



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ ABDELHAMID IBN BADIS - MOSTAGANEM



Faculté des Sciences Exactes et d'Informatique

Département de Physique

Filière : Physique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'Obtention du Diplôme de Master en Physique

Option : **Physique des matériaux**

Présenté par :

Bouhenni Nour el Houda

THEME :

Optimisation de la couche de passivation dans les cellules solaires à hétérojonction de silicium.

Soutenu le : 20/06/2023

Devant le jury composé de :

M.ABBES Charef	MCA	Université de Mostaganem	Président
M.ADDA BENATTIA Tekkouk	MCB	Université de Mostaganem	Examineur
M ^{me} RAHAL Wassila Leïla	MCA	Université de Mostaganem	Encadrant
HENNI Wafaâ		Université de Mostaganem	Co-Encadrant

Année Universitaire 2022-2023

Dédicaces

Je dédie ce travail en signe de respect et de reconnaissance :

A mes chers parents qui m'ont donné la confiance, le courage et toutes les possibilités pour terminer mes études universitaires. Que Dieu me les garde.

A mes frères et mes sœurs, à toute ma famille, à tous mes collègues et mes amis partout.

Remerciements

Tout d'abord, je remercie Allah le tout puissant pour m'avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé pour réaliser ce travail.

Je tiens à remercier mon encadrante *M^{me} RAHAL Wassila Leïla* pour son encadrement efficace, pour ses encouragements et pour ses orientations bénéfiques tout au long de ce travail. Je remercie également ma co-encadrante *M^{elle} HENNI Wafaâ* pour sa disponibilité et son aide durant la réalisation de ce travail.

J'exprime toute ma gratitude aux membres de jury qui m'ont fait l'honneur de bien vouloir examiner mon travail : Monsieur *ABBES Charef* et Monsieur *ADDA BENATTIA Tekkouk*. Je vous remercie pour l'honneur que vous m'avez fait en acceptant de juger ce travail et de siéger à mon jury de soutenance.

Un grand merci à mes parents qui m'ont toujours encouragé à poursuivre mes études et à aller toujours vers l'avant.

SOMMAIRE

Dédicaces	I
Remerciements	II
Listes des Figures	VI
Listes des Tableaux	VII
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Les cellules solaires photovoltaïques.....	3
I.1 Introduction :.....	4
I.2 L'énergie solaire :.....	4
I.3 Rayonnement solaire :	5
I.3.1 Le rayonnement direct :	6
I.3.2 Le rayonnement diffus :	6
I.3.3 Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol :.....	6
I.3.4 Le rayonnement global :.....	6
I.4 Spectre solaire :.....	7
I.5 Masse d'air :	8
I.6 La conversion photovoltaïque :.....	10
I.7 Historique de la cellule photovoltaïque :.....	11
I.8 Les filières photovoltaïques :.....	13
I.8.1 Première génération : cellules solaires au Si cristallin :.....	13
I.8.2 Deuxième génération : cellules en couches minces :.....	14
I.8.3 Troisième génération :	15
I.9 Le matériau Silicium :	16
I.9.1 Définition :	16
I.9.2 Les différents types de silicium :.....	17
I.9.2.1 Silicium cristallin :.....	17
I.9.2.1.1 Structure cristalline :	17
I.9.2.1.2 Propriétés :.....	18
I.9.2.1.3 Le silicium monocristallin :.....	18
I.9.2.1.4 Silicium poly cristallin :	18
I.9.2.2 Silicium amorphe :.....	18

I.9.2.2.1	Rôle de l'hydrogène :	19
I.9.2.2.2	Propriétés du silicium amorphe :	20
I.9.2.2.3	Modèle de la densité des états dans l'a-Si : H :	20
I.10	Les cellules solaires HIT :	21
I.11	Composants d'une cellule à hétérojonction de silicium :	23
I.11.1	L'Oxyde Transparent Conducteur (TCO) :	23
I.11.2	L'émetteur :	23
I.11.3	La couche absorbante (La couche active) :	23
I.11.4	Le BSF :	24
I.11.5	Les contacts :	24
I.12	Conclusion :	24
ChapitreII	: Modélisation et simulation des cellules solaires.....	25
II.1	Introduction :	26
II.2	Modélisation d'une cellule photovoltaïque :	26
II.3	Modèle à une diode :	26
II.4	Modèle à deux diodes :	27
II.5	Caractéristiques courant-tension $I=f(V)$:	28
II.6	Les Paramètres des cellules photovoltaïques :	29
II.6.1	Courant de court-circuit, (I_{CC}) :	29
II.6.2	Tension en circuit ouvert (V_{CO}) :	29
II.6.3	Facteur de forme (FF) :	30
II.6.4	Rendement d'une cellule solaire η :	30
II.7	Le rendement quantique externe EQE :	30
II.8	Réponse spectrale d'une cellule photovoltaïque :	31
II.9	Jonction PN :	31
II.9.1	Les caractéristiques d'une jonction PN :	33
II.10	Les recombinaisons :	36
II.10.1	Recombinaisons radiatives :	37
II.10.2	Recombinaisons non radiatives :	38
II.11	Logiciels de simulation disponibles :	38
II.11.1	Le logiciel AMPS-1D :	39
II.11.2	Le logiciel AFORS-HET :	39

II.11.3 ASDMP :	39
II.11.4 SCAPS-1D :	40
II.11.4.1 Interface du logiciel SCAPS :	40
II.12 Conclusion :	44
Chapitre III Résultats et discussion	45
III.1 Introduction :	46
III.2 Présentation de la cellule étudiée :	46
III.3 Modélisation des défauts dans le silicium amorphe :	48
III.3.1 Distribution dans les queues de bandes :	48
III.3.2 Distribution au milieu du gap :	49
III.3.2.1 Le modèle en U (U-shaped model) :	49
III.3.2.2 Le modèle en gaussiennes :	50
III.4 Résultats et discussions :	51
III.4.1 Effet de l'épaisseur de la couche intrinsèque sur la performance de la cellule :	51
III.4.2 Étude de l'utilisation de différents matériaux comme couche de passivation sur la performance de la cellule :	55
III.5 Conclusion	59
Conclusion générale	60
Références	62

Listes des Figures

Figure I-1:Image du soleil.....	5
Figure I-2: Types de rayonnements solaires reçus au sol.....	7
Figure I-3:Spectre d'irradiance solaire au sommet de l'atmosphère et au niveau de la mer.....	8
Figure I-4: Description du nombre de masse d'air.	9
Figure I-5: Irradiance solaire à la surface de l'atmosphère terrestre (AM0) et au sol (AM1.5D et AM1.5G).	9
Figure I-6:Principe de la conversion photovoltaïque.	10
Figure I-7:Photo des 3 chercheurs américains des laboratoires BELL : G.S. Fuller, D.M. Chapin, et G.L. Pearson, physicien, de gauche à droite.....	12
Figure I-8 : Evolution des rendements des différentes technologies de cellules solaires au niveau des laboratoires..	12
Figure I-9 :Les différentes technologies des cellules solaires.	13
Figure I-10 :Etape de fabrication des cellules : (1) minerai de Silicium – (2) raffinage (pour augmenter la pureté) – (3) Silicium en fusion donnant des lingot (4) après solidification – (5) wafer obtenu par sciage du lingot – (6) traitement de surface par procédés p.....	14
Figure I-11:cellule monocristalline (à gauche) et poly-cristalline (à droite).	14
Figure I-12: (a), (b) Module flexible à base de CIGS Silicium amorphe et (c) panneaux solaires à base de CdTe.....	15
Figure I-13: Sac à dos incorporant un module de technologie organique DSSC.	16
Figure I-14: (a) Cellule solaire organique et (b) Cellule solaire de type Grätzel (DSC).....	16
Figure I-15: Structure du silicium cristallin.	17
Figure I-16: Structure cristalline de type diamant.	17
Figure I-17: Structure du silicium amorphe hydrogéné.	19
Figure I-18: Effet de l'addition d'hydrogène sur la densité d'états dans la bande interdite du silicium amorphe.....	20
Figure I-19: Structure schématique des cellules solaires à hétérojonction a-Si : H / c-Si faites par Sanyo.	21
Figure I-20:Structure schématique des cellules solaires ACJ-HIT fabriquées par Sanyo.....	22
Figure I-21: Structure schématique de la cellule solaire HIT avec surface texturé et BSF.....	22
Figure II-1: Schéma équivalent du modèle à une diode.	26
Figure II-2: Schéma équivalent du modèle à deux diodes.	27
Figure II-3: Caractéristique courant-tension I(V) (en trait bleu) et puissance (en trait rouge) d'une cellule photovoltaïque.	29
Figure II-4: Diagramme de bandes de deux semi-conducteurs dopés différemment avant et après la mise en contact.	32
Figure II-5: Jonction PN à l'équilibre : a) Distribution des impuretés ionisées, b) Distribution du champ électrique, c) Variation du potentiel.....	33
Figure II-6: Mécanisme de recombinaisons radiatives : a) Bande à bande, b) à travers des niveaux d'impuretés, c) dues aux excitons.....	37
Figure II-7: Mécanisme de recombinaisons non radiatives : a) de type Auger, b) de type Shockley-Read - Hall (SRH).....	38
Figure II-8: Panneau principal de démarrage de SCAPS-1D.	41

Figure II-9 : Fenêtre principale pour définir le dispositif.....	42
Figure II-10: La fenêtre de caractérisation des couches.....	42
Figure II-11: Fenêtre d'évolution des calculs.....	43
Figure II-12: Caractéristique J-V affichée par le logiciel SCAPS-1D.....	44
Figure III-1: Cellule solaire HIT (TCO/p-a-Si :H/i-a-Si :H/n-c-Si/BSF/Al).....	46
Figure III-2: Diagramme de bande du silicium amorphe hydrogéné.....	48
Figure III-3: Le modèle en U.....	49
Figure III-4: Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'épaisseur de l'a-Si :H intrinsèque.....	52
Figure III-5: Influence de l'épaisseur de la couche intrinsèque a-Si :H sur le taux de recombinaison dans la cellule.....	53
Figure III-6: Diagramme de bandes d'énergie en fonction de la position dans la cellule.....	54
Figure III-7: Influence de l'épaisseur de la couche intrinsèque a-Si :H sur le champ électrique au niveau de la jonction PN dans la cellule.....	55
Figure III-8: Le rendement quantique externe pour deux épaisseurs de la couche a-Si : H.....	55
Figure III-9 : Les caractéristiques J(V) pour différents matériaux de la couche de passivation.....	57
Figure III-10: Diagramme de bandes d'énergie en fonction de la position dans la cellule pour quatre matériaux différents utilisés comme couche de passivation.....	58
Figure III-11 : Le rendement quantique externe de la cellule pour les différentes couches de passivation.....	59

Listes des Tableaux

Tableau I-1: Quelques propriétés du silicium cristallin.....	18
Tableau III-1: Paramètres des différentes couches de la cellule HIT étudiée.....	47
Tableau III-2: Paramètres des défauts de la couche de passivation et l'émetteur.....	50
Tableau III-3: Paramètres PV pour différentes épaisseurs de la couche intrinsèque i-a-Si : H.....	51
Tableau III-4 : Paramètres des différents matériaux utilisés comme couche de passivation.	56
Tableau III-5: Paramètres PV pour différents matériaux de de la couche de passivation.....	57

Introduction générale

En raison du développement de l'industrie, des transports et des moyens de communication, une croissance de la consommation mondiale d'électricité a été observée au cours des dernières décennies. Cependant, l'essentiel de l'énergie électrique est produit par la combustion de ressources non renouvelables (charbon, pétrole, gaz, nucléaire) dont le temps d'épuisement est estimé à quelques décennies. De plus, ce type de production d'énergie est très polluant. Par conséquent, le développement des sources d'énergie renouvelables et non polluantes est un sujet d'actualité. [1]

Les énergies renouvelables sont les formes finales d'énergie (électricité, chaleur et carburant) obtenues à partir de sources renouvelables. Contrairement aux sources d'énergie fossiles ou nucléaires, les énergies renouvelables sont inépuisables à très long terme, car elles proviennent directement de phénomènes naturels liés au soleil, aux vents, aux flux hydrauliques, à la chaleur naturelle de la Terre...etc. On peut citer l'énergie éolienne, géothermique, hydraulique, l'énergie photovoltaïque qui fait l'objet de ce travail de recherche. [2]

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité à l'aide des cellules photovoltaïques. L'élément le plus utilisé dans la fabrication des cellules solaires est le silicium [3].

En octobre 1997, l'entreprise japonaise Sanyo se lance dans la production de modules photovoltaïques appelés « structure HIT » (Heterojunction with Intrinsic Thin layer) [4]. En associant les bonnes performances du silicium cristallin au faible coût de production du silicium amorphe, cette technologie a permis d'atteindre des rendements élevés (estimés à 26.7% ([5]) tout en réduisant le prix de revient (budget thermique plus faible, épaisseur de couche plus fine, ce qui entraîne un prix moins cher, etc.).

Le principal objectif de ce mémoire est de modéliser une cellule solaire HIT de type N et d'optimiser numériquement la couche de passivation (épaisseur, matériau), afin d'étudier son effet sur les performances photovoltaïques : Tension de circuit ouvert V_{oc} , Courant de court-circuit J_{sc} , Facteur de forme FF et rendement de conversion η de la cellule étudiée.

Le mémoire est organisé en trois chapitres comme suit :

Dans le premier chapitre, nous présenterons les principes généraux de l'effet photovoltaïque, le rayonnement solaire, la conversion photovoltaïque ainsi que les caractéristiques principales des cellules solaires à hétérojonctions de silicium.

