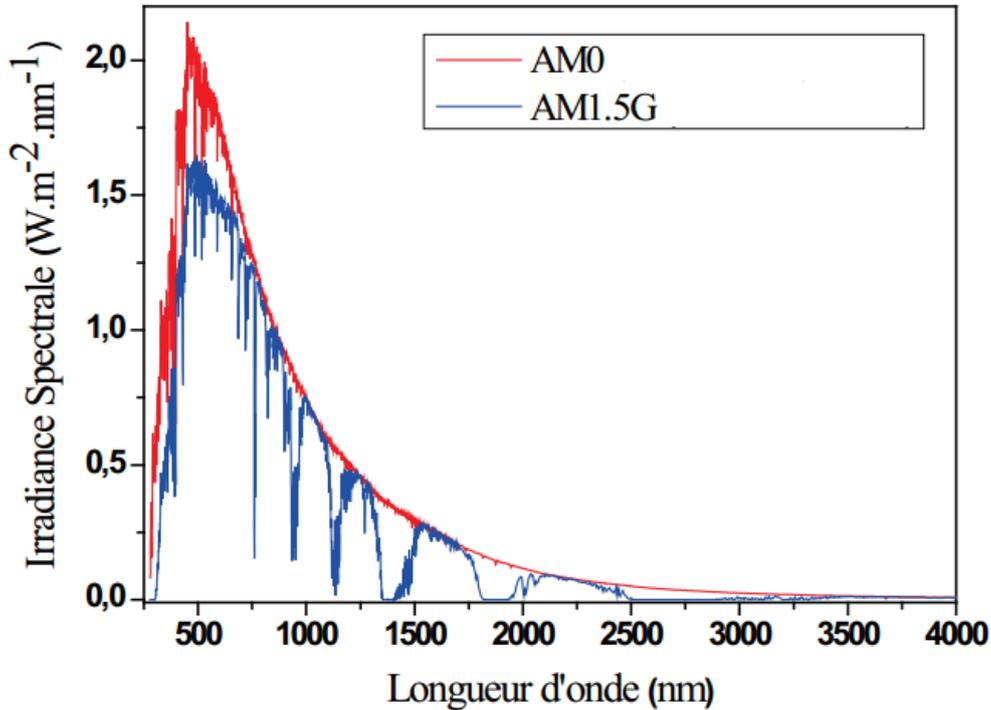
**Figure I.1 :** Description de nombre d'air –masse ;  $AM_0$  (spectre solaire en dehors de l'atmosphère),  $AM_1$  (spectre solaire au sol lorsque le soleil est situé au zénith) et  $AM_{1.5}$  (spectre solaire au sol pour un rayonnement solaire ayant un angle d'incidence de 48,2°).

La notion de  $AM$  pour « Air Mass » (masse atmosphérique) a été définie pour pouvoir comparer les performances des cellules photovoltaïques. Cette convention permet d'harmoniser les résultats obtenus dans les laboratoires.  $AM$  quantifie la puissance absorbée par l'atmosphère en fonction de l'angle  $\theta$  du soleil par rapport au zénith.

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

Les spectres solaires  $AM_0$  et  $AM_{1.5}$  sont principalement utilisés pour évaluer les rendements de conversion des cellules solaires (figure I.1).  $AM_0$  représente le spectre solaire dans l'espace (hors atmosphère) et est utilisée pour évaluer les performances des cellules solaires pour applications spatiales.

Le spectre solaire *AM 1.5* représente le spectre solaire sur terre à une altitude de 0 m en plein soleil et avec un angle zénithal  $\theta$  de  $48,2^\circ$  (cette valeur de  $\theta$  donnant  $AM = 1.5$ ). Le rendement de conversion d'une cellule pour application terrestre est défini à  $25^\circ\text{C}$  et avec un spectre solaire *AM 1.5* dont la puissance incidente est de  $1\,000\text{ W/m}^2$ .



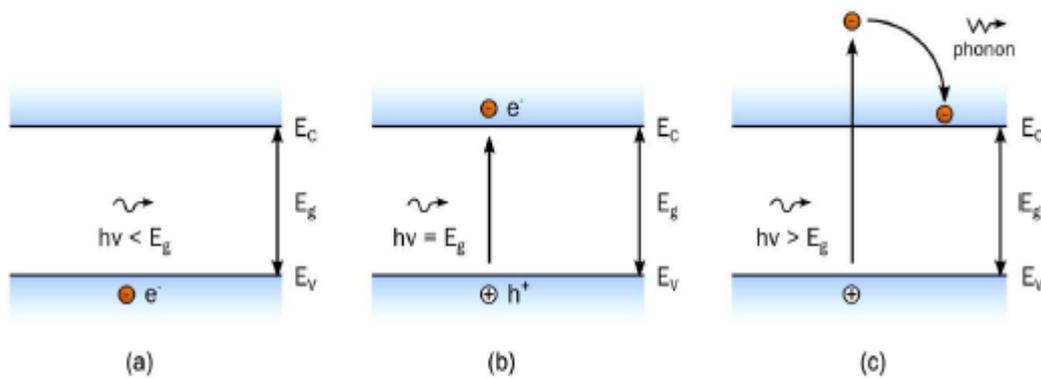
**Figure I.2** : Représentation graphique des spectres *AM0* et *AM1.5G* [3].

Le spectre standard le plus étudié est *AM1.5G*, G signifiant global car il tient compte à la fois des radiations directes et diffuses, par opposition à *AM1.5D* qui ne tient compte que des directes. Le rendement de conversion d'une cellule pour application terrestre est défini à  $25^\circ\text{C}$  et avec un spectre solaire *AM 1.5* dont la puissance incidente est de  $1\,000\text{ W/m}^2$ . Les spectres *AM0* et *AM1.5G* sont représentés sur la figure I.2 [3].

### I.3 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La production d'énergie photovoltaïque est basée sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs. En effet, ces derniers sont capables d'absorber des photons dont l'énergie  $E_{\text{photon}} = h\nu$  est supérieure à la largeur de bande interdite  $E_g = E_c - E_v$ . L'énergie du photon est absorbée par un électron de la bande de valence, qui est transféré dans la bande de

conduction. Son absence dans la bande valence est modélisée par un trou, porteur de charge positive. L'absorption du photon génère ainsi une paire électron-trou. La figure I.3 montre les différentes interactions entre un photon et un semi-conducteur. Dans le cas où l'énergie du photon est supérieure à celle de la bande interdite du matériau, l'excès d'énergie est libéré par l'électron sous forme de phonons et donc de chaleur (thermalisation). Cependant, un matériau semi-conducteur seul ne permet pas de générer de courant électrique. En effet, les paires électron-trou ne sont pas collectées et elles se recombinent donc toutes au bout d'un temps caractéristique  $\tau$  (temps de vie des porteurs).



**Figure I.3 :** a) Transmission d'un photon d'énergie  $E_{\text{photon}} < E_g$  dans un matériau semiconducteur. b) Absorption d'un photon d'énergie  $E_{\text{photon}} = E_g$  et formation d'une paire électron-trou. c) Absorption d'un photon d'énergie  $E_{\text{photon}} > E_g$ , formation d'une paire électron-trou et thermalisation de l'électron par émission de chaleur (phonon) [4].

L'une des étapes clés du fonctionnement d'une cellule PV est la séparation des électrons et des trous avant qu'ils ne se recombinent au sein du matériau. Cette séparation électrons/trous peut être obtenue par une différence de potentiel réalisée par la mise en contact de deux semiconducteurs, un de type p et un de type n, créant une jonction p-n. Sous l'effet du gradient de concentration, les porteurs majoritaires, les trous dans le semiconducteur de type p et les électrons dans le semiconducteur de type n vont diffuser au travers de l'interface p/n. Ces porteurs vont alors se recombiner. La zone sans porteur mobile (atomes ionisés) ainsi créée est appelée zone de charge d'espace (ZCE) ou zone de déplétion. Il y a ainsi création d'un champ électrique  $E$  qui s'oppose à la diffusion des porteurs majoritaires. Ce champ électrique permet la migration des trous vers la zone dopée p dans le sens du champ et les électrons vers la zone dopée n en sens inverse au champ. L'alignement du niveau de Fermi  $E_F$  induit une courbure des bandes ainsi qu'une barrière de potentiel  $V_D$ .

Sous éclairage, les électrons générés par des photons vont immédiatement être dirigés vers la zone chargée n et les trous vers la zone p. Des conducteurs métalliques permettent de collecter ces électrons et trous et de récupérer le courant généré par la cellule solaire.

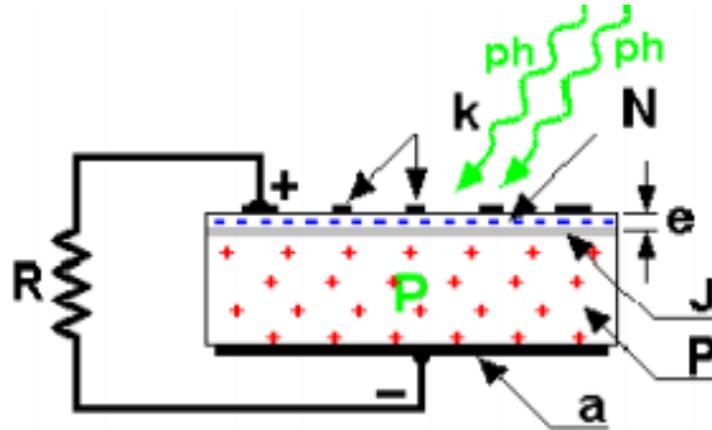


Figure I.4 : Description d'une cellule photovoltaïque [5].

## I.4 Paramètres caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

### I.4.1 Caractéristiques électrique d'une cellule photovoltaïque

Les performances d'une cellule solaire sont principalement évaluées à partir de sa caractéristique courant-tension sous un éclairage normalisé (spectre solaire *AM1.5G*, d'une puissance de  $1000 \text{ W/m}^2$ , à  $25^\circ\text{C}$ ).

La courbe courant-tension, représentée sur la figure I.5, suit dans le cas idéal l'équation de la diode

$$\mathbf{I} = I_{ph} - I_0 \left( \frac{qv}{eKT} - 1 \right) \quad (\text{I.2})$$

où

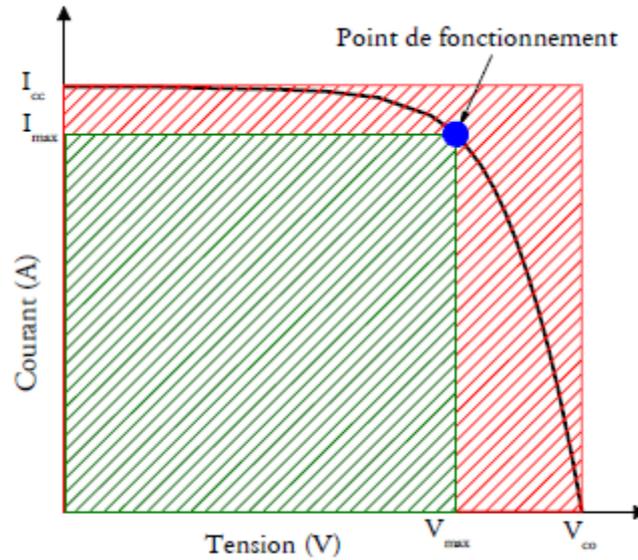
$I_{ph}$  est le courant photogénéré

$I_0$  le courant de saturation de la diode

$q$  la charge de l'électron

$k$  la constante de Boltzmann

$T$  la température en Kelvin



**Figure I.5 :** Caractéristique courant-tension sous éclairage typique d'une cellule solaire.

La cellule dans le noir est seulement un redresseur de courant ou diode. Le courant photogénéré  $I_{ph}$  est dépendant du flux incident sur la cellule. Sa dépendance en fonction de la longueur d'onde est discutée sous le vocable de rendement quantique ou réponse spectrale. Le photocourant est normalement indépendant de la tension appliquée mais pas toujours. Dans le cas idéal, le courant de court-circuit  $I_{CC}$  est égale au courant photogénéré  $I_{CC}$  et la tension de circuit ouvert  $V_{CO}$  est donnée par :

$$V_{OC} = \frac{KT}{q} \ln\left(1 + \frac{I_{ph}}{I_o}\right) \quad (I.3)$$

Il existe un point sur cette courbe tel que le produit du courant et de la tension soit maximal. C'est le point de fonctionnement de la cellule. La puissance maximale de sortie de la cellule est représentée par l'aire du rectangle vert sur le graphique de la figure I.5. Le rendement de conversion est donné par l'équation.

$$\eta = \frac{V_m I_m}{P_i} = \frac{FF V_{CO} I_{CC}}{P_i} \quad (I.4)$$

avec

$I_m$  le courant au point de puissance maximale.

$V_m$  la tension au point de puissance maximale.

$P_i$  la puissance incidente.

$I_{cc}$  le courant de court-circuit, qui est le point d'intersection de la caractéristique I(V) avec l'axe des ordonnées. Il caractérise le courant de sortie de la cellule si la charge à ses bornes est d'impédance nulle.

$V_{co}$  la tension de circuit ouvert, qui est le point d'intersection de la caractéristique I(V) avec l'axe des abscisses. Elle correspond à la différence de potentiel mesurée lorsque le courant de sortie est nul.

FF le facteur de forme, qui correspond au ratio de surface entre le rectangle vert et le rectangle rouge de la Figure I.5. C'est le rapport entre la puissance maximale réellement délivrée par la cellule et la puissance maximale de la cellule. Ce paramètre compris entre 0 et 1, on l'exprime en % qualifie la forme plus ou moins rectangulaire de la caractéristique I(V) de la cellule solaire. Si celle-ci était carrée le facteur de forme serait égale à 1, la puissance  $P_m$  sera égale à  $(I_{cc} \times V_{co})$ . Mais, généralement le facteur de forme prend des valeurs entre 0.6 et 0.85.

#### I.4.2 Rendement quantique externe (EQE)

Le rendement quantique est le rapport entre le nombre d'électrons dans le circuit externe et le nombre de photons incidents. Lorsque les photons perdus par réflexion (à la fenêtre de la cellule) et les photons perdus par transmission à travers toute l'épaisseur de la cellule (à cause de l'absorption incomplète) ne sont pas pris en compte, cette grandeur s'appelle alors le rendement quantique interne, IQE (internal quantum efficiency). Dans le cas contraire, ce paramètre s'appelle le rendement quantique externe, EQE (external quantum efficiency). Le rendement quantique externe est défini comme suit:

$$EQE(\lambda) = \frac{J_{cc}(\lambda)}{\phi(\lambda)} \times \frac{E_{ph}(\lambda)}{q} = \frac{J_{cc}(\lambda)}{\phi(\lambda)} \times \frac{hc}{q\lambda} \quad (I.5)$$

Où  $\phi(\lambda)$  est la puissance de l'éclairement reçu par la cellule (W) et  $I_{cc}$  le courant de court-circuit (mA).  $q$  la charge de l'électron (C) et  $E_{ph}$  l'énergie du photon (avec  $E_{ph}(\lambda) = hc/\lambda$ ;  $h$  étant la constante de Planck (J.s),  $c$  la vitesse de la lumière ( $\mu\text{m.s}^{-1}$ ) et  $\lambda$  la longueur d'onde (nm)).

## I.5 Les différents types de cellule photovoltaïque

Dans le photovoltaïque, il existe de nombreuses filières qui peuvent être regroupées en deux grands groupes : la filière silicium et la filière couches minces.

**La filière silicium** regroupe toutes les cellules à base de silicium cristallin ou multicristallin. Elle est composée de cellules silicium à homojonctions et à hétérojonctions. Cette filière domine toujours le marché de la production des modules photovoltaïques : 90 % en 2005 et 67 % en 2008 [6]. Les substrats de silicium cristallin utilisés sont encore assez épais (~250  $\mu\text{m}$ ) et représentent une bonne partie du coût de fabrication d'où la tendance vers l'utilisation de substrats moins épais pour baisser les coûts de fabrication. 25 % constitue le meilleur rendement obtenu en laboratoire par le professeur *Martin Green* de l'UNSW (*University of New South Wales*).

