



**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem

Faculté Des Sciences Exactes et de l'Informatique

Domaine des Sciences de la Matière

Département de physique

Projet de Fin d'Études

Pour obtenir le diplôme de Master en Physique

Option : Modélisation et Caractérisation des Matériaux

Présenté par :

BENYAGOUB Amel

Sujet :

**Simulation des propriétés électriques et optiques de la cellule
solaire à base de silicium amorphe**

Soutenue le : 31 / 05 / 2016

Devant le jury composé

M.TURKI.Hassaine Mounir	MCA	Université de Mostaganem	Président
M.BOUNOUA Abdelkader	MCA	Université de Mostaganem	Examineur
M.HADRI.Baghdâd	Professeur	Université de Mostaganem	Co-encadreur
M.BOURAHLA Ahmed	MCA	Université de Mostaganem	Encadreur

Année universitaire : 2015/2016

Table des matières

Introduction générale	1
------------------------------------	---

Chapitre I: L'enseillement

I.1. Introduction.....	4
I.2. Le soleil.....	4
I.3. Le rayonnement solaire	4
a) Rayonnement.....	6
b) Rayonnement diffus	6
c) Rayonnement global	6
d) L'albédo	6
I.4. Le nombre de masse d'air	6
I.5. Le spectre solaire.....	8
I.6. L'absorption de la lumière	9

Chapitre II : Notion sur la physique des semi-conducteurs

II.1. Introduction.....	12
II.2. Les semi-conducteurs.....	12
II.2.1. Bande interdit (gap)	13
II.2.2. Variation du gap.....	13
II.2.3. Types de semi-conducteurs	14
a) Semi -conducteur intrinsèque	14
b) Semi-conducteur extrinsèque.....	15
b.1. Semi-conducteur de type N.....	15
b.2. Semi-conducteur de type P	16
II.2.4. Niveau de fermi	17
II.2.5. La jonction P-N.....	18
II.3. Absorption et génération.....	19
II.3.1. Processus d'absorption	19
a) Absorption bande-à-bande.....	19
b) Absorption par les porteurs libre.....	20
c) Génération des porteurs.....	20
II.4. La cellule solaire.....	21
II.4.1. Définition.....	21
II.4.2. Historique.....	21
II.4.2. Principe de Fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	22
a) L'interaction rayonnement/semi-conducteur	22

Chapitre III : La cellule photovoltaïque

II.1. Introduction.....	26
III.2.Génération de cellule solaires.....	26
a) Première génération.....	26
b) Deuxième génération.....	27
c) Troisième génération.....	27
III.3. Elaboration du Silicium.....	28
a) Réduction de la silice.....	28
b) Purification du silicium.....	28
c) Procédé de Czochralski (CZ).....	29
III.4. Définition de l'état amorphe.....	30
a) Classification des matériaux.....	30
b) Caractéristique macroscopique d'un solide amorphe.....	31
c) Création des solides amorphes.....	31
III.5. Le silicium amorphe.....	31
III.5.1. Densité d'états dans a-Si.....	33
III.5.2. Propriétés optiques de silicium amorphe.....	34
III.5.3. Quelques valeur caractéristiques.....	35
III.6.Les cellules amorphes.....	35
III.6.1. Composition d'une cellule au silicium amorphe.....	36
III.6.2. l'oxyde d'indium et d'étain (ITO).....	36
III.6.3.Structure PIN.....	36
III.7. Elaboration de la cellule solaire à base de silicium amorphe.....	37
a) les équipements utilisés.....	37
b) Dépôt chimique en phase vapeur.....	38
III.8. Schéma électrique équivalent.....	40
III.9. Grandeur caractéristique de la cellule solaire.....	41
a) Courant de court-circuit , I_{cc}	42
b) Tension de circuit ouvert V_{oc}	42
c) La puissance maximum, P_m	43
d) Facteur de forme, FF.....	43
e) Le rendement η	43

Chapitre IV : Simulation numérique sous TCAD-SILVACO

IV.1. La simulation par TCAD-SILVACO.....	45
IV.2. La recombinaison.....	45
a) Recombinaison SRH (Schokley-Read-Hall).....	46
b) Recombinaison Auger.....	47
IV.3. Equation de Poisson.....	48
IV.4. Equations de continuité.....	48

IV.5. Structure étudiée	49
IV.6. TFT (thin-film transistor simulator).....	50
a) Définition Les États défauts.....	50
b) La déclaration de défaut	51
IV.7. Caractéristique courant-tension de la structure étudiée.....	52
IV.8. Effet des niveaux des pièges profonds avec distribution gaussienne.....	54
IV.9. Effet des états de queue	57
IV.10. Effet de l'épaisseur.....	58
IV.11. Améliorer le rendement.....	62
IV.12. Réponse spectrale.....	63
IV.13. Conclusion.....	64
 Conclusion générale	 67
 Bibliographie	 69
 Annexe	 73

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir, en effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter, par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles, la consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Un danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures.

Par contre, une énergie dite renouvelable et indéfiniment à l'échelle temporelle de notre civilisation. Parmi ces sources d'énergie on trouve le soleil, qui est contrairement aux autres sources d'énergies renouvelables, abondante et propre, d'autre part annuellement elle fournit à la terre une énergie supérieure à celle de la consommation mondiale.

L'électricité est l'une des formes non polluantes et silencieuses de conversion de l'énergie solaire, elle se produit au moyen d'un dispositif de conversion appelée « Cellule solaire » basé sur un effet dit « Effet photovoltaïque ».

La première cellule photovoltaïque a été réalisée en 1954, à base de silicium, aujourd'hui il reste encore le matériau le plus couramment utilisé, malgré la concurrence toujours plus rude des tellures de cadmium et l'arséniure de gallium. Cette filière technologique à base de ces semi-conducteurs caractérisés par son prix élevé, par sa fabrication très compliquée.

Pour diminuer à la fois le prix de ces dispositifs tout en augmentant leurs surfaces et leurs souplesses, des cellules solaires à base de silicium amorphe ont été réalisées. Malgré son rendement est faible, elle peut être considérée comme une solution pour les pays des moyens limités.

L'objectif de notre travail est l'étude par simulation numérique des propriétés électriques et optiques de la cellule solaire à base de silicium amorphe.

Nous avons utilisé le logiciel de simulation TCAD_SILVACO pour simuler la caractéristique courant tension $I(V)$

Cette étude se présente de la façon suivante :

Le premier chapitre de ce mémoire présente un rappel général sur l'ensoleillement.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons des notions fondamentales sur les semi-conducteurs, la jonction et sur la cellule solaire ainsi son principe de fonctionnement.

Le troisième chapitre est une étude générale sur les cellules solaires à base de silicium amorphe et leur fabrication.

Dans le dernier chapitre nous allons présenter les résultats obtenus de la simulation numérique à deux dimensions, sous TCAD_SILVACO.

I.1. Introduction

De tout temps, l'homme a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil. La plupart des utilisations, connues depuis des siècles, sont directes comme en agriculture à travers la photosynthèse ou dans les diverses applications de séchage et chauffage autant artisanales qu'industrielles. Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et malgré une atténuation importante lorsqu'elle traverse l'atmosphère, la quantité qui reste est encore assez importante quand elle arrive au sol. On peut ainsi compter sur $10\,000\text{ W/m}^2$ crête dans les zones tempérées et jusqu'à $14\,000\text{ W/m}^2$ lorsque l'atmosphère est faiblement polluée.

Signalons dès à présent le flux solaire reçu au niveau de sol dépend de[1] :

- l'orientation, la nature et l'inclinaison de la surface terrestre,
- la latitude du lieu de collecte, son degré de pollution ainsi que son altitude,
- la période de l'année,
- l'instant considéré dans la journée,
- la nature des couches nuageuses.

I.2. Le soleil

Le soleil est une sphère de plasma (matière complètement ionisée), dont la masse est d'ordre de $2 \cdot 10^{30}$ Kg, soit 332500 fois de la terre. C'est le siège des réactions thermonucléaires et exothermiques transformant des noyaux hydrogène (proton) en noyaux d'hélium (neutron) avec une émission d'énergie qui donne naissance à rayonnement électromagnétique répartie sur un très large spectre de longueur d'onde comprises entre 10^{-10} et 10^4m [2].

Le soleil libère d'énormes quantités d'énergies qui, après avoir parcouru une distance d'environ 150 millions de kilomètres atteignent la surface de la Terre avec une puissance moyenne d'environ 1.000 W/m^2 [2].

I.3. Le rayonnement solaire

Malgré la distance considérable qui sépare le soleil de la terre $150 \cdot 10^6\text{ Km}$, la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie importante $180 \cdot 10^6\text{ GW}$, c'est pour ça que l'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autres sources d'énergie.

Chapitre I : L'ensoleillement

Cette quantité d'énergie quittera sa surface sous forme de rayonnement électromagnétique compris dans une longueur variant de 0.22 à 10 μm [3], l'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit:

- 9 % dans la bande des ultraviolets ($< 0.4\mu\text{m}$).
- 47 % dans la bande visible ($0.4 \text{ à } 0.8 \mu\text{m}$).
- 44 % dans la bande des infrarouges ($> 0.8\mu\text{m}$).

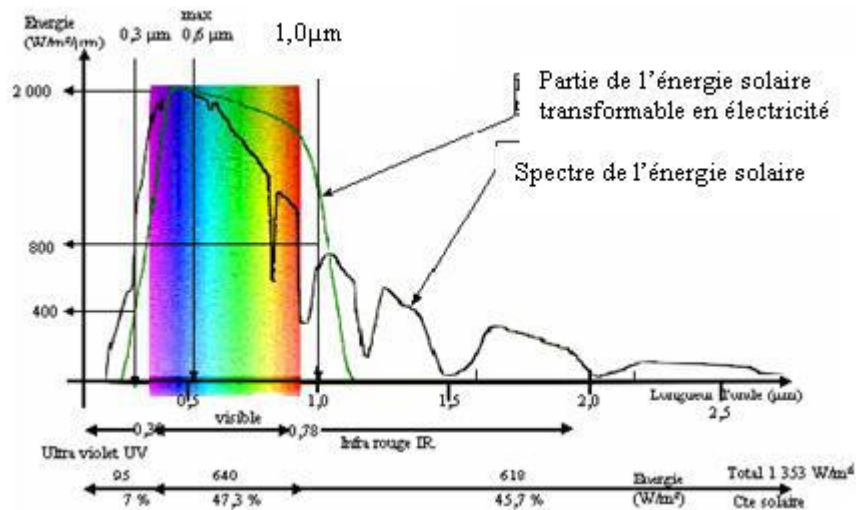


Figure I.1 : Réponse spectrale d'une cellule (PV).

Au cours de ces dix dernières années ce spectre a été homologué par l'organisation internationale de standardisation (ISO 9845-1 :1992) et la société américaine de test et de matériaux (ASTM E 892-87 :1992) ont fixées le flux de standardisation à 1000 W/m^2 [3]. Cette énergie est définie comme paramètre solaire qui a une valeur variable suivant la saison, l'heure, la localisation géographique du site, les conditions météorologiques (poussière, Humidité,...etc.).

Les rayons du soleil mettent environ 8 min à nous parvenir.

Le rayonnement reçu par la terre en incidence normale avoisine les 1400 W/m^2 avant d'aborder la couche atmosphérique.

En traversant l'atmosphère, on distingue quatre types de rayonnements solaires[1] :

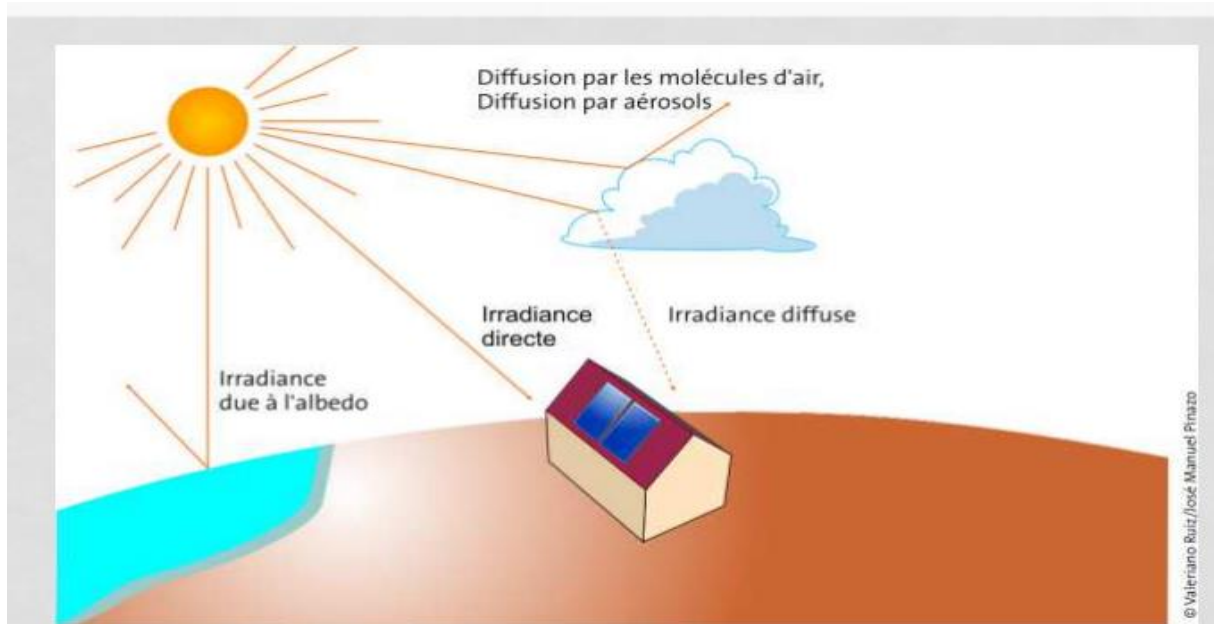


Figure I.2 : Composantes du rayonnement solaire au sol[5].

- a. **Rayonnement direct** : il est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère, ses rayons sont parallèle entre eux, il forme donc les ombres et peut être concentré par des miroirs.
- b. **Rayonnement diffus** : il est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols, nuages). la diffusion est le phénomène qui un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions dans le ciel
- c. **Rayonnement global** : est tout simplement la somme de ces diverses contributions.
- d. **L'albédo** : est la partie réfléchi par le sol. Il dépend de l'environnement du site. La neige, par exemple renvoi énormément de rayons lumineux alors qu'un asphalte n'en renvoie pratiquement aucun. Il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés.

Pour pouvoir comparer les performances des cellules photovoltaïques, on utilise la notion AM «Air Masse » (masse atmosphérique)[7].

Cette conversion permet d'harmoniser les résultats obtenue dans laboratoires.

I.4. Le nombre de masse d'air

On appelle masse d'air, ou Air Mass en anglais, le rapporte entre l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement directe pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu[1].

Chapitre I : L'ensoleillement

La masse d'air dépend d'une hauteur angulaire h du soleil (l'angle entre la direction du soleil et le plan horizontal du lieu).

à l'aide des points O, A et M et cet angle h on écrit la longueur du trajet du soleil à travers l'atmosphère :

$$OM = \frac{OA}{\sin h} \quad \text{I.1}$$

Donc l'air masse :

$$\frac{OM}{OA} = \frac{1}{\sin h} \quad \text{I.2}$$

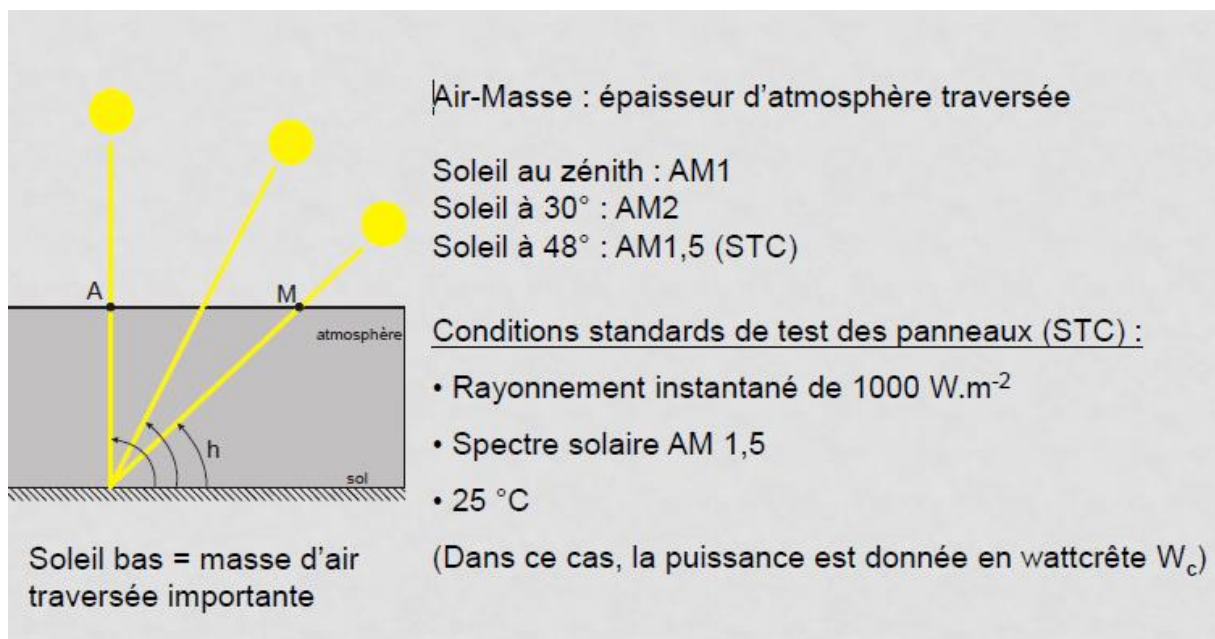


Figure I.3 : Notion « d'air-masse » ou masse atmosphérique[5].

Air Masse : $AM = 1/\sin h$

AM0 : correspond à une masse d'air nulle pour la lumière arrivant au dessus de notre atmosphère à incidence normale

AM1 : représente le spectre solaire à la surface de la terre quand le soleil est au zénith.

AM1.5 : désigne la masse d'air rencontrée par la lumière arrivant à 48.2° (par rapport à la verticale au sol) sur la terre, soit la lumière plus faible du fait que l'épaisseur de la couche atmosphérique traversée est plus grande

$P(AM1.5G) \sim 1 \text{ kW/m}^2$

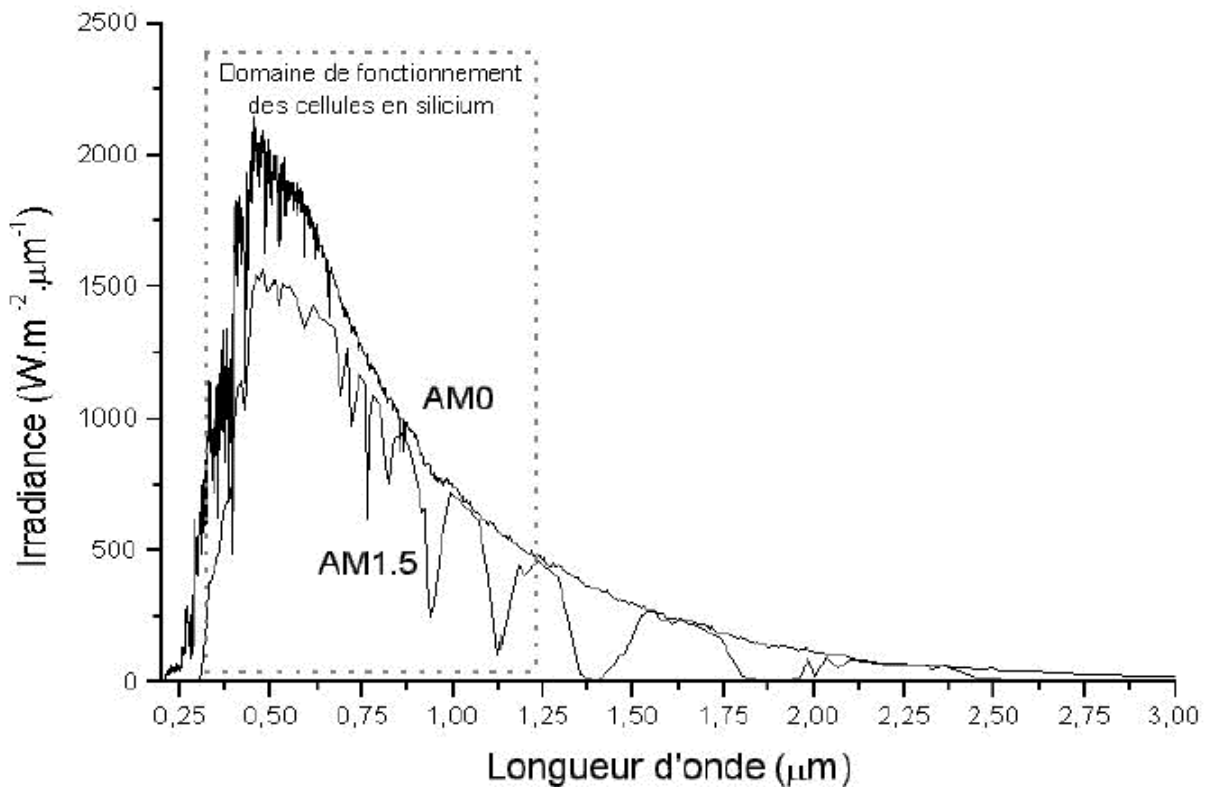


Figure I.4 : Représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5. Le domaine spectral utile aux cellules en silicium est mis en évidence[3].

I.5. Le spectre solaire

Le spectre solaire c'est sa décomposition en longueurs d'onde ou "couleurs". La lumière solaire est en effet composée de toutes sortes de rayonnements de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde[4]. Les photons, grains de lumière qui composent ce rayonnement électromagnétique, elles sont porteuses d'une énergie qui est liée à leur longueur d'onde par la relation :

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad I.3$$

Avec : ***h*** : constante de planck

C : la vitesse de la lumière

λ : la longueur d'onde

L'analyse des transitions électroniques possibles dans un semi conducteur montre que les photons du spectre solaire ne vont pas être tous utilisable pour la génération de paires électron-trou.