Dans le second chapitre, les différentes notions relatives à la cellule photovoltaïque ; sa caractéristique I-V, ses circuits électriques équivalents et ses principales grandeurs caractéristiques seront abordés. Nous présenterons aussi les logiciels de simulation disponibles pouvant être utilisés pour la modélisation des cellules solaires et nous détaillerons le logiciel SCAPS-1D que nous utiliserons pour réaliser nos simulations.

Dans le dernier chapitre, nous présenterons les résultats obtenus et discuterons l'influence des différents paramètres (l'épaisseur, le matériau) de la couche de passivation sur la performance de la cellule étudiée.

Enfin, nous présenterons notre conclusion générale sur le contenu de ce travail et les perspectives qui en découlent.

Chapitre I

Les cellules solaires photovoltaïques.

Introduction :

Toutes les énergies renouvelables sont issues, directement ou indirectement du soleil. Le rayonnement direct de cette étoile peut être utilisé de deux manières :

L'énergie solaire thermique : qui représente la conversion du rayonnement solaire en énergie thermique. Cette conversion est utilisée directement pour par exemple chauffer un bâtiment ou indirectement pour produire de la vapeur d'eau dans une turbomachine et ainsi obtenir de l'énergie électrique.

L'énergie solaire photovoltaïque : où l'énergie est récupérée à partir du rayonnement solaire et directement convertie en électricité par les panneaux photovoltaïques.

Nous consacrons ce premier chapitre aux généralités et notions fondamentales sur l'énergie solaire et les cellules solaires photovoltaïques.

L'énergie solaire :

L'énergie solaire est une énergie inépuisable. L'énergie qui parvient à la terre en une année représente plus de 10 000 fois la consommation mondiale en énergie.

Il s'agit donc d'une énergie abondante et renouvelable. Malheureusement, elle ne peut pas être exploitée directement car elle doit être convertie en d'autres formes d'énergie plus utiles :

- ✓ En bénéficiant directement du rayonnement solaire (énergie passive) ;
- ✓ En utilisant la chaleur du rayonnement solaire (énergie thermique) ;
- ✓ En convertissant le rayonnement solaire en électricité à l'aide des cellules photovoltaïques (énergie photovoltaïque).



Figure I-1:Image du soleil. [6]

Rayonnement solaire :

La distance de la terre au soleil est d'environ 150 millions de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300000 km/s, les rayons du soleil mettent donc environ 8 minutes à nous parvenir. La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. Sa valeur est communément prise égale à 1360 W/m². Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est réduite à 1000 W/m² à cause de l'absorption dans l'atmosphère. Albert Einstein a découvert en travaillant sur l'effet photoélectrique que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie est portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon étant donnée par la relation :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad [1.1]$$

Avec :

h : Constante de Planck (J.s).

ν : Fréquence (s⁻¹).

c : Vitesse de la lumière dans le vide (m/s).

λ : Longueur d'onde (m).

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande.

Une façon commode d'exprimer cette énergie est donnée par l'équation (1.2) :

$$E(eV) = 1.24/\lambda(nm) \quad [1.2]$$

Le rayonnement du soleil parvenant à la surface de la terre se compose de l'infrarouge qui procure de la chaleur, du visible qui est nécessaire à la croissance des plantes et des animaux, l'ultraviolet qui brunit la peau et tue les bactéries. [7]

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit :

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

Le rayonnement direct :

Le rayonnement direct est le rayonnement solaire atteignant directement la surface terrestre depuis le soleil. C'est la différence entre le rayonnement global et le rayonnement diffus. [8]

Le rayonnement diffus :

Ce rayonnement indirect résulte de la diffraction de la lumière par les nuages et les aérosols en suspension dans l'atmosphère. [8]

Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol :

C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc...). [8]

Le rayonnement global :

Le rayonnement global est la somme des rayonnements direct, diffus et reflété par le sol. La figure 2 représente l'ensemble des rayonnements solaires reçus sur une surface terrestre. [8]

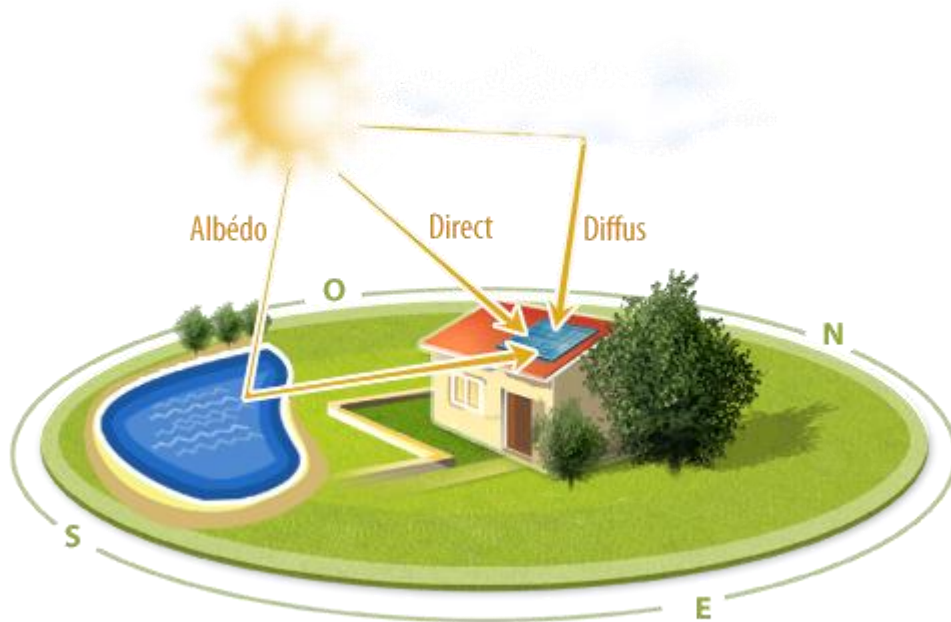


Figure I-2: Types de rayonnements solaires reçus au sol. [9]

Spectre solaire :

La lumière solaire est composée de toutes sortes de rayonnements, de couleurs différentes, caractérisées par différentes longueurs d'onde. Des photons composent ce rayonnement électromagnétique.

En 1924, Louis de Broglie a confirmé la nature à la fois corpusculaire et ondulatoire de la lumière : présence de corpuscules (photons) et propagation d'ondes avec une fréquence de vibration et une longueur d'onde. [10]

Le spectre du soleil s'étend de 200 nm à 3000 nm et présente des bandes d'absorption tel que montré sur la figure 3.

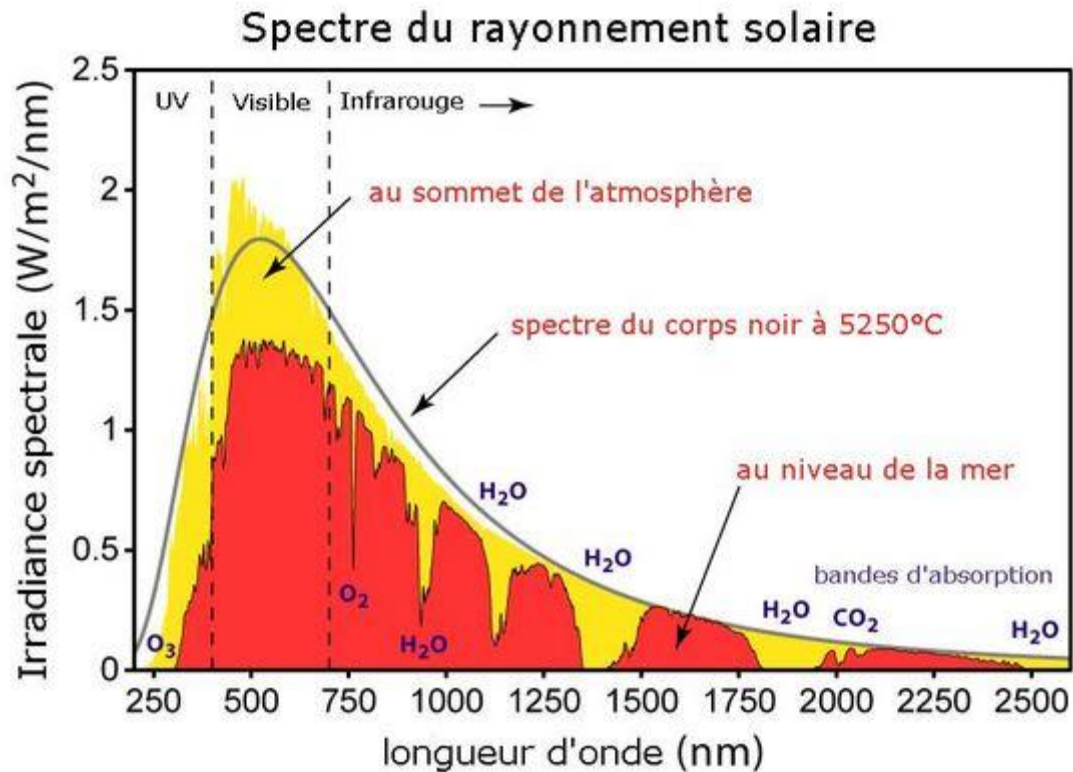


Figure I-3: Spectre d'irradiance solaire au sommet de l'atmosphère et au niveau de la mer. [11]

Masse d'air :

La masse d'air est la longueur de trajet que la lumière emprunte à travers l'atmosphère normalisée à la longueur de trajet la plus courte possible (c'est-à-dire lorsque le soleil est directement au zénith). La masse d'air quantifie la réduction de la puissance de la lumière lorsqu'elle traverse l'atmosphère et est absorbée par l'air et la poussière. La masse d'air est définie comme : [12]

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} \quad [1.3]$$

Où θ est l'angle par rapport à la verticale (angle zénithal). Lorsque le soleil est au zénith ($\theta=0$), la masse d'air est de 1.

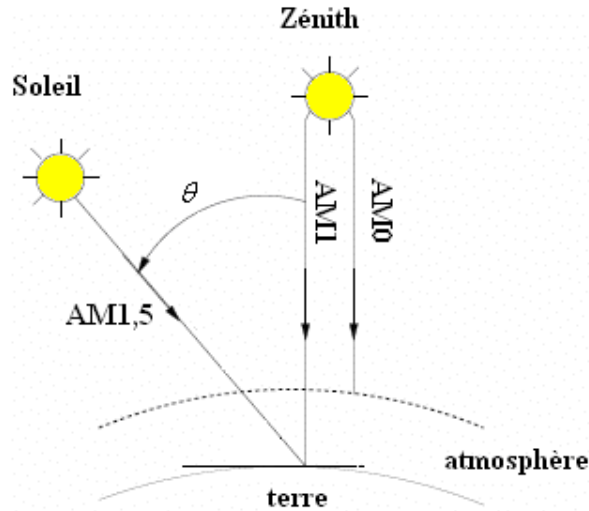


Figure I-4: Description du nombre de masse d'air. [13]

La figure 8 représente plusieurs Air Mass (AM). L'Air Mass AM0 correspond à une masse d'air nulle pour un rayonnement arrivant au-dessus de la couche atmosphérique à incidence normale, AM1 pour un rayonnement reçu au niveau de la mer correspondant à un soleil vertical à la terre (Soleil au zénith), et AM1.5 pour un rayonnement solaire correspondant à une inclinaison du soleil de 48.2° par rapport au zénith.

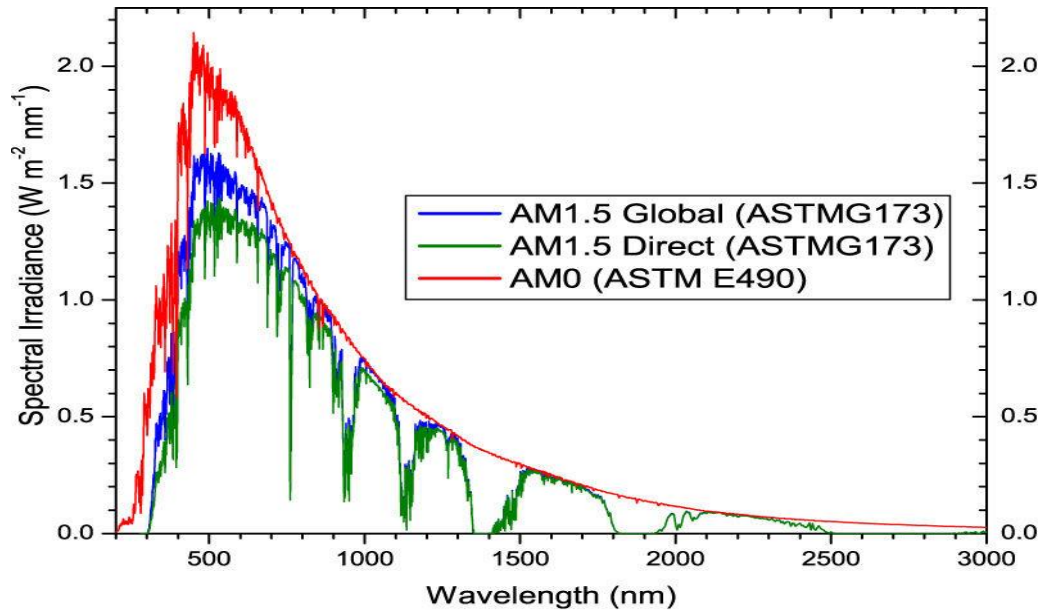


Figure I-5: Irradiance solaire à la surface de l'atmosphère terrestre (AM0) et au sol (AM1.5D et AM1.5G). [14]

La conversion photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière.

Le principe de fonctionnement des cellules solaires repose sur 3 étapes principales :

- 1- L'absorption de la lumière et la création de paires électron/trou ;
- 2- La séparation des paires électron/trou sous l'effet d'un champ électrique induit et le transport de ces charges vers les électrodes ;
- 3- La collecte des charges.