**La filière couches minces** Elle est composée de plusieurs branches :

- Les cellules en couches minces à base silicium amorphe. Les cellules sont soit à simple jonction p-i-n ou bien à jonctions multiples. Les épaisseurs sont de l'ordre du  $\mu\text{m}$  ce qui rend cette filière moins couteuse avec cependant des rendements plus faibles. Les meilleurs rendements (15 %) ont été obtenus avec des triples jonctions.
- Les cellules en couches minces de la famille des chalcopyrites  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$  (CIGS) ou  $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{Se,S})_2$  (CIGSS). Des rendements de l'ordre de 20,1 % ont été obtenus avec des cellules CIGS. La rareté de l'indium et du gallium peut constituer un frein pour cette filière.
- Les cellules multi-jonctions en semi-conducteurs III-V (GaAs, AlGaAs, InGaAsP). De très bons rendements sont obtenus avec cette filière mais les coûts de fabrication sont plus élevés (bâti sous ultravide, croissance très lente). Les cellules sont destinées à des applications spatiales. Un rendement de 32 % a été obtenu avec une triple jonction GaInP/GaAs/Ge sans concentrateur et 41 % avec concentrateur.
- Les cellules organiques qui suscitent un intérêt grandissant notamment avec un coût de fabrication potentiel très faible même si l'encapsulation pour lutter contre l'oxydation reste problématique. Elles sont encore cependant à l'état de recherche avec des

rendements ne dépassant pas 5 %. Les cellules à colorants (Grätzel) sont aussi à bas coûts avec des rendements maximum de 11 % mais le vieillissement rapide de ces cellules est problématique.

A ces deux grandes filières qui occupent l'essentiel du marché photovoltaïque, nous pouvons ajouter les cellules en tellure de Cadmium (Cd étant toxique) et aussi les technologies en gestation (électrons chauds, ionisation par impact, bande intermédiaire). Ces concepts sont à l'état de recherche.

Notre travail est orienté vers la filière silicium et plus particulièrement les cellules à hétérojonctions à base de silicium cristallin.

## **I.6 Avantages et inconvénient de la technologie photovoltaïque**

### **I.6.1 Avantages**

La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux. et le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliWatt au MégaWatt.

### **I.6.2 Inconvénients**

La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé. Le rendement réel de conversion d'un module est faible. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.

## **I.7 Différents domaines d'application**

- Système à courant continu avec un module solaire et une batterie : Eclairage de domicile, Ecoles, Dispensaires, télécommunications etc.
- Système à courant continu avec plusieurs modules solaires et une rame de batteries: habitations, Ecoles, dispensaires, Maisons communautaires, télécommunications et informatiques.
- Système à courant continu sans batterie: Pompage d'eau.

## **I.8 Conclusion**

Dans ce chapitre, une description générale des cellules photovoltaïques a été présentée. Les éléments de base nécessaires à la compréhension du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, son principe de fonctionnement et les deux principales filières de l'industrie photovoltaïque ont été définis et présentés.

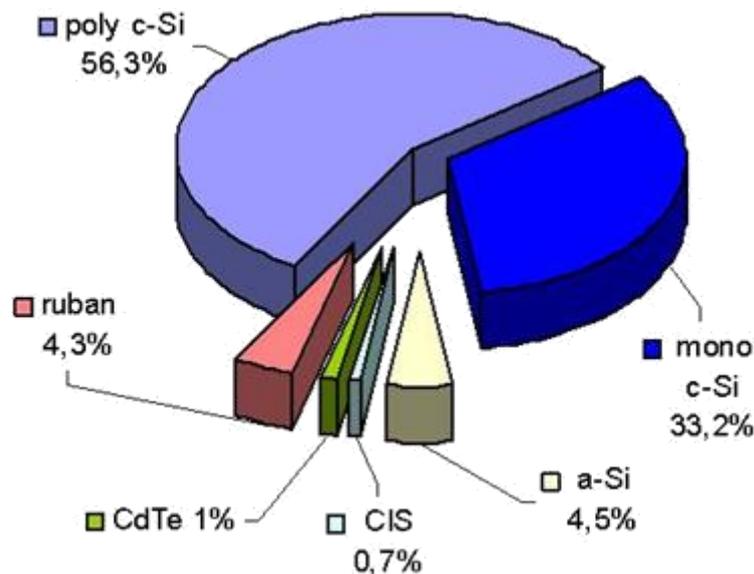
## *Chapitre II*

# **Cellule Photovoltaïque en Silicium**

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, 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, multicristallin), et le silicium amorphe.

## II.1 Propriétés Photovoltaïque de silicium

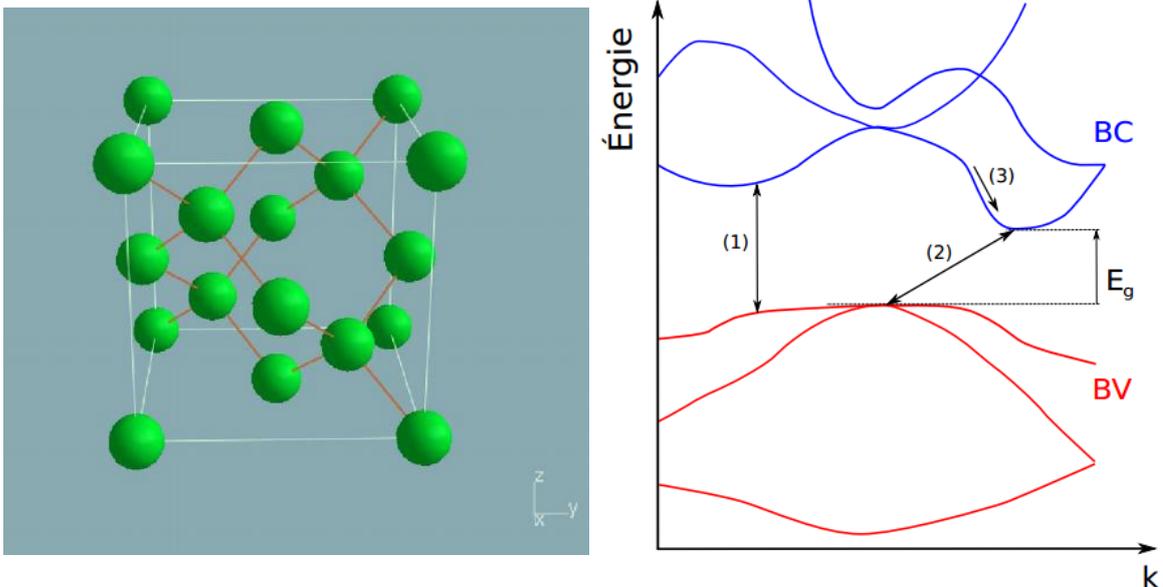
L'industrie photovoltaïque est concentrée à plus de 90% sur l'utilisation du silicium comme matériau de base (figure II.1). Le silicium est le deuxième élément le plus abondant de la croûte terrestre car facilement extrait à partir du sable (et le troisième du matériau terrestre après l'oxygène et le magnésium [7]). il n'est pas toxique comme certains semi-conducteurs III-V ; il possède un oxyde naturel ( $\text{SiO}_2$ ) présentant d'excellentes propriétés électroniques. Il appartient à la colonne IV, troisième ligne du tableau périodique des éléments, situé respectivement entre le carbone et le germanium, et l'aluminium et le phosphore.



**Figure II.1** : Utilisation des matériaux photovoltaïques en 2003 [7].

Il est semiconducteur avec une énergie de gap égale à 1,12 eV à 300 K dans l'état cristallin, et comprise dans la gamme 1,55- 2,1 eV [8, 9] dans l'état amorphe hydrogéné. Entre ces valeurs, on trouve des matériaux composites, intégrant des nano ou micro cristaux de silicium dans des matrices amorphes, allant du silicium polymorphe au microcristallin. Cette flexibilité en fait un bon candidat pour les applications de conversion photovoltaïque terrestres et spatiales.

Le silicium est cristallin avec une énergie de bande interdite  $E_g = E_c - E_v = 1,12$  eV à 300 K lorsque chaque atome de silicium est lié à 4 autres atomes de silicium dans la configuration cubique face centrée comme le montre la figure II.2. La structure cubique du silicium en fait un semiconducteur multivallée à 6 vallées [10] comme le montre la représentation de sa structure des bandes dans l'espace des  $k$  sur la figure II.2. On remarque immédiatement que le gap du silicium est indirect : le maximum de la bande de valence la plus haute n'est pas aligné avec le minimum de la bande de conduction la plus basse, et il existe une dégénérescence d'ordre 2 du plus haut niveau de la bande de valence. Sur cette figure sont aussi représentés plusieurs types de transitions électroniques pouvant avoir lieu : le chemin (1) pour les transitions bande à bande directes, le chemin (2) pour les transitions indirectes, le chemin (3) lors de la thermalisation des électrons.



**Figure II.2 :** Représentation de la maille élémentaire du silicium cristallin (à gauche). Structure de bandes du silicium cristallin et transitions possibles dans l'espace des  $k$  (à droite).

Le silicium peut être dopé en introduisant des atomes dopants dans le réseau. Dans ce cas, l'énergie du système est minimale quand les dopants se substituent à un atome de silicium du réseau. Les atomes dopants tels que le phosphore, l'azote ou l'arsenic sont donneurs d'électrons lorsqu'ils sont liés à quatre atomes de silicium (partageant donc 8 électrons avec eux), un 9<sup>ème</sup> électron en excès est délocalisé de l'atome dopant (ex : ion P+) et libéré dans le matériau à température ambiante. Ce matériau est alors dopé n. Les atomes accepteurs d'électrons tels que le bore, l'aluminium ou le gallium sont eux en déficit d'un électron dans cette configuration, laissant apparaître une charge négative à leur voisinage (ex : ion B-) et un trou au sein du matériau à l'ambiante. Ce matériau est alors dopé p. Pour les applications photovoltaïques, le silicium est le plus souvent dopé avec des atomes de phosphore et de bore.

Le silicium reste cependant le matériau le plus utilisé dans le photovoltaïque (figure II.1). Outre les avantages précités, il bénéficie d'une implantation importante et durable dans l'industrie de la microélectronique. Celle-ci utilise du silicium monocristallin de très haute pureté, obtenu par des méthodes telles que le tirage CZ (Czochralski) [11]. Ce type de matériau, qui présente d'excellentes qualités électroniques, est très coûteux. Le tableau II.1 présente les principaux avantages et inconvénient de cellules photovoltaïques à base de silicium [12].

### **II.1.1 Silicium monocristallin :**

C'est un matériau de très haute pureté, qui est obtenu par (CZ) ou (FZ), le produit fini se présente sous la forme de lingots qu'il faut ensuite découper en plaquettes de 300 m. C'est un matériau qui présente d'excellentes qualités électroniques et permet la fabrication de cellules à haut rendement (18%), mais il est très couteux [13].

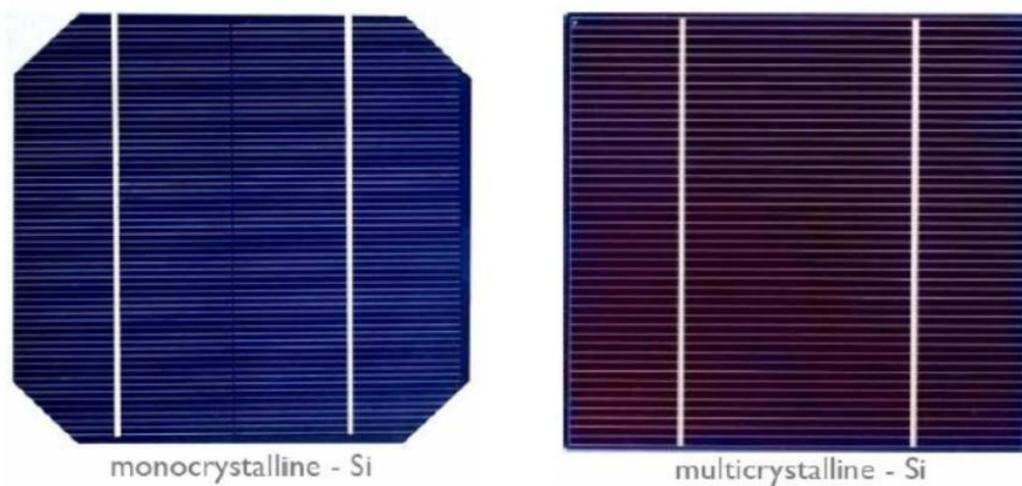
### **II.1.2 Silicium polycristallin**

Il apparaît comme la juxtaposition de petits cristaux monocristallins d'orientations différentes et de dimensions du millimètre ou centimètre. Pour fabriquer ce matériau, on refond tous les déchets provenant du tirage de monocristaux, on obtient des lingots qu'il faut ensuite scier en plaquettes (wafers). Il occupe 55,9% du marché et tend à progresser.

Cellules PV	Avantages	Inconvénients
<b>Silicium monocristallines</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bon rendement, de 14 à 16%.</li> <li>• Bon ratio (d'environ 150 WC/m<sup>2</sup>) ce qui permet un gain de place si nécessaire (surface de 1,75 ha environ nécessaire pour 1MWc de puissance).</li> <li>• Durée de vie importante (+/- 30 ans).</li> <li>• Nombre de fabricants élevé.</li> <li>• Stabilité de production.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût de production élevé.</li> <li>• Rendement faible sous un faible éclaircissement.</li> <li>• Méthode de production laborieuse.</li> </ul>
<b>Silicium polycristallines</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bon rendement, de 11 à 13%.</li> <li>• Bon ratio (environ 120 WC/m<sup>2</sup>) mais cependant un peu moins bon que pour le monocristallin (surface de 2 ha environ nécessaire pour 1MWc de puissance).</li> <li>• Durée de vie importante (+/- 30 ans).</li> <li>• Meilleur marché que le monocristallin.</li> <li>• Cellule carrée permettant un meilleur foisonnement dans un module.</li> <li>• stabilité de production.</li> <li>• adapté à la production à grande échelle.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rendement faible sous un faible éclaircissement.</li> </ul>
<b>Silicium amorphe</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fonctionne avec un éclaircissement faible ou diffus (même par temps couvert).</li> <li>• Un peu moins chère que les autres technologies.</li> <li>• Intégration sur supports souples ou rigides.</li> <li>• Moins sensible aux températures élevées.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rendement faible en plein soleil, de 5% à 7%.</li> <li>• Nécessité de couvrir des surfaces plus importantes que lors de l'utilisation de silicium cristallin.</li> <li>• Performances qui diminuent avec le temps, d'environ 7%.</li> <li>• Durée de vite courte</li> </ul>

**Tableau II.1 :** Tableau comparatif des différents types de cellules photovoltaïques à base de silicium [12].

Les cellules solaires à base de silicium multi cristallin sont moins onéreuses mais relativement moins performantes. La fabrication du silicium polycristallin est moins couteuse d'un point de vue énergétique mais aussi financier : les cellules poly cristallines supportent mieux la présence d'impuretés que les cellules monocristallines [14].