- ❖ Si $E_{ph} > E_g$ le photon est absorbé mais une partie de l'énergie est perdue par thermalisation.
- ❖ Si $E_{ph} < E_g$ le photon n'est pas absorbé par le semi-conducteur qui est donc transparente pour cette longueur d'onde.

Pour le silicium tout les photons d'énergie E_{ph} supérieure à 1.12ev, soit la longueur d'onde λ inférieure à 1.1 μm peut être générer de l'énergie électrique.

I.6. L'absorption de la lumière

La lumière se compose de photons, (grains de lumière), chacun, porteur d'une énergie dépendante sa longueur d'onde (ou couleur du rayon). Ces photons peuvent pénétrer dans certaines matières, et même passer à travers les objets transparents pour notre œil et laissent passer la lumière visible[6].

Les théories ondulatoires (équations de Maxwell) ou corpusculaires de la lumière nous permettent d'aborder les échanges entre la matière et le rayonnement lumineux[8].

Un rayon lumineux qui arrive sur un solide peut subir trois événements optiques :

- **La réflexion** : la lumière est renvoyée par la surface de l'objet.
- **La transmission** : la lumière traverse l'objet.
- **L'absorption** : la lumière pénètre dans l'objet et n'en ressort pas, l'énergie est restituée sous une autre forme.

Quand un matériau absorbe de la lumière, l'énergie subit une loi exponentielle décroissante, car la part qui reste à absorber diminue au fur et à mesure que l'on pénètre dans la matière. Si E_{inc} est l'énergie incidente, l'énergie restante à la profondeur d s'écrit :

$$E = E_{inc} e^{-\alpha d} \quad \text{I.4}$$

Donc l'énergie absorbée dans l'épaisseur d est égale à :

$$E = E_{inc} - E_{inc} e^{-\alpha d} = E_{inc} (1 - e^{-\alpha d}) \quad \text{I.5}$$

Le coefficient d'absorption α dépend du matériau et de la longueur d'onde incidente.

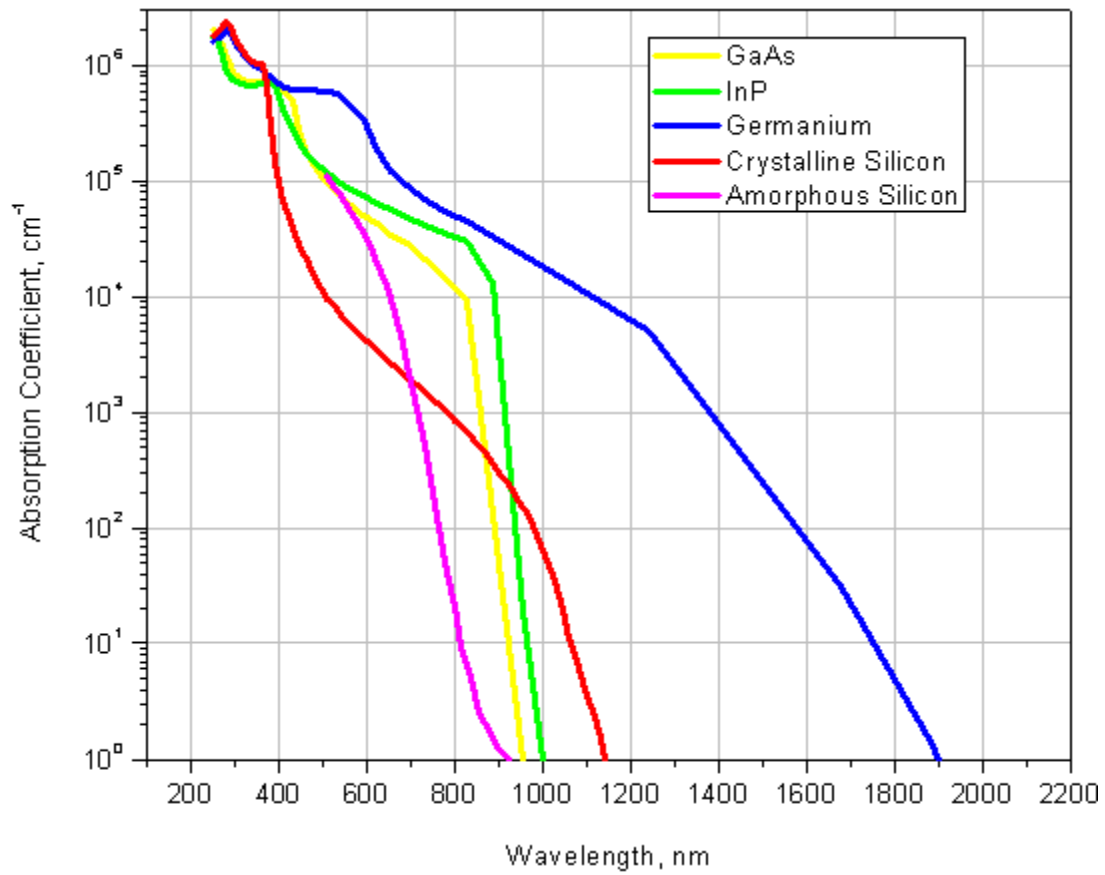


Figure I.5 : Variation du coefficient d'absorption de quelques matériaux en fonction de la longueur d'onde du rayonnement[6].

II.1. Introduction

Les cellules photovoltaïques (PV) sont des composants optoélectroniques capables de convertir directement la lumière en électricité, en utilisant l'interaction de la lumière avec certains matériaux semi-conducteurs. Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque fait appel aux propriétés du rayonnement solaire et celles des semi-conducteurs

II.2. Les semi-conducteurs

Les matériaux semi-conducteurs sont des corps dont la résistivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Et le taux de remplissage de la dernière bande occupée est soit très faible soit très important[9]. La hauteur de la bande interdite est faible. La conduction est faible est varie beaucoup avec la température.

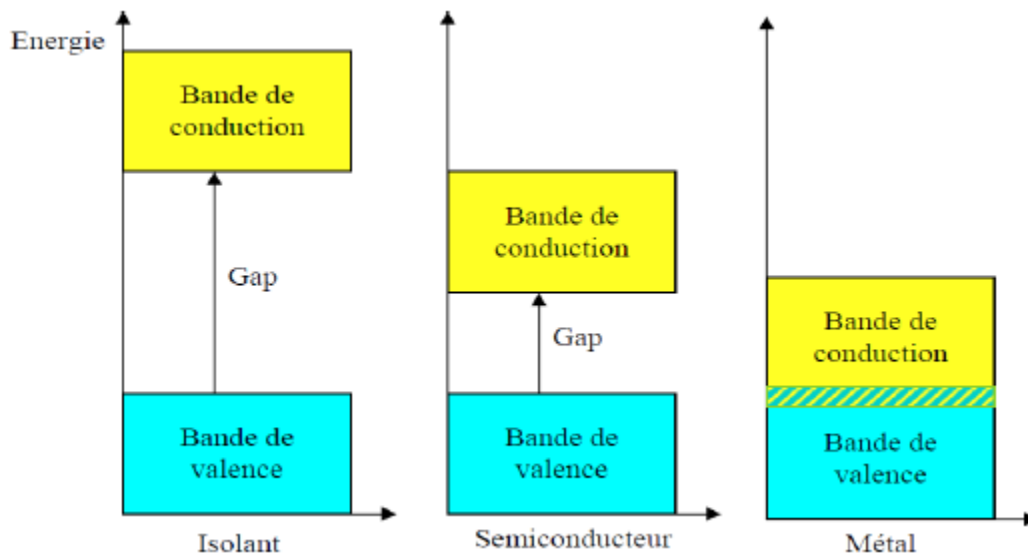


Figure II.1 : Représentation des bandes d'énergie[11].

Les matériaux	La résistivité
L'isolant	$> 10^8 \Omega\text{cm}$
Les métaux	$< 10^{-5} \Omega\text{cm}$
Les semi-conducteurs	Varie de 10^{-3} à $10^4 \Omega\text{cm}$ (ou plus)

Tableau II.1 : Résistivité des différents matériaux[9].

II.2.1. Bande interdite (gap)

Les semi-conducteurs sont caractérisés par un écart en énergie entre la bande de conduction et la bande de valence appelée bande interdite ou gap. Plus cet écart est important, plus le matériau est isolant. Ce gap correspond à l'énergie nécessaire au système pour faire passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction. L'apport énergétique nécessaire à la transition est le plus souvent fourni par un photon ou par une excitation électrique. Inversement, ce gap équivaut à l'énergie du photon émis par le système lors de la recombinaison d'un électron et d'un trou, c'est sur ces transitions que sont basés les systèmes d'émission ou de détection de photon (diodes, laser ou photodétecteur)[10].

Si le minimum de la bande supérieure correspond au même vecteur d'onde que le maximum de la bande inférieure, alors on dit que la bande interdite est directe (gap directe), sinon la bande est dite indirecte (gap indirect).

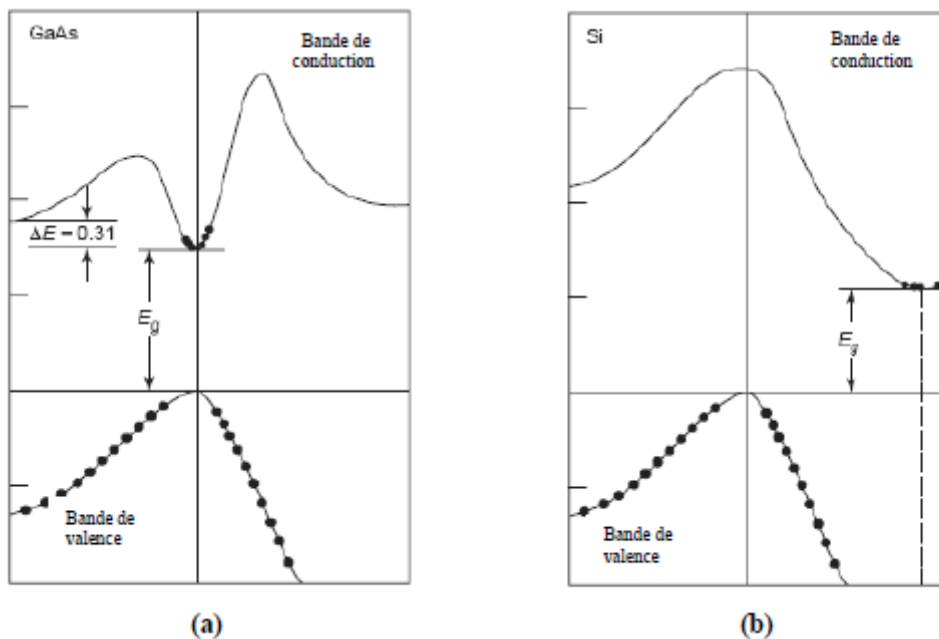


Figure II.2 : Courbes de dispersion (a) à gap direct ;(b) à gap indirect [12].

II.2.2. Variation du gap

La température entraîne une variation du gap directe des matériaux semi-conducteurs selon une loi dite de Varshni. Elle est donnée par :

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{(T+\beta)} \quad \text{II.1}$$

Où : $E_g(T)$ est la valeur du gap à une température donnée et α et β sont des valeurs empiriques déterminées pour chaque semi-conducteur.

Chapitre II: Notion sur la Physique des semi-conducteurs

L'énergie de gap varie également en fonction de la composition. Dans le cas des alliages ternaires, il s'agit en générale d'une loi d'approximation parabolique fonction de la concentration de chaque élément et de coefficients dont les valeurs empiriques sont dépendantes de la température[10].

II.2.3. Types de semi-conducteurs

Il existe deux types de semi-conducteurs :

- Semi-conducteur intrinsèque (pur)
- Semi-conducteur extrinsèque (dopé par des impuretés)

a) Semi-conducteur intrinsèque

Un semi-conducteur intrinsèque est un semi-conducteur dépourvu de toute impureté susceptible de modifier la densité de porteurs (pure)[9]. Les électrons de la bande de conduction ne peuvent résulter que l'excitation thermique d'électron liés de la bande de valence. Donc le nombre de trous et d'électron est égal.

$$n = p = n_i \quad \text{II.2}$$

n_i : La densité de porteurs intrinsèque. C'est une caractéristique du semi-conducteur à une température donnée.

Cette densité de porteurs intrinsèques est une fonction exponentielle du gap du matériau et de la température. A la température ambiante on obtient :

	Si	Ge	GaAs	InP	GaP
$n_i (cm^{-3})$	10^{10}	2.10^{13}	3.10^6	3.10^7	1

Tableau II.2 : La densité de porteurs intrinsèque de quelques semi-conducteurs.

Avec :

$$n \approx N_c e^{-(E_c - E_{Fi})/kT} \quad \text{II.3}$$

$$p \approx N_v e^{(E_v - E_{Fi})/kT} \quad \text{II.4}$$

Et

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad \text{II.5}$$

$$N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad \text{II.6}$$

Ou ;

N_c : La densité effective d'état dans la bande de conduction,

N_v : La densité effective d'état dans la bande de valence,

E_c : Le niveau énergétique du bas de la bande de conduction du semi-conducteur,

E_v : Le niveau énergétique du haut de la bande de valence du semi-conducteur,

E_{Fi} : Le niveau de fermi intrinsèque.

Le niveau de fermi d'un semi-conducteur intrinsèque est toujours très voisin du gap à la température ambiante,

$$E_{Fi} = (E_c + E_v) / 2 \quad \text{II.7}$$

b) Semi-conducteur extrinsèque

On modifier considérablement les propriétés électrique d'un semi-conducteur on y introduit des impuretés de manière contrôlée avec des atomes spécifiques. Ce procédé est appelé «dopage »[9], il existe ainsi deux types de semi-conducteur extrinsèques, de type N et de type P

b.1) Semi-conducteur de type N

Un semi-conducteur dopé N est un semi-conducteur dans laquelle la densité des électrons supérieurs à la densité des trous, la plupart de ces électrons résultent de l'introduction d'atomes donneurs dans le cristal ($N_d > N_a$), cela correspondre aux températures usuelles.

Dans le cas de silicium on introduire un atome pentavalente (phosphore), Quatre d'entre eux assurent les liaisons avec les atomes voisins de silicium et le cinquième resté disponible va être excité vers la bande de conduction très facilement par l'agitation thermique[13]. D'où le nombre d'électron libre qui va fortement augmenter : dans ce cas le nombre de trou est très inférieur au nombre d'électron libre. On obtient ainsi un cristal dopé N (négatif) : $n \gg p$

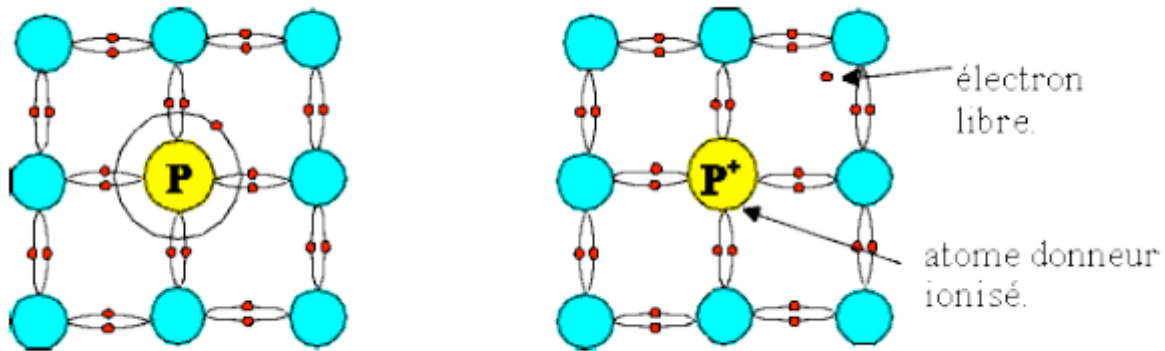


Figure II.3 : Représentation schématique des liaisons électroniques pour le semi-conducteur silicium (Si) dopé n par de phosphore (p).

Les électrons sont appelés porteurs majoritaires, les trous, porteurs minoritaires.

$$pn = n_i^2 \quad \text{II.8}$$

$$n \approx N_d - N_a \quad \text{II.9}$$

$$p \approx n_i^2 / (N_d - N_a) \quad \text{II.10}$$

Dans le pratique N_d , N_a et $N_d - N_a$ sont toujours très supérieures à n_i .

b.2) Semi-conducteur de type P

Un semi-conducteur dopé P est un semi-conducteur dans laquelle la densité des trous supérieur à la densité des électrons, la plupart de ces trous résultent de l'introduction d'atomes accepteurs dans le cristal, cela correspondre aux températures usuelle[9].

De la même façon on introduit des atomes trivalents (bore), ses trois électrons vont assurer les liaisons covalentes avec trois atomes voisins mais laisser un trou au quatrième. Ce trou se déplace de proche en proche dans le cristal pour créer un courant[13]. Ici le nombre de trous est très supérieur au nombre d'électrons libres du cristal intrinsèque, on obtient donc un cristal dopé P (positif) : $p \gg n$

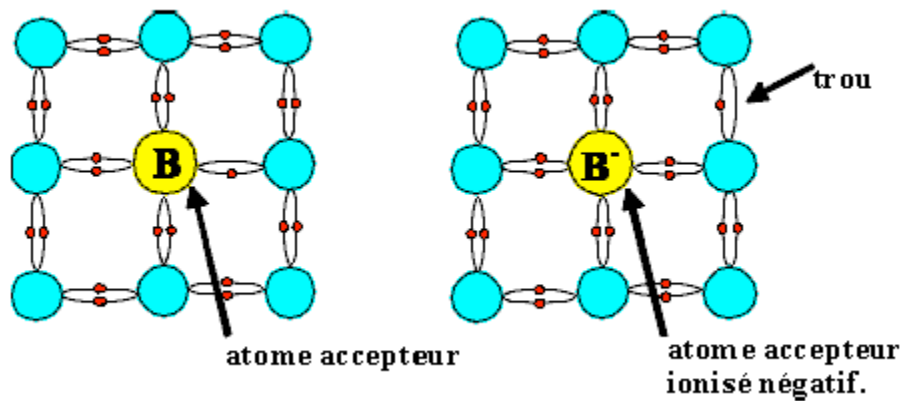


Figure II.4: Représentation schématique des liaisons électroniques pour le semi-conducteur silicium (Si) dopé P par du Bohr (B).

Les porteurs majoritaires sont les trous, la densité de porteurs sont données par

$$p \approx N_a - N_d \quad \text{II.11}$$

$$n \approx n_i^2 / (N_a - N_d) \quad \text{II.12}$$

II.2.4. Niveau de fermi

Dans chaque type de semi-conducteur, le niveau de fermi se rapproche d'autant plus de la bande de porteurs majoritaires que le dopage est important[9].

En particulier,

$$E_{Fn} = E_c \quad \text{Pour} \quad N_d - N_a = N_c \quad \text{II.13}$$

$$E_{Fp} = E_v \quad \text{Pour} \quad N_a - N_d = N_v \quad \text{II.14}$$

Les expressions du niveau de Fermi dans chaque type (*N et P*) sont :

$$E_{Fn} = E_c - kT \log \frac{N_c}{N_d - N_a} \quad \text{II.15}$$

$$E_{Fp} = E_v - kT \log \frac{N_v}{N_a - N_d} \quad \text{II.16}$$

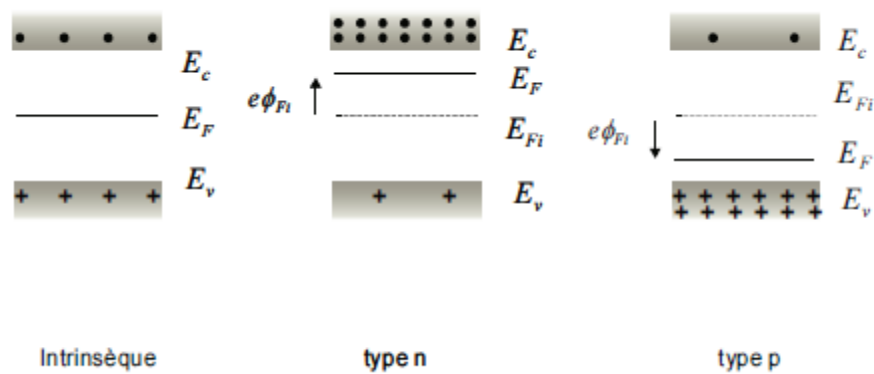


Figure II.5 : Position de niveau de fermi dans différents types de semi-conducteur.

II.2.5. La jonction P-N

Parmi tous les dispositifs à semi-conducteur, la jonction P-N est un composant essentiel à la fois pour ses applications directes et parce que la compréhension de sa physique permet la compréhension de nombreux autres dispositifs. Une jonction P-N est constituée par un cristal semi-conducteur dont la concentration en impuretés profondes varie avec x pour passer d'une région de type P à une région de type N [9].

Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P. une jonction (dite P-N) a été formée.

La zone où la charge n'est pas nulle porte le nom de zone de charge d'espace (ZCE) (Figure II.6).

En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue.