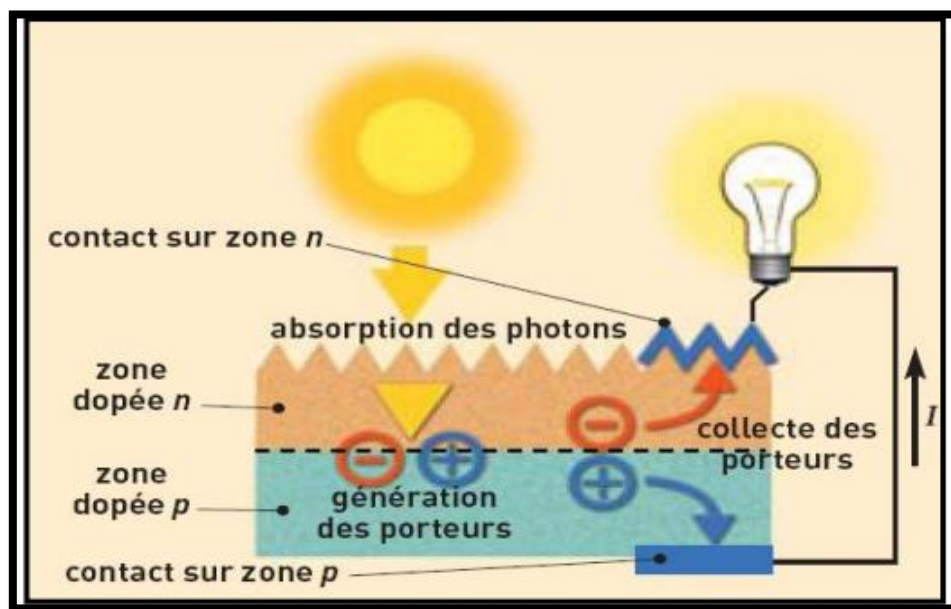


Figure I-6: Principe de la conversion photovoltaïque. [15]

La figure 6 résume le principe de la conversion photovoltaïque et montre que la jonction PN est la base du fonctionnement des cellules solaires car c'est elle qui génère le champ électrique qui tend à repousser les électrons vers la zone N et les trous vers la zone P.

Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel : le courant électrique circule.

Historique de la cellule photovoltaïque :

La découverte de l'effet photoélectrique est attribuée à Edmond Becquerel. En 1839, il démontra l'existence d'un photo-courant lorsque des électrodes de platine recouvertes de chlorure d'argent ou de bromure d'argent plongées dans une solution acide sont éclairées [16].

La première cellule solaire à base de sélénium fut fabriquée par Charles Fritts en 1883. Mais jusqu'à la seconde guerre mondiale, cette découverte reste une curiosité de laboratoire, et ce, jusqu'en 1954 lorsque trois chercheurs (Voir figure 7) des laboratoires Bell aux Etats-Unis développent une cellule solaire à base de silicium présentant un rendement de conversion de 6% [17].

En 1958, les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace. Ce développement notable est stimulé par le financement des gouvernements pour améliorer les cellules solaires et pour encourager l'utilisation d'énergies renouvelables suite aux chocs pétroliers de 1973 et 1980.

Depuis cette crise, le marché photovoltaïque (PV) a connu un intérêt grandissant du fait des rendements croissants. Néanmoins, malgré ces développements, un coût élevé de la technologie et des installations rend nécessaire le développement de nouvelles technologies photovoltaïques qui donnent des solutions compétitives à grande échelle [17].



Figure I-7: Photo des 3 chercheurs américains des laboratoires BELL : G.S. Fuller, D.M. Chapin, et G.L. Pearson, physicien, de gauche à droite. [18]

Depuis 1976, le NREL (The National Renewable Energy Laboratory) présente et actualise les meilleurs rendements de conversion certifiés pour les différents types de cellules photovoltaïques existants. Comme le montre la Figure 8.

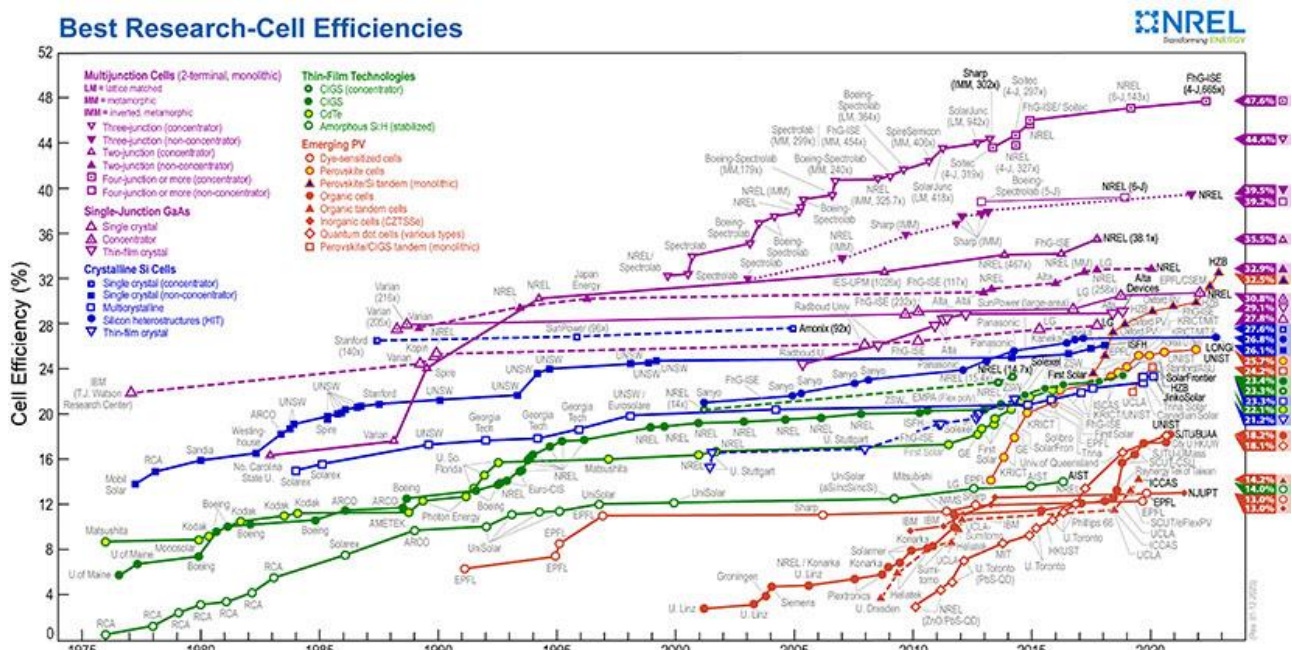


Figure I-8 : Evolution des rendements des différentes technologies de cellules solaires au niveau des laboratoires. [5] consulté le 08/02/2023.

Les filières photovoltaïques :

Basée sur les différentes technologies et les matériaux utilisés, la technologie de la cellule est passée par plusieurs phases, ce qui a conduit à les classer en trois grandes familles comme il est présenté sur la figure 9 :

- Les cellules au silicium cristallin ;
- Les cellules à base de couches minces ;
- Les cellules à base d'autres technologies.

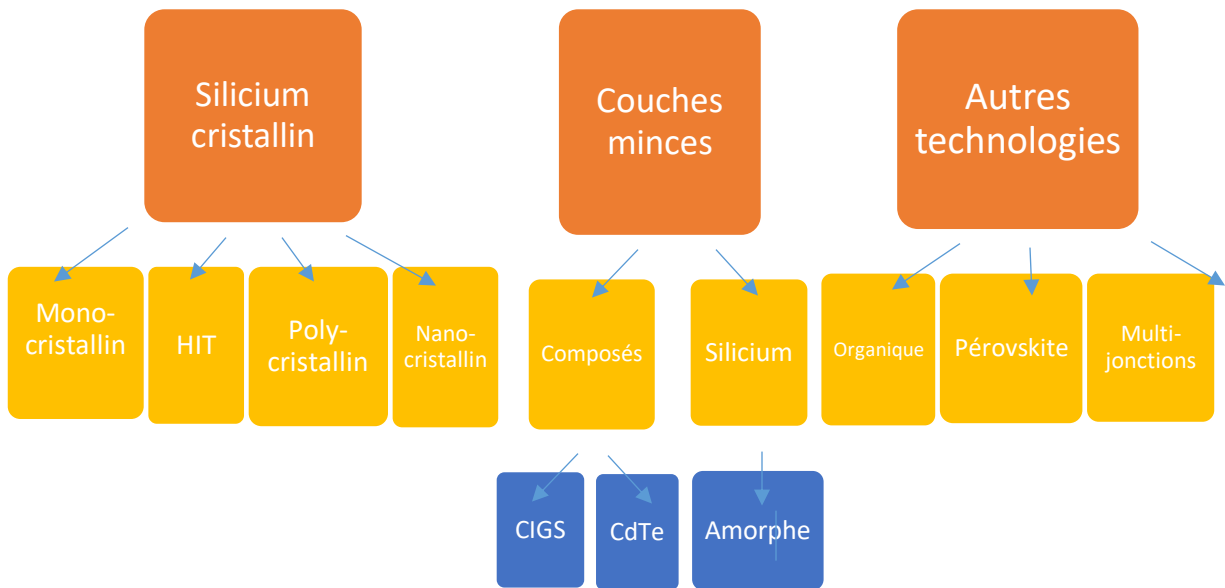


Figure I-9 : Les différentes technologies des cellules solaires.

Première génération : cellules solaires au Si cristallin :

Cette génération de cellules est basée sur des wafers (plaquettes) de silicium cristallin qui sont sciés dans des lingots de silicium qui sont le résultat d'un processus de purification pour obtenir un matériau contenant 99,99999 % de silicium pur. Dans la figure 10, nous présentons les différentes étapes de fabrication des cellules solaires à partir de silicium multi-cristallin. [19]

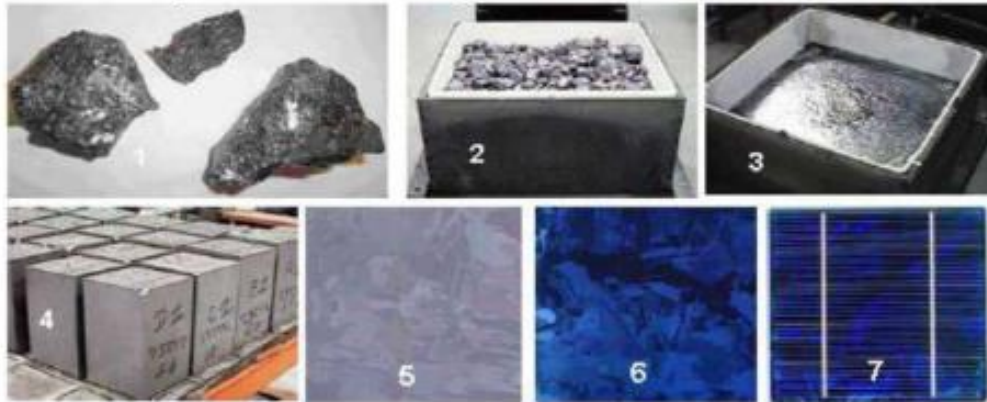


Figure I-10 :Étape de fabrication des cellules : (1) minerai de Silicium – (2) raffinage (pour augmenter la pureté) – (3) Silicium en fusion donnant des lingot (4) après solidification – (5) wafer obtenu par sciage du lingot – (6) traitement de surface par procédés p. [19]

Les cellules cristallines se subdivisent en deux catégories : mono- et poly- cristalline selon le type de structure du matériau utilisé (Figure 11).

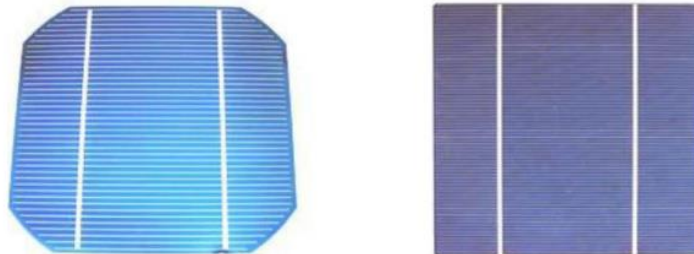


Figure I-11: cellule monocristalline (à gauche) et poly-cristalline (à droite) [19].

Les cellules monocristallines se distinguent par leurs coins coupés et à leur aspect uniforme. Les cellules poly-cristallines ont quant à elles un aspect plus irisé provenant de l'orientation des différents réseaux cristallins par rapport au plan de coupe.

Deuxième génération : cellules en couches minces :

Cette génération de cellules repose sur la déposition de matériaux semi-conducteurs en couches minces (thin films). Ces matériaux sont déposés par des procédés tels que PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) sur un substrat. L'épaisseur de la couche varie entre quelques nanomètres à des dizaines de micromètres.

Ces technologies qui étaient initialement chères étaient réservées aux applications spatiales et aux technologies à concentration. Avec l'augmentation de la quantité de production, le prix de revient de ces technologies a baissé pour devenir compétitif avec les technologies cristallines de la première génération. Parmi les technologies en couches minces qui sont exploitées industriellement (production de masse), on distingue : Silicium amorphe, CdTe, CIS, CIGS. [19]

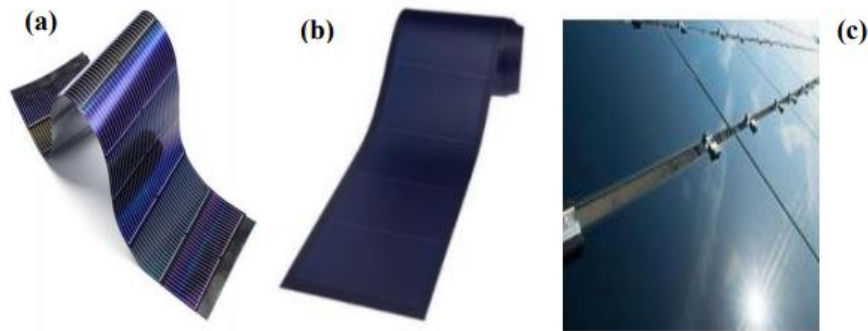


Figure I-12: (a), (b) Module flexible à base de CIGS Silicium amorphe et (c) panneaux solaires à base de CdTe.