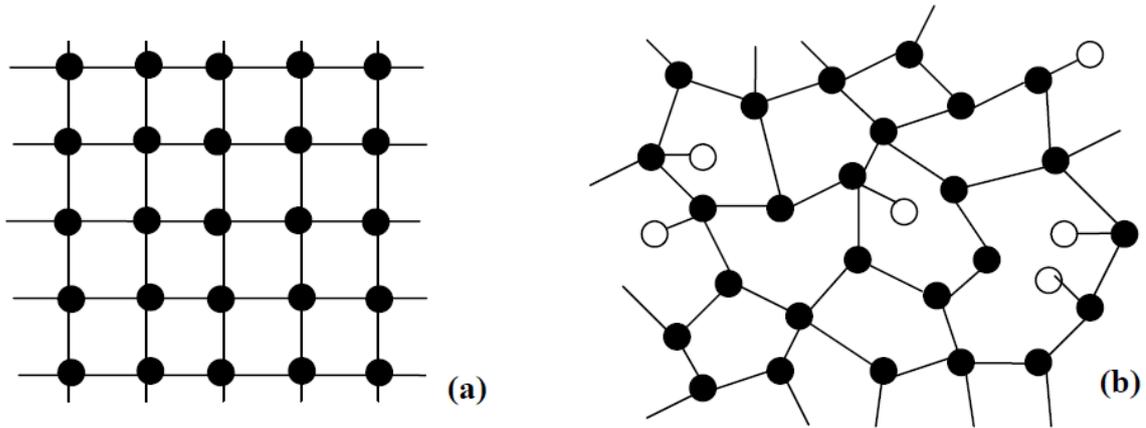
**Figure II.4** : Cellules solaires: au silicium monocristallin et au silicium multicristallin [14].

Actuellement, les wafers ont une taille de 125 x 125 mm pour une épaisseur de 330  $\mu$ m. Aujourd'hui, en plus d'obtenir des wafers plus fins, l'objectif est de réduire les pertes liées au sciage afin d'économiser le silicium. Les industriels du photovoltaïque développent des wafers de nouvelle génération de 210 x 210 mm<sup>2</sup> et plus large encore, tout en réduisant leur épaisseur pour arriver à un objectif de 100  $\mu$ m. L'augmentation de la taille de ces cellules implique donc une augmentation de la puissance produite et donc du courant.

### II.1.3 Silicium amorphe

La structure du silicium amorphe est, par opposition à celle du silicium cristallin (réseau régulier d'atomes sur la figure II.5(a)), un réseau aléatoire d'atomes qui conserve un ordre local (à courte distance). En effet, une distribution régulière d'atomes est respectée pour les premiers voisins (ordre à courte distance) mais plus on s'éloigne d'un atome donné plus les longueurs et angles de liaisons fluctuent (désordre à grande distance). Ainsi, les positions atomiques sont distribuées aléatoirement et une grande partie des liaisons de covalence sont brisées. Les atomes du réseau aléatoire se caractérisent non plus par leur position mais plutôt

par le nombre de liaisons qu'ils ont avec leurs voisins : c'est la notion de coordination qui a été introduite par *Zachariasen* en 1932. La figure II.5(b) montre un exemple de réseau aléatoire dans le silicium amorphe. Certaines liaisons ne sont pas satisfaites tandis que d'autres sont reliées à des atomes d'hydrogène.



**Figure II.5 :** Réseaux (a) périodique dans le silicium cristallin et (b) aléatoire dans le silicium amorphe. ○ hydrogène ● silicium.

La périodicité du réseau cristallin est à la base de la théorie des semi-conducteurs. L'application du théorème de Bloch et la résolution de l'équation de Schrödinger en utilisant un potentiel périodique permettent de déterminer l'existence d'une structure de bandes. Pour les semi-conducteurs à 0 K l'avant dernière bande (bande de valence) est totalement remplie et la dernière bande (bande de conduction) est totalement vide. Ces deux bandes sont séparées par une bande interdite (gap en anglais). Dans le silicium amorphe, le réseau d'atomes est aléatoire ce qui rend inopérant cette approche. Mais, les travaux de *Thorpe* et *Weaire* en 1971 ont montré que la périodicité du réseau (ordre à longue distance) n'est pas une condition nécessaire à l'existence d'une bande interdite dans le silicium. Les travaux d'*Anderson* ont montré quant à eux les phénomènes de localisation de la fonction d'onde de l'électron avec un désordre croissant [15]. Il existe des états localisés dans la bande interdite ou en bord de bande (de conduction ou de valence). Ainsi, dans le silicium amorphe, les défauts ont pour origine :

- le désordre dans le matériau dû la distorsion des liaisons (variations des longueurs et angles de liaison) qui fait apparaître des états dans la bande interdite au voisinage des bandes de valence et de conduction. Ces états sont appelés queues de bande.

- Les liaisons Si-Si brisées (ou pendantes) qui font apparaître des états profonds. Ces états sont situés au milieu de la bande interdite. Le dopage du silicium amorphe est possible en diminuant ces états profonds par l'introduction d'atomes d'hydrogène qui diminuent le nombre de liaisons pendantes.

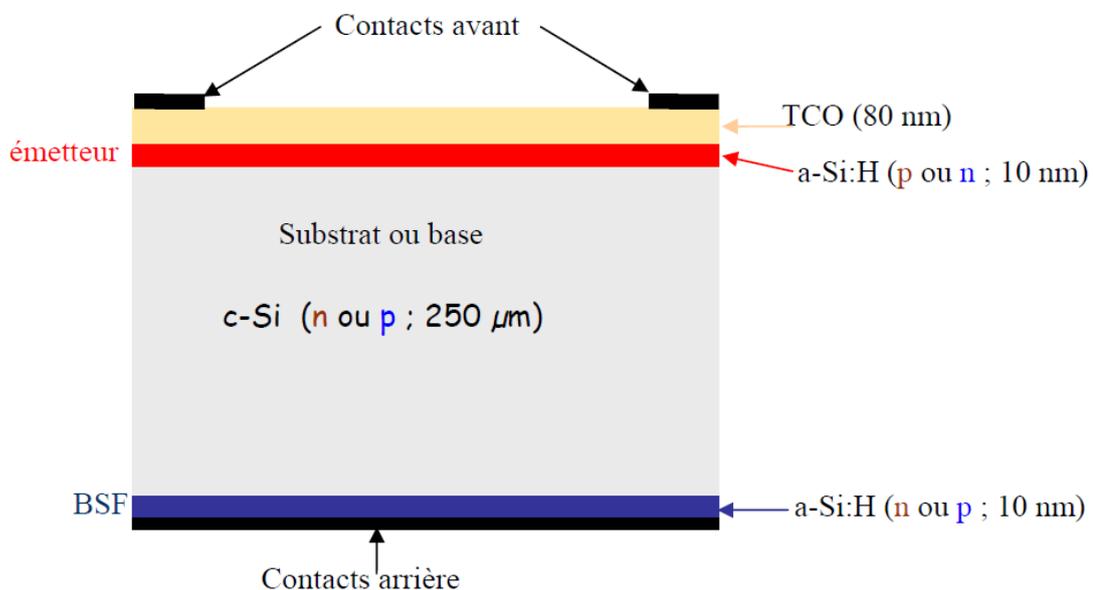
Les premières études sur le silicium amorphe remontent au début des années soixante. Ces études font suite à un intérêt grandissant pour les semi-conducteurs amorphes en général. Les premiers dépôts réalisés ont révélé une densité élevée de défauts profonds (de l'ordre de  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ) dans le silicium amorphe qui empêchait son dopage et dégradait en même temps les propriétés électroniques (photoconductivité, mobilité des porteurs). Avec cette densité élevée de défauts profonds, le niveau de Fermi reste bloqué et les atomes dopants introduits sont inactifs. Le dopage du silicium amorphe est rendu possible grâce à l'introduction de l'hydrogène. En effet, l'hydrogène atomique sature les liaisons pendantes ce qui se traduit par une baisse de la densité de défauts profonds jusqu'à quelques  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  pour un bon silicium amorphe hydrogéné. La concentration d'hydrogène dans le silicium amorphe hydrogéné varie de 6 % à 35 % car son niveau final dépend du substrat, du plasma, du dopage, de la température de dépôt et des éventuels recuits. Spear et LeComber ont réussi en 1975 à doper le silicium amorphe hydrogéné avec du phosphore (type n) et du bore (type p) [16]. Dès lors, le silicium amorphe devenait un matériau utile car pouvant être intégrés dans des dispositifs classiques (jonctions p-n, transistors). Les premières cellules solaires à base de silicium amorphe hydrogéné furent réalisées par Carlson en 1976 avec des rendements de conversion allant de 2 % à 2,5 % [17].

Le silicium amorphe hydrogéné est un matériau qui possède plusieurs avantages. Il peut être déposé uniformément sur de grandes surfaces et à faible coût. Les applications possibles avec ce matériau sont multiples : les cellules photovoltaïques (diodes p-i-n ou cellules à hétérojonctions), les matrices d'adressages pour écrans plats TFT-LCD, les détecteurs optoélectroniques à bas coût (diodes p-i-n), détecteurs de rayonnements (le a-Si:H a une bonne résistance aux radiations, la structure du dispositif est aussi de type diode p-i-n)...

## II.4 Cellules photovoltaïques à hétérojonctions de silicium HIT

### II.4.1 Structure de base de la cellule HIT

La figure II.6 représente la structure conventionnelle d'une cellule silicium à hétérojonctions où les contacts sont placés sur les deux faces de la structure. Sur un substrat de silicium cristallin, sont déposées sur les deux faces des couches de silicium amorphe hydrogéné qui vont créer des hétérojonctions entre le silicium cristallin et le silicium amorphe.



**Figure II.6** : Structure d'une cellule photovoltaïque silicium à hétérojonctions.

La couche de a-Si:H déposée sur la face avant (face éclairée) a un dopage différent du substrat c-Si et est appelée émetteur. La couche de a-Si:H déposée sur la face arrière est du même type de dopage que le substrat et est appelée BSF (*Back Surface Field*). Au dessus de l'émetteur est ensuite déposé un oxyde transparent conducteur. Les contacts métalliques sont enfin placés sur les deux faces de la cellule.

## II.4.2 Les constituants de base de la cellule silicium à hétérojonctions

### II.4.2.1 L'oxyde transparent conducteur

Dans la structure standard d'une cellule photovoltaïque, un oxyde transparent conducteur est placé sur la face avant (face éclairée) de la cellule. Le TCO doit avoir certaines propriétés :

- Il doit être avoir une excellente transparence optique. Etant placé sur la face avant, cette condition est nécessaire pour avoir le maximum de lumière qui pénètre dans la cellule pour générer des paires électron-trou.
- Il doit avoir une bonne conductivité pour assurer la collecte des porteurs.
- Il doit aussi avoir une bonne adhérence sur une variété de substrats.

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

L'oxyde d'indium dopé à l'étain nommé ITO (*Indium Tin Oxide*) est l'oxyde transparent conducteur le plus connu et aussi le plus utilisé. L'ITO possède en effet d'excellents propriétés : transparence supérieure à 80 % voire 90 % sur le spectre visible, résistivité faible de  $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$  à  $5 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$  pour les meilleurs ITO mais pouvant excéder  $5 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$  pour des ITO médiocres, et une très bonne adhérence sur une multitude de substrats [18].

Pour les cellules à contact arrière, les TCO en face avant sont remplacés par des matériaux qui joueront à la fois le rôle de couche antireflet et de couche de passivation de la surface du substrat c-Si. Le nitrure de silicium ( $\text{SiN}_x$ ) est généralement utilisé pour ce type de structure.

### II.4.2.2 L'émetteur

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

### II.4.2.3 BSF (Back Surface Field)

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

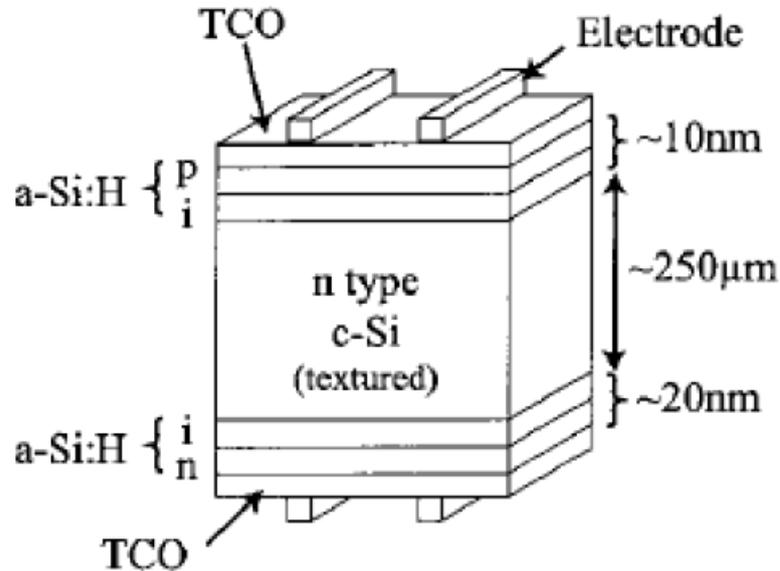
### II.4.2.4 Les contacts

Les contacts métalliques sont placés sur les deux faces de la cellule pour les structures standards représentées sur la figure II.6. Ces contacts permettent de collecter le courant photogénéré. Les contacts doivent être ohmiques, c'est-à-dire que la caractéristique  $I=f(V)$  du contact doit être linéaire. La résistance des contacts est un paramètre très important. La forte résistance des contacts augmente la résistance série de la cellule et baisse le facteur de forme et le rendement. Différents procédés sont utilisés pour réaliser les contacts. Dans le cadre des cellules photovoltaïques industrielles en silicium multicristallin, les contacts sont généralement réalisés par sérigraphie. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, la pulvérisation cathodique ou l'évaporation sous vide sont utilisées.

## II.5 Développement et avantages de la technologie silicium à hétérojonctions

Les premiers composants à base d'hétérojonctions a-Si:H/c-Si (diode) ont été réalisés par l'équipe de **Walter FUHS** [19]. Cette découverte fut exploitée par l'entreprise japonaise SANYO pour réaliser des cellules solaires. SANYO a commencé ces premiers travaux sur les cellules silicium à hétérojonctions a-Si:H/c-Si vers la fin des années 1980 et la première publication a été faite en 1991 [20]. SANYO domine actuellement le marché de la production des cellules silicium à hétérojonctions avec ses cellules HIT (*Heterojunction with Intrinsic Thin film*) dont l'originalité est d'utiliser une couche de silicium amorphe hydrogéné intrinsèque (non dopé) entre le silicium amorphe hydrogéné dopé et le silicium cristallin (Voir

la Figure II.7). Cette couche de silicium amorphe intrinsèque joue un rôle primordial dans les valeurs élevées de  $V_{co}$  obtenues avec la technologie HIT.



**Figure II.7 :** Structure d'une cellule HIT [21].

La technologie des cellules silicium à hétérojonctions possède plusieurs avantages. En effet, elle possède un grand potentiel d'amélioration du rendement avec l'optimisation du dépôt du silicium amorphe (passivation du silicium cristallin). L'intégralité du procédé de fabrication est à basse température (autour de 200 °C) ce qui permet de baisser considérablement le budget thermique. Le procédé basse température permet aussi d'utiliser des substrats moins épais (avec moins de casse) et de prévenir toute dégradation liée à la mauvaise qualité du substrat. La réduction de l'épaisseur du substrat constituant la voie privilégiée pour diminuer le coût des cellules solaires en c-Si ou mc-Si, cette technologie est mieux adaptée que la technologie silicium à homojonctions où le procédé est à haute température. D'autant plus que la réduction de l'épaisseur du substrat rend encore plus critique la passivation des surfaces. La technologie silicium à hétérojonctions est donc simple à mettre en oeuvre et sa mise à l'échelle est facile. Les cellules silicium à hétérojonctions possèdent aussi une meilleure constance du rendement avec la température.

SANYO détient le record du rendement de conversion des cellules silicium à hétérojonctions qui est de 23%. La table II.1 résume l'évolution des performances des cellules HIT durant la dernière décennie. Cette évolution croissante du rendement de conversion des cellules HIT s'explique par une optimisation continue du procédé de fabrication de SANYO :

i) amélioration de la qualité des couches de a-Si:H et de leurs conditions de dépôt (en réduisant les défauts de surface), ii) réduction de l'absorption dans les couches a-Si:H et dans le TCO, iii) optimisation de la grille de métallisation sur la face avant (réduction des résistances série et de la surface de la grille).