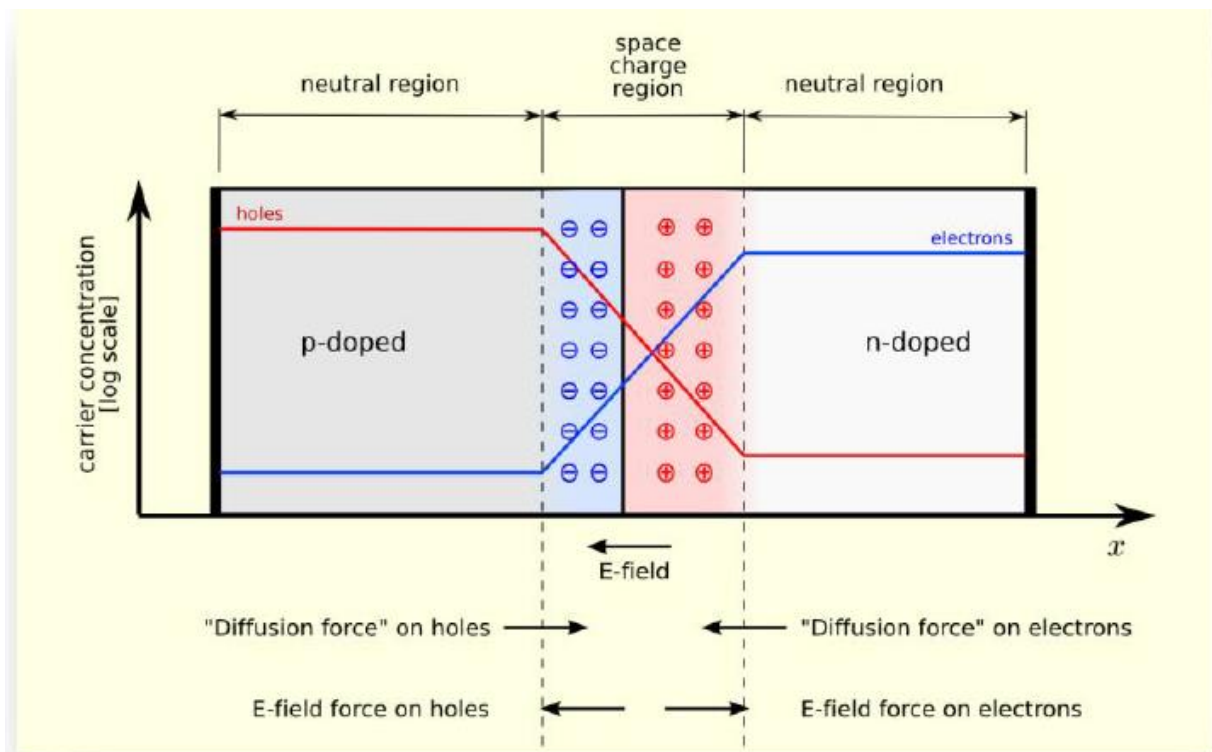


Figure II.6 : jonction P-N à l'équilibre.

À structure de la jonction P-N peut être :

➤ Jonction abrupt

Une jonction P-N est de type abrupt si la quantité $N_a - N_d$ est constante et positive dans la zone P et elle constante et négative dans la zone N.

➤ Jonction graduelle

Une jonction est dite progressive linéaire si la quantité $N_d - N_a$ suit la loi linéaire suivante $N_d - N_a = Cx$

Où : C est une constante positive.

II.3. Absorption et génération

II.3.1. Processus d'absorption

Les principaux d'absorption sont l'absorption fondamentale bande-à-bande et par les porteurs libres.

a) Absorption bande-à-bande

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est basé sur l'absorption des photons d'énergie suffisante pour pouvoir induire le saut d'un électron depuis un état occupé de la bande de valence vers un état libre de la bande de conduction. En réalité. Cette transition se

Chapitre II: Notion sur la Physique des semi-conducteurs

fait de différentes manières selon le gap du semi-conducteur. S'il s'agit d'un gap directe la transition inter-bandes s'effectuent verticalement, et son dons radiatives, ceci illustre le fonctionnement des semi-conducteurs binaires III-V. dans le cas du gap indirect, la transition sont obliques, les électrons du sommet de la bande de conduction grâce à un photon de plus grande énergie[10].

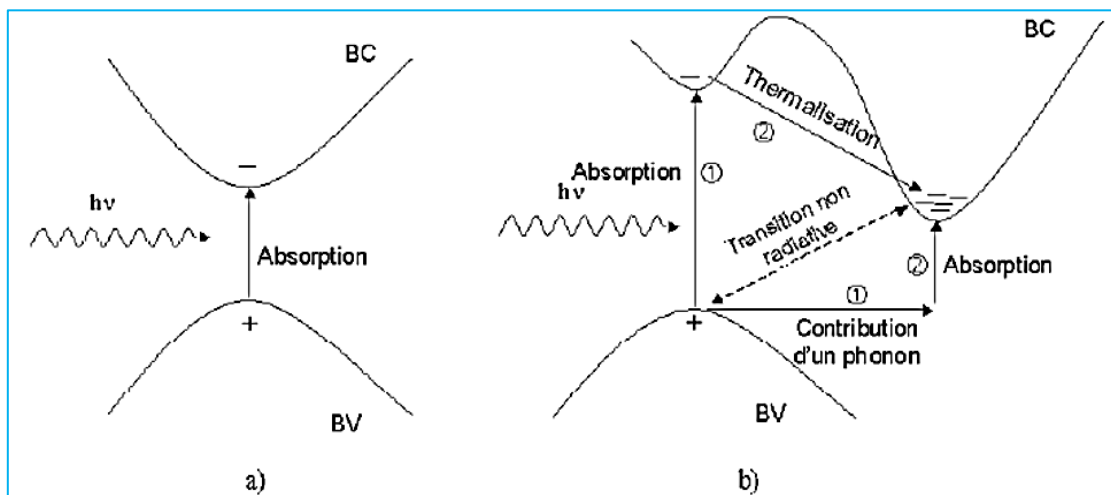


Figure II.7 : Transitions bande à bande dans un semi-conducteur
(a) à bande interdite directe et (b) à bande interdite indirecte.

b) Absorption par les porteurs libre

L'absorption par les porteurs libres des photons incidente est un processus concurrent aux processus générant des paires électron-trou, ce processus est significatif pour les photons d'énergies inférieures au gap[10]. dans ce processus, les électrons de la bande de conduction absorbent des photons et bougent vers des états supérieurs (même chose avec les trous).

c) Génération des porteurs

Les photons d'énergie supérieure au gap du matériau entrant dans un semi-conducteur génèrent des paires électron-trou (on suppose implicitement la création d'un seul pair par photon). L'expression du taux de génération G ($cm^{-3}.s^{-1}$) dépend de la forme du faisceau et de la surface éclairée, mais son intégrale sur tout le volume de génération donne le nombre totale des photons absorbé par seconde.

Cas (1) : dans le cas de génération homogène, par un éclairage monochromatique, sur toute l'épaisseur W d'un échantillon :

$$G = \frac{\phi_0 f_{abs}}{W}$$

II.17

Chapitre II: Notion sur la Physique des semi-conducteurs

Où : ϕ_0 (photons/cm²/s) : flux des photons incidente ;

f_{abs} : Fraction des photons absorbés par le semi-conducteur.

Cas (2) : en éclairant une surface S d'un semi-conducteur d'une façon homogène en surface mais par en profondeur, le taux de génération à une dimension s'écrit[14]:

$$G(z) = \alpha \frac{I_0}{S} f_{abs} \exp(-\alpha z) \quad \text{II.18}$$

Avec : I_0 : (photons/s) : intensité incidente.

Dans le cas où les photons incidents ne pénétraient pas jusqu'à la surface arrière de l'échantillon, on peut écrire :

$$f_{abs} = 1 - R \quad \text{II.19}$$

Où R est la réflectivité à la longueur d'onde d'excitation.

II.4. La cellule solaire

II.4.1. Définition

La cellule solaire est une composante qui convertit la lumière incidente provenant du soleil en électricité. Elle fournit la source d'énergie de longue durée la plus importante pour les satellites et les véhicules spatiaux. Elle a été aussi implantée avec succès dans plusieurs applications terrestre à échelle réduite. Son importance ne cesse pas de croître surtout depuis que le monde s'est mis à l'évidence qu'il doit développer d'autres ressources d'énergie autres que les ressources conventionnelles. Le meilleur candidat pour cette fonction est le soleil.

II.4.2. Historique

Le mot photovoltaïque vient du mot grec « photos » qui signifie lumière et du mot « Voltaïque » relatif au nom du physicien italien qui, en 1800, découvrit la pile électrique.

L'abréviation commune pour le photovoltaïque est PV [17]. La conversion photovoltaïque est la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement) en énergie électrique de type continu directement utilisable.

L'historique du photovoltaïque est résumé comme suit [7]:

- **1838** : Le physicien français EDMOND BEQUEREL découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide : c'est l'effet photovoltaïque.

- **1875** : WERNER VON SIEMENS expose devant l'académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.
- **1954** : Trois chercheurs américains mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale cherche des solutions pour alimenter ses satellites.
- **1958** : une cellule avec un rendement de 9% est mise au point, les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- **1973** : la première maison alimentée par des cellules photovoltaïque.
- **1985** : la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque en Australie.
- **1995** : Des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001.

II.4.3. Principe de Fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Pour mieux comprendre le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, il est important de décrire les phénomènes qui régissent l'interaction entre un semi-conducteur et le rayonnement lumineux[7].

a) L'interaction rayonnement/semi-conducteur

Les trois processus qui peuvent se produire lors de l'interaction rayonnement/semi-conducteur sont :

- l'absorption fondamentale qui représente le passage d'un électron d'un état occupé de la bande de valence à un état vide de la bande de conduction après l'absorption d'un photon,
- l'émission spontanée qui représente le passage d'un électron de la bande de conduction à la bande de valence avec émission d'un photon,
- l'émission stimulée qui représente le passage d'un électron de la bande de conduction à la bande de valence suite à l'absorption d'un photon avec l'émission d'un deuxième photon.

Ces différents processus sont fonction du type de semi-conducteur.

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif.

Chapitre II: Notion sur la Physique des semi-conducteurs

- conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau Semi-conducteur.
- collecte des particules générées dans le dispositif

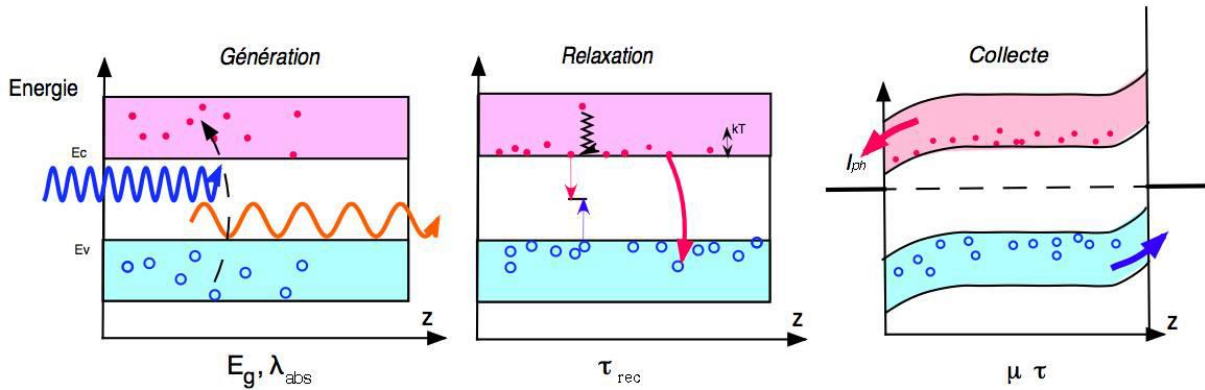


Figure II.8 : Les mécanismes de transformation [15].

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant : d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électron/trou créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction p-n. d'autres structures, comme les hétérojonctions et les Schottky peuvent également être utilisées.

Le fonctionnement des cellules photovoltaïque est illustré sur la figure suivante :

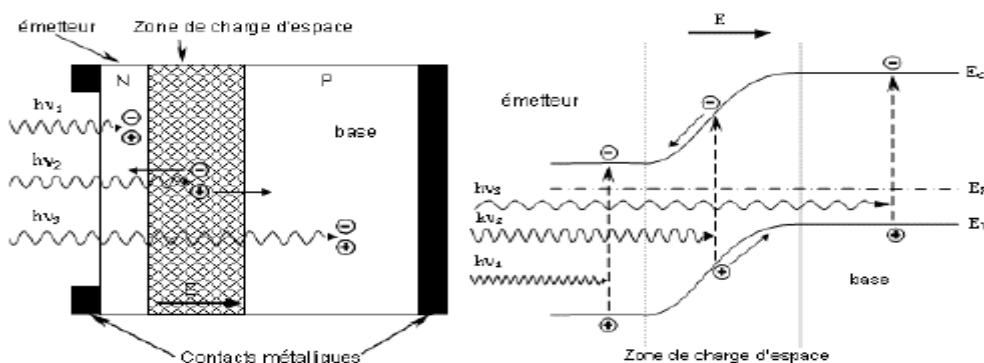


Figure II.9 : structure (image gauche) et diagramme de bande (image droite) d'une cellule photovoltaïque.

Chapitre II: Notion sur la Physique des semi-conducteurs

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones n et p dans la zone charge d'espace. Les photoporteurs auront un comportement différent suivant la région :

- dans la zone n ou p, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont "envoyés" par le champ électrique dans la zone p (pour les trous) ou dans la zone n (pour les électrons) ou ils seront majoritaires. On aura un photocourant de diffusion ;
- dans la zone de charge d'espace, les paires électron/trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région n, les trous vers la région p. on aura un photocourant de génération.

Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un photocourant résultant I_{ph} . c'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse.

III.1. Introduction

Les cellules au silicium amorphe (a-Si) sont apparues en 1976. Elles marquent une transition importante entre les structures de première génération et de deuxième génération. Ces entités se composent toujours de silicium, mais sur une épaisseur d'environ 1 μm seulement[18].

Le silicium intégré dans les cellules a-Si n'a pas fait l'objet d'une cristallisation. Ses atomes sont donc agencés sans réelle organisation, ce qui leur permet de mieux capter la lumière (par rapport au silicium cristallin). Problème : les charges générées ont plus de difficulté pour se déplacer à cause de la désorganisation de la matière, ce qui se traduit par un mauvais coefficient de conversion. Par conséquent, leur rendement est faible.

La désorganisation atomique a d'autres conséquences. Les électrons de valence des atomes de Si ne forment pas toujours des liaisons covalentes au sein du semi-conducteur. Il apparaît alors des liaisons pendantes qui peuvent dénaturer les propriétés électroniques du matériau.

III.2. Génération de cellules solaires

Les panneaux solaires sont classés en trois générations selon leur importance. Des recherches sont menées sur l'ensemble des trois générations en même temps pour améliorer leur efficacité, tandis que les cellules solaires de première génération constituent la plus grande part de la production commerciale (89.7%) en 2007[19].

a) Première génération

Les panneaux de première génération sont constitués de fines plaques de silicium mono ou multi-cristallin. Ces cellules ont un bon rendement (15 à 20%) et le prix le plus bas du marché. Elles représentent plus de 80% des cellules existantes. La durée de vie de ces panneaux est estimée à 35 ans[20].

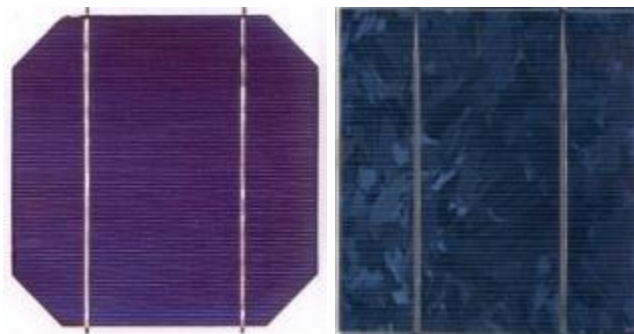


Figure III.1 : Cellule solaire de première génération.

b) Deuxième génération

Les panneaux de deuxième génération sont fabriqués en déposant une ou plusieurs couches semi-conductrices et photosensibles sur un support de verre, de plastique ou d'acier.

Cette technologie permet de diminuer les coûts de fabrication mais le rendement des cellules est moindre.

Différents produits sont disponibles. Certains intègrent dans leur composition des éléments chimiques rares (comme l'indium, le sélénium, le Gallium) et parfois même controversés: comme le tellure de cadmium[20].



Figure III.2 : Cellule solaire de deuxième génération.

a) Troisième génération

Les panneaux de troisième génération sont constitués de molécules organiques. Il y a trois types de cellules photovoltaïques organiques : les moléculaires, les polymères et les organiques hybrides.

Ces technologies sont encore au stade de la recherche et développement. Néanmoins, ces cellules sont déjà utilisées dans certaines applications spécifiques à faible consommation et forte valeur ajoutée comme les calculatrices ou le rechargement des appareils nomades.

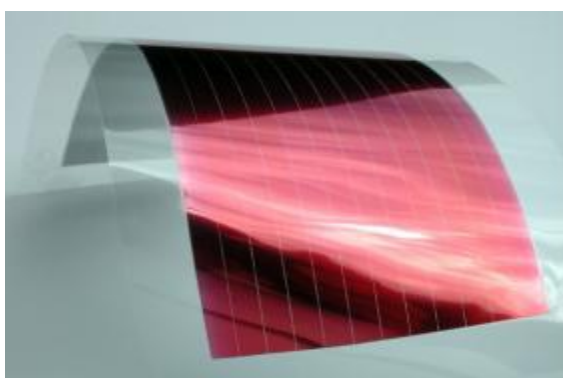


Figure III.3 : Cellule solaire de troisième génération.

III.3. Elaboration du Silicium

Le silicium existe en grande quantité à la surface du globe terrestre, c'est le deuxième élément le plus fréquent de la croûte terrestre, O_2 (46 %), Si (28%) Al (8%), sa température de la fusion est de 1415°C

Le silicium existe essentiellement sous forme oxydée (silice, sable) et nécessite d'une part d'être réduit et d'autre part, d'être purifié afin d'obtenir un matériau de qualité électronique.

a) Réduction de la silice

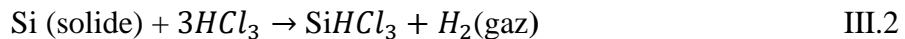
On réalise une électrolyse dans un four à arc pour atteindre une température assez élevée pour faire fondre la silice. La silice est mélangée à du carbone:



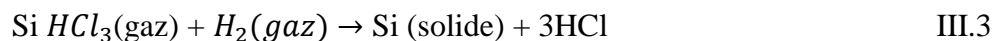
Le silicium obtenu a une pureté de 98%, il faut encore le purifier pour obtenir un matériau de qualité électronique[21].

b) Purification du silicium

Une des méthodes consiste à faire une distillation à partir de $SiHCl_3$ (trichlorosilane) liquide à température ambiante :



Le rendement de la réaction est égal à 90%, c'est une première purification car des précipités chlorés ne se mélangent pas au trichlorosilane. Ensuite, le $SiHCl_3$ (qui a une température d'ébullition faible: 31.8°C) est purifié par distillation fractionnée, il est plus volatil que les chlorures des principales impuretés. Ce trichlorosilane purifié est ensuite réduit pour redonner du silicium[21] :



Après la distillation, la teneur en impuretés actives est inférieure à 1ppm, le silicium est alors de qualité électronique. Le silicium pur obtenu (donc intrinsèque) doit maintenant subir un double traitement à la fois d'enrichissement en matériau dopant afin d'en faire du silicium

Chapitre III : La cellule photovoltaïque

extrinsèque de type p ou n comportant une proportion d'une impureté connue et d'obtenir de plus un monocristal convenablement orienté. En effet, le silicium précédemment obtenu était poly cristallin, il y a nécessité de le transformer en monocristallin pour améliorer sa conductivité. Cette opération est réalisée dans un four à tirage selon la procédure de Czochralski[21].

c) Procédé de Czochralski (CZ)

Dans le cas des oxydes utilisés notamment dans le cadre des applications laser, la méthode Czochralski est l'une des seules permettant d'obtenir de gros monocristaux de qualité optique suffisante. Le matériau à élaborer est d'abord porté à la fusion dans un creuset. Un germe monocristallin est approché du centre de la surface du bain, avec laquelle il est mis en contact. Le liquide remonte par capillarité le long du germe, créant une interface triple liquide-solide-gaz. Le germe est ensuite lentement tiré vers le haut, à des vitesses de l'ordre du millimètre par heure, pour former un monocristal. L'ensemble de la croissance est effectuée en maintenant le cristal en rotation, de manière à homogénéiser le bain et à contrôler la forme de l'interface solide/liquide[21][22].

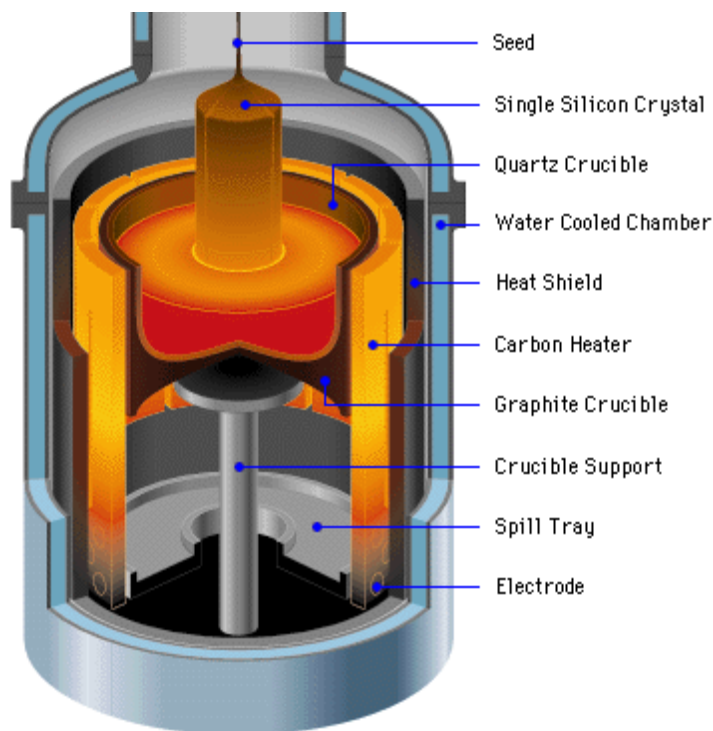


Figure III.4 : Tirage d'un lingot par la technique Czochralski. Le diamètre du lingot est lié aux Paramètres physiques en cours de tirage



Figure III.5 : Présente des lingots de silicium monocristallin obtenus par la méthode Czochralski.

Cependant, les simples cristaux de silicium développés par la méthode de Czochralski contiennent des impuretés puisque le creuset qui contient la fonte se dissout. Pour certains dispositifs électroniques, en particulier ceux exigés pour des applications de puissance élevée, le silicium développé par la méthode de Czochralski n'est pas assez pur. Pour ces applications, le silicium de la zone flottante (FZ-Si) peut être employé à la place[22].

III.4. Définition de l'état amorphe

a) Classification des matériaux

Les matériaux se divisent en deux classes suivant qu'ils sont cristallins ou amorphes.