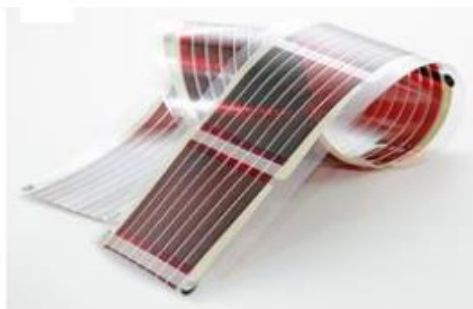
Troisième génération :

La troisième génération englobe toutes les technologies émergentes, tels que les cellules organiques, les cellules à multi-jonctions, ...etc. Les cellules photovoltaïques organiques peuvent être regroupées en trois grandes familles :

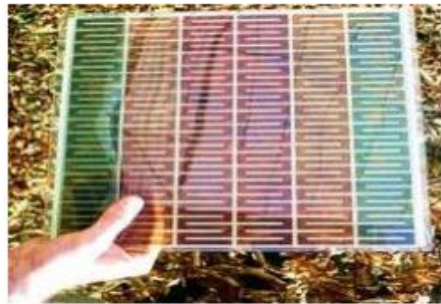
- ✚ Les cellules solaires organiques : Ces cellules composées soit de matériaux moléculaires soit de polymères semi-conducteurs. Ces macromolécules sont fabriquées à partir de produits pétrochimiques, elles sont donc peu coûteuses. De plus, elles sont légères et peu fragiles.,
- ✚ Les cellules solaires à colorant : Ces cellules dites "cellules de Grätzel" portent le nom de leur créateur, le chimiste suisse Michael Grätzel, (en anglais « Dye-Sensitized Solar Cells » (DSSC)). Les cellules DSSC reposent sur l'utilisation d'oxydes semi-conducteurs inorganiques à large bande interdite comme TiO₂, ZnO, SnO₂, etc. Ils sont nano structurés et sensibilisés par des chromophores organiques.
- ✚ Les cellules solaires à base d'absorbeurs pérovskites : Ces cellules sont basées sur un matériau hybride organique/inorganique qui est défini par ce que l'on appelle sa structure cristalline « pérovskite ».



Figure I-13: Sac à dos incorporant un module de technologie organique DSSC. [19]



(a)



(b)

Figure I-14: (a) Cellule solaire organique et (b) Cellule solaire de type Grätzel (DSC). [19]

Le matériau Silicium :

Définition :

Le silicium est l'élément chimique de numéro atomique 14, de symbole Si. C'est un membre du groupe des cristallogènes. Il se classe dans la colonne IV de la classification périodique de Mendeleïev, comportant 4 électrons de valence, il se classe dans les matériaux semi- conducteurs.

Ce semi-conducteur présente différents avantages : [20]

- ✚ Il est abondant à la surface du globe terrestre ;
- ✚ Il n'est pas toxique ;
- ✚ Il possède un oxyde naturel (SiO_2) présentant d'excellentes propriétés électroniques. Il peut être dopé facilement (avec le phosphore ou le bore).

Les différents types de silicium :

Il existe deux types de silicium : le cristallin et l'amorphe.

Silicium cristallin :

Le silicium cristallin se caractérise par sa structure ordonnée.

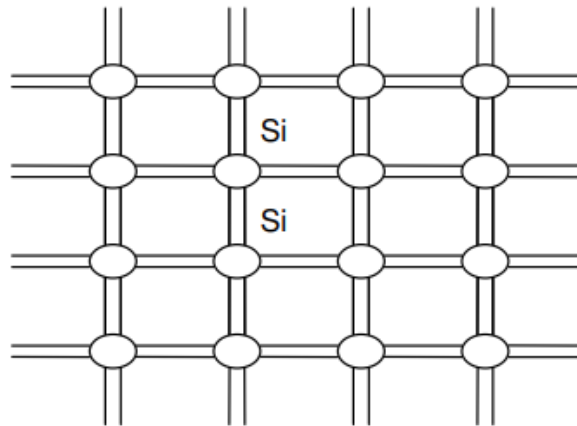


Figure I-15: Structure du silicium cristallin. [21].

Structure cristalline :

Le silicium cristallise dans la structure de type diamant.

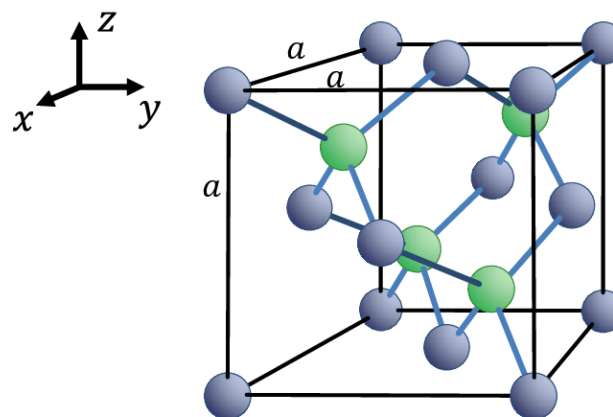


Figure I-16: Structure cristalline de type diamant. [22]

Cette structure consiste en deux réseaux cubiques à faces centrées qui s'interpénètrent. Chaque atome d'un des réseaux est entouré par quatre proches voisins équidistants de l'autre réseau, formant un tétraèdre, avec lesquels il échange ses quatre électrons de valence.

Propriétés :

Dans le tableau 1, on présente quelques paramètres physiques du silicium.

Tableau I-1: Quelques propriétés du silicium cristallin. [20]

Propriétés	Valeur
Masse volumique ρ (à 300K) g/cm^3	22.329
Masse volumique \tilde{n} (1687 K) g/cm^3	2.51
Conductivité thermique k (300K) $cm^{-1}k^{-1}$	1.5
Température de fusion T_f (K)	1687
E_g (300 K) (Gap indirect)	1.126

Le silicium monocristallin :

Le silicium monocristallin comporte peu de défauts recombinants et permet d'obtenir les meilleurs rendements. [20]

Silicium poly cristallin :

Le silicium poly cristallin, appelé aussi poly silicium ou poly-Si est une forme particulière du silicium. Il se différencie du silicium monocristallin et du silicium amorphe. Contrairement au premier (composé d'un seul cristal) et au second (n'ayant aucune ou une très faible cohérence cristallographique), le silicium poly cristallin est constitué de multiples petits cristaux de taille et de forme variées. [23]

Silicium amorphe :

Le silicium amorphe (a-Si) a été découvert vers la fin du 19ième siècle. Avant les années 1950, il ne présentait aucun intérêt, sinon académique. C'est avec la découverte des semi-conducteurs cristallins (c-Si) que le silicium amorphe a connu un regain d'intérêt. Toutefois, étant

donné le désordre existant dans ce type de matériau et la grande quantité de défauts électroniques présents, personne n'envisageait d'applications potentielles. [21]

Par la suite, il a été démontré que l'incorporation de l'hydrogène dans le silicium amorphe avait pour effet de diminuer la quantité de défauts électroniques.

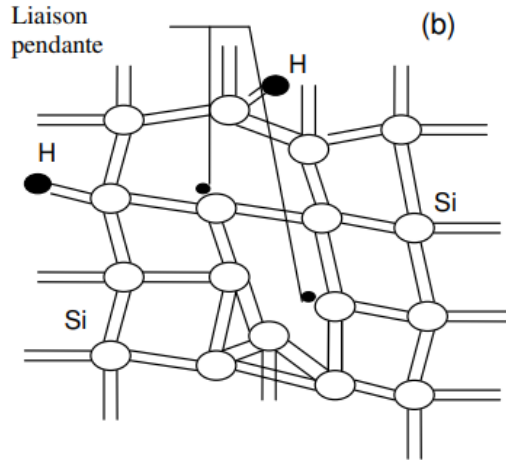


Figure I-17: Structure du silicium amorphe hydrogéné. [21]

Rôle de l'hydrogène :

La structure du silicium amorphe a une incidence directe sur ses propriétés électroniques et optiques. L'hydrogène est nécessaire pour améliorer la qualité du matériau.

L'Hydrogène incorporé passive une grande partie des liaisons pendantes, via l'équilibre suivant :



D : désigne la liaison pendante portée par un atome de Silicium en coordination 3. Un (a-Si:H) non dopé en possède en général moins de 10^{16}cm^{-3} [24].

L'hydrogène contribue également à réduire le désordre et à diminuer la largeur des queues de bandes. La figure 18 montre la densité d'états dans la bande interdite du silicium amorphe et l'effet de l'ajout de l'hydrogène sur ces niveaux d'énergie.

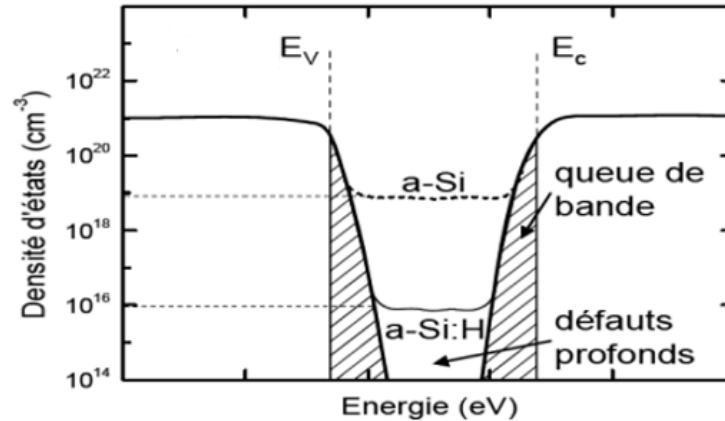


Figure I-18: Effet de l'addition d'hydrogène sur la densité d'états dans la bande interdite du silicium amorphe.

Propriétés du silicium amorphe :

Le silicium amorphe hydrogéné a gap direct qui varie de 1.6 – 1.8 eV suivant les techniques et les conditions du dépôt [24].

Il possède un coefficient d'absorption de la lumière environ 1000 fois supérieur au silicium cristallin dans le domaine du visible. Une fine couche de 0,3 μm est donc suffisante pour absorber l'essentiel du spectre visible [25].

Dans le silicium amorphe hydrogéné (a-Si :H), un atome de silicium peut avoir une coordination (nombre de liaisons avec ses plus proches voisins) de 3 ou 5. Il apparaît donc des liaisons pendantes ou flottantes. Une grande partie de ses défauts, près de 99,99%, sont passivés par l'hydrogène qui permet de diminuer la densité de défauts à 10^{15}cm^{-3} [24].

Modèle de la densité des états dans l'a-Si : H :

Il existe des modèles pour représenter les défauts existants dans les semi-conducteurs amorphe. Ces défauts qui engendrent des états localisés continus dans le gap proviennent de la distorsion du réseau représentée par des courbes exponentielles et des liaisons pendantes représentées par des Gaussiennes. Ces modèles seront présentés dans le chapitre 3.

Les cellules solaires HIT :

Les cellules photovoltaïques à hétérojonction sont obtenues lorsqu'on met en contact deux matériaux de différente énergie de gap E_g . L'hétérojonction de silicium consiste à déposer des couches de silicium amorphe hydrogéné (a-Si : H) sur des substrats de silicium cristallin (c-Si) telle que chaque région de l'hétérojonction (amorphe/cristallin) a un type de dopage différent de l'autre. [26]

Les substrats utilisés sont des wafers de c-Si de type N ou de type P. L'entreprise japonaise SANYO produit des modules de cellules HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin Layer) de type N qui correspondent à 5% de la vente mondiale. Cependant, de nombreux laboratoires européens ont entrepris des recherches en utilisant un substrat en silicium cristallin dopé P. [27]

La première cellule solaire en silicium monolithique produite par Sanyo consistait en une couche de silicium amorphe hydrogéné de type P (a-Si : H) qui était déposé directement sur une tranche de silicium cristallin de type N (c-Si) pour former la cellule solaire à hétérojonction (Figure 19). [28]

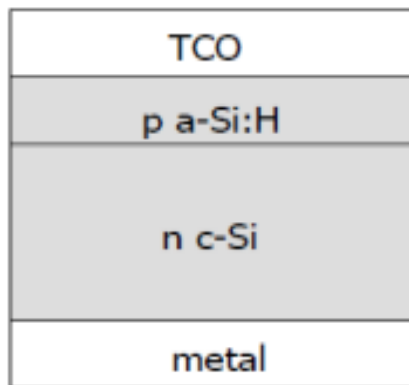


Figure I-19: Structure schématique des cellules solaires à hétérojonction a-Si : H / c-Si faites par Sanyo.

[28]

Dans un effort pour améliorer cette cellule, Sanyo a incorporé une mince couche a-Si : H intrinsèque entre la plaquette de c-Si de type N et une couche de l'a-Si : H de type P (Fig. 20) dans le but de passiver les liaisons pendantes à la surface du c-Si. En conséquence, la densité d'états de défauts à l'interface a-Si : H/c-Si a été considérablement réduite, ce qui a permis d'améliorer la

qualité de la cellule. Sanyo a nommé cette structure la cellule solaire ACJ-HIT (hétérojonction à couche mince intrinsèque).