V <sub>co</sub> (mV)	I <sub>sc</sub> (A)	FF (%)	$\eta$ (%)	Surface (cm <sup>2</sup> )	date	référence
701.7	3.706	77.9	20.1	101	2000	[23]
712	3.837	78.8	21.5	100.3	Déc 2004	[24]
718	3.852	79	21.8	100.4	Avril 2006	[22]
725	3.909	79.1	22.3	100.5	Juill 2007	[25]
729	3.968	80	23	100.4	Mai 2009	[26]
766.7	3.847	84.2	24	100.4	2013	[12]

**Tableau II.2 :** Evolution des performances des cellules HIT de SANYO ces dix dernières années [21].

## I.6 Conclusions

Dans ce chapitre on a présenté la filière silicium et plus particulièrement les cellules photovoltaïques à hétérojonctions c-Si/a-Si:H en décrivant les deux matériaux utilisés (c-Si et a-Si:H) et les composants de ce type de cellules. Puis, nous avons présenté la technologie silicium à hétérojonctions.

# *Chapitre III*

*Simulation de la cellule  
photovoltaïque à hétérojonction  
de silicium a-si :H/c-si*

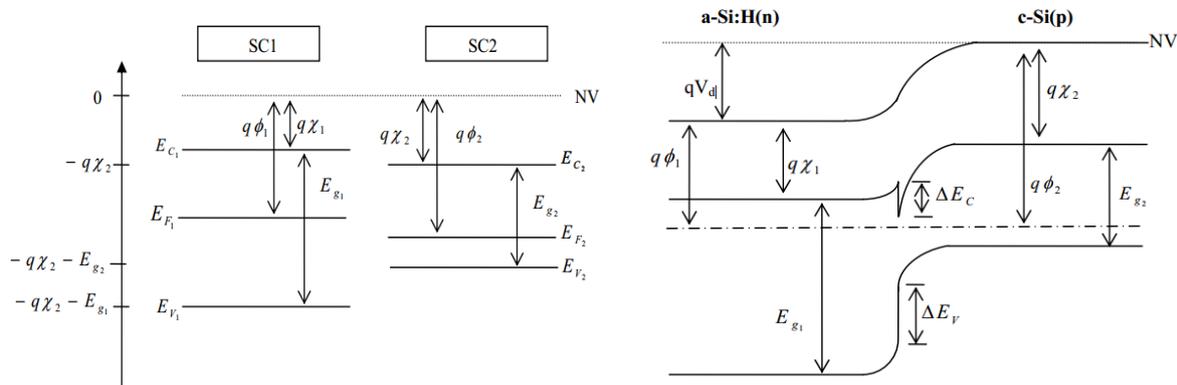
### III.1 Introduction

La simulation numérique est utilisée pour l'optimisation des paramètres d'une structure d'une cellule solaire. Les paramètres à optimiser sont l'épaisseur de la cellule, les niveaux et les profils de dopage, les contacts et les paramètres optique. Les valeurs des paramètres optimaux dépendent, bien sûr, de la structure de la cellule solaire, de la qualité du matériau. L'optimisation de la cellule solaire comprend donc l'étude de l'influence de ces paramètres sur le rendement afin d'obtenir une structure conduisant au rendement maximum.

Dans ce chapitre, nous présentons la structure de la cellule solaire à hétérojonction (silicium amorphe / silicium cristallin) étudiée. Ensuite, le simulateur numérique SCAPS unidimensionnel développé par ELIS, à l'université de Gent en Belgique [1, 2], est présenté et nous terminons par les résultats obtenus.

### III.2 Principe de base de l'hétérojonction a-Si:H/c-Si

Lorsque deux matériaux semi-conducteurs sont en contact, il se produit un échange de charges qui fait tendre le système vers l'équilibre thermodynamique. L'émetteur qui est la zone fortement dopée dans le cas d'une homojonction est remplacé par un matériau à grand gap (ici le silicium amorphe, a-Si:H). Ce matériau à grand gap doit satisfaire certaines conditions comme avoir une faible absorption et avoir une faible recombinaison. Le diagramme de bande dépend des paramètres suivants: le gap ( $E_{g1}$  et  $E_{g2}$ ), l'affinité électronique ( $\chi_1$  et  $\chi_2$ ) et le niveau de dopage ( $\delta_1$  et  $\delta_2$ ) de ces deux matériaux en contact (figure III.1(a)).



**Figure III.1 :** a) Représentation des paramètres électroniques de deux matériaux isolés. Le niveau du vide est le niveau de référence. b) Diagramme de bandes d'une hétérojonction a-Si:H(n)/c-Si(p) à l'équilibre thermodynamique [3].

Lors du raccordement des bandes de conduction et de valence, la différence entre les gaps et les affinités électroniques sont à l'origine des discontinuités. La figure III.1(b) représente le diagramme de bande d'une hétérojonction a-Si:H(n)/c-Si(p). Dans ce modèle, on considère que le transport de charges se fait par injection dans les régions quasi-neutres et aussi par les phénomènes de génération/recombinaison dans la zone de charge d'espace. On considère aussi que les quasi-niveaux de Fermi ne varient pas dans la zone de charge d'espace. Le raccordement des bandes de conduction et de valence se fait en respectant les relations suivantes [4]:

$$\text{Le désaccord de la bande de conduction : } \Delta E_c = q(\chi_2 - \chi_1) \quad (\text{III.1})$$

$$\text{Le désaccord de la bande de valence } \Delta E_v = q(\chi_1 - \chi_2) + E_{g1} - E_{g2} \quad (\text{III.2})$$

$$\text{La tension de diffusion } qV_d = q(\phi_2 - \phi_1) \quad (\text{III.3})$$

### **III.3 Simulation numérique de l'hétérojonction a-Si:H/c-Si**

La simulation de l'hétérojonction a-Si:H/c-Si exige de disposer d'un logiciel permettant de simuler les caractéristique électriques. Les logiciels les plus utilisés dans le domaine photovoltaïque pour la simulation numérique sont PC1D, ISE TCAD, Silvaco... Ainsi, plusieurs laboratoires ont développé leur propre logiciel:

- AMPS-1D « Analysis of Microelectronic and Photonic Structures » développé à Pennsylvania State university (USA) par l'équipe du professeur Stephen Fonash [5, 6].
- ASPIN développé à l'université de Ljubljana (Slovénie) [7]
- ASDMP « Amorphous Silicon Device Modelling Program » développé par le professeur Parsathi Chatterjee de l'Indian Association for Cultivation of Science (Kolkata, Inde) [8].
- ASA « AmorphousSemiconductor Analysis » développé à l'université technologique de Delft (Pays Bas) [9].
- ATLAS de Silvaco International (USA) [10].
- AFORS-HET « Automat for Simulation of Heterojunction » développé au Hahn Meintner Institute (Allemagne) [11].
- SCAPS « A Solar Cell Capacitance Simulator » unidimensionnel développé par ELIS, à l'université de Gent en Belgique [1, 2].

### **III.3.1 Présentation de logiciel de simulation SCAPS**

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 : Alex Niemegeers, Marc Burgelman, Koen Decock, Johan Verschraegen, Stefaan Degraeve [1, 2].

Ce logiciel est disponible gratuitement pour la communauté des recherches photovoltaïques (PV) (Instituts et établissements de recherche). Il fonctionne sur PC sous les systèmes d'exploitation Windows 95, 98, NT, 2000, XP, Vista, Windows 7, Windows 8 et occupe 50 MB d'espace sur le disque.

SCAPS est développé pour les cellules de la famille  $\text{CuInSe}_2$  et  $\text{CdTe}$ . Cependant, plusieurs extensions ont amélioré ses capacités de façon à devenir applicable pour les cellules solaires cristallines (de la famille Si et GaAs), ainsi que les cellules solaires amorphes (a-Si et les micro-morphes Si). Un aperçu de ses principales caractéristiques est donné ci-dessous :

- Jusqu'à 7 couches semi-conductrices.
- Presque tous les paramètres peuvent être introduits avec des variations graduées (en dépendance de la composition et la profondeur de la cellule, ex :  $\chi, \epsilon, N_c, N_v, v_{thn}, \mu_n, \mu_p, N_D, N_A$ , tous les pièges (défauts  $N_t$ )).
- Mécanismes de recombinaison : bande-à-bande (directe), Auger, SRH.
- Les niveaux des défauts : en volume ou à l'interface, en considérant leurs états de charge et la recombinaison à leurs niveaux.
- Les niveaux des défauts, type de charge : pas de charge (neutre), monovalent (un seul donneur, accepteur), divalent (double donneur, double accepteur, amphotère), multivalent (défini par l'utilisateur).
- Les niveaux des défauts, distribution énergétique : niveau discret, uniforme, Gauss, sous forme de queue ou bien une combinaison.
- Les niveaux des défauts, propriété optique : excitation directe par la lumière est possible (connu par effet de l'impureté photovoltaïque, IPV).
- Les niveaux des défauts, transitions métastables entre les niveaux.
- Contacts : travail de sortie du métal ou régime de bande plate ; propriété optique (réflexion ou transmission) du filtre.

- Tunneling, inter-bandes (dans la bande de conduction ou dans la bande de valence), tunneling à/ou à partir des états de l'interface.
- Génération : à partir d'un calcul interne ou bien d'un fichier g(x) fourni par l'utilisateur.
- Illumination : plusieurs types de spectre sont disponibles (AM0, AM1.5D, AM1.5G, AM1.5G édition 2, Monochromatique, Blanc, etc.).
- Illumination: du côté p ou n.

### III.3.2 Notions de base

SCAPS s'ouvre avec l'icone 'Action Panel'. La fenêtrer qui s'ouvre est présentée dans la figure III.2.

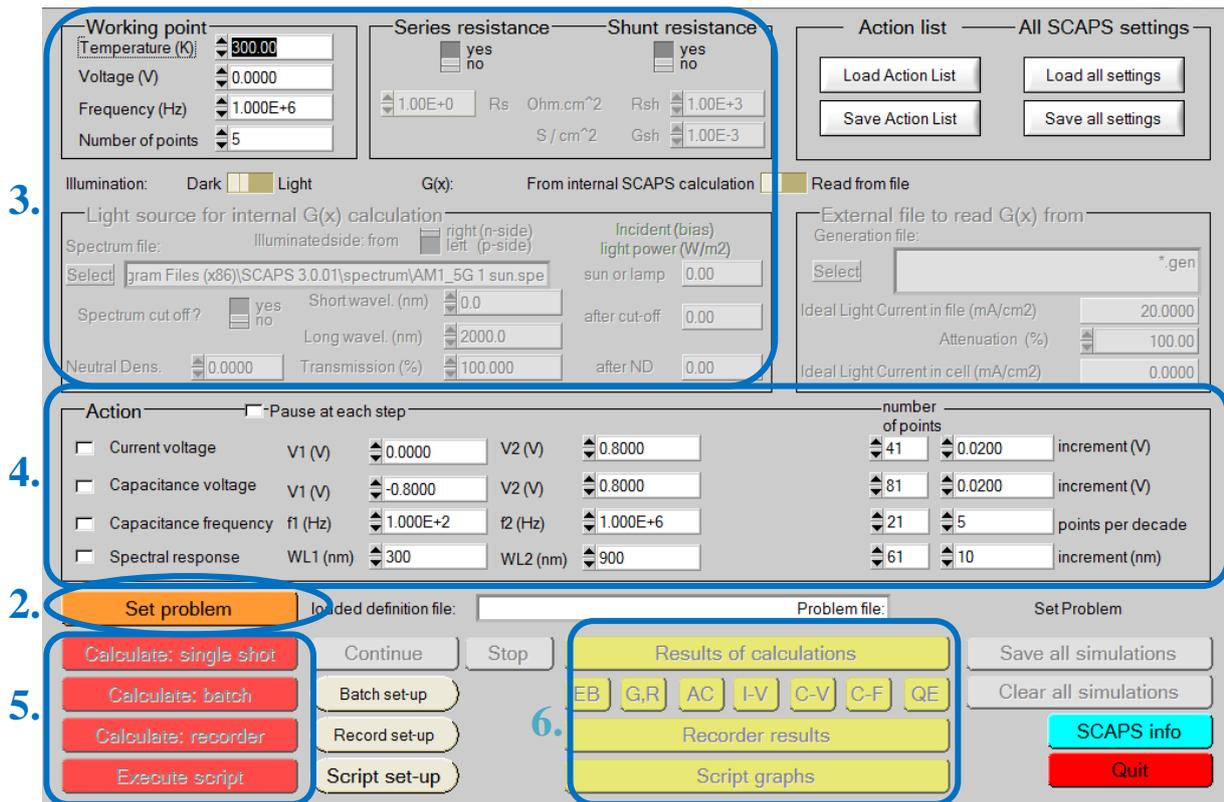


Figure III.2 : Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal.

La signification des blocs est expliquée comme suivant:

1. Lancer SCAPS.
2. Définir le problème, ainsi que la géométrie, les matériaux et toutes les propriétés de la cellule solaire étudiée.
3. Indiquer les circonstances dans lesquelles la simulation est effectuée (spécifier le point de fonctionnement).
4. Indiquer la mesure (la caractéristique) à simuler.
5. Commencer le calcul.
6. Afficher les courbes de simulation.

### **III.3.2.1 Lancer SCAPS**

On clique sur l'icône « SCAPS » sur le bureau, ou bien double-clique sur le fichier SCAPS3200.EXE dans le gestionnaire de fichiers (ou dans n'importe quelle autre version de SCAPS). SCAPS s'ouvre avec le panneau d'action.

### **III.3.2.2 Définir le problème**

On clique sur le bouton SET PROBLEM dans le panneau d'action, et on choisit LOAD dans le coin droit en bas du panneau qui s'ouvre par la suite. On sélectionne et on ouvre (par exemple NUMOS CIGS Baseline.def. Ceci est un fichier exemple d'une cellule solaire à base de CIGS. Par la suite, il est possible de modifier toutes les propriétés de la cellule en cliquant sur 'SET PROBLEM' dans le panneau d'action.

### **III.3.2.3 Définir le point de fonctionnement**

Le point de fonctionnement spécifie les paramètres qui ne sont pas variables dans les mesures de la simulation, et qui sont relatifs à l'opération de mesure. On trouve la température  $T$ , le voltage  $V$  de la polarisation, la fréquence  $f$  et l'illumination (l'obscurité ou la lumière).

### **III.3.2.4 Sélection des caractéristiques à simuler**

Dans la partie Action, on peut choisir un ou plusieurs mesures à simuler: I-V, C-V, C-f et QE ( $\lambda$ ). On peut ajuster également, les valeurs initiales et finales de l'argument, ainsi que le nombre des étapes.

### III.3.2.5 Commencer le calcul

#### A- Afficher les courbes simulées

Après les calculs, SCAPS passe au panneau de bande d'énergie, présenté dans la figure III.3. On peut voir les diagrammes de bandes, les densités des porteurs libres et la densité du courant. On peut faire apparaître les résultats par les commandes SAVE GRAPHS, SHOW, et les valeurs s'affichent par la suite à l'écran. Il est possible de faire du Couper & Coller vers, par ex., Excel, ou sauvegarder les valeurs dans un fichier de données.