Les matériaux cristallins comprennent les métaux, une grande partie des céramiques, une partie des polymères et la plupart des minéraux. Les atomes y sont disposés régulièrement suivant un réseau tridimensionnel[23].

L'état amorphe est caractérisé au contraire par des atomes placés de façon plus irrégulière dans lesquels on ne peut construire aucun réseau à grande distance. Elles comprennent en dehors des verres de nombreux polymères de poids moléculaire élevé, quelques composés inorganiques et un petit nombre d'éléments chimiques.

Cette classification des matériaux qui ne tient compte que de la géométrie suivant laquelle sont disposés les atomes permet de comprendre une partie de leurs propriétés.

b) Caractéristique macroscopique d'un solide amorphe

Nous observons régulièrement dans notre environnement de nombreux solides amorphes sans compter ceux dont la structure complexe est intermédiaire entre le cristal et l'amorphe.

L'exemple le plus commun est ce que l'on appelle en langage courant le verre. On sait qu'un morceau de verre est dur, qu'il est indéformable : même par une forte pression ou traction, on ne peut pas sensiblement en changer la forme à moins de le briser, ce qui est par contre assez facile ; on dit que le verre est fragile. A l'examen, à l'œil nu ou même à l'aide d'un fort microscope, le verre apparaît comme une substance homogène, continue, et cela a un caractère important car il reflète à notre échelle la nature de sa structure atomique[23].

c) Création des solides amorphes

Pour obtenir un solide amorphe, il faut franchir l'intervalle critique de température de quelques dizaines de degrés au dessous de la température de fusion du cristal, sans que des germes cristallins se forment. Pour la silice, c'est ce qui est réalisé par refroidissement du liquide, même assez lent. C'est aussi ce qui se produit à la fabrication des verres de composition plus usuelle que le verre de silice pure : l'introduction d'oxyde de sodium, de calcium, de plomb, etc... diminue en effet la viscosité du liquide, ce qui permet de couler le verre à une température moins élevée que la silice pure.

Il n'est pas possible « d'amorphiser » n'importe quelle substance, quelque soit le procédé employer. L'état amorphe est exceptionnelle, spéciale à certains corps, la grande majorité des solides n'existant qu'à l'état cristallisé. Ainsi, si l'on peut obtenir certains alliages métalliques, en général de composition complexe, de façon durable sous forme amorphe, ce n'est pas possible avec les métaux purs, sauf pour quelques rares exceptions[23].

III.5. Le silicium amorphe

Le silicium amorphe a-Si présente de faible variation de longueur et d'angle de liaison qui a pour conséquence d'éliminer l'ordre après quelques distances atomiques (figure.III.6). A cause de ce désordre, des distorsions apparaissent dans le réseau, induisant une distribution des états électroniques, ce qui se traduit par l'apparition d'états localisés dans la bande interdite en haut de la bande de valence et en bas de la bande de conduction. Ils forment ce qu'on appelle les queues de bande[24].

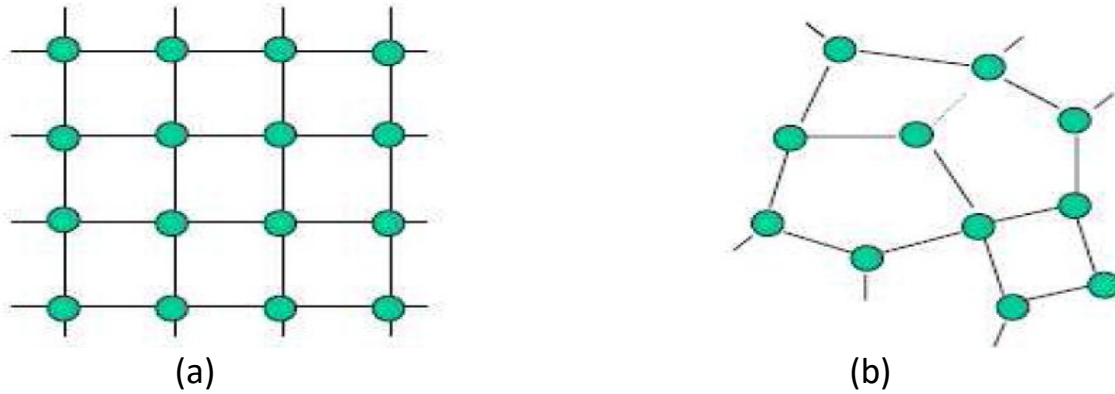


Figure III.6: vue schématique de l'arrangement atomique dans la Structure:
(a) cristalline, (b) amorphe.

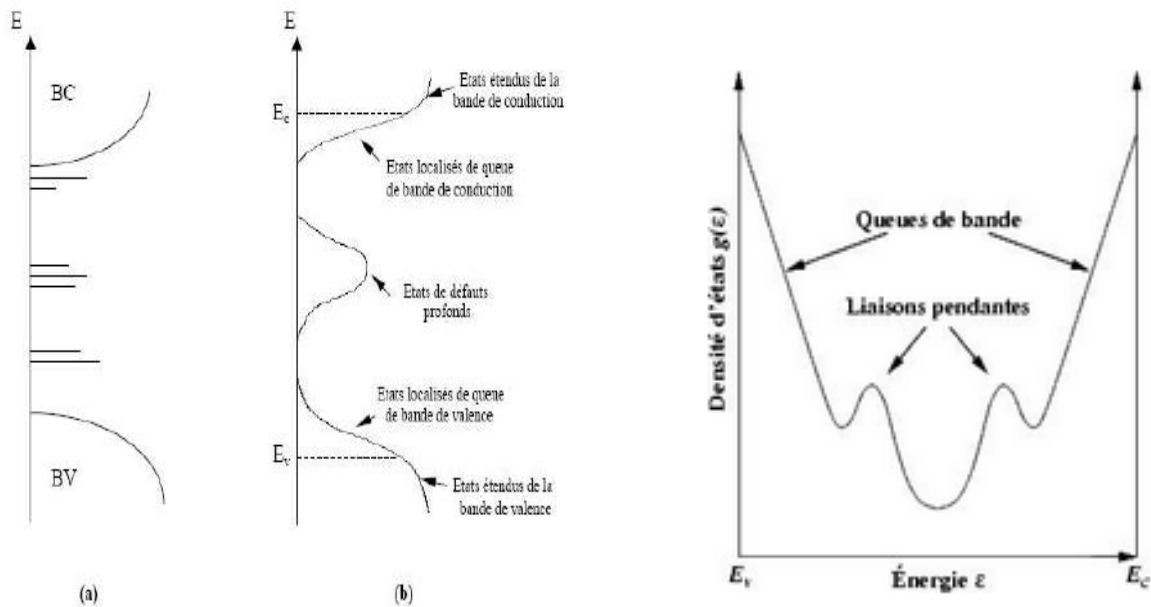


Figure III.7 : Distribution de densité d'états dans la structure cristalline (a), et la structure amorphe (b).

D'autre part, ces distorsions peuvent donner lieu à la formation des liaisons pendantes (figure III.5), Ces dernières ont une très grande influence sur les propriétés électroniques du silicium amorphe. Elles sont caractérisées par la présence d'un électron célibataire de l'atome concerné. Un second électron peut aisément s'y fixer, pour former une paire d'électrons, le centre est alors chargé négativement. Les liaisons pendantes constituent de ce fait des pièges à électrons très efficaces. L'électron célibataire peut aussi éventuellement quitter l'atome, laissant un centre chargé positivement.

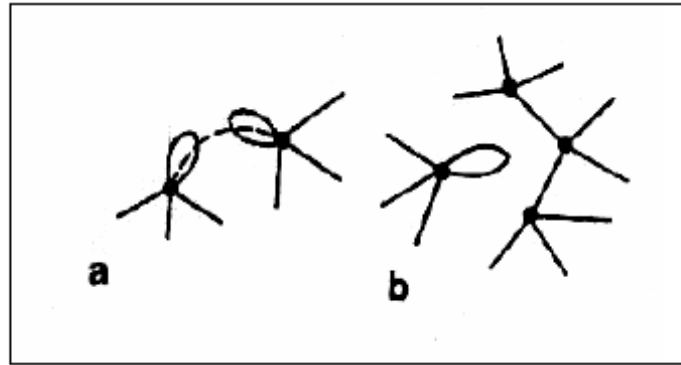


Figure III.8: Représentation schématique de la structure atomique :
(a- une paire de liaisons pendantes, b- une liaison pendante isolée).

III.5.1. Densité d'états dans a-Si

La description énergétique du silicium amorphe est plus compliquée à déterminer que celle du silicium cristallin. Une représentation du gap est à l'aide d'une densité d'états (DOS) $N(E)$. L'a-Si est caractérisé par des faibles mobilités des porteurs libres et la présence d'états localisés dans le gap près des bandes de valence et de conduction (queues de bandes) et près du niveau de Fermi (états profonds) [25].

La définition la plus utilisée pour la densité d'états correspond au modèle introduit par Davis et Mott [26]. Dans ce modèle, la (DOS) est constituée de deux distributions exponentielles respectivement pour les queues de bandes de conduction (QBC) et de valence (QBV), et de distributions gaussiennes pour les états profonds. Les premières sont liées au désordre dans le matériau (angles et longueurs des liaisons interatomiques) tandis que les secondes dépendent de la coordination (liaisons pendantes notamment).

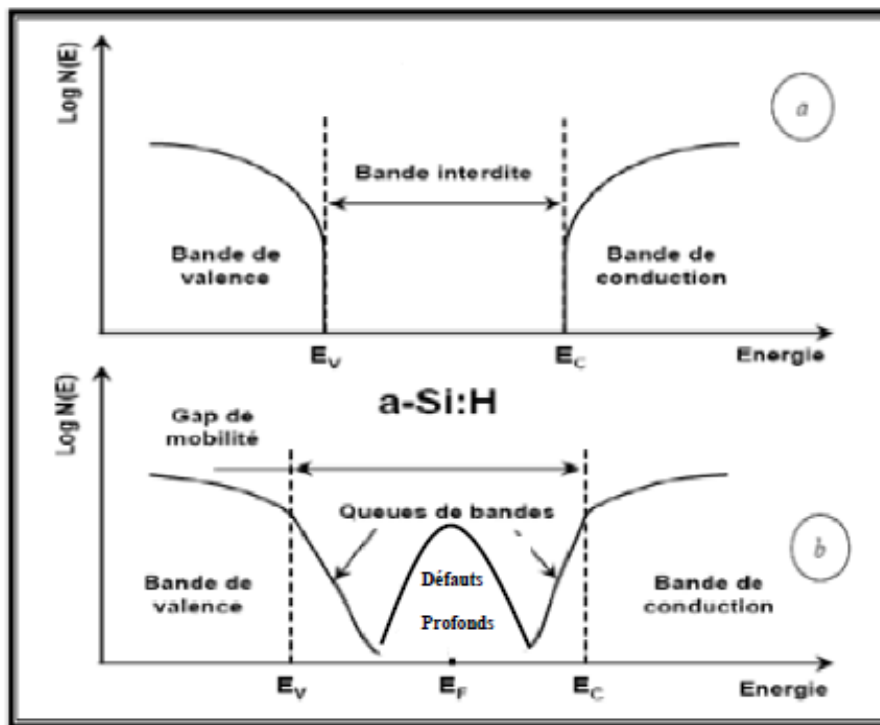


Figure III.9 : Densité d'états en fonction de l'énergie :
a) semi-conducteur cristalline, b) semi-conducteur amorphe.

III.5.2. Propriétés optiques de silicium amorphe

Son coefficient d'absorption est supérieur à celui du silicium monocristallin aux énergies au-delà de 1.7 eV et permet à seulement 1 μm d'a-Si d'absorber 90% du spectre solaire. Selon le type de silicium amorphe le gap optique est compris entre 1.7 et 1.8 eV. La mobilité des électrons varie de 10 à 20 cm^2/vs et celle des trous de 1 à 5 cm^2/vs .

III.5.3. Quelques valeurs caractéristiques

Niveau de Fermi du matériau intrinsèque (eV)	0.6-0.7
Energie caractéristique des états profonds (meV)	86
Energie caractéristique des états de queue (meV)	23
Constante diélectrique	1019
Densité d'états effective dans la bande de conduction (cm^{-3}) à 300K	11
Gap énergétique (eV) à 300 K	1.7
Mobilité des électrons à 300°K (cm^2/vs)	10-20
Mobilité des trous à 300°K (cm^2/vs)	1-5

Tableau III.1 : Les valeurs caractéristiques de silicium amorphe[27].

III.6. Les cellules amorphes

Les cellules amorphes (figure III.10) sont composées d'un support en verre ou en matière synthétique sur lequel est disposé une fine couche de silicium (l'organisation des atomes n'est plus régulière comme dans un cristal). Leur rendement est de l'ordre de 5 à 9% [28], plus bas que celui des cellules cristallines mais le courant produit est relativement bon marché.



Figure III.10 : Cellules Photovoltaïques Amorphes [28].

Elles sont appliquées dans les petits produits de consommation (montres, calculatrices) mais sont peu utilisées dans le cadre des installations solaires.

III.6.1. Composition d'une cellule au silicium amorphe

De haut en bas, les cellules a-Si se composent généralement (plusieurs variantes existent)[28] :

- d'une couche de verre par où pénètre la lumière ;
- d'un film conducteur transparent (ou TCO, pour *transparent conducting oxides*) qui récupère les charges négatives, par exemple de l'oxyde d'indium-étain (ITO), de l'oxyde de zinc (ZnO) ou du stannate de cadmium (Cd_2SnO_4) ;
- de trois couches de silicium amorphe, respectivement n, i puis p ;
- d'une couche conductrice réfléchive qui récupère les trous (souvent en aluminium) ;
- d'un substrat en verre (solide), en métal (souple) ou en plastique (souple).

III.6.2. l'oxyde d'indium et d'étain (ITO)

L'oxyde d'indium et d'étain : est un semi-conducteur composé d'un mélange d'oxyde d'indium (In_2O_3) et d'oxyde étain (SnO_2) , dans la proportion massique typique de 90% pour le premier et 10% pour le second, dont le gap optique est de l'ordre de 4.70 eV. Sa caractéristique principale est la combinaison, à la fois d'une conductivité électrique élevée et d'une bonne transparence dans le visible cet alliage possède une transmittance élevée entre 70% et 90% SUR tout la gamme du visible, ce qui permet à la lumière de traverser l'anode et d'être absorbé par la couche active sans trop de perte[29].

III.6.3. Structure PIN

Le principe de base d'une cellule solaire faite avec un matériau semi-conducteur comme le silicium amorphe consiste en une jonction p-i-n, c'est à dire: une zone de silicium dopée p - une zone de silicium non dopée (intrinsèque) – une zone de silicium dopée n [Shah 1992]. La figure III.11 schématise le fonctionnement d'une cellule solaire de ce type:

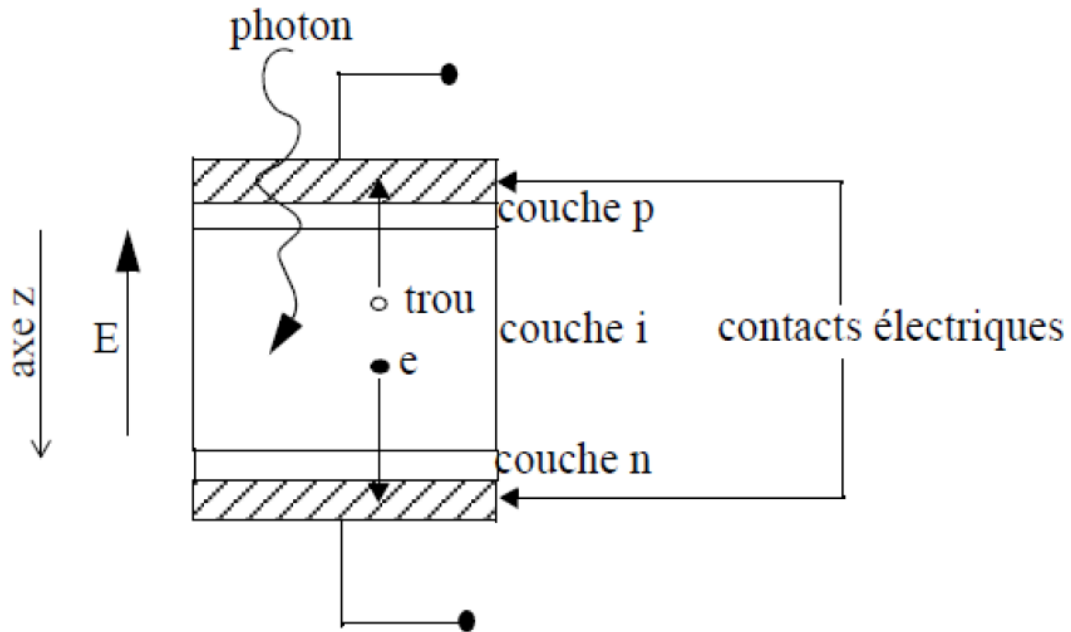


Figure III.11 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire en silicium amorphe ou microcristallin.

Lorsqu'un photon d'énergie supérieure au gap du silicium atteint la zone intrinsèque, il est absorbé pour créer une paire "électron-trou". Un courant électrique est alors généré par la séparation de cette paire "électron-trou", en direction des deux bornes opposées de la cellule. Cette séparation se fait sous l'action du champ électrique présent dans la zone de silicium intrinsèque[30].

Le trou et l'électron créés dans la couche "i" doivent traverser les couches de silicium dopées ("p" et "n") avant d'atteindre les bornes de la cellule solaire. Malheureusement, ces couches dopées de silicium amorphe ou microcristallin possèdent énormément de "défauts" divers qui provoquent la recombinaison des électrons et trous dans ces couches avant que ceux-ci aient pu atteindre les bornes de la cellule. C'est pourquoi on donne à ces couches dopées le moins d'épaisseur possible.

Deux couches conductrices de courant placées aux bornes de la cellule vont récupérer l'électron et le trou qui n'auront alors plus beaucoup de risques de se recombiner.

III.7. Elaboration de la cellule solaire à base de silicium amorphe

La technique employée pour fabriquer les matériaux étudiés est la méthode de dépôt chimique en phase vapeur PEVCD[31].

a) les équipements utilisés :

- un réacteur de décharge à couplage capacitif RF.

Chapitre III : La cellule photovoltaïque

- deux sortes d'électrodes distantes de 40 mm se trouvent dans un récipient en acier (anodes sont reliées à la terre et servent de supports aux substrats et les cathodes sont reliées à une émettrice haute fréquence $f=13.56$ MHz)
- Une pompe à vide sert à évacuer les récipients avant le dépôt et à aspirer les gaz usagés pendant le procédé pour maintenir la pression constant.

Pour le dépôt de silicium amorphe on utilise surtout le silane SiH_4

b) Dépôt chimique en phase vapeur :

le silicium amorphe peut être déposé par une vitesse avoisinant la dizaine de nanomètres par minute directement à basse température (200 à 400°C), assisté par plasma radio fréquence (13,56 MHz), Dans ce milieu, les collisions inélastiques entre les électrons de haute énergie (accélérés par le champ électrique RF) et le silane génèrent des radicaux, des ions et des espèces excitées. Les espèces réactives produites dans le plasma vont se condenser sur le substrat pour former (atome après atome) une couche mince, en général désordonnée. Les gaz sources sont le silane (SiH_4) et, pour les gaz dopants, le diborane(B_2H_6) et la phosphine (PH_3)[32].

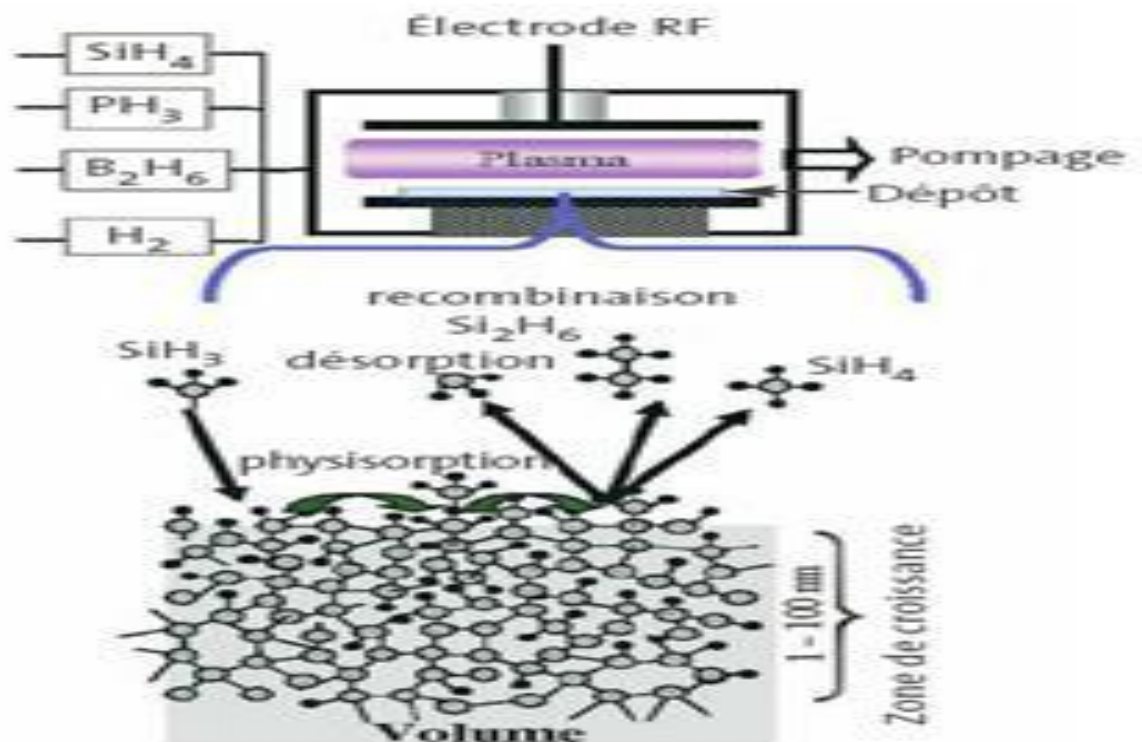


Figure III.12 : Dépôt de couches minces de silicium amorphe par PECVD

Chapitre III : La cellule photovoltaïque

Par la décomposition du silane (SiH_4), Sur un substrat de verre de vitre, on dépose d'abord une couche d'oxyde transparent conducteur (0,5 micron), puis une couche de a-Si de type n, une couche de a-Si semi-isolante, dite intrinsèque (au total 1 micron), et enfin une couche métallique arrière à base d'argent (l'éclairage étant réalisé à travers le support de verre). Ces caractéristiques, permettant d'abaisser significativement les coûts de production. Cependant, la grande densité de défauts du silicium amorphe (liaisons pendantes, états d'interface, structure multicristalline) limite son rendement de conversion, rendement inférieur à 10 % pour les cellules solaires industrialisées[28].