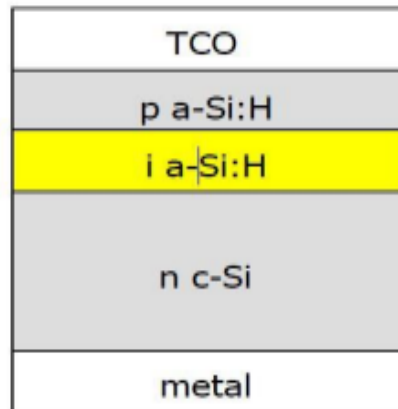


Figure I-20: Structure schématique des cellules solaires ACJ-HIT fabriquées par Sanyo. [28]

Les performances de la cellule solaire HIT ont été encore améliorées par l'introduction de surfaces texturées pour capter la lumière et l'insertion d'un BSF (Back Surface Field) à l'arrière de la cellule solaire (Fig. 21).

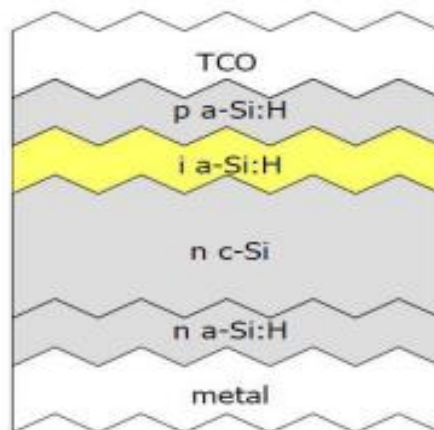


Figure I-21: Structure schématique de la cellule solaire HIT avec surface texturé et BSF. [28]

Composants d'une cellule à hétérojonction de silicium :

L'Oxyde Transparent Conducteur (TCO) :

Dans une structure de cellule photovoltaïque standard, un oxyde conducteur transparent est placé sur la face avant (face éclairée) de la cellule. Le TCO doit avoir certaines propriétés : [29]

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

Plusieurs matériaux peuvent être utilisés pour constituer le TCO comme :

- Le dioxyde d'étain dopé au fluor ($\text{SnO}_2 : \text{F}$ ou FTO)
- L'oxyde d'indium et d'étain (ITO)
- L'oxyde de Zinc (ZnO)
- L'oxyde de Zinc dopé à l'aluminium ($\text{ZnO} : \text{Al}$ ou AZO) ...etc.

L'émetteur :

L'émetteur est constitué d'un film mince de silicium amorphe hydrogéné dopé anti-substrat. L'émetteur permet de former la jonction P-N afin de séparer les paires électron-trou photo-générées. Il doit être pris très fin pour minimiser l'absorption dans cette couche. [29]. De plus son gap doit être supérieur à celui de la couche active afin d'obtenir un bon alignement de bande.

La couche absorbante (La couche active) :

La couche absorbante est la partie dans laquelle les photons vont être convertis en paires électrons-trous. Elle doit être constituée de matériaux à fort coefficient d'absorption dans le visible, c'est-à-dire que la valeur de leur bande interdite (gap), doit varier de 1,1 à 1,7 eV. L'épaisseur de cette couche doit être importante pour améliorer l'absorption.

Dans le cas d'une cellule en silicium à hétérojonction, l'absorbant est du silicium cristallin. [30]

Le BSF :

Le BSF est une couche qui crée un fort champ électrique arrière qui permet également de passiver la face arrière de la cellule. Le BSF est une couche fortement dopée (p+ ou n+) avec le même type de dopage que l'absorbeur. Avec une jonction p+-p ou n+-n, une barrière de potentiel est induite par la différence de niveau de dopage entre l'absorbeur et le BSF.

Cette barrière de potentiel en face arrière de la structure permet de confiner les porteurs minoritaires au substrat et ainsi les empêcher de se recombiner en face arrière de la cellule. Le BSF minimise la recombinaison arrière et assure une meilleure collecte des porteurs majoritaires. [29]

Les contacts :

Les contacts métalliques sont placés de part et d'autre de la cellule pour les structures standards. Ces contacts permettent de capter le courant photo généré. Les contacts métalliques de type ohmique sont une condition idéale car le courant maximal sera collecté avec ce type de contact. En plus de choisir le métal qui donne des contacts ohmiques, il est également important que la résistance de contact soit la plus faible possible.

Pour réaliser les contacts métalliques, les principales techniques utilisées sont l'électrolyse, l'évaporation, la sérigraphie. [29]

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases indispensables à la compréhension du fonctionnement physique d'une cellule photovoltaïque. Nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, et son application dans le domaine photovoltaïque. Nous avons ensuite expliqué le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques et les caractéristiques principales des cellules solaires à hétérojonctions de silicium.

Chapitre II

Modélisation et simulation des cellules solaires.

Introduction :

Dans ce chapitre nous présenterons les modèles mathématiques équivalents d'une cellule photovoltaïque, puis nous détaillerons les paramètres photovoltaïques qui servent à caractériser une cellule solaire. En dernier, nous présenterons le logiciel SCAPS-1D que nous utiliserons pour réaliser nos simulations.

Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

Pour développer un circuit équivalent à une cellule photovoltaïque, il faut bien choisir les éléments électriques qui le constituent. Pour cela, plusieurs modèles ont été développés pour représenter le comportement non linéaire des jonctions à semi-conducteurs. Dans ce qui suit, nous présentons deux modèles de cellules photovoltaïques, à savoir le modèle à une diode et le modèle à deux diodes. [31]

Modèle à une diode :

La cellule photovoltaïque est représentée par le modèle « standard » à une diode. Ce modèle comporte une diode comme le montre la figure 1. [31]

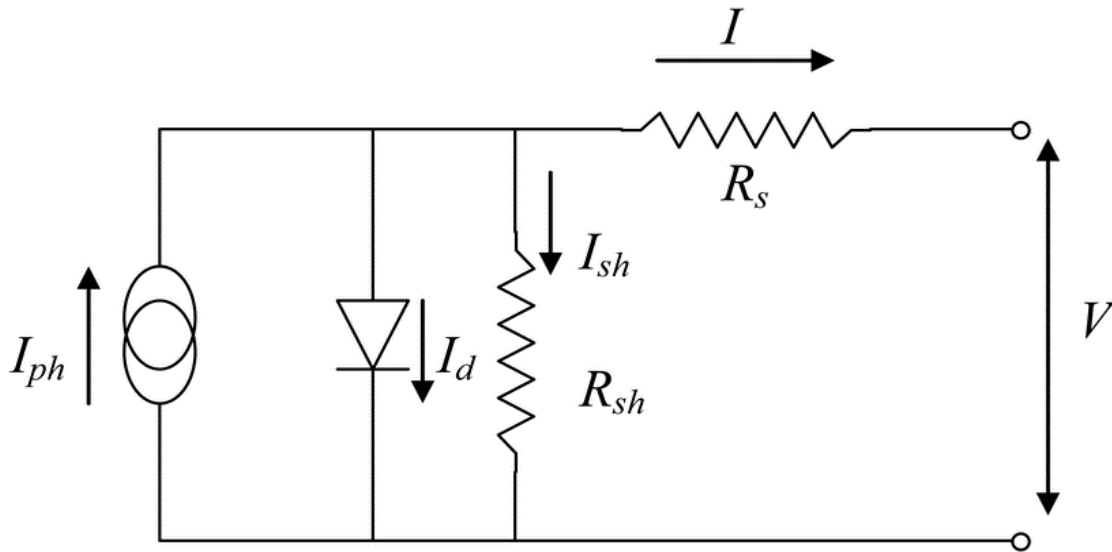


Figure II-1: Schéma équivalent du modèle à une diode. [32]

Le modèle est constitué d'une source de courant produisant le courant de court-circuit de la cellule, d'une diode de courant de saturation I_d qui représente la jonction PN, et de deux résistances R_s et R_{sh} . La résistance série R_s représente de la résistivité du matériau et des contacts semi-conducteur-métal. La résistance parallèle R_{sh} traduit la présence d'un courant de fuite dans la jonction. [31]

Le courant qui circule dans ce circuit est décrit par l'expression suivante :

$$I = I_{ph} - I_d \left[e^{q \left(\frac{V + I * R_s}{n * K T} \right)} - 1 \right] - \frac{V + I * R_s}{R_{sh}} \quad [2.1]$$

La résistance parallèle R_{sh} est très grande par rapport à la résistance série R_s . Ce modèle, est largement utilisé pour la modélisation.

Modèle à deux diodes :

La figure 2 représente le circuit équivalent d'une cellule solaire, réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes de courants de saturation I_{D1} et I_{D2} et de facteurs d'idéalité n_1 et n_2 ,

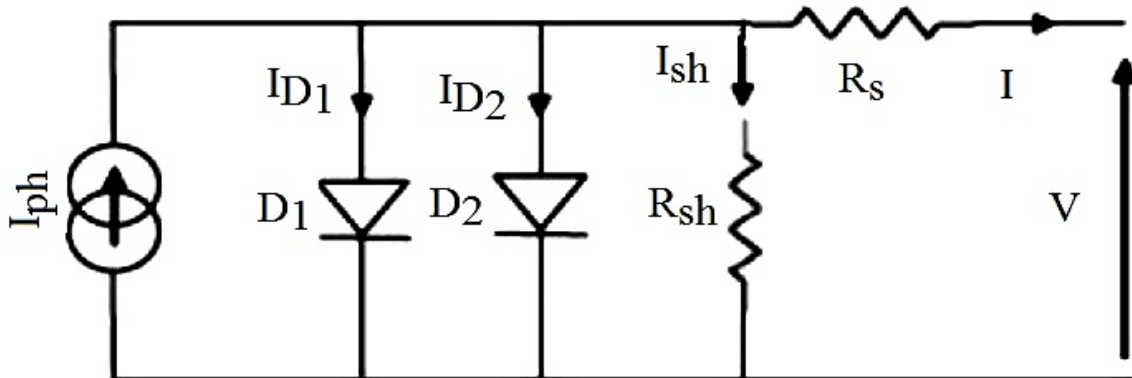


Figure II-2: Schéma équivalent du modèle à deux diodes. [33]

Le courant I délivré par la cellule est donné par l'expression suivante :

$$I = I_{ph} - I_{D1} \left[e^{q \left(\frac{V+I \cdot R_s}{n_1 \cdot K T} \right)} - 1 \right] - I_{D2} \left[e^{q \left(\frac{V+I \cdot R_s}{n_2 \cdot K T} \right)} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad [2.2]$$

Avec :

I_{ph} (A) : le photo-courant de la cellule dépendant de l'ensoleillement et de la température,

I_{D1} (A) : le courant de saturation de la diode1,

I_{D2} (A) : le courant de saturation de la diode2,

$K = 1.381 \times 10^{-23}$ J/K : la constante de Boltzmann,

T (K) : la température effective de la cellule,

q : la charge de l'électron,

n_1 : le facteur d'idéalité de la jonction de la diode1,

n_2 : le facteur d'idéalité de la jonction de la diode2,

I (A) : le courant fourni par la cellule,

V (V) : la tension aux bornes de la cellule,

R_{sh} (Ω) : la résistance de shunt caractérisant les courants de fuites de la jonction,

R_s (Ω) : la résistance série représentant les diverses résistances dans la cellule.

Caractéristiques courant-tension $I=f(V)$:

Sous éclairement, chaque cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe de variation du courant I en fonction de la tension V, qui représente l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule.

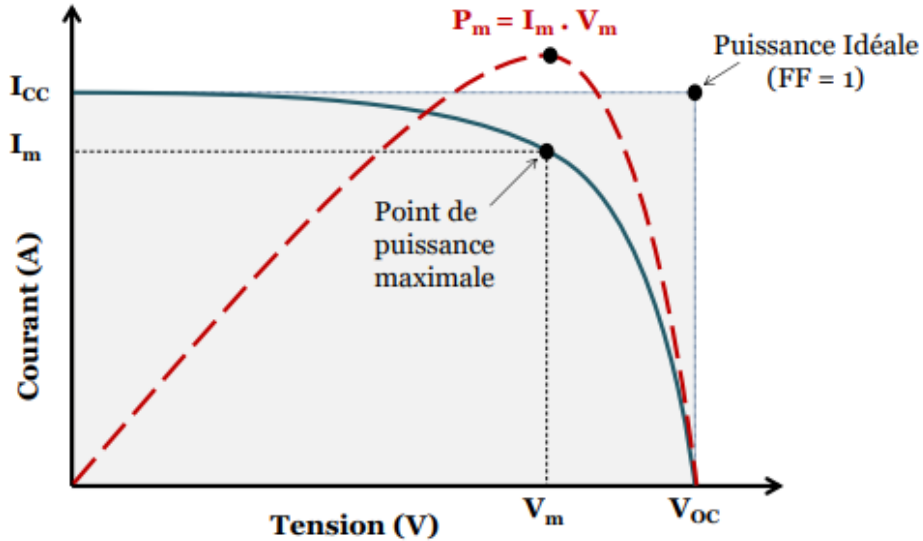


Figure II-3: Caractéristique courant-tension $I(V)$ (en trait bleu) et puissance (en trait rouge) d'une cellule photovoltaïque. [34]

Les Paramètres des cellules photovoltaïques :

Il existe plusieurs paramètres qui permettent de caractériser une cellule solaire. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique $I(V)$. [35]

Courant de court-circuit, (I_{cc}) :

C'est le courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul. C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. [35]

On peut écrire :

$$I_{cc} = I_{ph} (V = 0) \quad [2.3]$$

Tension en circuit ouvert (V_{co}) :

La tension en circuit ouvert est obtenue lorsque le courant de la cellule est nul. Il est associé à la résistance shunt, lorsque cette dernière n'est pas connectée ou connectée mais sa valeur est infinie. [35]

La valeur de cette tension est donnée par l'équation 2.4.

$$V_{oc} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad [2.4]$$

Avec :

$\frac{kT}{q}$: le potentiel thermodynamique ;

T : la température absolue ;

I_s : le courant de saturation inverse.