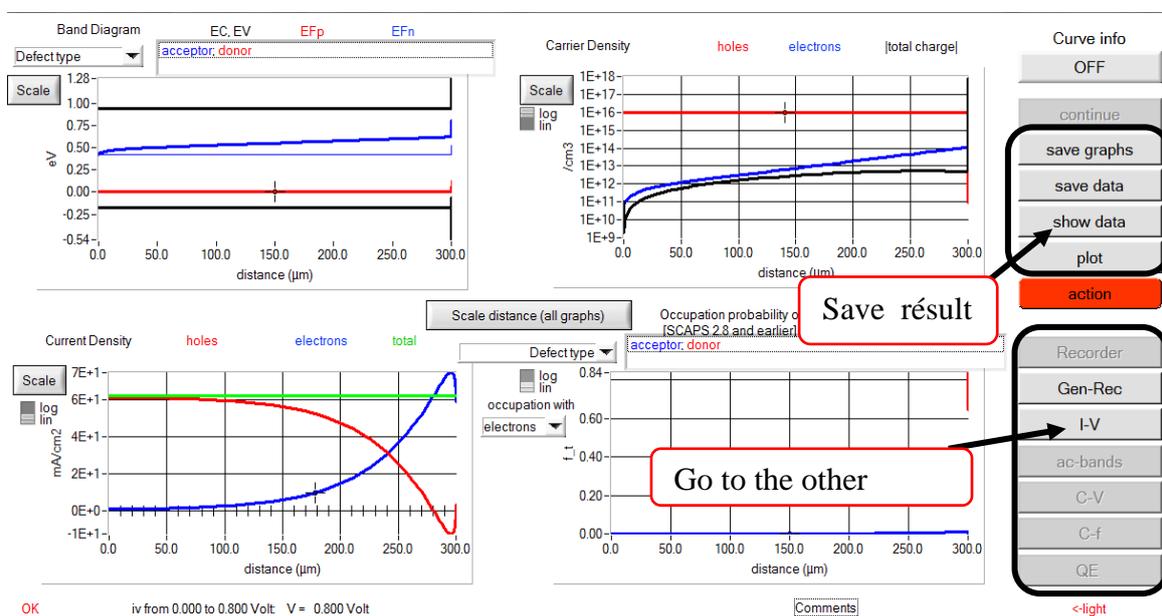


Figure III.3 : Panneau des bandes d'énergie.

#### B- Les courbes I-V

La figure III.4 montre le panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et sous éclairage. Les courbes des taux de recombinaison sont affichées seulement pour la dernière simulation. La couleur de la légende correspond à la couleur de la courbe. Si CURVE INFO est sur ON et si on clique sur une courbe du graphe, un panneau pop-up apparaîtra, avec des informations concernant le graphe, la courbe ainsi que le point cliqué. Le bouton SCALE aide à changer la gamme et l'échelle des axes.

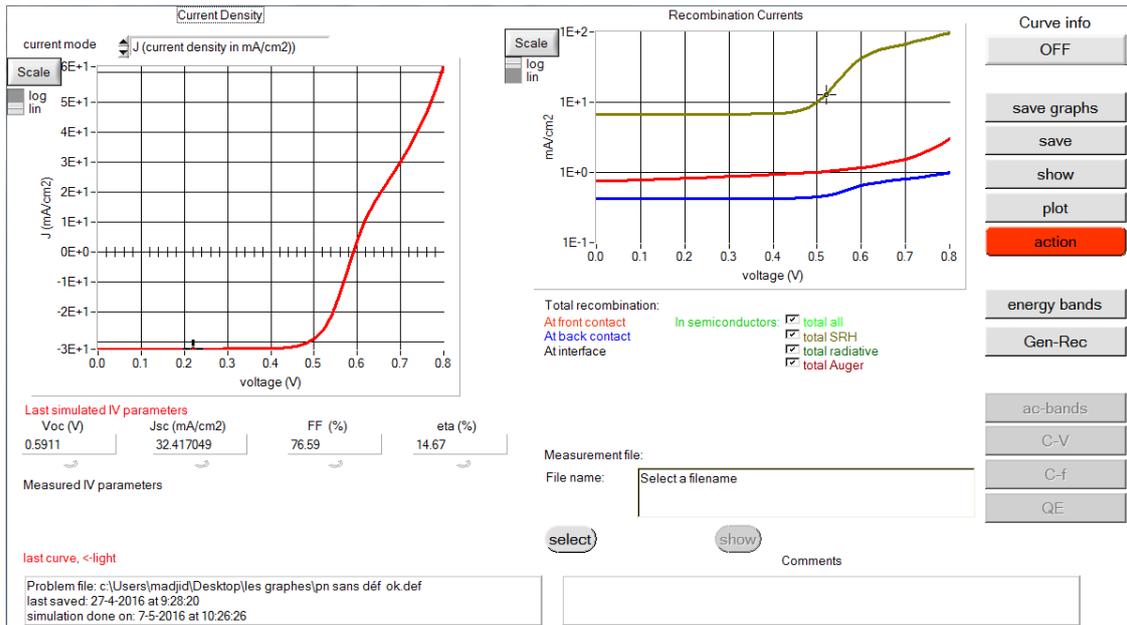


Figure III.4 : Panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et en éclaircissement.

### III.3.3 Définition des différents matériaux d'une cellule à hétérojonctions de silicium amorphe/ silicium cristallin

La méthode recommandée pour introduire une cellule solaire est d'utiliser l'interface graphique du programme. De cette façon on peut introduire interactivement tous les paramètres qui seront contrôlés par SCAPS de manière à ne pas obtenir des valeurs impossibles ou incohérentes.

#### III.3.3.1 Edition de la structure d'une cellule solaire

Quand on clique sur le bouton 'SET PROBLEM' sur le panneau d'action, le panneau 'SOLAR CELL DEFINITION' s'affichera. Ce dernier permettra de créer ou de modifier les structures des cellules solaires et de les enregistrer, ou bien de les charger à partir d'autres fichiers. Ces fichiers de définition sont des fichiers standards ASCII (American Standard Code for Information Interchange) d'extension *.def* qui peuvent s'ouvrir avec Notepad.exe ou Wordpad.exe. Les propriétés des couches, contacts et de l'interface peuvent être modifiées en cliquant sur le bouton approprié. De la même manière, des couches peuvent être rajoutées en cliquant 'ADD LAYER'.

### **III.3.3.2 Contacts**

Les propriétés des contacts peuvent être introduits soit en cliquant sur le bouton du contact avant ou celui du contact arrière sur le panneau de définition de la cellule. Un panneau des propriétés de contact 'CONTACT PROPERTIES PANEL' s'ouvre. Les propriétés des contacts, se divisent en propriétés électriques et optiques. Dans les propriétés électriques, on définit :

- Les vitesses de recombinaison surfaciques des électrons et des trous libres.
- Si le contact a un travail de sortie, ou il est idéal (régime de bande plates).
- La barrière des porteurs majoritaires.
- L'effet tunnel (si on veut en tenir compte).

Pour les propriétés optiques, on peut définir la transmission ou la réflexion, par une valeur ou un fichier de données dans le SCAPS.

### **III.3.3.3 Définition des couches**

En cliquant sur le bouton « add layer », une fenêtre s'ouvre qui contient les différents paramètres du matériau à introduire. Ces paramètres peuvent avoir des distributions uniformes ou non uniformes, selon la physique du matériau. Dans la première case, on introduit le nom de la couche (qui correspond au type du dopage). Dans la deuxième case, l'épaisseur de la couche est introduite. Le troisième block, concerne la pureté du matériau et son profile. Dans le quatrième block, on introduit : le gap d'énergie, l'affinité électronique, la permittivité diélectrique, les densités effectives des bandes de conduction et de valence, les vitesses thermiques des électrons et des trous libres, les mobilités des électrons et des trous. Finalement, une case, qui permet d'ajouter les masses effectives des électrons et des trous si on tient compte du transport des porteurs par effet tunnel. Si le matériau est un composé d'éléments avec des concentrations non uniforme, on peut introduire des variations graduelles des précédents paramètres. Dans le cinquième block, on introduit le dopage (uniforme ou des variations graduelles).

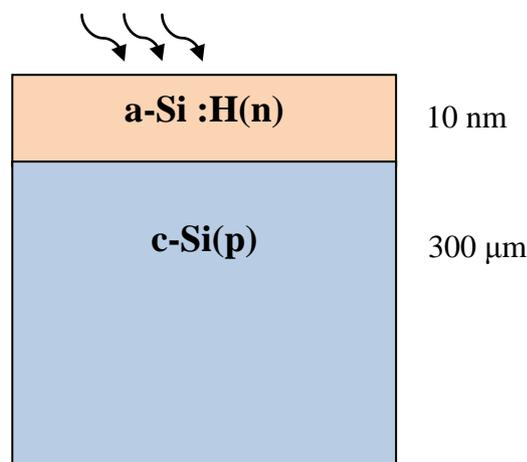
L'absorption de la couche peut être définie par le modèle analytique fourni par SCAPS, comme elle peut être introduite sous forme de données. SCAPS fournit un nombre de données de l'absorption pour plusieurs types de semi-conducteurs. On peut également utiliser d'autres données de l'absorption pour des semi-conducteurs non disponibles dans SCAPS, à

condition que le fichier ait la même extension des fichiers de l'absorption fournis par SCAPS. Le type des recombinaisons en volume présent est indiqué dans le côté droite du panneau des propriétés de la couche. Tous les types des recombinaisons sont présents ; directs ou à travers les pièges. Si on introduit les défauts (pièges) ; ils peuvent être uniformes ou non uniformes, discrets, avec des distributions gaussiennes, donneurs, accepteurs, neutres, monovalents ou divalents. On peut même définir des transitions de porteurs entre les différents niveaux d'énergie des pièges.

### **III.4 Etude de l'hétérojonction a-Si:H (n)/c-Si (p)**

#### **III.4.1 Géométrie de la structure a-Si:H(n)/c-si(p)**

La figure III.5 représente la structure d'une cellule silicium conventionnelle 1D à hétérojonction a-Si:H(n)/c-si(p). Sur un substrat du silicium cristallin c-Si de type *p* avec une épaisseur de 300  $\mu\text{m}$ , est placé un émetteur de silicium amorphe de type *n* a-Si:H(n) de 10 nm. Cette structure a été simulée en introduisant les paramètres pour les couches de silicium cristallin et de silicium amorphe dopé *p* dans le logiciel SCAPS. Les contacts ohmiques sont placés aussi bien sur la face avant que sur la face arrière.



**Figure III.5:** Structure d'une hétérojonction a-Si:H(n)/c-Si(p).

#### **III.4.2 Paramètres de la structure simulée**

La partie II.4.2 du chapitre II décrit les différentes couches utilisées pour la structure simulée. Les paramètres utilisés pour simuler la hétérojonction a-Si:H/c-Si sont présentés dans le tableau III.1.

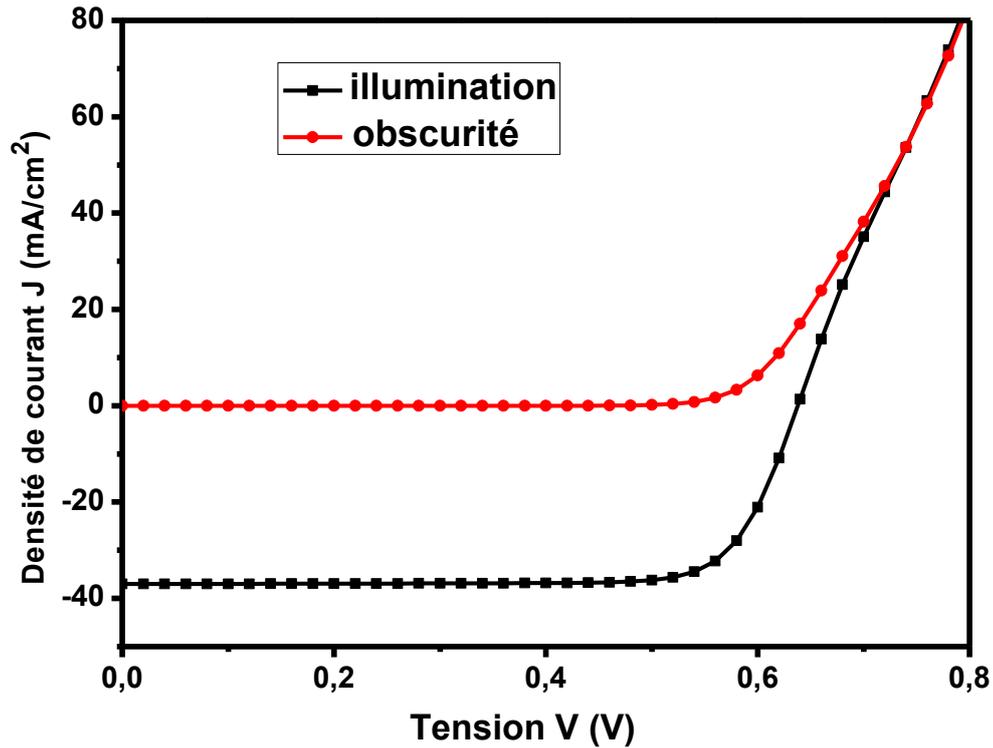
Paramètres	a-Si :H(p <sup>+</sup> )	a-Si :H(i)	a-Si :H(n)	c-Si(p)
Epaisseur (nm)	10	3	10	3.10 <sup>5</sup>
Constante diélectrique	11.9	11.9	11.9	11.9
Affinité électronique (eV)	3.9	3.9	3.9	4.05
Energie de gap (eV)	1.74	1.74	1.74	1.12
Densité de la bande de conduction (cm <sup>-3</sup> )	1.10 <sup>20</sup>	1.10 <sup>20</sup>	1.10 <sup>20</sup>	2.8.10 <sup>19</sup>
Densité de la bande de valence (cm <sup>-3</sup> )	1.10 <sup>20</sup>	1.10 <sup>20</sup>	1.10 <sup>20</sup>	1.04.10 <sup>19</sup>
Mobilité d'électron (cm <sup>2</sup> /Vs)	5	5	5	1040
Mobilité du trou (cm <sup>2</sup> /Vs)	1	1	1	412
Accepteur (cm <sup>-3</sup> )	1.10 <sup>20</sup>	0	0	1.10 <sup>16</sup>
Donneur (cm <sup>-3</sup> )	0	0	1.10 <sup>16</sup>	0
Vitesse thermique des électrons (cm/s)	1.10 <sup>7</sup>	1.10 <sup>7</sup>	1.10 <sup>7</sup>	1.10 <sup>7</sup>
Vitesse thermique des trous (cm/s)	1.10 <sup>7</sup>	1.10 <sup>7</sup>	1.10 <sup>7</sup>	1.10 <sup>7</sup>

**Tableau III.1:** Paramètres de la cellule photovoltaïque à hétérojonction [12].

### III.5 Exploitation des résultats de la simulation

Le fonctionnement de la cellule à hétérojonctions a-Si:H(n)/c-si(p) dépend d'un grand nombre de paramètres. Cette étude permettra de déterminer les paramètres importants dans le fonctionnement de ce type de cellule et l'optimisation des performances de celle-ci.

Pour étudier l'influence d'un paramètre, nous allons le faire varier sur un intervalle donné tout en fixant tous les autres paramètres (Tableau III.1). Pour chaque variation d'un paramètre donné, nous avons généré les caractéristiques courant-tension sous l'éclairement *AM1.5* (100Mw/cm<sup>2</sup>, 300K°) afin d'extraire les caractéristiques de sortie : la tension de circuit ouvert *V<sub>co</sub>*, la densité de courant de court-circuit *J<sub>cc</sub>*, le facteur de forme *FF* et le rendement de conversion  $\eta$  de la cellule.



**Figure III.7 :** Caractéristique  $J(V)$  en obscurité et sous illumination pour une cellule photovoltaïque à hétérojonction a-Si:H(n)/c-Si(p).

La figure III.7 représente la caractéristique de courant-tension  $J(V)$  en obscurité et sous illumination pour une cellule photovoltaïque à hétérojonction a-Si:H(n)/c-Si(p). Pour cette cellule de référence a-Si:H(n)/c-Si(p) en utilisant les paramètres du tableau III.1, les performances obtenues sont les suivantes : tension de circuit ouvert  $V_{co}=637$  mV, densité de courant  $J_{cc}=37,015$  mA.cm<sup>-2</sup>, facteur de forme  $FF=78,96$  % et rendement  $\eta=18,65$  %. D'après la référence [12], les paramètres électriques de la cellule à hétérojonction de silicium a-Si:H(n)/c-Si(p) sont :  $J_{cc} = 36$  mA/cm<sup>2</sup>,  $V_{oc}=628.3$  V,  $FF=82.5\%$  et  $\eta = 18.7\%$ . On constate que les résultats obtenus se rapprochent des valeurs obtenues par N. Dwivedi et *al.* [12].