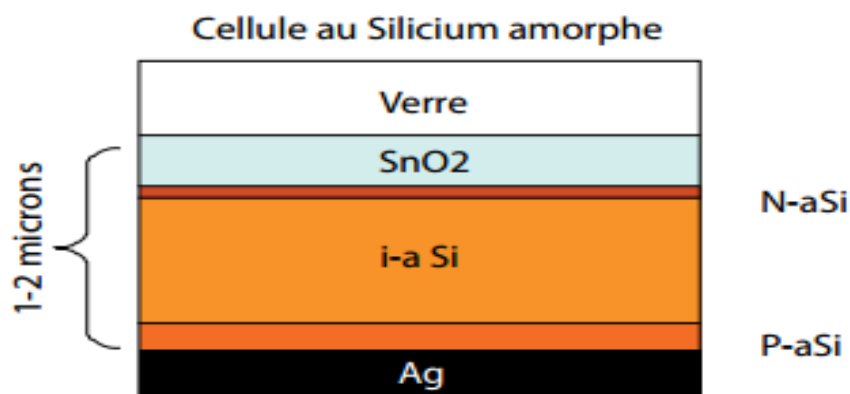


Figure III.13 : Structure de la cellule au silicium amorphe.

Un grand avantage de la méthode de dépôt chimique en phase vapeur PEVCD est qu'on peut couvrir des grandes surfaces avec du silicium amorphe. Mais il n'est pas censé de produire des cellules de telle grandeur, car dans ce cas la photo courant généré serait trop élevé. Comme les pertes ohmiques en puissance croissent de manière quadratique avec le courant, le rendement d'une telle cellule serait considérablement réduit. Il serait mieux de produire une tension élevée. Pour cela on doit mettre en série plusieurs petites cellules[31].

Les techniques permettant de produire des matériaux en couches minces sont très nombreuses. La plus ancienne est sans doute l'évaporation sous vide du matériau que L'on veut obtenir, mais beaucoup d'autres méthodes sont fréquemment appliquées: la pulvérisation cathodique, la décomposition Photo-chimique, la décomposition thermique d'un gaz ou dépôt chimique en phase Vapeur (CVD – chemical vapor deposition) (PECVD: plasma Enhanced chemical vapor depositon).

Chapitre III : La cellule photovoltaïque

Les cellules solaires en silicium amorphe présentent des avantages et des inconvénients. Nous avons cité quelques cas dans le tableau suivant:

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">• Possibilité de le déposer sur des grandes surfaces.• Possibilité de le déposer sur des surfaces non planes ou souples.• Facilité de fabrication.• Forte absorption de la lumière visible.• Utilisation de substrats à bas coût.	<ul style="list-style-type: none">• Beaucoup de défauts, dans la structure.• Faible mobilité des porteurs libres.• il faut d'utiliser une isolante galvanique entre les modules et le réseau, sans cette isolante galvanique les cellules amorphes se dégradent très rapidement.

Tableau III.2 : Les avantages et les inconvénients de la cellule solaire à base de silicium amorphe.

III.8. Schéma électrique équivalent

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma équivalent électrique ci-dessous. On peut considérer le cas d'une cellule photovoltaïque idéale comprenant une source de courant et une diode en parallèle. La source de courant modélise le courant généré par les photons et la diode qui modélise la jonction PN.

Pour envisager le cas d'une cellule photovoltaïque réelle, le circuit équivalent doit intégrer :

- Une résistance R_s , qui modélise les pertes résistives au sein de la photopile et donc les métallisations :
- Une résistance parallèle R_{sh} modélisant les courants de fuite qui court-circuitent la jonction (fuit par les bords de la cellule est au niveau de la jonction).

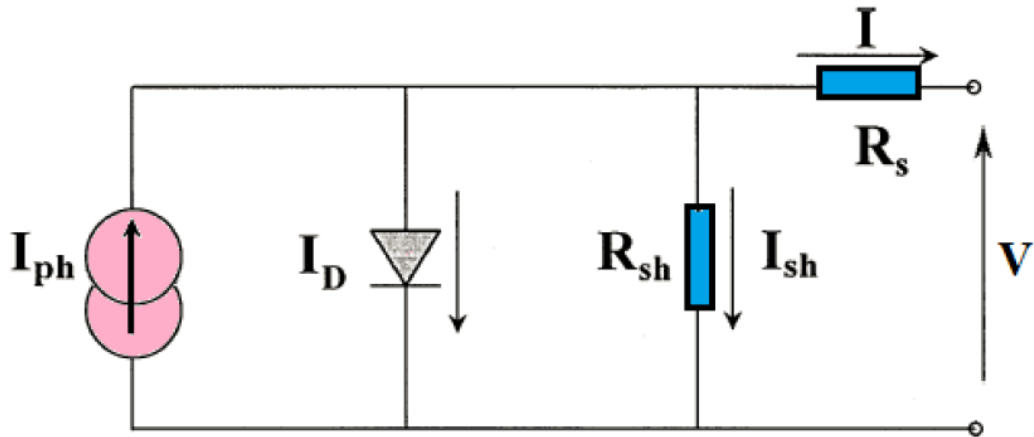


Figure III.14 : schéma électrique équivalent de la cellule solaire.

Selon le schéma équivalent d'une cellule solaire dans la figure (III.14), on a :

$$I = I_{ph} - I_d - \left(\frac{V + IR_s}{R_{sh}} \right) \quad \text{III.4}$$

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{nV_T} \right) - 1 \right] - \left(\frac{V + IR_s}{R_{sh}} \right) \quad \text{III.5}$$

Où :

I_s : le courant de saturation en Ampère (A).

n : le facteur de qualité de la diode; sans dimension.

V_T : le potentiel thermique en Volt (V) ; il est donné par :

$$V_T = \frac{KT}{q} \quad \text{III.6}$$

Où :

K : la constante de Boltzmann ($1.38066 \times 10^{-23} \text{ J/K} = 8.61400 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$).

T : la température absolue en Kelvin (K).

q : la charge absolue d'un électron en coulomb ($1.60281 \times 10^{-19} \text{ C}$).

III.9. Grandeurs caractéristiques de la cellule solaire

Les grandeurs caractéristiques de la cellule solaire peuvent être déterminées à partir de la caractéristique $I(V)$ décrivant le fonctionnement de la cellule[16]. La figure ci-dessous représente la caractéristique $I(V)$ sous obscurité et sous éclaircissement et sa représentation conventionnelle.

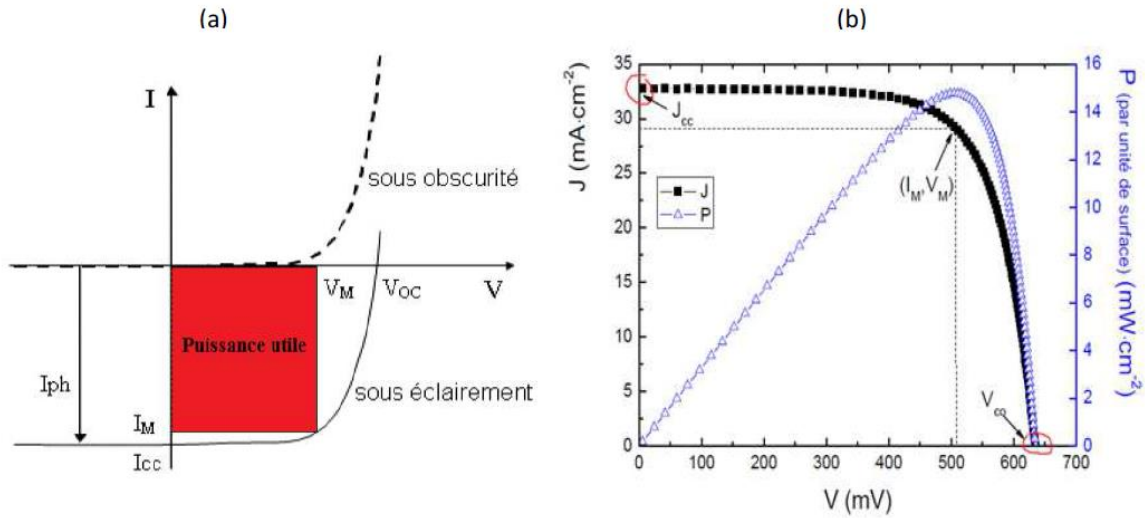


Figure III.15 : (a) caractéristique $I(V)$ de la cellule photovoltaïque sous éclairement et dans l’obscurité. (b) représentation conventionnelle de la courbe $I(V)$ et $P(V)$.

Les paramètres propres à la cellule photovoltaïque (V_{co}, I_{cc}, FF, η), extraits de la caractéristique $I(V)$, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques.

a) Courant de court-circuit, I_{cc}

Il s’agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant $V=0$) dans le schéma équivalent, il croît linéairement avec l’intensité d’illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée. De la longueur d’onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

b) Tension à circuit ouvert, V_{oc}

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d’énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l’intensité lumineuse.

La tension V_{co} est donnée par la relation :

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{I_{cc}}{I_0} + 1\right) \quad \text{III.7}$$

c) La puissance maximum, P_m

Le point de fonctionnement est imposé par la résistance de charge et non par la cellule elle-même. Un choix judicieux de la résistance de charge permettra donc d'obtenir la puissance maximale, soit :

$$P_m = I_m \cdot V_m \quad \text{III.8}$$

Avec: V_m la tension correspondante à la puissance maximale fournie,

I_m le courant correspondant à la puissance maximale fournie.

d) Facteur de forme, FF

La puissance fournie au circuit extérieure par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale pour une pointe de fonctionnement $P_m(I_m$ et $V_m)$ de la courbe courant-tension. Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{cc}} \quad \text{III.9}$$

Dans le cas d'une cellule idéale le facteur de forme FF ne peut pas être supérieure à 0.89 du fait de la relation exponentielle liant courant et tension.

e) Le rendement η

Le rendement η des cellules photovoltaïques désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre le rapport maximal délivré par la cellule et la puissance lumineuse incidente.

$$\eta = \frac{P_{max}}{S \times E} \quad \text{III.10}$$

Ou d'après (III.9):

$$P_m = FF \times I_{cc} \times V_{co} \quad \text{III.11}$$

$$\eta = \frac{FF \times I_{cc} \times V_{co}}{S \times E} \quad \text{III.12}$$

IV.1. La simulation par TCAD-SILVACO

Le logiciel de simulation Atlas est un simulateur de modélisation des caractéristiques électriques des composants à semi-conducteurs, nous allons utiliser ce logiciel pour la simulation électrique de la cellule solaire sujet de notre travail.

Dans ce chapitre, nous allons premièrement présenter le modèle physique utilisé pour décrire le fonctionnement de cette cellule, qui est basé sur la résolution numérique des équations de Poisson et des équations de continuité.

Dans ce travail nous allons simuler en premier lieu une cellule solaire en a-Si de structure PIN et extraire ces caractéristiques électriques.

La simulation et l'optimisation des cellules solaires par TCAD SILVACO nécessitent des modèles physiques utilisés pour décrire le fonctionnement de cette cellule, et dans notre cas nous utilisons les modèles suivants :

- recombinaison Shockley-Read-Hall (SRH)
- recombinaison Auger

IV.2. La recombinaison

Par définition, la recombinaison est le retour de l'électron de l'état excité à l'état initial ou de la bande de conduction vers la bande de valence, car il ne peut rester dans un état excité que pour un temps faible ($t < 10^{-8}$ s). Ce retour de l'électron de l'état excité vers l'état stable peut avoir lieu selon plusieurs façons (mécanisme)[35]. Lors d'une génération des paires électrons-trous, il faut aussi considérer le processus inverse ou recombinaison des paires électrons-trous, permettant de définir les taux de recombinaison:

R_n Pour les électrons, R_p pour les trous par :

$$R_{n,p} = \frac{\Delta_{n,p}}{\tau_{n,p}} \quad \text{IV.1}$$

Avec : $\Delta_{n,p} = n, p - n_e, p_e$: la densité des porteurs générés.

n_e, p_e : La densité des porteurs à l'équilibre.

$\tau_{n,p}$: La durée de vie de ces porteurs.

La recombinaison des électrons et des trous est un processus par lequel les deux porteurs s'annihilent. Les électrons arrivant à la bande de conduction retournent à la bande

de valence selon différents mécanismes, soit en une seule étape ou par des étapes multiples.

Les mécanismes de recombinaison sont semblables par le fait qu'ils contribuent tous pour annihiler les porteurs en excès et ils sont :

a) Recombinaison SRH (Schokley-Read-Hall)

Pour le silicium, il y a des niveaux profonds proches du milieu de la bande interdite associés à quelques impuretés courantes. L'électron a tendance à revenir à son état initial dans la bande de valence, en passant par ces niveaux (s'ils existent)[35].

Le modèle physique décrivant les recombinaisons à travers les défauts est basé sur le modèle de Shockley-Read-Hall à un seul niveau piège.

La recombinaison Schokley-Read-Hall est modélisée par :

$$R_{SRH} = \frac{pn - n_{ie}^2}{\tau_{p0} \left[n + n_{ie} \exp\left(\frac{E_t - E_i}{kT_L}\right) \right] + \tau_{n0} \left[p + n_{ie} \exp\left(\frac{-(E_t - E_i)}{kT_L}\right) \right]} \quad \text{IV.2}$$

Avec

E_t : La position énergétique des états de piège

E_i : Le niveau de Fermi dans le semi-conducteur intrinsèque

τ_{p0} : Respectivement la durée de vie pour les électrons et les trous

n_{ie} : La concentration intrinsèque

k : la constante de Boltzmann

T_L : La température en Kelvin.

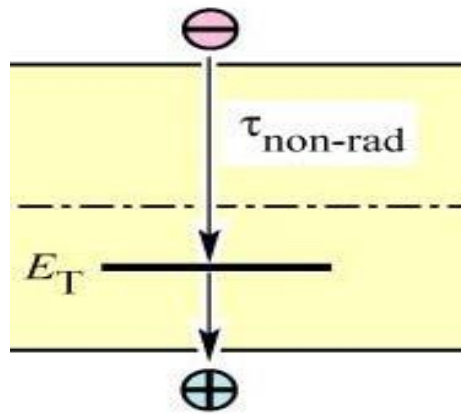


Figure IV.1 : Schéma descriptif du processus de recombinaison par piège.

b) Recombinaison Auger

Nous avons une recombinaison de type Auger, lorsque l'énergie de l'électron qui se recombine dans la bande de valence est transférée sous forme d'énergie cinétique à un autre électron libre. L'énergie transférée est libérée ensuite sous forme de phonons[35]. Ce mécanisme est prédominant pour les régions fortement dopées.

La recombinaison Auger est modélisée en utilisant l'expression suivante :

$$R_{Auger} = C_{Aug,n}(pn^2 - nn_{ie}^2) + C_{Aug,p}(np^2 - pn_{ie}^2) \quad \text{IV.3}$$

Où $C_{Aug,n}$ et $C_{Aug,p}$ sont les coefficients Auger pour les électrons et les trous.

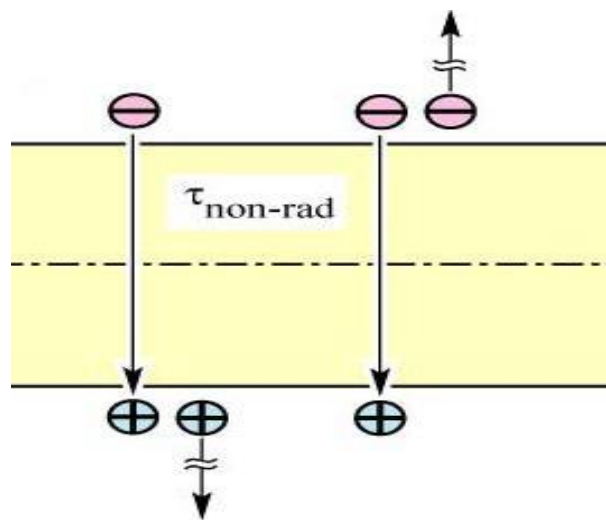


Figure IV.2 : Schéma descriptif du processus de recombinaison de type Auger.

IV.3. Equation de Poisson

L'équation de Poisson s'exprime par :

$$\text{div } \epsilon \nabla \psi = - \rho \quad \text{IV.4}$$

Où ψ représente le potentiel électrostatique, ϵ la permittivité électrique ($\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$), ϵ_0 est la permittivité du vide et ϵ_r est la permittivité relative du matériau), ρ est la densité volumique nette de charges libres[34].

IV.4. Equations de continuité

L'équation de continuité s'exprime par :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \text{div} \vec{J}_n + G_n - R_n \quad \text{IV.5}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \text{div} \vec{J}_p + G_p - R_p \quad \text{IV.6}$$

G_n et G_p sont les taux de génération pour les électrons et les trous par des agents externes, R_n et R_p sont respectivement les taux de recombinaisons (internes) pour les électrons et les trous, J_n et J_p sont les densités des courants des électrons et des trous.

L'expression de la densité de courante est :

$$\vec{J}_n = qn\mu_n\vec{E} + qD_n \text{grad}n \quad \text{IV.7}$$

$$\vec{J}_p = qp\mu_p\vec{E} - qD_p \text{grad}p \quad \text{IV.8}$$

Si on considère le modèle de type linéaire, les deux équations deviennent :

$$J_n(x) = qn(x)\mu_n E(x) + qD_n \frac{dn(x)}{dx} \quad \text{IV.9}$$

$$J_p(x) = qp(x)\mu_p E(x) - qD_p \frac{dp(x)}{dx} \quad \text{IV.10}$$

Où $E(x)$ est le champ électrostatique, $p(x)$ et $n(x)$ sont, respectivement les concentrations des trous et des électrons libres. μ_n, μ_p Sont les mobilités respectives des électrons et des trous et D_n, D_p sont leurs coefficients de diffusion.

Les densités des électrons et des trous sont données par :

$$\text{Pour électrons :} \quad n(x) = N_c e^{(E_F - E_c(x))/k_B T} \quad \text{IV.11}$$

$$\text{Pour trous :} \quad p(x) = N_v e^{(E_v(x) - E_F)/k_B T} \quad \text{IV.12}$$

Les quantités N_c et N_v sont les concentrations équivalentes des états de la bande de conduction et de valence

IV.5. Structure étudiée

La structure choisie est une cellule photovoltaïque basée sur le silicium amorphe. Elle contient trois couches (une couche dopée n, une couche intrinsèque i et une couche dopée p), cette cellule est limitée au-dessus et au-dessous par ITO (l'oxyde d'indium l'étain).

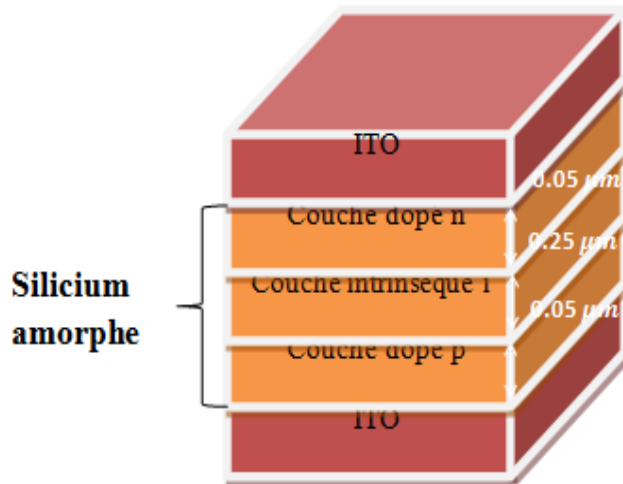


Figure IV.3 : la structure de la cellule solaire étudiée.

Dans cette partie de travail, nous allons étudier les caractéristiques électriques et optiques de cette cellule photovoltaïque sous un éclairage de $1000 W/m^2$ et une température de 300K.

Pour définir l'effet des défauts dans le silicium amorphe sous TCAD SILVACO nous avons utilisé le module TFT (thin-film transistor simulator).

IV.6. TFT (thin-film transistor simulator)

TFT est un module Atlas qui simule des systèmes de matériaux désordonnés.

TFT nous permet de définir une distribution d'énergie des états défauts dans la bande interdite des matériaux semi-conducteurs, ceci est nécessaire pour le traitement précis des propriétés de l'électricité des matériaux tels que le silicium polycristalline et le silicium amorphe[33].

a) Définition Les États défauts

Dans un semi-conducteur amorphe, la densité d'états est composée de quatre bandes : deux bandes de queue (une bande de valence comme donneur et une bande de conduction comme accepteur) et deux bandes de niveau profond (un comme accepteur et l'autre comme donneur) les premières sont modélisées en décomposition exponentielle à partir du bord de la bande, tandis que les derniers sont modélisés on utilise une distribution gaussienne[36].

La densité est donc donné par :

$$g(E) = g_{GA}(E) + g_{GD}(E) + g_{TA}(E) + g_{TD}(E) \quad \text{IV.13}$$

Les indices G et T sont pour gaussienne et de la queue, respectivement, tandis que A et D sont respectivement accepteur et donneur

$$g(E) = G_{GA} \exp \left[- \left[\frac{E_{GA} - E}{\sigma_D} \right]^2 \right] + G_{GD} \exp \left[- \left[\frac{E - E_{GD}}{\sigma_D} \right]^2 \right] + G_{TA} \exp \left[\frac{E - E_C}{E_A} \right] + G_{TD} \exp \left[\frac{E_V - E}{E_D} \right] \quad \text{IV.14}$$

Où :

$E_{V(C)}$: est le bord de la bande de valence (conduction)

$G_{TD(A)}$ (cm^{-3}/ev): La densité efficace à $E_{V(C)}$

$E_{D(A)}$: L'énergie de la pente caractéristique d'états de la bande queue de valence (conduction).