Facteur de forme (FF) :

On appelle facteur de forme FF (Fill Factor), le rapport entre la valeur maximale de la puissance pouvant être extraite ($P_m = I_m * V_m$) de la photopile sous les conditions de mesures standardisées, et le produit $I_{cc} * V_{co}$ [35] :

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} * V_{co}} \quad [2.5]$$

Rendement d'une cellule solaire η :

Le rendement η des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente, P_{inc} : [35]

$$\eta = \frac{P_m}{P_{inc}} = \frac{FF * I_{cc} * V_{co}}{P_{inc}} \quad [2.6]$$

Le rendement quantique externe EQE :

Le rendement quantique externe est le rapport entre le nombre d'électrons collectés par la cellule solaire et le nombre de photons incidents. Il est défini comme suit [35] :

$$EQE(\lambda) = \frac{I_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)} * \frac{E(\lambda)}{q} = \frac{I_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)} * \frac{h * c}{q * \lambda} \quad [2.7]$$

Où :

$\varphi(\lambda)$: le flux lumineux incident ;

$E(\lambda)$: l'énergie du photon ;

h : la constante de Planck ;

c : la vitesse de la lumière ;

λ : la longueur d'onde.

Réponse spectrale d'une cellule photovoltaïque :

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 qui composent le rayonnement incident.

La réponse spectrale RS est donnée par la relation suivante : [36]

$$RS(\lambda) = \frac{I_{cc}(\lambda)}{P_{inc}(\lambda)} \left(\frac{A}{W} \right) \quad [2.8]$$

Jonction PN :

Les semi-conducteurs sont des matériaux dont les propriétés électriques se situent entre celles des isolants et celles des métaux. L'énergie de gap pour ces matériaux varie de 0,5 à 4 eV. La nature et l'énergie du gap E_g d'un semi-conducteur jouent un rôle important dans le choix du matériau à utiliser pour fabriquer des composants optoélectroniques.

On obtient une jonction PN lorsqu'on met en contact deux semi-conducteurs l'un dopé P et l'autre de dopé N.

1) Semi-conducteur dopé N :

Matériau dopé N est un semi-conducteur dont la concentration en électrons est largement supérieure à la concentration en trous. La concentration des donneurs sera donc supérieure à la concentration d'accepteurs ($N_D - N_A > 0$).

2) Semi-conducteur dopé P :

Il s'agit d'un semi-conducteur dont la concentration en trous est largement supérieure à la concentration en électrons. La concentration des accepteurs sera donc supérieure à la concentration des donneurs ($N_A - N_D > 0$).

Il y a deux types de jonctions PN :

1) **Homo-jonction** : c'est une jonction constituée d'un même matériau.

Par exemple :

Si	Si
dopé P	dopé N

2) **Hétérojonction** : C'est une jonction constituée de deux matériaux différents.

Ge	Si
dopé N	dopé P

Lorsqu'on met deux semi-conducteurs de dopage différent, on observe une courbure de bandes induite par l'alignement des niveaux de Fermi du premier SC avec le second.

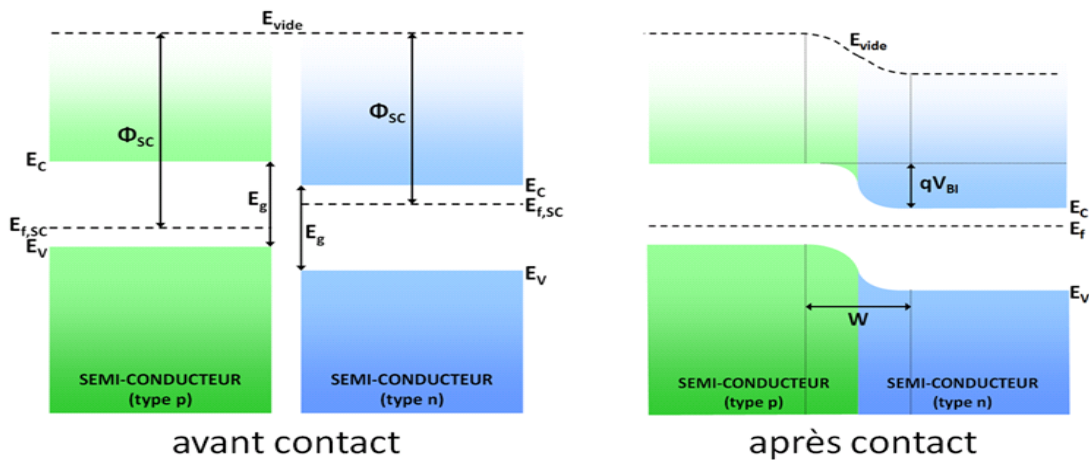


Figure II-4: Diagramme de bandes de deux semi-conducteurs dopés différemment avant et après la mise en contact.

La mise en contact d'un semi-conducteur dopé P avec un autre dopé N fait apparaître un phénomène de diffusion dans la jonction. Les électrons majoritaires dans le côté N diffusent vers le côté P et les trous majoritaires dans le côté P diffusent vers le côté N. Au niveau de la jonction, les porteurs de charge (électrons et trous) se recombinent créant une zone dépourvue de porteurs mobiles, appelée Zone de Charge d'Espace (ZCE).

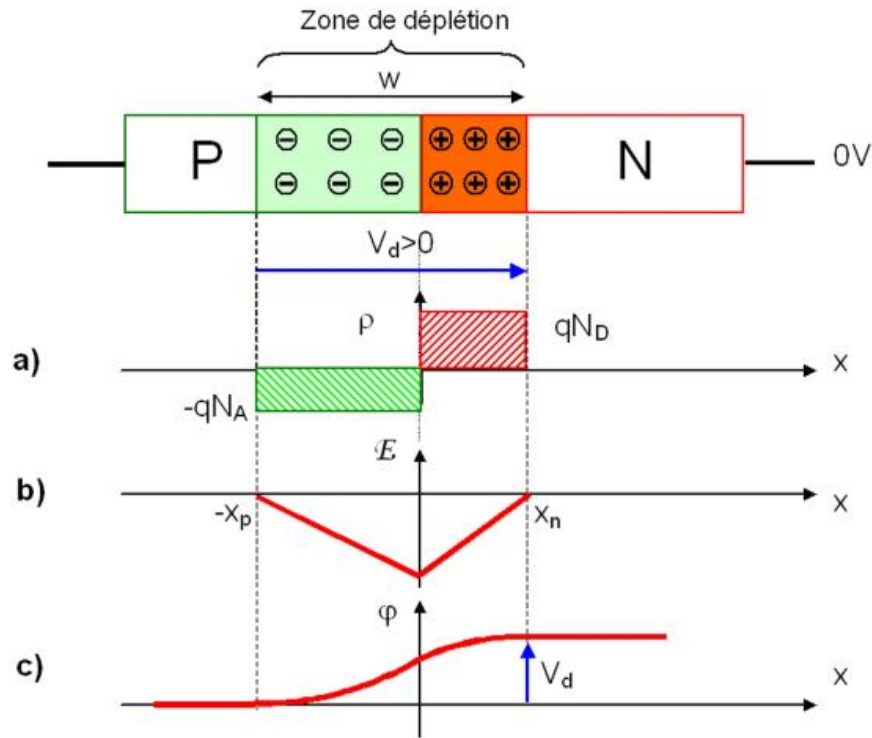


Figure II-5: Jonction PN à l'équilibre : a) Distribution des impuretés ionisées, b) Distribution du champ électrique, c) Variation du potentiel.

Les caractéristiques d'une jonction PN :

a- Le potentiel induit :

$$V_d = \frac{KT}{e} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \quad [2.9]$$

b- La densité de charge :

$$\rho(x) = \begin{cases} 0, & x < -x_p \\ -eN_A, & -x_p < x < 0 \\ +eN_D, & 0 < x < x_n \\ 0 & x > x_n \end{cases} \quad [2.10]$$

c- Le champ électrique :

Pour calculer le champ électrique dans la ZCE, on utilise l'équation de Poisson :

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho(x)}{\epsilon} \quad [2.11]$$

- Dans la région $0 < x < x_n$:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{eN_D}{\epsilon} \Rightarrow E = \int e \frac{N_D}{\epsilon} dx = e \frac{N_D}{\epsilon} x + C \quad [2.12]$$

C : est une constante, on va déterminer sa valeur par la condition aux limites $E(x_n)=0$

$$E(x_n) = e \frac{N_D}{\epsilon} x_n + C = 0 \Rightarrow C = -e \frac{N_D}{\epsilon} x_n \quad [2.13]$$

Donc :

$$E_n(x) = e \frac{N_D}{\epsilon} (x - x_n) \quad [2.14]$$

- Dans la région $-x_p < x < 0$:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{-eN_A}{\epsilon} \Rightarrow E = \int -e \frac{N_A}{\epsilon} dx = -e \frac{N_A}{\epsilon} x + C' \quad [2.15]$$

C' : est une constante, on va déterminer sa valeur par la condition aux limites $E(-x_p) = 0$

$$E(-x_p) = e \frac{N_A}{\epsilon} x_p + C' = 0 \Rightarrow C' = -e \frac{N_A}{\epsilon} x_p \quad [2.16]$$

$$E_p(x) = -e \frac{N_A}{\epsilon} (x + x_p) \quad [2.17]$$

Le champ électrique E au point $x = 0$:

$$\frac{-eN_D}{\epsilon} x_n = \frac{-eN_A}{\epsilon} x_p \Rightarrow N_D x_n = N_A x_p \quad [2.18]$$

Avec :

$E(x)$: Le champ électrique.

$\rho(x)$: La densité de charge.

N_A : La densité des accepteurs.

N_D : La densité des donneurs.

V_d : Le potentiel de diffusion.

ε : La permittivité électrique du semi-conducteur.

n_i : La densité intrinsèque du semi-conducteur.

d- L'équation de continuité des trous :

$$G_p(x) - R_p(p(x), n(x)) - \frac{1}{q} \frac{\partial J_p(x)}{\partial x} = 0 \quad [2.19]$$

e- L'équation de continuité des électrons :

$$G_n(x) - R_n(p(x), n(x)) + \frac{1}{q} \frac{\partial J_n(x)}{\partial x} = 0 \quad [2.20]$$

Avec :

J_n, J_p : densités de courant des électrons et des trous successivement.

G_n, G_p : les taux de génération pour les électrons et les trous.

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

f- Les équations de transport :

Le déplacement des porteurs de charges se fait par l'effet d'un champ électrique ou l'effet d'un gradient de concentration de porteurs de charge.

- Sous l'action d'un champ électrique, on a un courant de conduction proportionnel à ce champ, défini par l'équation suivante :

$$\vec{J}_C = \vec{J}_n + \vec{J}_p = e(n\mu_n + p\mu_p)\vec{E} \quad [2.21]$$

- Sous l'action d'une variation spatiale de la densité des porteurs, on a un courant de diffusion, car les charges diffusent de la région de forte concentration vers la région de faible concentration. Ce courant est défini par la relation suivante :

$$\vec{J}_D = \vec{J}_n + \vec{J}_p = e(D_n \vec{\nabla}_n - D_p \vec{\nabla}_p) \quad [2.22]$$

Le courant total des porteurs de charge est la somme des deux courants, le courant de conduction et le courant de diffusion, et s'exprime par l'équation suivante :

$$\vec{J}_T = \vec{J}_C + \vec{J}_D = e[(n\mu_n \vec{E} + D_n \vec{\nabla}_n) + (p\mu_p \vec{E} - D_p \vec{\nabla}_p)] \quad [2.23]$$

Avec :

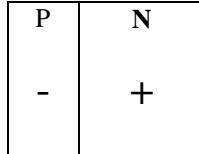
D_n, D_p : les constantes de diffusion.

μ_n, μ_p : les mobilités des électrons et des trous respectivement.

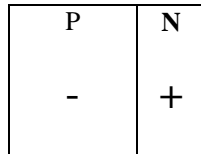
Remarque :

La Zone de Charge d'Espace n'est pas forcément symétrique, elle s'étend du côté le moins dopé.

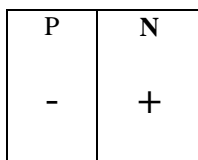
Si $N_A > N_D$



Si $N_A < N_D$



Si $N_A = N_D$



Les recombinaisons :

Les recombinaisons sont des phénomènes conduisant la disparition de paires électron-trou. Elles peuvent être classifiées en recombinaisons radiatives et non radiatives. [37]

Recombinaisons radiatives :

Les recombinaisons radiatives les plus importantes sont représentées sur la figure 6. [37]

a) La recombinaison bande à bande :

Elle se produit entre un électron de la bande de conduction et un trou de la bande de valence. Ceci s'accompagne de l'émission d'un photon d'énergie proche de l'énergie du gap du matériau C'est la recombinaison radiative la plus dominante.

b) La recombinaison à travers les niveaux des impuretés :

Trois cas peuvent être distingués. Premier cas, l'électron excité revient du niveau donneur vers la bande de valence et sa recombinaison avec le trou. Le deuxième cas, le retour de l'électron excité de la bande de conduction au niveau accepteur et sa recombinaison avec le trou. Le troisième cas : le retour de l'électron excité du niveau donneur au niveau accepteur et sa recombinaison avec le trou.

c) Les recombinaisons dues aux isoélectriques (excitons) :

Les excitons représentent des atomes ou des molécules de même valence que les atomes qu'ils remplacent dans le matériau mais n'ont pas le même diamètre ni la même électronégativité. Ils n'ajoutent aucune charge supplémentaire dans le matériau hôte.