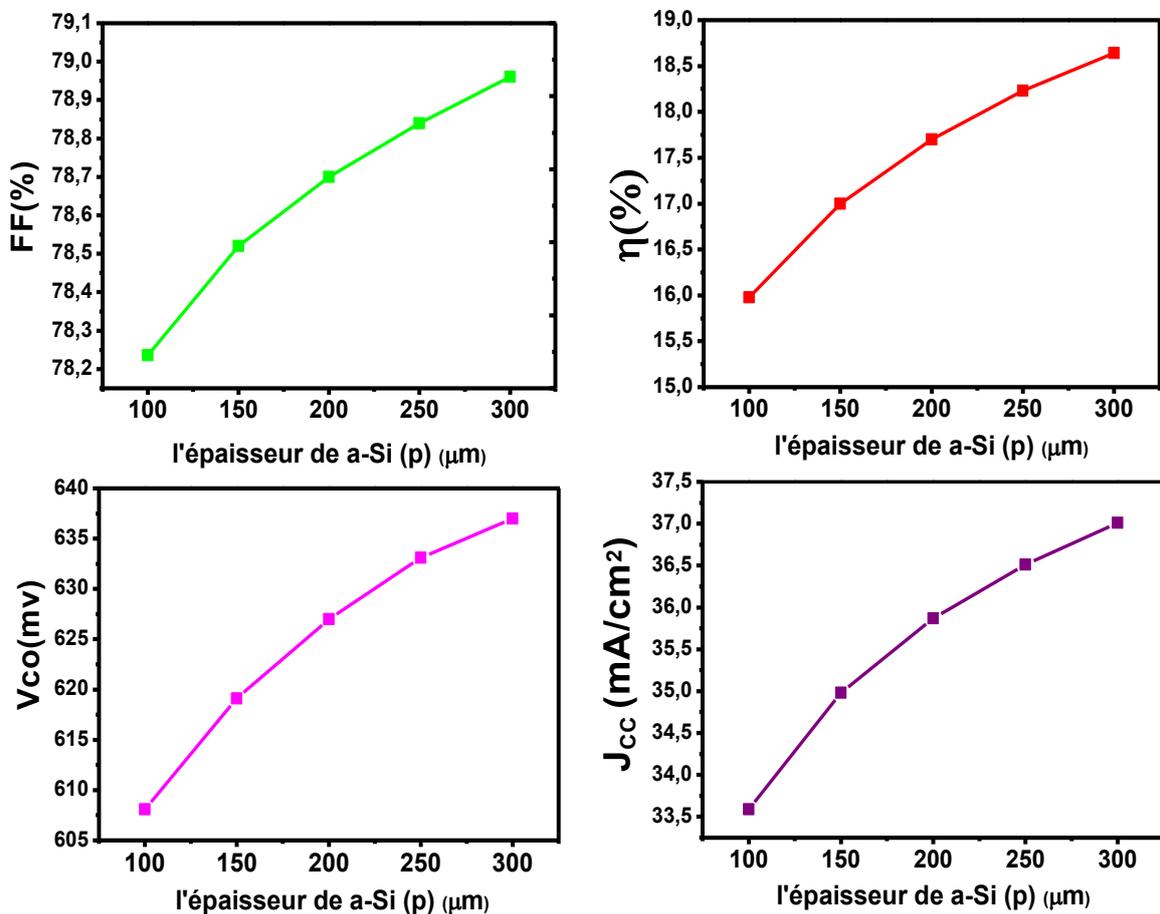
### III.5.1 Etude de l'influence du substrat c-Si

Le substrat c-Si est l'élément de base de la cellule à hétérojonctions. Nous étudions l'influence de l'épaisseur du substrat et de la concentration de dopants sur les performances de la cellule à hétérojonctions a-Si:H(n)/c-Si(p). Les paramètres du silicium amorphe hydrogéné dopé n (a-Si:H(n)) et la concentration de dopants (ND) sont fixées comme indiqués dans le tableau III.1.

### III.5.1.1 Influence de l'épaisseur du substrat c-Si

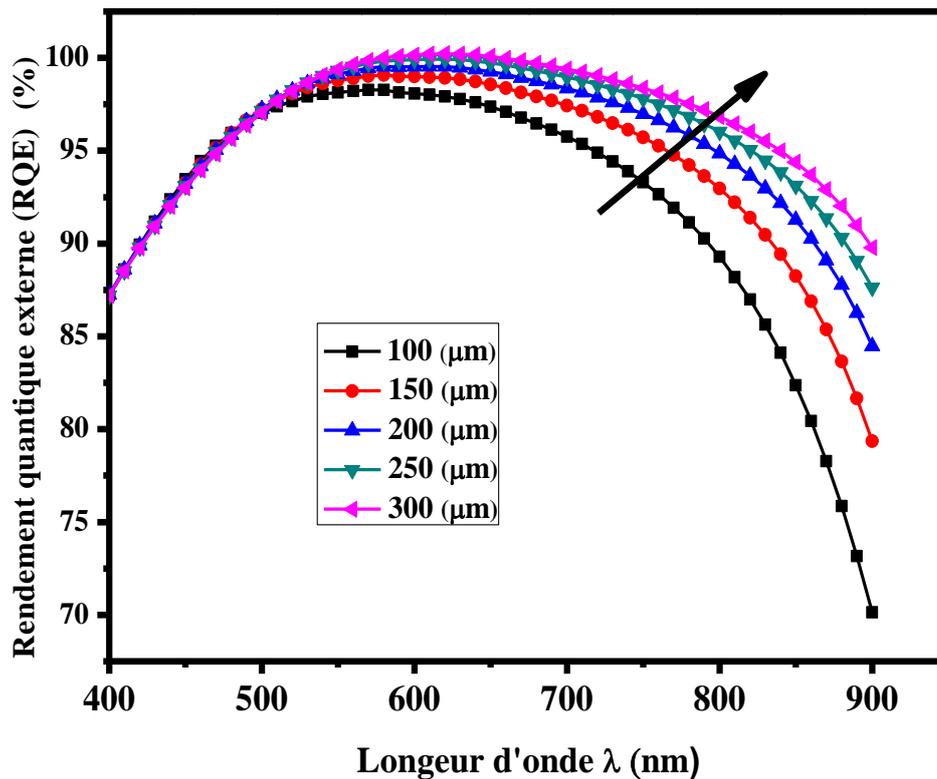
L'épaisseur de c-Si généralement utilisée est d'environ 300  $\mu\text{m}$ . Nous allons étudier dans cette partie l'impact de la réduction de l'épaisseur du substrat c-Si sur les caractéristiques de sortie de la cellule à hétérojonctions a-Si:H(n)/c-Si(p). L'épaisseur du substrat de silicium cristallin c-Si(p) varie entre 100  $\mu\text{m}$  et 300  $\mu\text{m}$ .

La figure III.8 montre l'évolution de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , la densité de courant de court-circuit  $J_{cc}$ , le facteur de forme  $FF$  et le rendement de conversion  $\eta$  de l'hétérojonctions a-Si:H(n)/c-Si(p) avec l'épaisseur du substrat de silicium cristallin c-Si(p).



**Figure III.8 :** Evolution du  $V_{co}$ ,  $J_{cc}$ ,  $FF$  et le rendement de conversion  $\eta$  en fonction de l'épaisseur du substrat c-Si de la cellule à hétérojonctions a-Si:H(n)/c-Si(p).

La figure III.8 montre que  $V_{co}$ ,  $J_{cc}$  augmente lorsque le substrat c-Si augmente de 100  $\mu\text{m}$  à 300  $\mu\text{m}$ . La réduction de l'épaisseur de c-Si se traduit par une baisse de la densité de courant de court-circuit qui s'explique par une diminution de l'absorption des photons de grande longueur d'onde. Par conséquent,  $J_{cc}$  et  $V_{co}$  augmentent, le rendement se déplace de 15,98% à 18,64% lorsque l'épaisseur du substrat c-Si augmente de 100  $\mu\text{m}$  à 300  $\mu\text{m}$ . Ces résultats sont en bon accord avec les résultats de simulation dans la littérature [12].

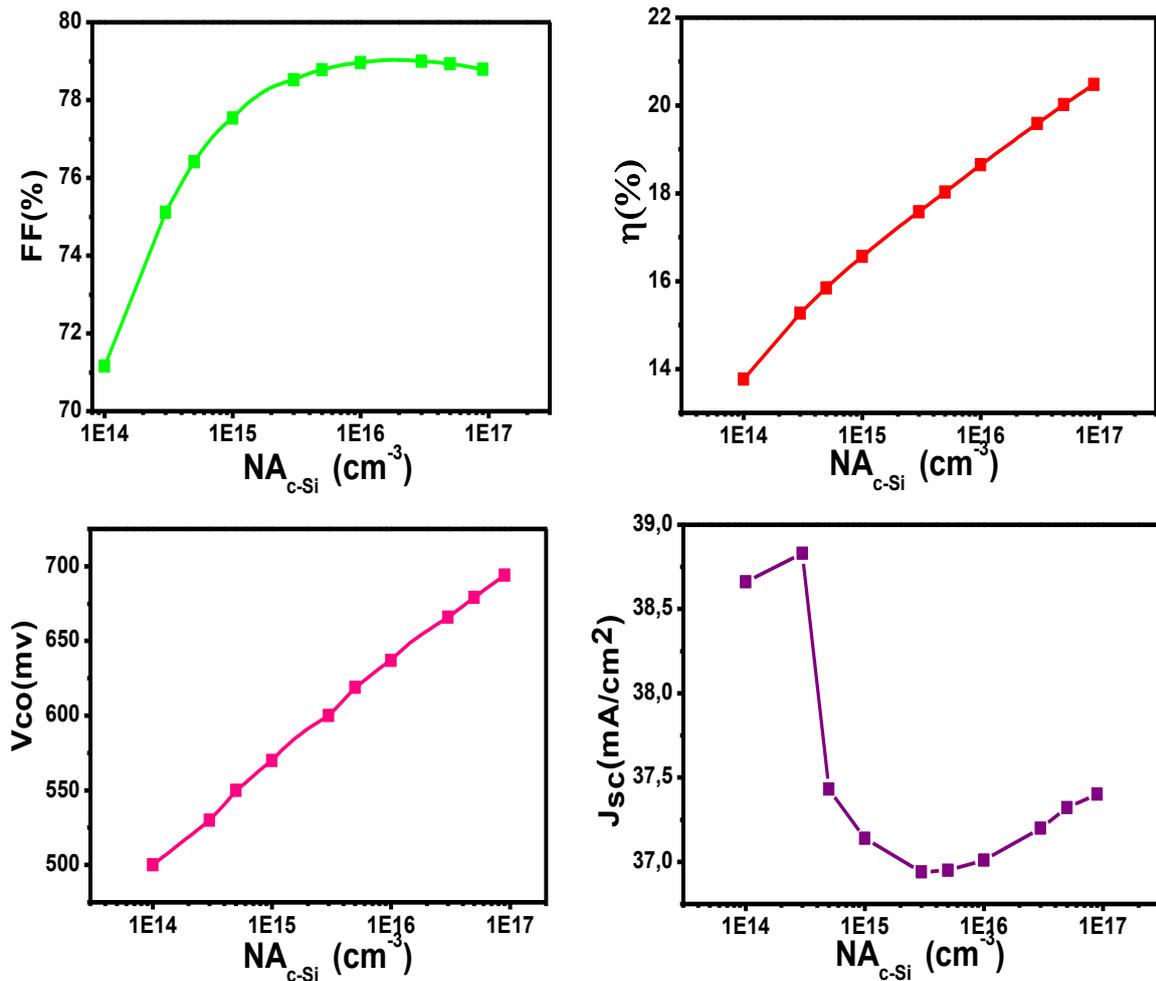


**Figure III.9 :** Evolution du Rendement quantique externe (RQE) de la cellule a-Si:H (n)/c-Si (p) en fonction de l'épaisseur du substrat c-Si (p).

La Figure III.9 présente l'évolution du rendement quantique externe (RQE) de la cellule a-Si:H(n)/c-Si(p) en fonction de l'épaisseur du substrat c-Si(p). Le rendement quantique externe est amélioré avec des épaisseurs du substrat plus grand dans les grandes longueurs d'onde. Ce résultat confirme l'amélioration des performances avec un substrat de 300  $\mu\text{m}$ .

### III.5.1.2 Influence du dopage du substrat c-Si(p)

Dans la suite de nos simulations, nous avons utilisé les mêmes paramètres du silicium amorphe hydrogéné a-Si:H(n) mentionnées au tableau III.1 pour faire l'étude en fonction de la concentration de dopants du substrat c-Si(p). La concentration de dopants du substrat c-Si(p) comprise entre  $1.10^{14} \text{ cm}^{-3}$  et  $1.10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .



**Figure III.10** Evolution du  $V_{co}$ ,  $J_{cc}$ ,  $FF$  et le rendement de conversion  $\eta$  en fonction du dopage du substrat c-Si de la cellule à hétérojonctions a-Si:H(n)/c-Si(p).

La variation du  $V_{co}$  avec la concentration de dopants est illustrée dans la figure III.10. La tension de circuit ouvert croît de 500 mV à 694 mV avec la concentration de dopants ( $1.10^{14} - 1.10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ). En effet, la tension de diffusion à l'hétérojonction p-n, qui détermine le  $V_{co}$ , croît avec la concentration de dopants.

La densité de courant de court-circuit  $J_{cc}$  diminue lorsque la concentration de dopants augmente comme nous l'observons sur la figure III.10. Quel que soit le type de dopage, la durée de vie des porteurs et leur mobilité diminuent avec une concentration croissante de dopants. Ces dépendances expliquent la baisse de la densité de courant de court-circuit avec une concentration croissante de dopants.