Chapitre IV: Simulation numérique sous TCAD-silvaco

$G_{GA(D)}$: La densité totale (cm^{-3}/ev)

$\sigma_D(\sigma_A)$: L'écart-type.

$E_{GD(A)}$: L'énergie de crête de la distribution gaussienne.

Les paramètres des différents constituants de la densité d'états utilisés pour simuler leur effet sur le silicium amorphe performances de cellules solaires sont présentés dans le tableau suivant :

b) La déclaration de défaut

distribution exponentielle		Distribution gaussienne	
Densité des bandes (cm^{-3}/ev)	Leur énergie (ev)	Densité des bandes (cm^{-3}/ev)	Leur énergie (ev)
$N_{ta}=10^{21}$	$W_{ta}=0.033$	$N_{ga}=1.510^{15}$	$W_{ga}=0.15$
$N_{td}=10^{21}$	$W_{td}=0.049$	$N_{gd}=1.510^{15}$	$W_{gd}=0.15$

Tableau IV.1 Paramètre des défauts du silicium amorphe.

La figure ci-dessous représente la structure de la cellule de référence utilisée lors de la simulation.

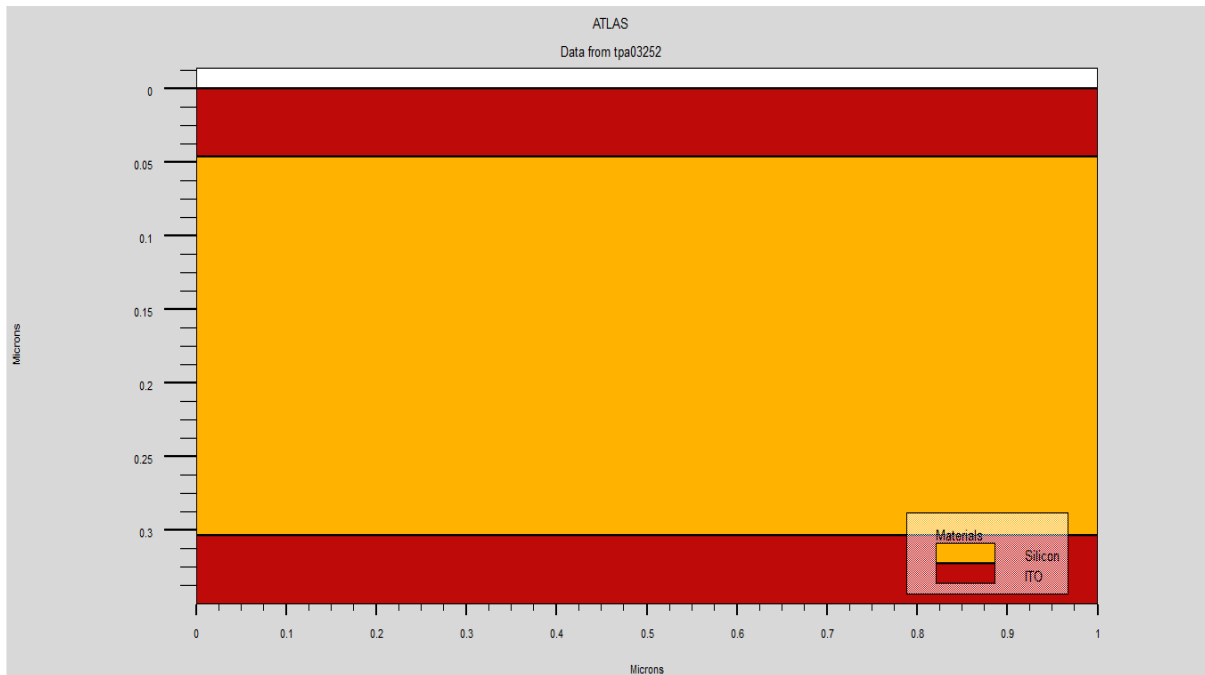


Figure IV.4 : Matériaux et les régions d'une cellule solaire amorphe.

Les paramètres caractéristiques de la cellule solaire étudiée sont représentés dans le tableau suivant :

Paramètre	Symbole	valeur
Bande interdite	E_g	1.9 ev
Mobilité d'électron	μ_n	$20m^2/v s$
Mobilité de trou	μ_p	$1.5m^2/v s$
Densité d'état dans la bande de conduction (300K)	N_c	$2.510^{20} cm^{-3}$
Densité d'états dans la bande de valence (300K)	N_v	$2.510^{20} cm^{-3}$

Tableau IV.2 : Présentation des paramètres de la cellule solaire étudiée.

IV.7. Caractéristique courant-tension de la structure étudiée

La figure IV.5, présente les caractéristiques courant-tension de la cellule solaire étudiée avec défaut sous spectre solaire AM 1.5 avec un éclairement de $1000 W/m^2$ et à la température 300 K. À partir des courbe I(V) on peut connaitre les pointes caractéristiques de fonctionnement de cette cellule :

- Le courant de court-circuit I_{cc} (tension nulle correspondant au courant maximum produit)
- La tension à vide V_{oc} (courant nul pour une tension maximale)
- Le courant de puissance maximale I_m
- La tension de puissance maximale V_m

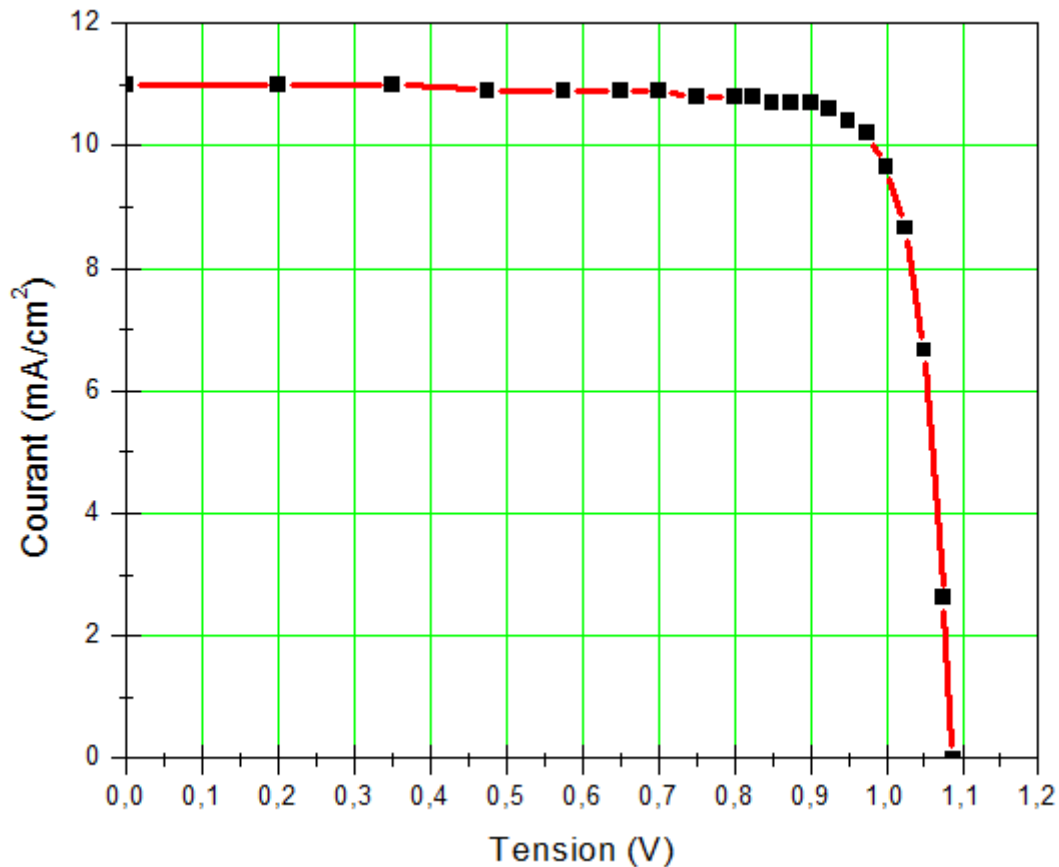


Figure IV.5 : Caractéristique courant-tension de la cellule solaire étudiée.

A partir de la caractéristique I(V) nous pouvons déterminer la tension en circuit ouvert $V_{co} = 1.0875$ V et la densité de courant de court-circuit $I_{cc} = 11 \text{ mA/cm}^2$.

- Les valeurs extraites de cette courbe sont données ci-dessous

$I_{cc}(\text{mA/cm}^2)$	$V_{oc}(\text{V})$	$I_m(\text{mA/cm}^2)$	$V_m(\text{V})$	$P_m(\text{mW/cm}^2)$	$\eta \%$	FF %
11	1.0875	10.17	0.975	9.92	9.92	82.93

Tableau IV.3 : Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en silicium amorphe.

Chapitre IV: Simulation numérique sous TCAD-silvaco

Le rendement qui est égale à 9.92% est en bon accord avec le rendement trouvé

Expérimentalement entre 6 et 9% pour une cellule solaire en a-Si [28].

La densité de puissance délivrée par la cellule a pour expression $P = V.I$, pour chaque Point de la figure.

On peut calculer la puissance P et tracer la courbe $P = f(V)$. (Figure IV.6)

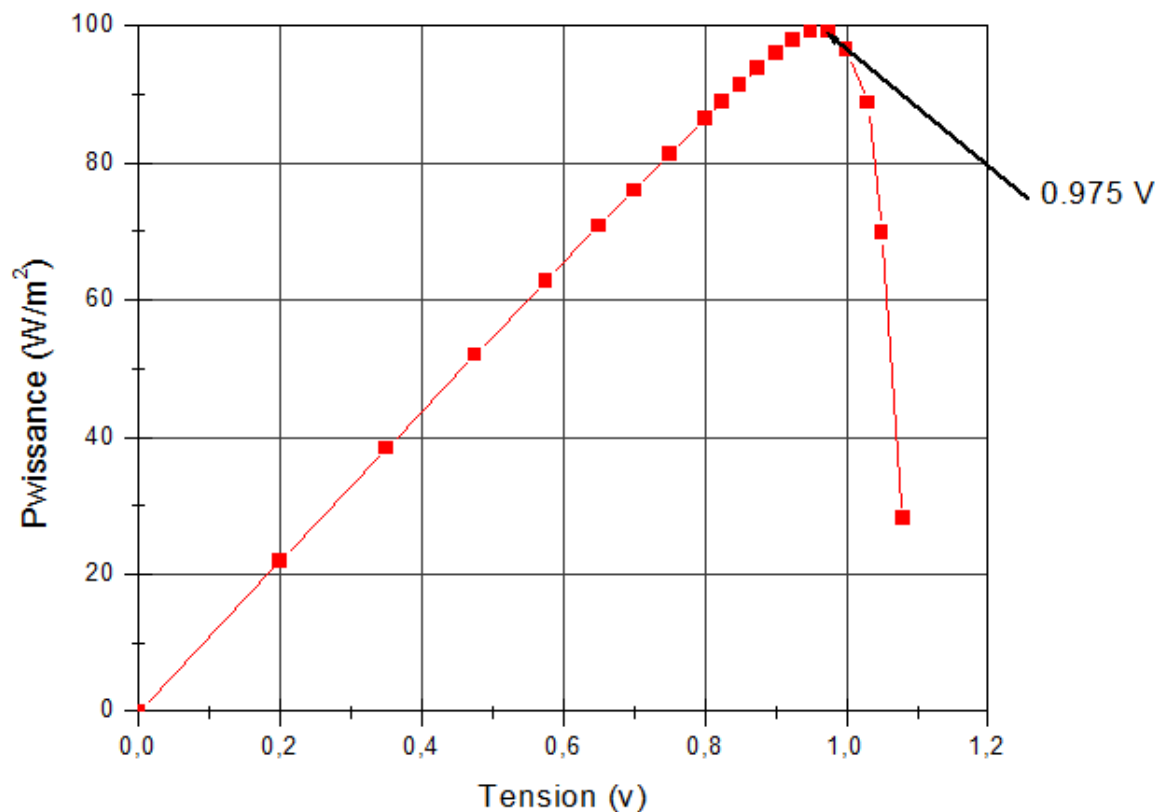


Figure IV.6 : Caractéristique puissance-tension.

IV.8. Effet des niveaux des pièges profonds avec distribution gaussienne

La modification dans la densité des niveaux des pièges profonds avec une distribution gaussienne (N_{ga} et N_{gd}), change tous ces paramètres, dont le courant de court-circuit, la tension en circuit ouvert, le facteur de forme et le rendement. En faisant varier la densité entre $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}/\text{ev}$ jusqu'à $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}/\text{ev}$, à $T=300 \text{ K}$, on a déduit l'influence de celui-ci sur la caractéristique I-V de cette cellule comme il est illustré par la figure IV.7.

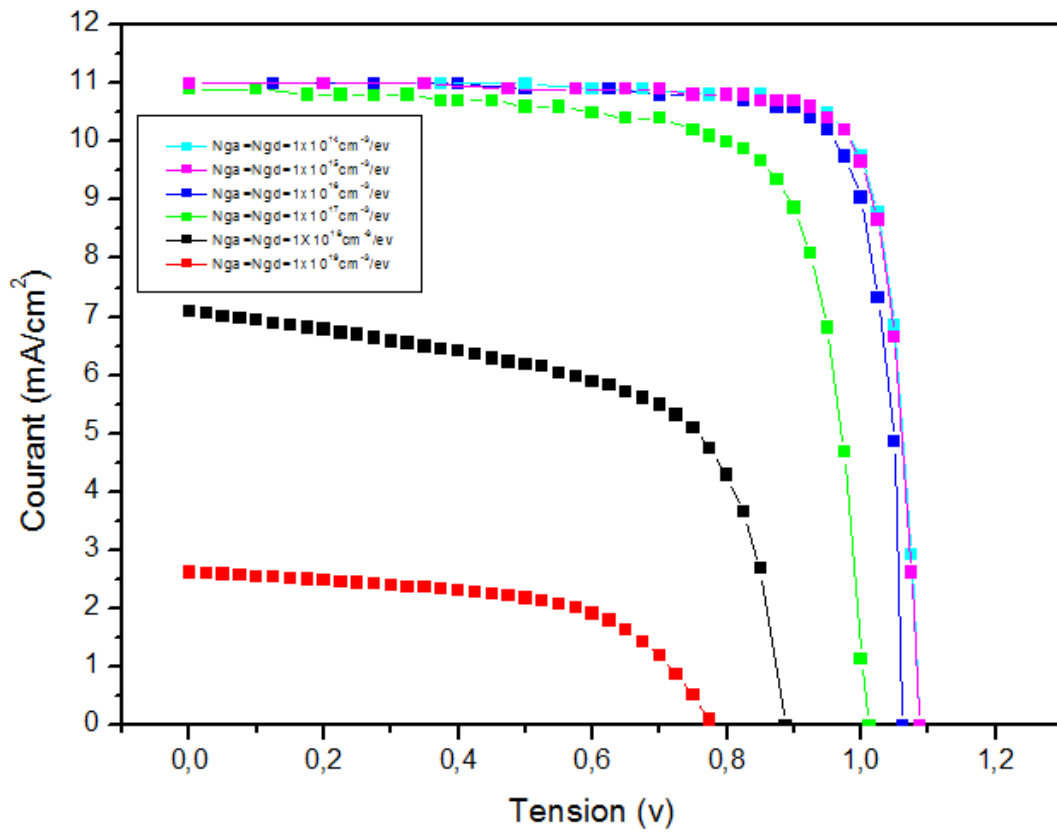


Figure IV.7 : Influence de la densité Effet des niveaux de profondeur avec distribution gaussienne sur la caractéristique courant- tension.

D'après la figure (IV.7), on constate que lorsque la densité des états varie de $10^{14} \text{ cm}^{-3}/\text{ev}$ à $10^{16} \text{ cm}^{-3}/\text{ev}$, il y a une légère diminution du courant de court-circuit et de la tension en circuit ouvert,

A partir de $10^{17} \text{ cm}^{-3}/\text{ev}$ on observe une diminution importante dans le court circuit, et la tension de circuit.

Le tableau suivant présente l'effet des niveaux de pièges profonds sur les caractéristiques de la cellule solaire étudiée pour une distribution gaussienne

Chapitre IV: Simulation numérique sous TCAD-silvaco

Nga=Ngd (cm^{-3}/ev)	I_{cc} (mA/cm^2)	V_{oc} (V)	I_m (mA/cm^2)	V_m (V)	P_m (mW/cm^2)	η %	FF %
1.5×10^{14}	11	1.0875	10.46	0.95	9.94	9.94	83.09
1.5×10^{15}	11	1.0875	10.17	0.975	9.92	9.92	82.93
1.5×10^{16}	11	1.0625	10.17	0.95	9.66	9.66	82.65
1.5×10^{17}	10.9	1.0125	9.87	0.825	8.14	8.14	78.17
1.5×10^{18}	7.09	0.8875	5.31	0.725	3.85	3.85	61.19
1.5×10^{19}	2.62	0.7875	2.01	0.575	1.16	1.16	56.22

Tableau IV.4 : Représentation des paramètres caractéristiques de la cellule solaire sous l'effet des niveaux de profondeur.

D'après ce tableau, on remarque que le rendement de la cellule augmente lorsque la densité d'états des pièges profonds reste en dessous de $1.5 \times 10^{16} cm^{-3}/ev$.

Ce qui explique que la diminution du rendement est causée par la présence des nombreux pièges profonds dans a-Si, à partir des concentrations supérieures à $1.5 \times 10^{17} cm^{-3}/ev$.

On peut comprendre ce phénomène par le fait que la majorité des porteurs photogénérés sont capturés par les pièges des niveaux profonds

Lorsque le pourcentage de défauts de structure de silicium amorphe augmente, deux cas peuvent se présenter :

- Si les défauts se trouvent dans la zone de charge d'espace, l'augmentation de la densité d'états peut créer des canaux de conduction auquel sont associés les courants de fuite. Ce qui a pour effet de diminuer la résistance shunt (R_{sh}), voir schéma équivalent figure (III.14)
- Si les défauts se trouvent hors de la zone de charge d'espace, l'augmentation de densité d'états crée une augmentation du taux de recombinaison non radiative, ce qui a pour effet d'augmenter la résistance série (R_s) d'où diminution du courant, voir schéma équivalent figure (III.14).

IV.9. Effet des états de queue

Les états de queues de bandes sont des états localisés dus aux liaisons faibles. Leurs densités sont souvent décrites par une loi exponentielle décroissante depuis les seuils de mobilité.

Nous avons aussi étudié l'effet des ces états de queue sur la performance des cellule solaire en faisant varier symétriquement les accepteurs et les donneurs de la densité des bords de la bande de conduction et de valence de silicium amorphe respectivement (N_{ta} et N_{td}).

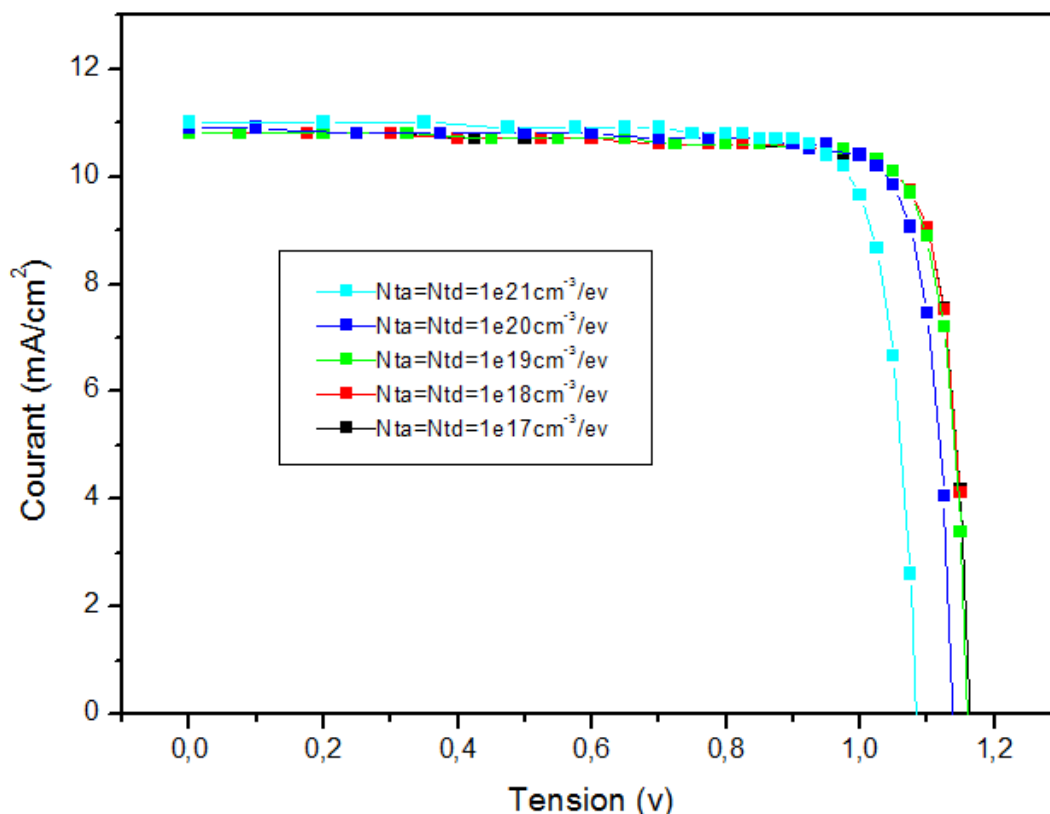


Figure IV.8 : Influence de la densité d'états de queue de bande sur la caractéristique courant- tension.

D'après cette figure on remarque que le courant du court-circuit est indépendant de la densité des états de queue de bande

Le tableau suivant présente l'influence des états de queue sur les caractéristiques de la cellule solaire étudiée.