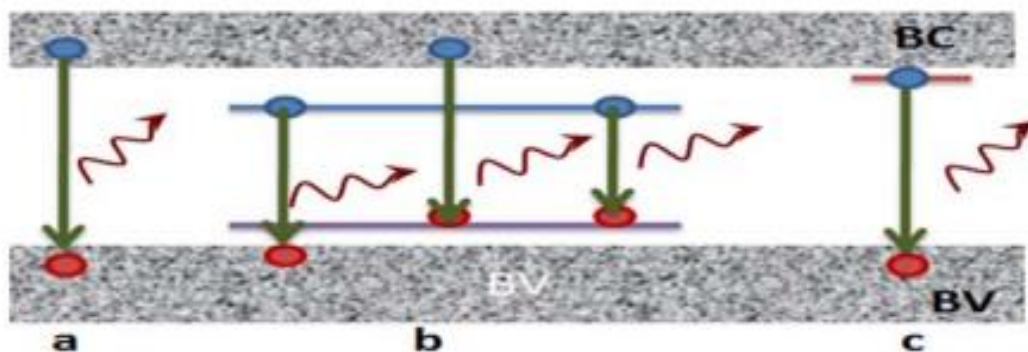


Figure II-6: Mécanisme de recombinaisons radiatives : a) Bande à bande, b) à travers des niveaux d'impuretés, c) dues aux excitons. [37]

Recombinaisons non radiatives :

a) La recombinaison de type Auger :

Elle se fait par transition directe bande à bande ou par l'intermédiaire d'un centre recombinant. L'énergie restante est transférée à une troisième particule (électron ou trou) qui est excitée à un état d'énergie plus élevé (Fig. 7) puis transférée de manière non radiative au réseau. [37]

b) La recombinaison de type Shockley-Read -Hall (SRH):

C'est le mécanisme dominant dans la plupart des semi-conducteurs. Il se déroule via un centre recombinant (défaut ou impureté) qui introduisent un niveau E_p profondément dans la bande interdite. Les quatre étapes possibles dans ce processus sont [37] :

- 1- La capture d'électron avec un niveau de piège (passage de l'électron de E_c vers E_p).
- 2- L'émission d'un électron à partir d'un niveau piège (passage de l'électron de E_p vers E_c).
- 3- L'émission d'un trou à partir d'un niveau piège (passage de l'électron de E_v vers E_p).
- 4- La capture d'un trou par un niveau piège (passage de l'électron de E_p vers E_v).

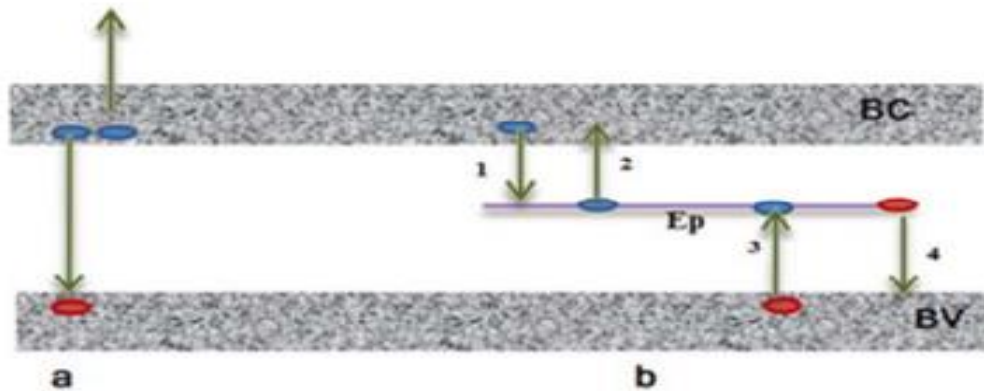


Figure II-7: Mécanisme de recombinaisons non radiatives : a) de type Auger, b) de type Shockley-Read - Hall (SRH). [37]

Logiciels de simulation disponibles :

La simulation numérique est une technique d'étude et d'analyse du comportement d'un dispositif réel. Ces dernières années, plusieurs simulateurs solaires ont été développés dans le but

de modéliser et de simuler des cellules solaires. On peut citer des logiciels de simulation numérique tels que : AMPS-1D, AFORS-HET, ASDMP, SCAPS.

Le logiciel AMPS-1D :

Le logiciel AMPS-1D (Analysis of Microelectronic and Photonic Structures) a été développé par le Professeur J. Vonash et son équipe à l'Université de Pennsylvanie.

Ce logiciel permet d'analyser les phénomènes de transport dans les structures optoélectroniques. Il utilise les principes de continuité et l'équation de Poisson pour analyser le comportement des structures. [38]

Le logiciel AFORS-HET :

AFORS-HET (Automate FOR Simulation of HETerostructures) est un outil de simulation numérique qui permet la simulation de dispositifs semi-conducteurs. Une séquence de couches peut être modélisée, en spécifiant les propriétés des couches et leurs interfaces. Aux extrémités, les contacts peuvent être choisis de type métal/semi-conducteur ou métal/isolant/semi-conducteur. [39]

Ce logiciel résout les équations de base des semi-conducteurs et permet de simuler des densités de défauts de la même manière que AMPS-1D. Ainsi, on pourra choisir une densité constante pour le silicium monocristallin, alors qu'il sera possible de simuler les queues de bandes et les liaisons pendantes pour le silicium amorphe.

ASDMP :

Le logiciel ASDMP (Amorphous Semiconductor Device Modeling Program) a été développé par P. Chatterjee et validé par l'équipe de recherche du laboratoire LPICM (Laboratoire de Physique des Interfaces et des Couches Minces) de l'École Polytechnique de Paris. Il est unidimensionnel, et analyse les propriétés de transport en fonction de la position dans l'ensemble du dispositif. [40]

Ce logiciel a été initialement conçu pour modéliser des dispositifs à base de silicium amorphe. Il a été ensuite généralisé au silicium amorphe et aux cellules HIT. Il comprend une partie électrique et une autre partie optique. [40]

SCAPS-1D :

Le simulateur SCAPS-1D « Solar Cell Capacitance Simulator in one Dimension » développé par Marc Burgelman, est un programme conçu pour fonctionner sous le système d'exploitation Windows. Il permet de simuler les caractéristiques J-V sous obscurité et sous éclairage des cellules solaires à couches minces. Il contient une base de données contenant plusieurs types de cellules solaires d'extension « def ».

Il a été développé par la compagnie « Lab Windows/CVI » afin de simuler spécifiquement des cellules solaires à base de CdTe et Cu(InGa)Se₂. La dernière version a été développée par le Département d'Electronique et Système d'Information de l'Université de GENT en Belgique (ELIS). [41]

Interface du logiciel SCAPS :

Pour simuler tous les paramètres d'une cellule photovoltaïque au moyen de Logiciel SCAPS, nous devons passer par la fenêtre principale appelé « **Fenêtre d'exécution (action panel)** ».

- **Fenêtre d'exécution (action panel) :**

C'est la fenêtre qui apparaît au démarrage du logiciel, et qui peut être divisée en 5 blocs notés de 1 à 5, comme Indiqué sur la figure 8.

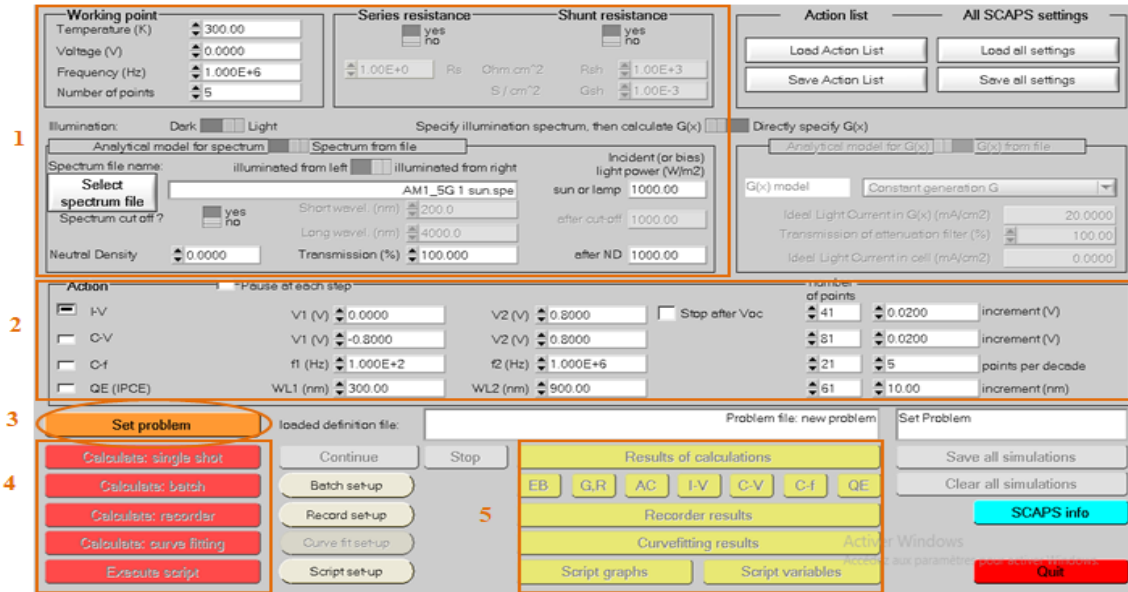


Figure II-8: Panneau principal de démarrage de SCAPS-1D

1. Lancement du logiciel :

Ce bloc permet de définir les conditions de simulation, telles que le type de rayonnement solaire appliqué, la température de fonctionnement de la cellule, la résistance série et parallèle, etc. Lorsque nous déplaçons le bouton de « Dark » à « Light », nous avons fourni la condition la plus importante pour que la cellule solaire commence à fonctionner.

2. Sélection des caractéristiques à simuler :

On peut choisir une ou plusieurs caractéristiques à simuler : J-V, C-V, C-f et QE (λ). On peut également définir les valeurs initiales et finales de l'intervalle, ainsi que le nombre de répétitions à effectuer.

3. Définition du problème :

Pour définir le problème dont la géométrie, les matériaux et toutes les propriétés de la cellule solaire, on doit cliquer sur le bouton « Set problem » sur le panneau d'action, une nouvelle fenêtre s'ouvre qui est :

- **La fenêtre de conception du dispositif et la définition du problème :**

Cette fenêtre est très importante dans ce logiciel puisqu'elle nous permet de configurer la structure de la cellule à étudier.

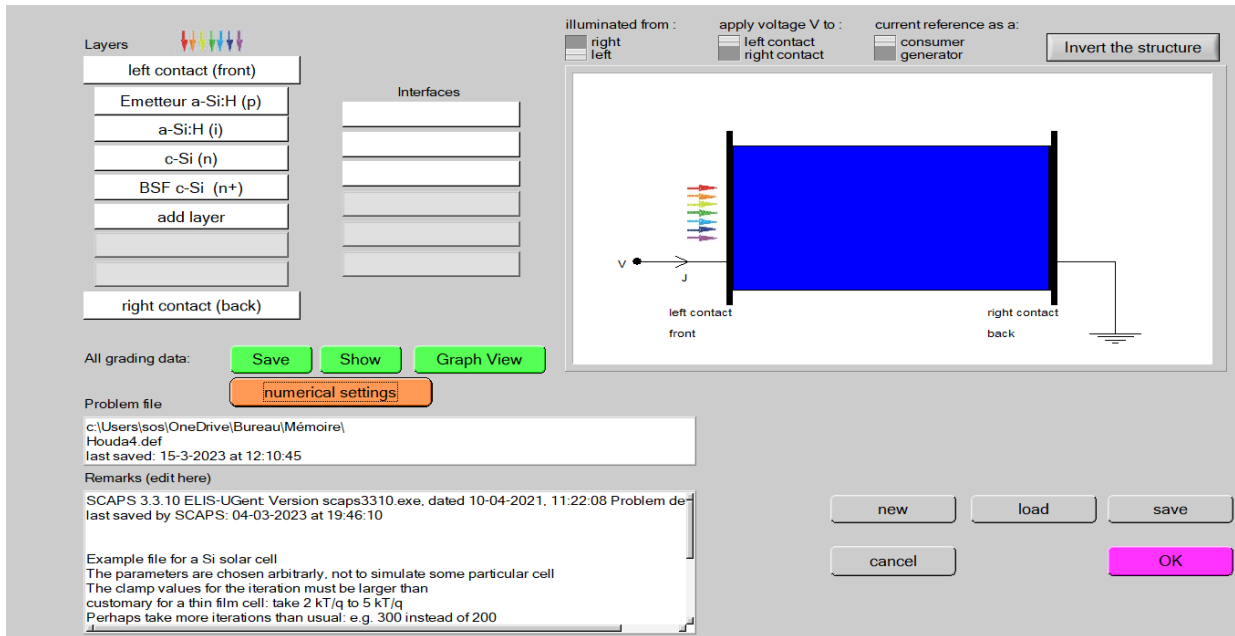


Figure II-9 : Fenêtre principale pour définir le dispositif.

Depuis cette fenêtre, nous pouvons ouvrir le fichier « def » en utilisant le bouton « load » pour charger la structure de la cellule lorsqu'elle a déjà été enregistrée.

Lorsque nous cliquons sur le bouton avec le nom de la couche, la fenêtre illustrée à la figure 10 apparaît à l'écran.