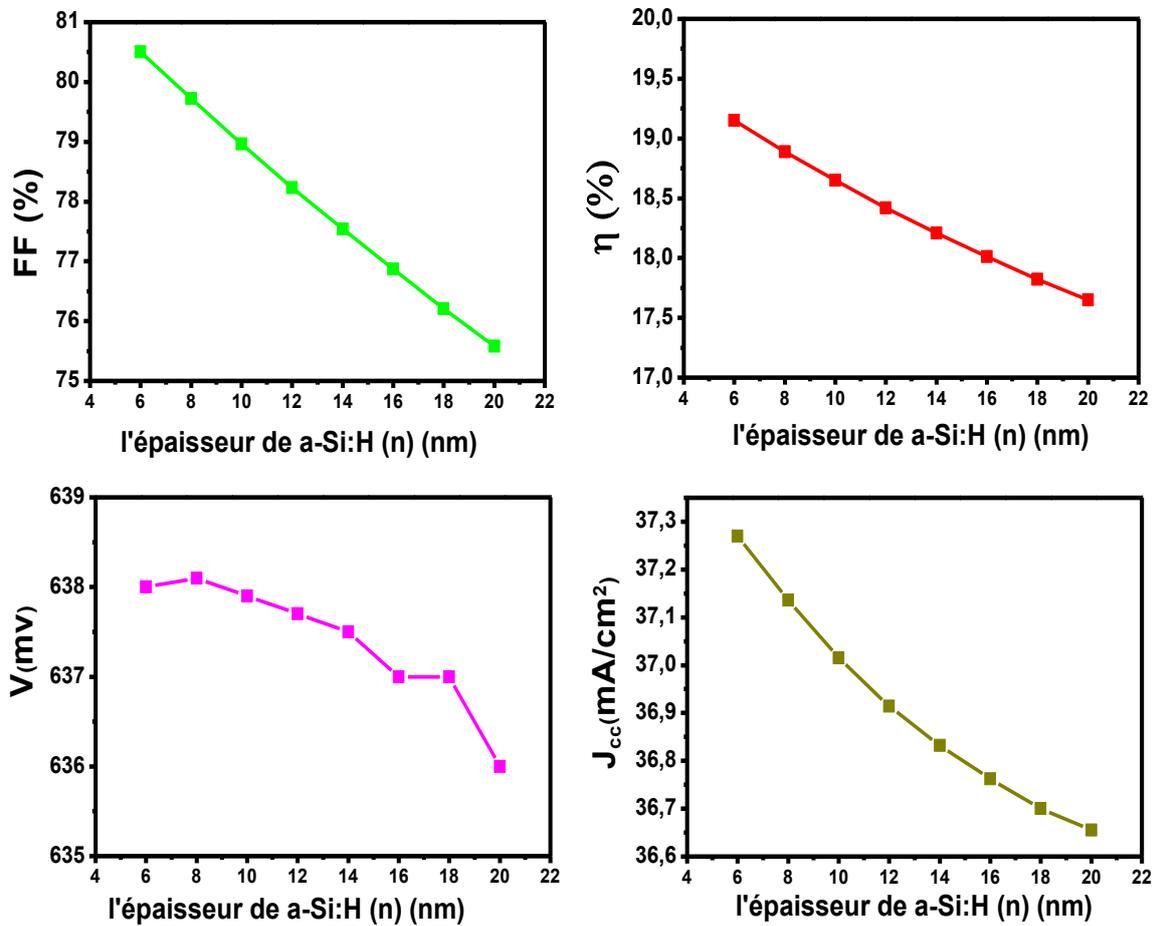
La figure III.10 montre l'évolution du facteur de forme avec la concentration de dopants du substrat c-Si(p). En augmentant la concentration de dopants (NA) du substrat, le facteur de forme s'améliore. Cette amélioration du facteur de forme est liée à la résistivité du substrat c-Si. En effet, la résistivité d'un substrat de c-Si est inversement proportionnelle à la concentration de dopants. Lorsqu'on augmente la concentration de dopants, la résistivité du substrat diminue : ce qui améliore la conduction dans le substrat c-Si et donc le facteur de forme. Les simulations ont été réalisées sans tenir compte des résistances série au niveau des contacts ce qui explique les très bonnes valeurs obtenues. L'augmentation de la densité de courant de court-circuit  $J_{cc}$  pour des valeurs du dopage supérieur à  $1.10^{16} \text{ cm}^{-3}$  entraîne une faible décroissance du facteur de forme FF comme on peut le voir sur la figure III.10.

On constate qu'il y a une valeur optimale du dopage du substrat d'épaisseur de  $300 \mu\text{m}$  égal à  $1.10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , qui correspond au maximum de rendement de la cellule de l'ordre 18.65 %.

### **III.5.2 Influence de l'épaisseur de la couche a-Si:H(n)**

La figure III.11 montre l'évolution de la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , la densité de courant de court-circuit  $J_{cc}$ , le facteur de forme  $FF$  et le rendement de conversion  $\eta$  de la cellule à hétérojonctions a-Si:H(n)/c-Si(p) avec l'épaisseur de la couche a-Si:H(n) varie de 6 nm à 20 nm. On observe que les trois paramètres de la cellule (le rendement  $\eta$ , le courant de court-circuit  $J_{cc}$  et la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ ) dépendent fortement de l'épaisseur de la couche a-Si:H(n).

Pour la cellule à hétérojonctions a-Si:H(n)/c-Si(p) avec l'épaisseur du substrat de  $300\mu\text{m}$ , l'épaisseur de la couche émetteur a-Si:H(n) optimal est égal à 6 nm. Cette couche donne un rendement de 19.15%.



**Figure III.11 :** Evolution du  $V_{co}$ ,  $J_{cc}$ ,  $FF$  et le rendement de conversion  $\eta$  en fonction de l'épaisseur de la couche a-Si:H(n) de la cellule à hétérojonctions a-Si:H(n)/c-Si(p).

### III.5.3 Influence de la couche intrinsèque a-Si:H(i)

Nous avons effectué des simulations de la cellule à hétérojonction en introduisant une fine couche (3 nm) de silicium amorphe intrinsèque a-Si:H(i). La structure de la cellule à hétérojonctions de silicium de type a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p) est représentée sur la figure III.12.

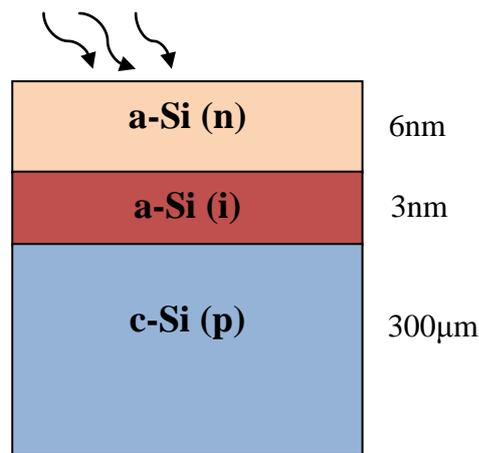


Figure III.12: Structure d'une hétérojonction a-Si :H(n)/a-Si :H(i)/c-Si(p).

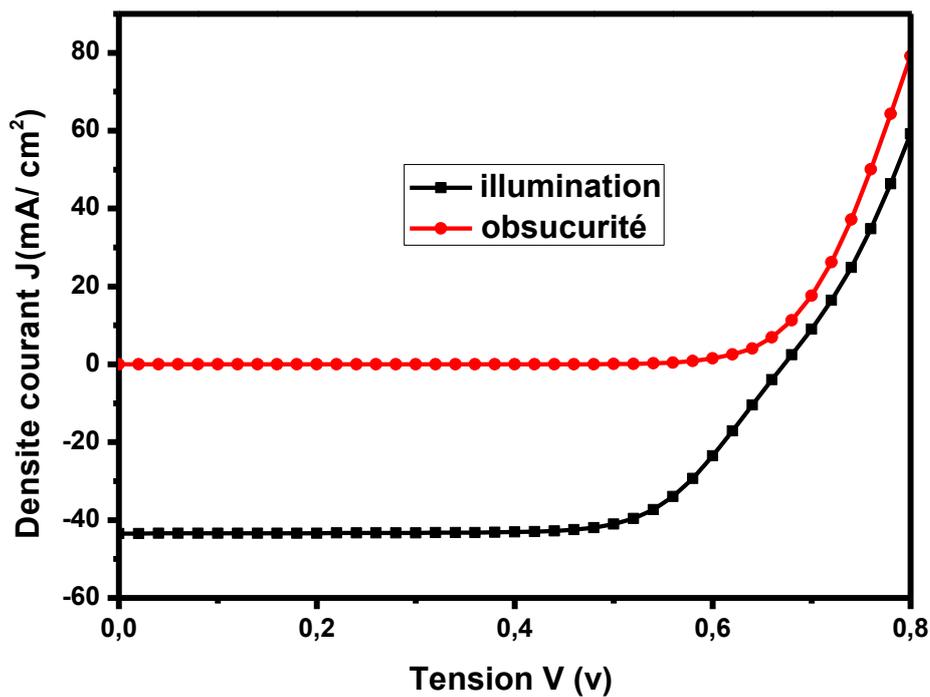


Figure III.13 Caractéristique J(V) sous l'obscurité et sous illumination de cellule photovoltaïque à hétérojonction a-Si :H(n)/a-Si :H(i)/c-Si(p).

La figure III.13 représente la caractéristique J(V) en l'obscurité et sous illumination de cellule photovoltaïque à hétérojonction a-Si :H(n)/a-Si :H(i)/c-Si(p). Les paramètres de sortie de la cellule sont résumés dans le tableau III.2. La cellule à hétérojonction a-Si :H(n)/a-

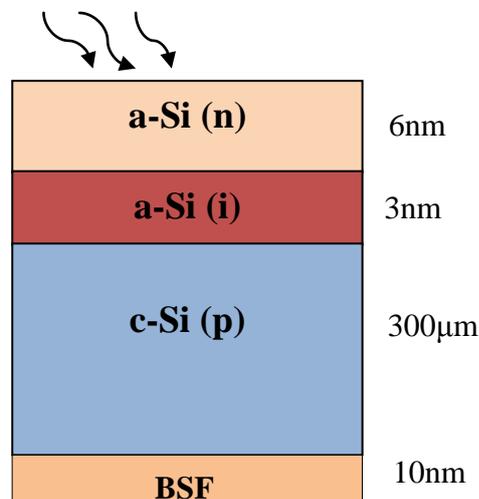
Si :H(i)/c-Si(p) donne un rendement de 19.52%. On constate que l'introduction de cette couche est influencé sur les caractéristiques de sortie de l'hétérojonction a-Si:H(n)/c-Si(p).

	$V_{oc}$ (mV)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	$\eta$ (%)
<b>c-si(p)/a-si :H(n)</b>	637	37.015	78.96	18.65
<b>a-Si :H(n)/a-Si :H(i)/c-Si(p)</b>	615.4	42.94	73.85	19.52

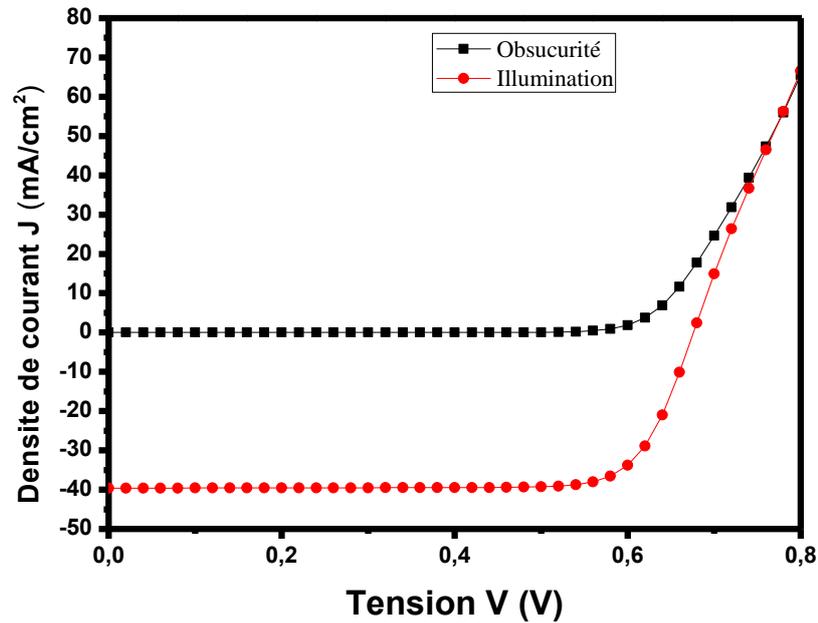
**Tableau III.2** les performance de la cellule à hétérojonction de type a-si:H(n) /c-si(p) et a-Si :H(n)/a-Si :H(i)/c-Si(p).

### III.5.3 Etude de l'influence de la couche du BSF

La figure III.14 représente la structure de la cellule de silicium à hétérojonction de type a-Si :H(n)/a-Si :H(i)/c-Si(p)/BSF. En face arrière de la cellule solaire, nous retrouvons la couche a-Si:H dopée (P+) afin de former le champ arrière BSF d'épaisseur de 10 nm . Nous avons réalisé la simulation de la cellule solaire a-Si:H(n)/a-Si :H(i)/c-Si(p)/ a-Si :H(p+)BSF afin d'analyser l'influence du BSF sur les caractéristiques de la cellule solaire. Les paramètres du BSF sont regroupés dans le tableau III.1.



**Figure III.14:** Structure de l'hétérojonction a-Si :H(n)/a-Si :H(i)/c-Si(p)/ a-Si :H(p+) « BSF »



**Figure III.26** Caractéristique courant-tension sous obscurité et sous illumination de cellule photovoltaïque à hétérojonction a-Si :H(n)/a-Si :H(i)/c-Si(p)/a-Si :H(p+).

La figure III.15 représente la caractéristique  $J(V)$  sous l'obscurité et sous illumination de cellule photovoltaïque à hétérojonctions a-Si :H(n)/a-Si :H(i)/c-Si(p)/a-Si :H(p)/ a-Si :H(p+) « BSF ». L'introduction de la couche BSF donne une amélioration importante de toutes les paramètres de la cellule HIT (tableau III.3).

Cellule HIT	V <sub>co</sub> (mV)	J <sub>cc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	FF(%)	η(%)
a-Si :H(n)/c-Si(p)	637	37,015	78,96 %	18,65 %.
a-Si :H(n)/a-Si :H(i)/c-Si(p)	615.4	42.94	73.85	19.52
a-Si :H(n)/a-Si :H(i)/c-Si(p)/BSF	676.3	39.61	79.5	21.32%

**Tableau III.3** les performances des cellules en silicium à hétérojonction HIT.

### III.6 Conclusion

La simulation numérique a été utilisée dans ce travail afin de déterminer les paramètres les plus importants pour le fonctionnement des cellules solaires à hétérojonction de silicium HIT et d'optimiser les paramètres physiques et géométriques de la cellule en vue d'obtenir un rendement maximum.

## *Conclusion générale*

Les cellules basées sur des technologies en couches minces sont souvent moins chères à fabriquer que celles en silicium cristallin et ont l'avantage de pouvoir être conçues sur de grandes surfaces, mais avec des rendements généralement inférieurs. La technologie des cellules HIT combinant le silicium cristallin et le silicium amorphe hydrogéné (structure HIT, pour Heterojunction with Intrinsic Thin layer) a montré qu'elle peut rivaliser avec les jonctions de silicium conventionnelles, avec l'avantage de combiner les rendements élevés du silicium cristallin et les grandes surfaces des couches minces. Cette étude est orientée vers les cellules à base de silicium à hétérojonction a-Si:H/c-Si(p) et a permis de déterminer les paramètres géométriques et électroniques qui conditionnent les performances des cellules solaires de silicium à hétérojonctions HIT en utilisant le logiciel SCAPS.

Pour chaque optimisation, nous avons trouvé les caractéristiques de sortie de la cellule HIT : la tension de circuit ouvert  $V_{co}$ , la densité de courant de court-circuit  $J_{cc}$ , le facteur de forme FF et le rendement de conversion  $\eta$  de la cellule. Les performances de la cellule de type Si:H(n)/c-Si(p) obtenues sont les suivantes : tension de circuit ouvert  $V_{co} = 637$  mV, densité de courant  $J_{cc} = 37,015$  mA.cm<sup>-2</sup>, facteur de forme FF = 78,96 % et rendement  $\eta = 18,65$  %. Ces valeurs se rapprochent des valeurs trouvées dans la littérature. Ensuite nous avons étudié l'impact de la réduction de l'épaisseur du substrat c-Si sur les performances de la cellule à hétérojonctions a-Si:H(n)/c-Si(p). Lorsque l'épaisseur du substrat c-Si augmente de 100  $\mu$ m à 300  $\mu$ m, le rendement s'augmente de 15,98 % à 18,64 %. De plus, le rendement quantique externe est amélioré avec des épaisseurs du substrat plus grand dans les grandes longueurs d'onde. Ce résultat confirme l'amélioration des performances avec un substrat de 300  $\mu$ m. Dans l'étude des performances de la cellule HIT en fonction de la concentration de dopants du substrat c-Si(p), nous avons trouvé qu'il y a une valeur optimale du dopage du substrat égal à  $1.10^{16}$  cm<sup>-3</sup>, qui correspond au maximum de rendement de la cellule de l'ordre 18.65 %. On constate que l'introduction d'une couche fine intrinsèque de 3 nm est influencé sur les caractéristiques de sortie de l'hétérojonction a-Si:H(n)/c-Si(p). La cellule à hétérojonction a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p) donne un rendement de 19.52%. Les paramètres électroniques ont été améliorés de sorte d'obtenir un rendement de conversion de 21.32 % sur la cellule photovoltaïque à hétérojonctions a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p)/a-Si:H(p)/a-Si:H(p+) après l'introduction de la couche BSF d'épaisseur 10 nm.