N_{ta}=N_{td} (cm⁻³/ev)	I_{cc} (mA/cm²)	V_{oc}(V)	I_m (mA/cm²)	V_m(V)	P_m (mW/cm²)	η %	FF %
1 × 10 ²¹	11	1.0875	10.17	0.975	9.92	9.92	82.93
1 × 10 ²⁰	10.9	1.1375	10.2	1.025	10.46	10.46	84.36
1 × 10 ¹⁹	10.9	1.16	10.09	1.05	10.59	10.59	83.76
1 × 10 ¹⁸	10.8	1.1625	10.09	1.05	10.59	10.59	84.35
1 × 10 ¹⁷	10.8	1.1625	10.09	1.05	10.59	10.59	84.35

Tableau IV.5 : Paramètres de sortie de la cellule avec l'effet de la densité d'états de queue de bande.

Dans ce cas, le courant de court-circuit «I_{cc}» est insensible (ne varie pratiquement pas) au la densité d'états de queue de bande, alors que V_{co} augmente.

Donc la diminution de la densité d'états de queue de bande donne une amélioration importante de toutes les caractéristiques de la cellule, ce qui traduit à une augmentation du rendement de la cellule.

IV.10. Effet de l'épaisseur

Il est important d'avoir une épaisseur de silicium suffisante pour absorber un maximum de la lumière qui traverse la couche intrinsèque.

En effet, le silicium amorphe a un fort coefficient d'absorption et la lumière absorbée dans cette couche défectueuse serait perdue.

Nous avons étudié l'influence de l'épaisseur de la couche intrinsèque sur les paramètres de sortie de la cellule. Pour cela nous avons fait varier l'épaisseur de 0.2 μm à 0.4 μm. Les résultats sont présentés dans le tableau (IV.6).

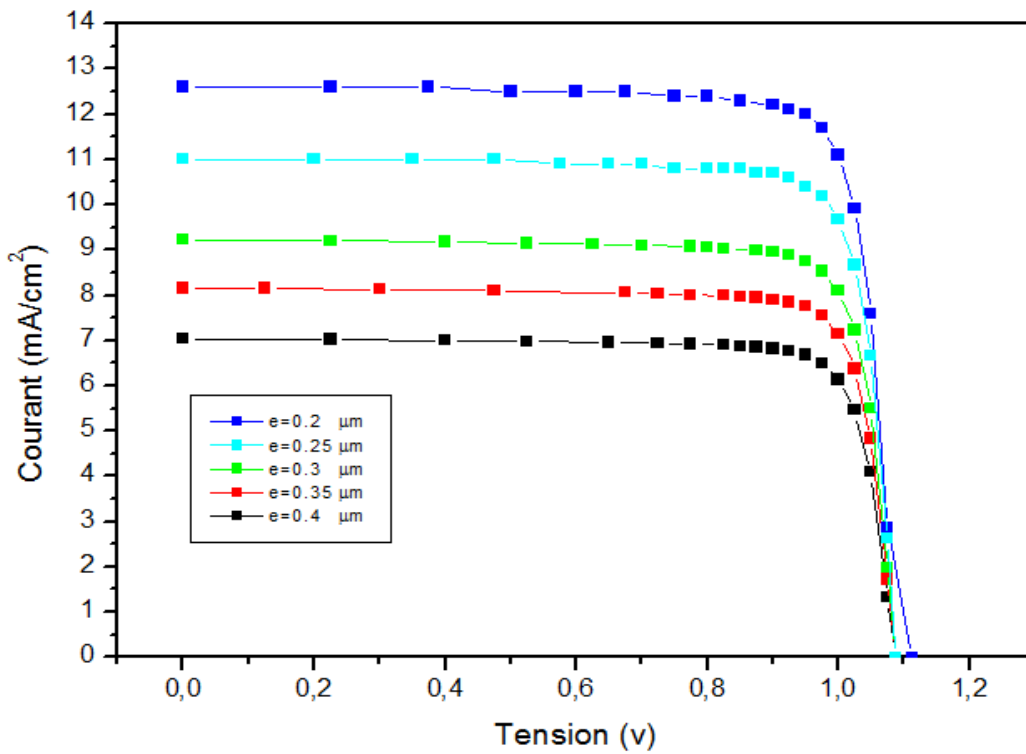


Figure IV.9 : Effet de l'épaisseur de la couche intrinsèque sur la caractéristique courant-tension.

La tension de circuit ouvert « V_{oc} » ne varie pratiquement pas avec la diminution de l'épaisseur de la couche intrinsèque, alors que le courant du court-circuit diminue.

Le tableau suivant présente l'influence de l'épaisseur sur les caractéristiques de la cellule solaire étudiée.

Epaisseur (μm)	I_{cc} (mA/cm^2)	V_{oc} (V)	I_m (mA/cm^2)	V_m (V)	P_m (mW/cm^2)	η %	FF %
0.2	12.6	1.125	11.97	0.95	11.37	11.37	80.21
0.25	11	1.0875	10.17	0.975	9.92	9.92	82.93
0.3	9.23	1.0875	8.75	0.95	8.31	8.31	82.78
0.35	8.15	1.0875	7.76	0.95	7.37	7.37	83.15
0.4	7.04	1.0875	6.68	0.95	6.34	6.34	82.81

Tableau IV.6 : Paramètres de sortie de la cellule avec l'effet de l'épaisseur de la couche intrinsèque.

Chapitre IV: Simulation numérique sous TCAD-silvaco

Le tableau (IV.6) indique que le rendement atteint son maximum 11.37% pour une épaisseur de 0.2 μm , puis subit une diminution pour une épaisseur entre 0.3 et 0.4 μm . Par ailleurs, V_{OCco} est presque constante avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche intrinsèque. I_{CC} diminue avec l'épaisseur de la couche intrinsèque et atteint sa valeur 7.04 mA/cm² pour une épaisseur de 0.4 μm . Le facteur de forme augmente légèrement avec l'augmentation de l'épaisseur et atteint la valeur 83.15 % pour une épaisseur 0.35 μm .

L'influence de l'épaisseur sur les paramètres électriques de la cellule (P_{max} , FF et η) est illustrée par les figures (IV.10, 11, 12), ci-dessous.

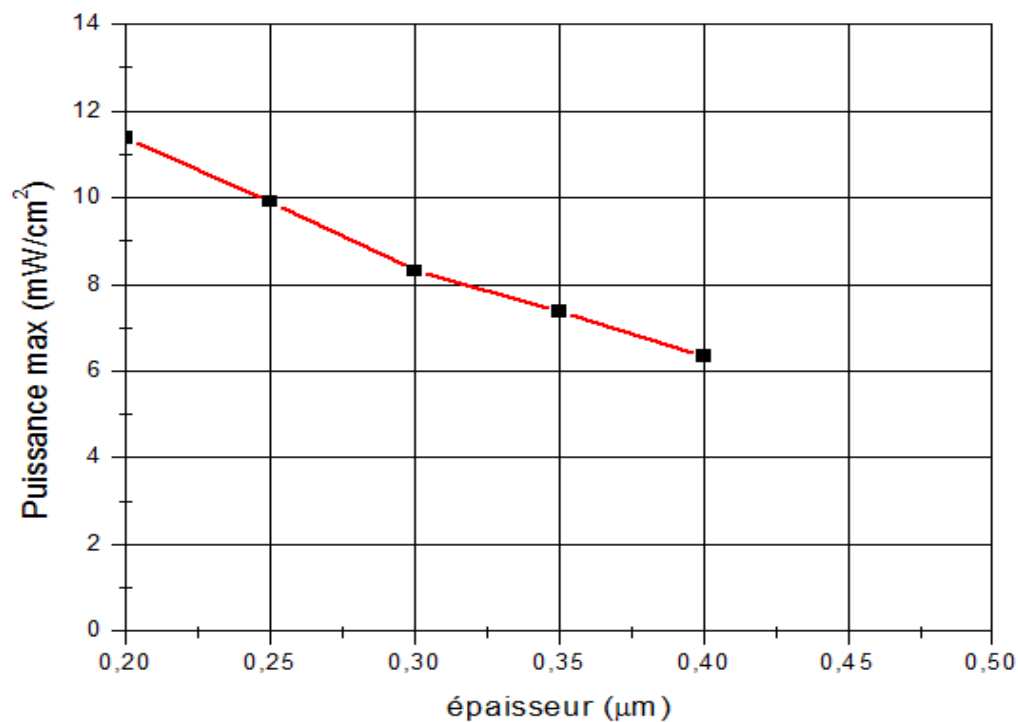


Figure IV.10 : Variation de puissance en fonction de l'épaisseur de la couche intrinsèque.

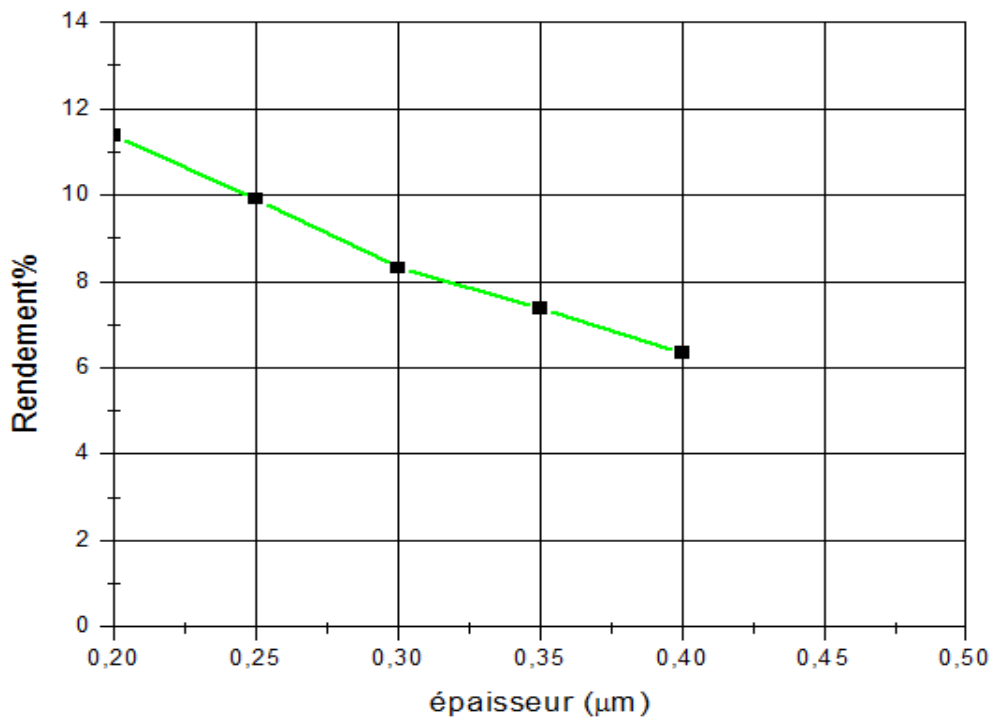


Figure IV.11 : Variation de rendement en fonction de l'épaisseur de la couche intrinsèque.

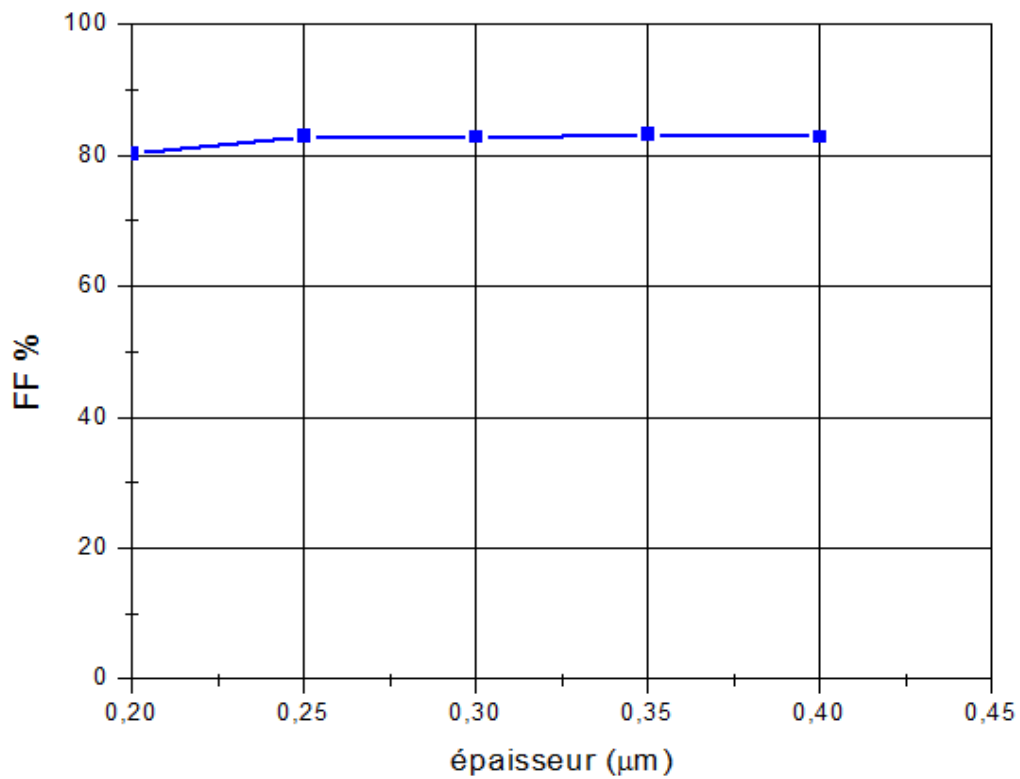


Figure IV.12 : Variation de facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la couche intrinsèque.

IV.11. Amélioration du rendement

Pour améliorer le rendement nous avons essayé d'optimiser certains paramètres de cette cellule solaire.

Les paramètres de la cellule optimisée sont :

- La densité des niveaux des pièges profonds.
- La densité d'états de queue de bande.
- L'épaisseur de la couche intrinsèque.

Ces paramètres peuvent être obtenus sous l'effet des conditions standards d'éclairement (1000 W/m^2) et de température (300 K).

$N_{ga}=N_{gd} \text{ (cm}^{-3}/\text{ev)}$	$N_{ta}=N_{td} \text{ (cm}^{-3}/\text{ev)}$	Epaisseur (μm)
1.5×10^{14}	1×10^{18}	0.2

Tableau IV.7 : les paramètres optimisés.

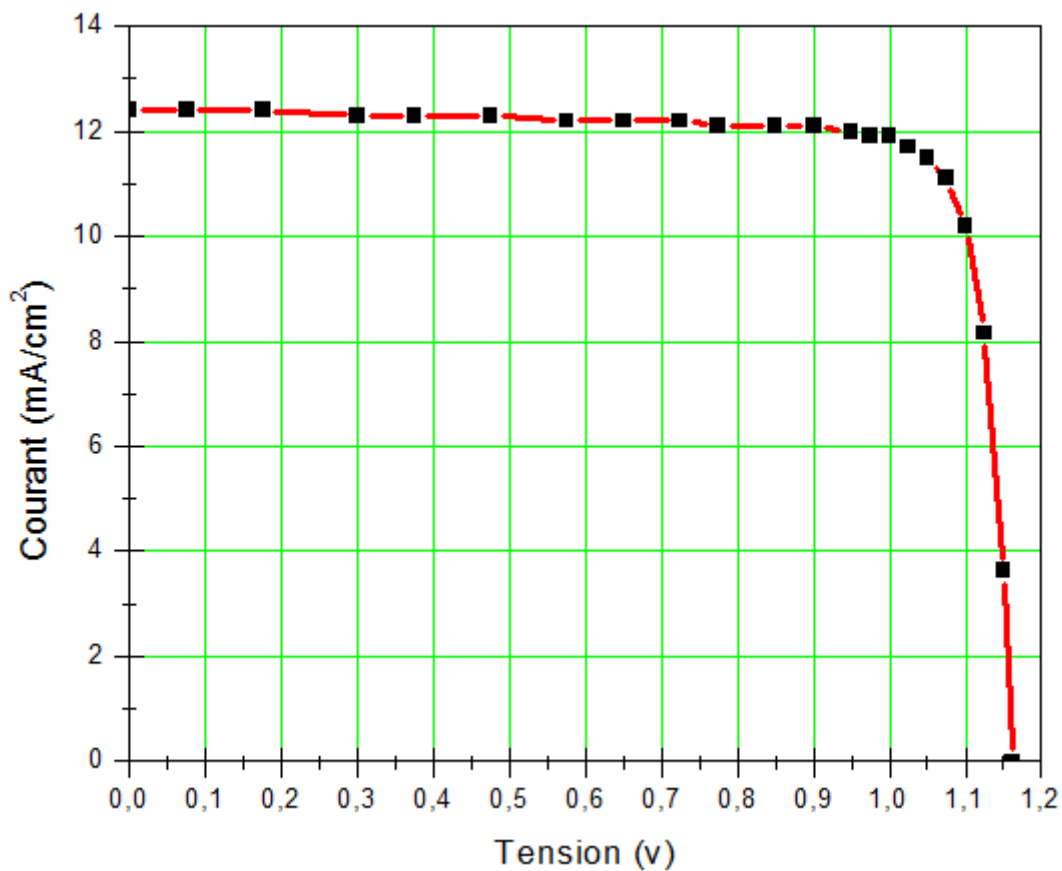


Figure IV.13: Caractéristique courant-tension de la cellule solaire optimisée.

$I_{cc}(mA/cm^2)$	$V_{oc}(V)$	$I_m(mA/cm^2)$	$V_m(V)$	$P_m(mW/cm^2)$	$\eta\%$	FF %
12.4	1.1625	11.5	1.05	12.08	12.08	83.80

Tableau IV.8 : Amélioration des paramètres photovoltaïques de la cellule solaire en silicium amorphe.

Le rendement déterminé avec nos paramètres est de 12.08 %.

IV.12. Réponse spectrale

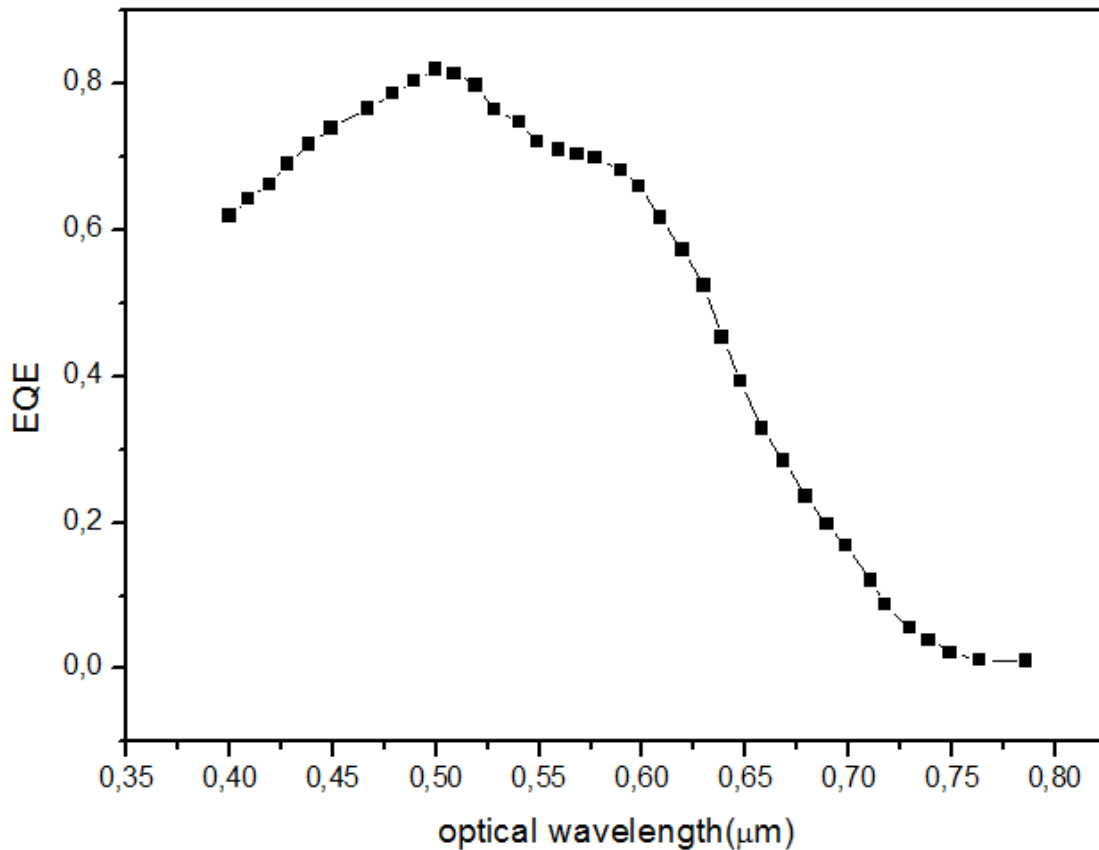
La réponse spectrale (RS) d'une cellule photovoltaïque est le rapport entre le courant de Court circuit généré par la cellule et la puissance lumineuse incidente, en fonction des différentes longueurs d'onde du rayonnement incident.

La réponse spectrale (RS) est donnée par la relation suivante :

$$RS(\lambda) = \frac{I_{cc}(\lambda)}{P_{inc}(\lambda)} \quad \text{IV.16}$$

Le rendement quantique externe (EQE) de la cellule est le rapport du nombre de porteurs générés sur le nombre de photons incidents pour chaque longueur d'onde.

La figure(IV.14), illustre le rendement quantique externe de la cellule solaire à base de silicium amorphe sous spectre solaire AM 1.5 avec un éclairage de 1000 W/m^2 et à la température 300 K pour absorber une grande partie du spectre et la convertir en électricité



Figures IV.14: Rendement quantique externe de la cellule silicium amorphe.

Nous remarquons que le rendement présente un maximum dans une gamme de longueur d'onde de la lumière entre 0,4 et 0,55 μm puis il chute aux basses et aux hautes longueurs d'onde. A partir de cette figure, le rendement quantique externe s'annule pour une longueur d'onde de l'ordre de 0,78 μm .

IV.13. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons utilisé l'outil Atlas du logiciel Silvaco pour l'étude du comportement électrique de la cellule solaire en a-Si.

Nous avons présenté, dans un premier temps, les modèles utilisés pour la simulation, ensuite la structure à simuler ainsi que les paramètres utilisés.

Nous avons optimisé les paramètres suivants pour avoir un bon rendement.