# Sommaire

Remerciement	
Dédicace	
Résumé	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des symboles	
Introduction générale.....	1
Chapitre I :Généralités sur les cellules photovoltaïques	
I.1 Historique de l'effet photovoltaïque.....	3
I.2 Rayonnement solaire.....	3
I.3 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	6
I.4 Paramètres caractéristiques d'une cellule photovoltaïque.....	7
I.4.1 Caractéristiques électrique d'une cellule photovoltaïque.....	7
I.4.2 Rendement quantique externe (EQE).....	10
I.5 Les différents types de cellule photovoltaïque.....	10
I.6 Avantages et inconvénient de la technologie photovoltaïque.....	12
I.7 Différents domaines d'application.....	12
I.8 Conclusion.....	12
Chapitre II : Cellule Photovoltaïque en Silicium	
II.1 Propriétés Photovoltaïque de silicium.....	13
II.1.1 Silicium monocristallin.....	16
II.1.2 Silicium poly cristallin.....	16
II.1.3 Silicium amorphe.....	18
II.4 Cellules photovoltaïques à hétérojonctions de silicium HIT.....	20
II.4.1 Structure de base de la cellule HIT.....	20
II.4.2 Les constituants de base de la cellule silicium à hétérojonctions.....	21
II.4.2.1 L'oxyde transparent conducteur.....	21
II.4.2.2 L'émetteur.....	22
II.4.2.3 BSF (Back Surface Field).....	22
II.4.2.4 Les contacts.....	23
II.5 Développement et avantages de la technologie silicium à hétérojonctio....	23
II.6 Conclusions.....	25
Chapitre III : Simulation de la cellule photovoltaïque à hétérojonction de silicium a-si : H/c-si	
III.1 Introduction .....	26
III.2 Principe de base de l'hétérojonction a-Si:H/c-Si.....	26
III.3 Simulation numérique de l'hétérojonction a-Si:H/c-Si.....	27
III.3.1 Présentation de logiciel de simulation SCAPS.....	28
III.3.2 Notions de base.....	29

III.3.2.1 Lancer SCAPS.....	30
III.3.2.2 Définir le problème.....	30
III.3.2.3 Définir le point de fonctionnement.....	30
III.3.2.4 Sélection des caractéristiques à simuler.....	30
III.3.2.5 commencer le calcul.....	31
III.3.3 Définition des différents matériaux d'une cellule à hétérojonctions de silicium amorphe/ silicium cristallin.....	32
III.3.3.1 Edition de la structure d'une cellule solaire.....	32
III.3.3.2 Contacts.....	33
III.3.3.3 Définition des couches.....	33
III.4 Etude de l'hétérojonction a-Si:H (n)/c-Si (p).....	34
III.4.1 Géométrie de la structure a-Si:H(n)/c-si(p).....	34
III.4.2 Paramètres de la structure simulée.....	34
III.5 Exploitation des résultats de la simulation.....	35
III.5.1 Etude de l'influence du substrat c-Si.....	36
III.5.1.1 Influence de l'épaisseur du substrat c-Si.....	37
III.5.1.2 Influence du dopage du substrat c-Si(p).....	39
III.5.2 Influence de l'épaisseur de la couche émetteur a-Si:H(n).....	40
III.5.3 Influence de la couche intrinsèque a-Si:H(i).....	41
III.5.3 Etude de l'influence de la couche du BSF.....	43
III.6 Conclusion.....	44
Conclusion générales.....	45
Les Références.....	46

## Les symboles

AM : la masse d'air

$\theta$  : angle de soleil [°]

$E_{\text{photon}}$  : énergie de photon [eV]

$E_g$  : énergie de bande interdite [eV]

$E_c$  : énergie de bande de conduction [eV]

$E_v$  : énergie de bande de valence [eV]

PV : photovoltaïque

ZCE : zone de charge d'espace

$E_F$  : niveau de Fermi [eV]

VD : potentiel de barrière [eV]

Ph : photon

J : jonction

N, n : zone n

P : zone p

R : résistance

$I_0$  : courant de saturation de la diode [mA/cm<sup>2</sup>]

q : la charge de l'électron [C]

k ou  $k_B$  : la constante de Boltzmann

T : la température en degré Kelvin [°K]

$I_{cc}$  : le courant de court-circuit [mA/cm<sup>2</sup>]

$V_{co}$  : la tension de circuit ouvert [mV]

$I_m$  : le courant au point de puissance maximale [mA/cm<sup>2</sup>]

$V_m$  : la tension au point de puissance maximale [mV]

$P_i$  : la puissance incidente [W/m<sup>2</sup>]

$\eta$  : rendement [%]

FF : facteur de forme[%]

EQE : Rendement quantique externe [%]

$\Phi$  : la puissance de l'éclairement reçu[w]

h : constante de Planck [ j.s]

c : vitesse de la lumière [ $\mu\text{m.s}^{-1}$ ]

$\lambda$  : longueur d'onde[nm]

eV : électron volt

BC : bande de conduction

BV : bande de valence

CZ : Czochralski

TCO : oxyde transparent conducteur

a-Si :H :couche en silicium amorphe

c-Si : couche en silicium cristallin

BSF : passiver la face arrière de la cellule

$\chi_{1,2}$  : affinité électronique[eV]

$\delta_{1,2}$  : niveau de dopage[ $\text{cm}^{-3}$ ]

$\Delta E_c$  : désaccord de la bande de conduction

$\Delta E_v$  : désaccord de la bande de valence

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b> : Description de nombre d'air –masse ; <i>AM0</i> (spectre solaire en dehors de l'atmosphère), <i>AM1</i> (spectre solaire au sol lorsque le soleil est situé au zénith) et <i>AM1.5</i> (spectre solaire au sol pour un rayonnement solaire ayant un angle d'incidence de 48,2°).....	4
<b>Figure I.2</b> : Représentation graphique des spectres <i>AM0</i> et <i>AM1.5G</i> .....	5
<b>Figure I.3</b> : a) Transmission d'un photon d'énergie $E_{\text{photon}} < E_g$ dans un matériau semiconducteur. b) Absorption d'un photon d'énergie $E_{\text{photon}} = E_g$ et formation d'une paire électron-trou. c) Absorption d'un photon d'énergie $E_{\text{photon}} > E_g$ , formation d'une paire électron-trou et thermalisation de l'électron par émission de chaleur (phonon).....	6
<b>Figure I.4</b> : Description d'une cellule photovoltaïque .....	7
<b>Figure I.5</b> : Caractéristique courant-tension sous éclairage typique d'une cellule solaire.....	8
<b>Figure II.1</b> : Utilisation des matériaux photovoltaïques en 2003 .....	13
<b>Figure II.2</b> : Représentation de la maille élémentaire du silicium cristallin (à gauche). Structure de bandes du silicium cristallin et transitions possibles dans l'espace des $k$ (à droite).....	14
<b>Figure II.4</b> : Cellules solaires: au silicium monocristallin et au silicium multi cristallin .....	17
<b>Figure II.5</b> : Réseaux <b>(a)</b> périodique dans le silicium cristallin et <b>(b)</b> aléatoire.....	18
<b>Figure II.6</b> : Structure d'une cellule photovoltaïque silicium à hétérojonctions.....	21
<b>Figure II.7</b> : Structure d'une cellule HIT .....	24
<b>Figure III.1</b> : a) Représentation des paramètres électroniques de deux matériaux isolés. Le niveau du vide est le niveau de référence. b) Diagramme de bandes d'une hétérojonction a-Si:H(n)/c-Si(p) à l'équilibre thermodynamique.....	26
<b>Figure III.2.</b> : Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal.....	29
<b>Figure III.3</b> : Panneau des bandes d'énergie.....	31
<b>Figure III.4</b> : Panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et en éclairage.....	32
<b>Figure III.5</b> : structure d'une hétérojonction a-si :H(n)/c-si(p).....	34
<b>Figure III.7</b> : Caractéristique $J(V)$ en obscurité et sous illumination pour une cellule photovoltaïque à hétérojonction a-Si:H(n)/c-Si(p).....	36
<b>Figure III.8</b> : Evolution du $V_{co}$ , $J_{cc}$ , $FF$ et le rendement de conversion $\eta$ en fonction de l'épaisseur du substrat c-Si de la cellule à hétérojonctions a-Si:H(n)/c-Si(p).....	37

<b>Figure III.9 :</b> Evolution du Rendement quantique externe (RQE) de la cellule a-Si:H (n)/c-Si (p) en fonction de l'épaisseur du substrat c-Si (p).....	38
<b>Figure III.10</b> Evolution du $V_{co}$ , $J_{cc}$ , $FF$ et le rendement de conversion $\eta$ en fonction du dopage du substrat c-Si de la cellule à hétérojonctions a-Si:H(n)/c-Si(p).....	39
<b>Figure III.11 :</b> Evolution du $V_{co}$ , $J_{cc}$ , $FF$ et le rendement de conversion $\eta$ en fonction de l'épaisseur de la couche émetteur a-Si:H(n) de la cellule à hétérojonctions a-Si:H(n)/c-Si(p).....	41
<b>Figure III.12:</b> Structure d'une hétérojonction a-Si :H(n)/a-Si :H(i)/c-Si(p).....	42
<b>Figure III.13</b> Caractéristique $J(V)$ en l'obscurité et sous illumination de cellule photovoltaïque à hétérojonction a-Si :H(n)/a-Si :H(i)/c-Si(p).....	42
<b>Figure III.14:</b> Structure de l'hétérojonction a-Si :H(n)/a-Si :H(i)/c-Si(p)/ a-Si :H(p+) « BSF ».....	43
<b>Figure III.15</b> Caractéristique courant-tension sous obscurité et sous illumination de cellule photovoltaïque à hétérojonction a-Si :H(n)/a-Si :H(i)/c-Si(p)/a-Si :H(p).....	44

### Liste de tableau

<b>Tableau II.1 :</b> Tableau comparatif des différents types de cellules photovoltaïques à base de silicium .....	16
<b>Tableau II.2 :</b> Evolution des performances des cellules HIT de SANYO ces dix dernières années.....	25
<b>Tableau III.1</b> Paramètres de la cellule photovoltaïque à hétérojonction.....	35
<b>Tableau III.2</b> les performance de la cellule à hétérojonction de type c-si(p)/a-si:H(n) et aSi :H(n)/a-Si :H(i)/c-Si(p).....	43
<b>Tableau III.3</b> les performances des cellules en silicium à hétérojonction.....	44

## Références

- [1] Edmond Becquerel, « Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires », C.R. Acad. Sci. **9**, 561 (1839).
- [2] D.M. Chapin, C.S. Fuller, and G. L. Pearson, J. Appl. Phys. **25**, 676 (1954).
- [3] Djicknoum DIOUF «thèse de doctorat Cellules photovoltaïques silicium à hétérojonctions et à structure interdigitée en face arrière ». Thèse doctorat, Université Paris sud, Paris, 2010.
- [4] Charles « Roger Développement de cellules photovoltaïques à base de CIGS sur substrats Métalliques » Thèse doctorat, Université Grenoble, Paris, PP 5, 2013.
- [5] W. Shockley , Hans J. Queisser ; « detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells » ; J. APPL. PHYS. 32, 510 (1961); DOI:10.1063/1.1736034. T. Desrues. " Developement des cellules solaires à hétérojonctions " N° d'ordre 2009ISAL0084.
- [6] Trends in photovoltaic applications 1992-2008, Technical report, IEA Photovoltaic Power Systems Programme, September 2009.
- [7] C. J. Allègre, J.-P. Poirier, E. Humler et A. W. Hofmann, « The chemical composition of the earth », Earth and Planetary Science Letters, vol. 134, p. 515–526, 1995.
- [8] K. Fukutani, M. Kanbe, W. Futako, B. Kaplan, T. Kamiya, C. Fortmann et I. Shimizu, « Band gap tuning of a-Si :H from 1.55 eV to 2.10 eV by intentionally promoting structural relaxation », Journal of Non-Crystalline Solids, vol. 227-230, p. 63–67, 1998.
- [9] W. Futako, K. Yoshino, C. M. Fortmann et I. Shimizu, « Wide band gap amorphous silicon thin films prepared by chemical annealing », Journal of Applied Physics, vol. 85, p. 812–818, 1999.
- [10] G. Schumm, C.-D. Abel et G. Bauer, « Photoconductivity and  $\mu \times \tau$  products in a-Si :H compatibility with various defect models », Journal of Non-Crystalline Solids, vol. 137 & 138, p. 351–354, 1991.
- [11] Goetzberger A., Hebling C. Photovoltaic materials, past, present, future. Solar En.Mat.&Sol.Cells, 2000, Vol. 62, pp. 1-19.
- [12] Benoit Brousse : « réalisation et caractérisation de cellules photovoltaïques organiques obtenues par dépôt physique », Thèse de Doctorat, 2004, Université de Limoges.

- [13] Zouak Belkacem : «Etude de l'évolution des caractéristiques des matériaux thermoélectriques des anciennes et nouvelles générations Rt applications photovoltaïque thermoélectricité», Thèse de Magister, 2012, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [14] Serge Poignant : «L'ENERGIE PHOTOVOLTAIQUE», Rapport D'information, 2009, Assemblée Nationale Constitution du 4 Octobre 1958 Treizième Législature.
- [15] W. Anderson, Phys. Rev. **109**, 1492 (1958).
- [16] W. E. Spear and P. G. LeComber, Solid State Commun. **17**, 1193 (1975). [17] D. E. Carlson and C. R. Wronski, Appl. Phys. Lett. **29**, 602 (1976).
- [17] D. E. Carlson and C. R. Wronski, Appl. Phys. Lett. **29**, 602 (1976).
- [18] J. Damon-Lacoste, « Vers une ingénierie de bandes des cellules solaires à hétérojonctions a-Si:H/c-Si. Rôle prépondérant de l'hydrogène » thèse Ecole polytechnique, Palaiseau, 2007.
- [19] W. Fuhs, K. Niemann, and J. Stuke, Bull. Am. Phys. Soc. **19**, 345 (1974).
- [20] K. Wakisaka, M. Taguchi, T. Sawada, M. Tanaka, T. Matsuyama, T. Matsuoka, S. Tsuda, S. Nakano, Y. Kishi, and Y. Kuwano, Proc. of the 22nd IEEE PSC **2**, 897 (1991).
- [21] Niemegeers and M. Burgelman, "Effects of the Au/CdTe back contact on I(V) and C(V) characteristics of Au/CdTe/CdS/TCO solar cells" J.Appl.Phys, article Vol.81,N°6 pp.2881-2886 (1997) .
- [22] M. Burgelman, P. Nollet and S. Degrave, "Modelling polycrystalline semiconductor solar cells" Thin Solid Films, article Vol362-361pp.527-532 (2000).
- [23] Henry Mathieu, Physique des semiconducteurs et des composants électroniques, Masson, 2ième édition, 1990.
- [24] AMPS-1D web site, Pennsylvania State University, <http://psu.edu/dept/AMPS>.
- [25] M.J. Powell and S.C. Deane, Phys. Rev. **48**, 10815 (1993).
- [26] F. Smole, M. Topi and J. Furlan, J. Non-Cryst. Solids **194**, 312 (1996).
- [27] P. Chatterjee, J. Appl. Phys. **76**, 1301 (1994).
- [28] M. Zeman, J. A. Willems, L. L. A. Vosteen, G. Tao and J. W. Metselaar, Solar Energy Materials and Solar Cells **46**, 81 (1997).

[29] Manuel d'utilisation de Silvaco, version 5.12.1.R.

[30] R. Stangl, M. Kriegel and M. Schmidt, Proc. 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 1350 (2006).

[31] N. Dwivedi, S. Kumar, A. Bisht, K. Patel, S. Sudhakar. / Solar Energy 88 (2013) 31–41