- La densité des niveaux des pièges profonds avec distribution gaussienne.
- La densité des états de queue de bande.
- L'épaisseur de la couche intrinsèque.

Chapitre IV: Simulation numérique sous TCAD-silvaco

De plus, nous avons étudié le rendement quantique externe (EQE) de cette cellule.

D'après notre étude, nous avons remarqué que :

- L'évolution de la densité des niveaux des pièges profond avec une température fixe provoque une diminution du courant de court-circuit I_{cc} et la tension de circuit ouvert V_{co} .
- Le courant du court-circuit ne dépend pas de la densité des états de queue de bande
- L'évolution de la densité des états de queue de bande provoque une augmentation de la tension de circuit ouvert.
- La tension de circuit ouvert « V_{oc} » est insensible (ne varie pratiquement pas) au l'évolution de l'épaisseur de la couche intrinsèque.
- L'augmentation de la couche intrinsèque a un effet négatif sur le rendement
- Le rendement quantique externe nous montre que la cellule en silicium amorphe présente un domaine d'absorption maximum compris dans le domaine de longueur d'onde de la lumière entre 0.4 et $0.55\mu m$.

Conclusion générale

Dans ce travail nous avons étudié les propriétés électriques et optiques de la cellule solaire à base de silicium amorphe.

Cette étude a été effectuée par le logiciel de simulation TCAD-SILVACO.

Les résultats obtenus à partir de cette simulation sont:

- Les niveaux des pièges profonds ont un effet néfaste sur le rendement de la cellule solaire en silicium amorphe.
- La majorité des porteurs photogénérés est capturée par les pièges des niveaux profonds.
- La densité d'états de queue de bande a un effet négatif sur le rendement.
- Le courant du court-circuit ne dépend pas de la densité des états de queue de bande.
- Pour obtenir un bon rendement on doit réduire l'épaisseur de la couche intrinsèque à $0.2\mu m$. Mais cette condition ne peut être réalisée à cause de contraintes de la technologie de fabrication des couches très minces.
- La tension de circuit ouvert V_{oc} est insensible à l'évolution de l'épaisseur de la couche intrinsèque.

D'autre part nous avons essayé d'optimiser la densité des niveaux des pièges profonds et la densité des états de queue de bande et l'épaisseur de la couche intrinsèque pour améliorer le rendement de cette cellule.

Il serait intéressant pour améliorer le rendement de cette cellule solaire d'augmenter le nombre de couches minces et de faire varier leurs natures.

Aperçu sur le logiciel SILVACO

1. Présentation du logiciel SILVACO

SILVACO est une société internationale Américaine, ayant son siège à Santa Clara en Californie. Elle est un des principaux fournisseurs de chaînes professionnelles de logiciels de simulation par éléments finis et de conception assistée par ordinateur pour les technologies de l'électronique TCAD (Technology Computer Aided Design). Ces outils sont utilisés par les compagnies de microélectronique dans le domaine de la recherche, du développement et de la conception de dispositifs.

SILVACO présente un ensemble des outils de simulation interactifs permettant la conception et l'analyse de la plus part des dispositifs à semi-conducteurs VWF (Virtual Wafer Fab). Les composants de base de VWF (Figure 1) sont :

- a) **Les outils de simulation** (VWF CORE TOOLS). Ces outils simulent soit leurs processus de fabrication ou soit leurs comportements électriques. Les outils de simulation sont ATHENA, ATLAS et SDUPEM3.
- b) **Les outils interactifs** (VWF INTERACTIVE TOOLS). Ces outils sont conçus pour être utilisés en mode interactif dans la construction d'un seul fichier d'entrée. En étant basé sur une interface utilisateur qui est graphique (Graphical User Interface, GUI), le travail de construction du fichier d'entrée devient plus efficace. Les outils interactifs peuvent être utilisés soit en relation avec un ensemble de fichiers, ou comme des composants intégrés dans l'environnement des outils d'automatisation.
- c) **Les outils d'automatisation** (VWF AUTOMATION TOOLS). Ces outils permettent à l'utilisateur d'exécuter sur une grande échelle des études expérimentales afin de créer des résultats pour l'analyse statistique suivante. Les outils automatiques se servent de la technologie de base de données réparties et des méthodes de logiciels de développement d'interprocessus.

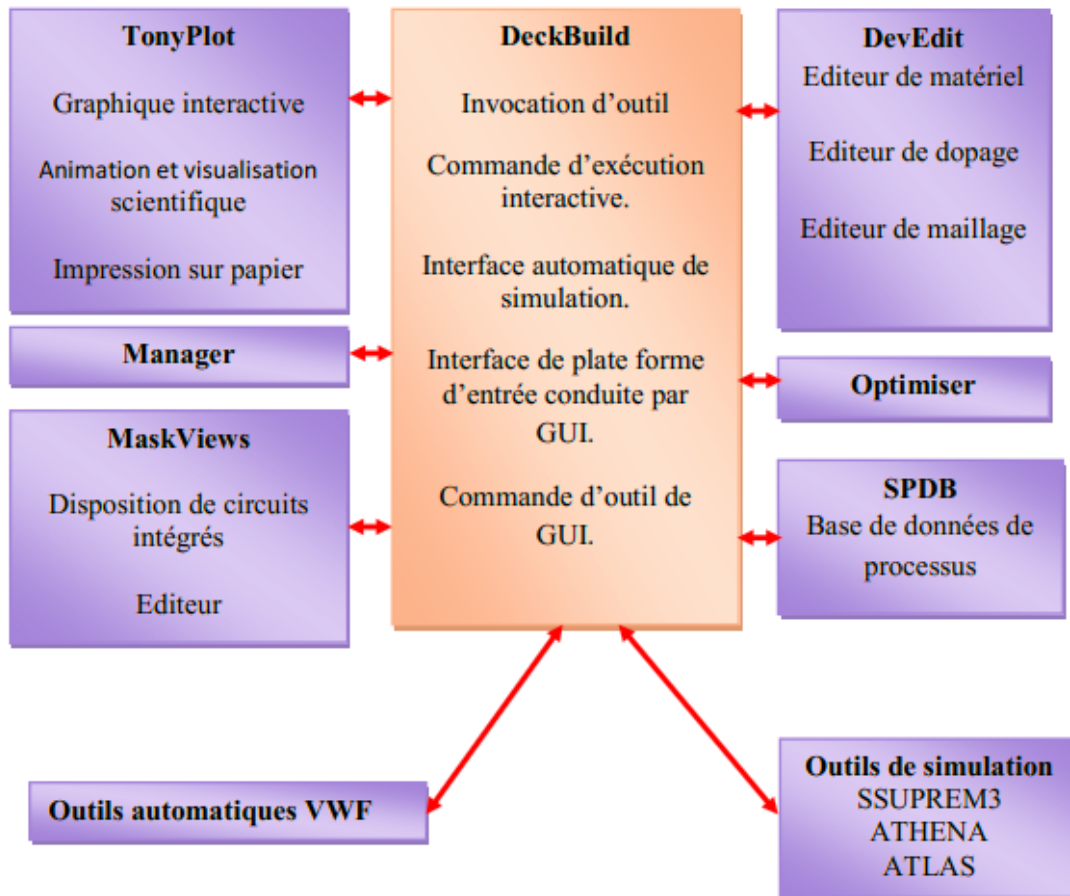


Figure 1 : Organigramme de la structure VWF

1.a) Les outils de simulation

- **ATLAS** : simulateur physique de dispositifs à semi-conducteur 2D ou 3D qui permet de simuler le comportement électrique de structures spécifiées des dispositifs à semi-conducteur.
- **ATHENA** : simulateur 2D de procédés technologiques qui permet de développer et optimiser des processus de fabrication de semi-conducteur (les différentes étapes effectuées en Salle Blanche). Il fournit une plate-forme pour simuler l'implantation ionique, la diffusion, gravure à l'eau-forte, le dépôt, la lithographie, l'oxydation, et la silicidation des matériaux semi-conducteur. Il remplace des expériences coûteuses par des simulations.
- **SSUPREMS3** : simulateur de procédé 1D avec prolongements simples de simulations des dispositifs.

1.b) Les outils interactifs

- **DECKBUILD** : environnement où est défini le programme de simulation. DeckBuild offre une aide et une prise en charge qui permet d'éviter l'apprentissage d'une syntaxe de commande généralement très complexe. Il permet aussi une exécution automatique et très pratique des programmes et des sauvegardes systématiques des étapes intermédiaires d'exécution.
- **TONYPLOT** : environnement où sont visualisés les résultats des simulations (structure du composant, distribution de grandeurs divers dans celui-ci, caractéristiques électriques...).
- **DEVEDIT** : environnement où est destinée la structure. On peut créer des nouvelles structures ou même modifier des structures existantes. On peut aussi définir des maillages ou raffiner les maillages existants.
- **MASKVIEWS** : outil de dessin des masques (éditeur de layout).
- **OPTIMIZER** : optimise les paramètres de la structure de façon à obtenir en final la valeur du paramètre que nous lui avons définie au préalable.
- **MANAGER** : outil de gestion des fichiers utilisés et créés par VWF.
- **SPDB** (Semiconductor Process Data Base): c'est un produit séparé, il n'est pas un outil interactif, mais il peut être utilisé avec DeckBuild. Il a été conçu pour stocker un grand nombre de profils de dopage mesurés expérimentalement ainsi que les données qui décrivent les conditions des expériences.

Le projet réalisé dans le cadre de ce travail de mémoire, a été basé principalement sur l'outil de simulation « Atlas » et sur l'environnement où est défini le programme de simulation « DeckBuild ». Une fois la simulation effectuée sous « ATLAS », la visualisation des résultats se fait via le logiciel « TonyPlot ». Par la suite nous allons développer la présentation de l'outil de simulation « ATLAS » que nous avons utilisé principalement pour effectuer la simulation de notre structure.

2. Présentation d'ATLAS

ATLAS est un simulateur physique 2D ou 3D des dispositifs basés sur la physique des semiconducteurs. Il prédit le comportement électrique des structures semi-conductrices spécifiées et fournit des aperçus de mécanismes physiques internes associés au fonctionnement des dispositifs.

Atlas peut être utilisé autonome ou comme un outil noyau dans le milieu de simulation VWF de SILVACO [94].

Ce simulateur est composé de deux parties :

- une partie de traitement numérique (méthode d'intégration, de discrétisation...)
- une partie formée des modèles physiques des composants semi-conducteurs (modèles de recombinaisons, de mobilités, ...).

3. Entrées et sorties d'ATLAS

La figure 2 montre les entrées et les sorties d'atlas. La plupart des simulations réalisées par ATLAS utilisent deux fichiers d'entrée. Le premier est représenté par « Fichier de commande » c'est un fichier script contenant les commandes pour que ATLAS s'exécute. Le second fichier est un « Fichier de structure » qui définit la structure à simuler. A la sortie d'Atlas, nous avons trois types de fichier. Le premier de ces fichiers est la sortie « Runtime » qui donne la progression, les erreurs et les messages d'avertissements pendant la simulation. Le deuxième type de fichier est le « fichier log » qui stocke toutes les valeurs de tensions et des courants provenant de l'analyse du dispositif simulé. Le troisième fichier de sortie est le « Fichier de solution », ce fichier stocke les données 2D ou 3D concernant les valeurs des variables solutions dans le dispositif en un point donné. Les deux derniers fichiers sont traités par l'outil de visualisation « TonyPlot ».

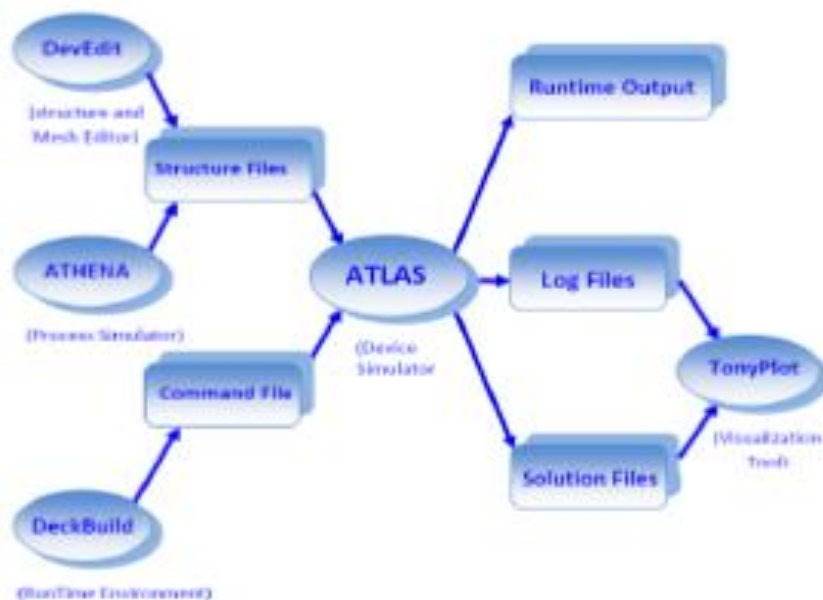


Figure 2: Entrées et sorties d'ATLAS.

4. Commandes dans un programme ATLAS

Nous allons maintenant présenter l'ordre des commandes fondamentales dans un programme ATLAS (Figure 3). Ainsi, il existe cinq groupes de commandes, ces groupes doivent être organisés correctement. Si l'ordre n'est pas respecté, un message d'erreur apparaît et le programme ne s'exécute pas d'une façon correcte.

Group	Statements
1. Structure Specification	MESH REGION ELECTRODE DOPING
2. Material Models Specification	MATERIAL MODELS CONTACT INTERFACE
3. Numerical Method Selection	METHOD
4. Solution Specification	LOG SOLVE LOAD SAVE
5. Results Analysis	EXTRACT TONYPLOT

Figure 3 : Ordre des groupes des commandes d'Atlas

4.1 Spécification de la structure :

La création d'une telle structure dans Atlas silvaco, se fait en utilisant le groupe de Commandes dans l'ordre comme suit :

- **Mesh** : c'est une commande qui produit un maillage qui est une série de lignes horizontales et verticales espacées entre elle. L'élément de maille utilisé est le triangle.
- **Région** : c'est une instruction qui définit une région dans une structure.
- **Electrodes** : Elle indique l'endroit et les noms des électrodes dans une structure.
- **Doping** : Cette commande indique le type et le profil de dopage.

4.2 Spécification des modèles des matériaux :

- **Matériel** : cette commande associe des paramètres physiques aux matériaux utilisés dans la simulation par exemple : affinité électronique, énergie de gap, la fonction de la densité des états, les vitesses de saturation, les durées de vie des porteurs minoritaires, etc....Le logiciel a des paramètres de matériaux définis par défaut pour les semi-conducteurs standards comme pour le silicium.
- **Models** : Cette instruction permet de faire appel aux modèles physiques existants dans le logiciel. Les modèles physiques se répartissent en cinq catégories: la mobilité, recombinaison, statistiques des transporteurs, l'ionisation d'impact, et de tunnels.
- **Beam** : Cette commande est importante pour des cellules solaires car c'est elle qui définit une source de lumière et ajuste sa localisation, orientation et intensité. Le spectre de la lumière peut être décrit dans tous les détails nécessaires. Polarisation, réflectivité et lancer le tracé de rayons.

4.3 Spécification des solutions :

Après avoir sélectionné la méthode numérique il est nécessaire de déterminer les solutions. La spécification de solution est donnée par les déclarations : LOG, SOLVE, LOAD, et SAVE.

- **LOG** : permet à toutes les caractéristiques finales de simulation d'être sauvées dans un fichier (ouvre un fichier de type log). Notons que log en minuscule veut dire le type de fichier et LOG en majuscule veut dire la commande dans le programme. Les informations sauvées sont de type électrique.
- **SOLVE** : La déclaration SOLVE fait suite à la déclaration LOG. SOLVE effectue une solution pour un ou plusieurs points de polarisation.
- **LOAD** : charge des solutions précédentes à partir de fichiers en tant que conjectures initiales à d'autres points de polarisation.
- **SAVE** : sauve toutes les informations d'un point noeud du maillage dans un fichier de sortie (les fichiers de sortie sont de type structure). Les informations sauvées correspondent à un état électrique bien précis.

4.4 Analyse des résultats

ANNEXE

Une fois la solution a été trouvée pour un problème de dispositif à semi-conducteurs, les informations peuvent être affichées graphiquement.

- **EXTRACT** : les commandes de ce type sont utilisées pour extraire les valeurs bien précises des paramètres des deux types des fichiers log ou structure.
- **TONYPLOT** : démarre le programme « TonyPlot » permettant une représentation graphique des données.

Bibliographie

- [1] A. LABOURET, M. VILLOZ « Energie solaire photovoltaïque » Dunod, paris, 2009, 4^e édition, P. 35, 36, 39.
- [2] B. EQUER, « Energie solaire photovoltaïques : physique et technologie de la conversion photovoltaïque », volume1, 2007.
- [3] B. EQUER, « Le pompage photovoltaïque Manuel de cours », énergie solaire photovoltaïques, ellipses 1993.
- [4] M. BOUFIA, L. DEBLAOUÏ « Modélisation et Simulation d'une cellule solaire en couche mince à base de diséléniure de Cuivre, d'Indium et de Gallium » Mémoire de Master, université Kasdi Merbah-ouargla, 2011-2012.
- [5] S. DELENCLOS « Le solaire photovoltaïques » 2013-2014, <http://gte.univ-littoral.fr>
- [6] C. HASNI « Comparaison par simulation numérique entre une cellule solaire n/p et une cellule solaire p/n en silicium cristalline par SCAPS », Mémoire de Master, université Med Khider Biskra, 2014.
- [7] D. DIOUF « Cellules photovoltaïque silicium à hétérojonction et à structure interdigitée en face arrière », thèse de doctorat, université paris sud 11, soutenue le 15 juin 2010.
- [8] M. ORGERET, « Les piles solaires le composant et ses applications », Masson, 1985.
- [9] H. MATHIEU « Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques » Dunod, Paris, 2009.
- [10] C. NGO, H. NGO « Physique des semi- conducteurs » DUNOD, Paris, 2012, 4^e édition.
- [11] G. BEN ABDERRAZAK « La cellule solaire à base de GZTS par SCAPS ». Mémoire de Master, université Med Khider Biskra, 2014.
- [12] KWAN CHI KOO , « Dielectric phenomena in solids, With Emphasis on Physical Concepts of Electronic Processes », Elsevier, 2004.
- [13] T.MORNAY, A. VERNAY, M. VOLTE « Les cellule photovoltaïques », Institution des chartreux, 2005.
- [14] A. BAHLLLOL, R. LAKEHALE, « Réalisation d'un système de pilotage d'un simulateur solaire : mesures I-V et extraction des paramètres », mémoire de mastère, université Abou bekr belkaid-Telemcen, 2011.
- [15] B.EQUER « Electricité solaire photovoltaïque », CNRS, journées (3-5 juin 2009).

Bibliographie

- [16] A. SAADI. « Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque », TH de Magister, Université de Biskra, 2000.
- [17] A. LABOURET et Al , "Cellules solaires : "les bases de l'énergie photovoltaïque", collection ETSF, Dunod, 4e édition, 2005.
- [18] A. MAOUCHE, « Etude et identification paramétrique d'une cellule photovoltaïque organique », thèse de Magister, université de Batna.
- [19] N. BEDDA, « Etude des propriétés physique des semi-conducteurs Si, GaAs et GaAlAs.», thèse de Magister, université de Batna, soutenue le 16.06.2014.
- [20] Direction générale de l'énergie et du climat « Solaire photovoltaïque », l'industrie des énergies décarbonées en 2010.
- [21] G-C. Joyce, D-T-J. Hurle et Q-QA-E. Vaughan, "Novel Development of the Weighing Method for Automatic Czochralski Crystal Growth of Semiconductors", Journal of Crystal Growth 132, 1 (1993).
- [22] P-H. HAUMESSER, « Elaboration par croissance Czochralski, caractérisation spectroscopique et propriétés laser de monocristaux dopés par l'Ytterbium », Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, 2000.
- [23] E.ADAM, P.BOUFFONDEAU, A.DARRASPEN, R.FIX et O.WELKER « Méthode d'analyse des composes amorphes », Ecole des Mines de Saint-Etienne.
- [24] A. KHALED « Elaboration de nouvelles phases de silicium en couche minces », thème de Magister, université de Mentouri Constantine, soutenue le 02 07 2008.
- [25] R. A. STREET, « Hydrogenated amorphous silicon ». Cambridge, Solid State Science Series, 1991.
- [26] N. F. MOTT, E. A. Davis et N. F. MOTT, Philosophical Magazine B, vol. 22, p. 903, 1970.
- [27] H. ZOUBIEDA « Les transistors à effet de champ en couche minces à base de silicium amorphe hydrogène », thèse de Magister, université de Mentouri Constantine.
- [28] Q.MAUGIT « Les cellules photovoltaïques, cœur des panneaux solaires » futura-sciences 30.09.2013.
- [29] A.ANSRI « Caractérisation des cellules photovoltaïques à base des polymères conducteurs », thèse de Magister, université Abou Bakr Belkaid- telemcen.
- [30] F.KAHOUL « Caractéristique électrique d'une cellule solaire à hétérojonction a-Si : H/ μ c -Si », Mémoire de Master, université Mohamed Khider Biskra, soutenu le 05 06 2014.

Bibliographie

- [31] A. NAMODA « Dégradation (effet stabler-wronski) et caractérisation des cellules solaire à base de silicium amorphe hydrogéné (a-Si : H) », thèse de doctorat, l'université de Metz.
- [32] J. BOUREE, P. CABARROCAS « Cellules solaires en couches minces à base de silicium », Ecole polytechnique, 91128 Palaiseau cedex.
- [33] ATLAS User's Manual « Device simulation software », 2012.
- [34] Z. SOLTN « Simulation et analyse d'une cellule solaire organique », thèse de Magister, université de Batna, 2013.
- [35] B.BENABDALLAH NADIA « Propriétés physiques des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et Simulation de la cellule solaire à base de Si et SiGe », Thèse de Magister, Université Abou Bekr Belkïd de Tlemcen 2006.
- [36] S. CHALA, N. SENGOUGA, F. YAKUPHANOGLU « Modeling the effect of defects on the performance of n.cdo/p-Si solar cell », 18 05 2015.