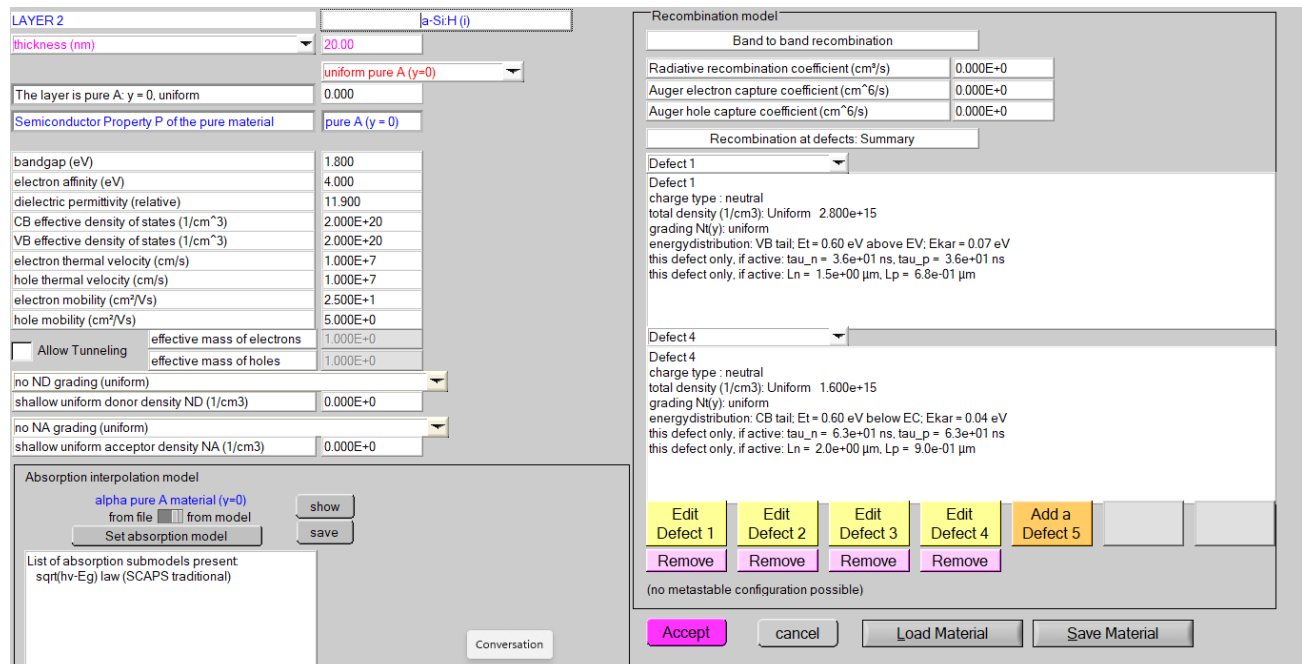


Figure II-10: La fenêtre de caractérisation des couches.

Cette fenêtre permet de modifier les valeurs des paramètres et les valeurs des défauts de la couche sélectionnée.

4. Commencer les calculs :

Après avoir vérifié toutes les données relatives à la cellule étudiée, nous appuyons sur le bouton «Calculate : single shot », la fenêtre illustrée à la figure 11 s'ouvre, et cette fenêtre nous informe des changements et des modifications qui se produisent à l'intérieur de la cellule après exposition à la lumière. Le bouton « show data » ouvre une fenêtre avec des informations importantes telles que les distributions de champ électrique, le diagramme de bande d'énergie, les profils de génération-recombinaison, les populations de porteurs libres et piégés, et les densités des porteurs individuels en fonction de la position dans le dispositif.

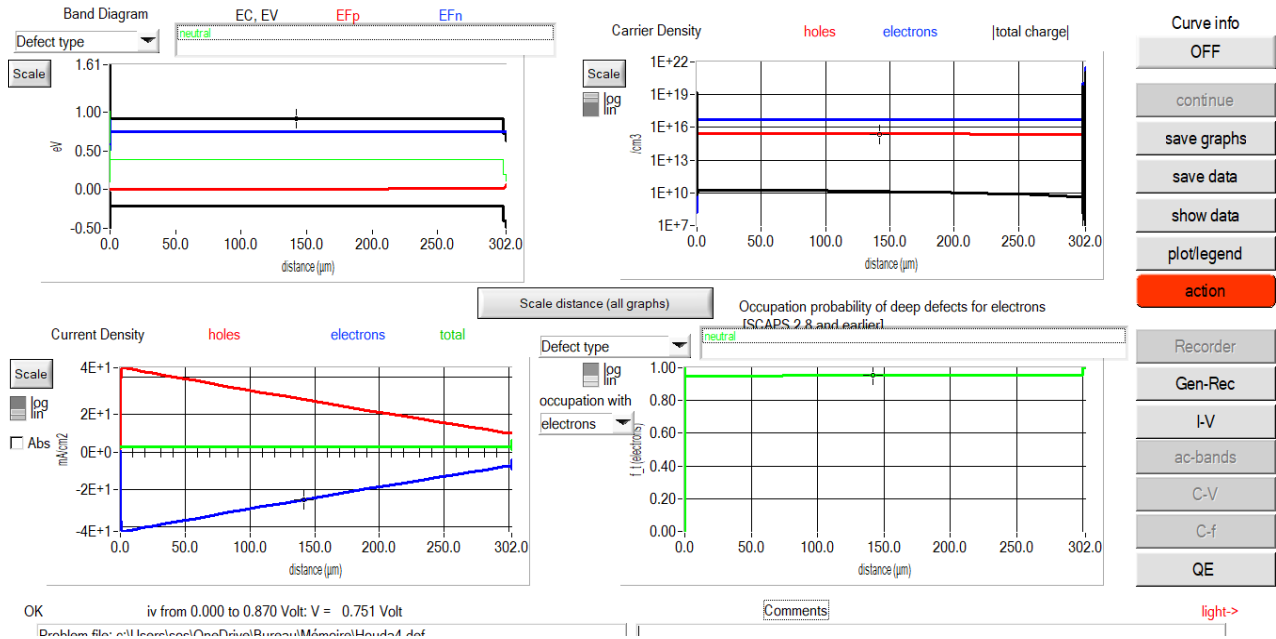


Figure II-11: Fenêtre d'évolution des calculs.

5. Afficher la courbe de simulation :

Le but du logiciel SCAPS-1D est d'évaluer les performances des cellules solaires, puisqu'il nous indique les valeurs des paramètres PV illustrés à la Figure 12, tels que la tension de circuit ouvert V_{oc} , la densité de courant de court-circuit J_{sc} , facteur de forme **FF** et le rendement η .

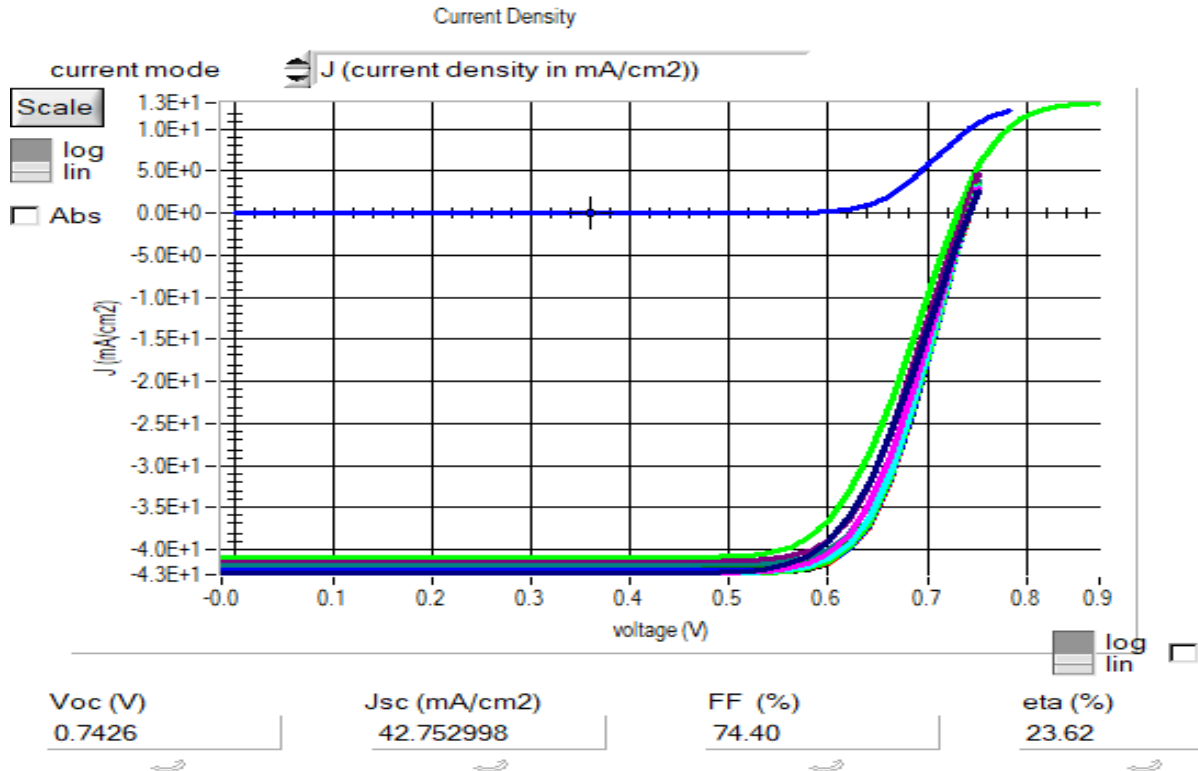


Figure II-12: Caractéristique J-V affichée par le logiciel SCAPS-1D.

Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes notions relatives à la cellule photovoltaïque ; sa caractéristique I-V, ses circuits électriques équivalents et ses principales grandeurs caractéristiques. Parmi ces grandeurs, le rendement photovoltaïque est le paramètre le plus important pour l'industrie des cellules solaires du fait qu'il englobe la tension de circuit ouvert (V_{co}), le courant de court-circuit (I_{cc}) et le facteur de forme (FF). C'est aussi le paramètre utilisé pour comparer les performances des cellules solaires.

Nous avons également présenté les logiciels de simulation disponibles pouvant être utilisés. Nous avons détaillé le logiciel SCAPS-1D que nous utiliserons pour effectuer la simulation d'une cellule HIT de type N, afin d'étudier l'effet de la couche de passivation de la cellule sur les paramètres PV (J_{sc} , V_{oc} , FF, η). Les résultats seront donnés et interprétés dans le chapitre suivant.

Chapitre III

Résultats et discussion

Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à l'optimisation numérique de la couche de passivation d'une cellule solaire à hétérojonction de silicium de type N afin d'améliorer le rendement de conversion et de comprendre comment cette couche influe sur la performance de la cellule. Pour cela, nous allons étudier l'effet de l'épaisseur et du type de matériau utilisé pour l'élaboration de la couche de passivation sur les paramètres photovoltaïques (J_{cc} , V_{co} , FF, η) de la cellule étudiée. Pour réaliser nos simulations, nous allons utiliser le logiciel SCAPS-1D. Dans un premier lieu, nous présenterons la structure de la cellule étudiée ainsi que les paramètres utilisés dans la simulation. Nous détaillerons par la suite les défauts qui existent dans le silicium amorphe et leur modélisation dans le logiciel utilisé. Enfin, nous interpréterons les résultats obtenus pour comprendre les phénomènes physiques engendrés dans la cellule lors de l'optimisation de la couche de passivation.

Présentation de la cellule étudiée :

La figure 1 représente la structure d'une cellule solaire HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin Layer) de type N.

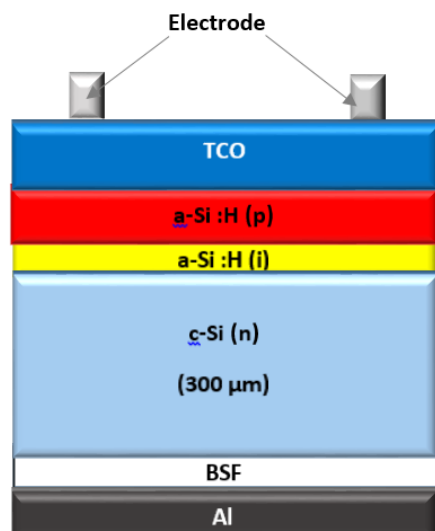


Figure III-1: Cellule solaire HIT (TCO/p-a-Si :H/i-a-Si :H/n-c-Si/BSF/Al).

Cette structure est constituée d'une couche de silicium cristallin dopé N, formant la couche active, d'une épaisseur de 300 μm , sur laquelle est déposée une couche de silicium amorphe hydrogéné de type P (P-a-Si : H) qui joue le rôle de l'émetteur, afin de créer une jonction PN.

Entre les deux couches citées précédemment, se trouve une couche de silicium amorphe hydrogéné intrinsèque (i-a-Si :H) pour passiver les défauts existants à l'interface (p-a-Si : H/n-c-Si).

Sur la face arrière de la cellule se trouve le Back Surface Field (BSF) qui est une couche de silicium cristallin fortement dopé N pour créer un champ électrique arrière.

Au-dessus de l'émetteur, un oxyde transparent conducteur est déposé sur la face avant (face éclairée) de la cellule. Nous avons utilisé l'ITO (Indium Tin Oxide) qui a un travail de sortie de 5.2 eV. Il permet d'établir le contact entre le silicium amorphe dopé et les contacts métalliques. Ces derniers permettent de capter le courant photo généré.

Les paramètres de chaque couche sont résumés dans le tableau 1.

Tableau III-1: Paramètres des différentes couches de la cellule HIT étudiée. [42]

	p-a Si: H	i-a-Si :H	n-c-Si	BSF
Epaisseur W	8 nm	Variable	300 μm	2 μm
Energie de gap E_g (eV)	1,7	1,8	1,12	1,12
Densité de dopage des donneurs N_D (cm^{-3})	0	0	$5 \cdot 10^{16}$	$1 \cdot 10^{20}$
Densité de dopage des accepteurs N_A (cm^{-3})	$1.4 \cdot 10^{19}$	0	0	0
Affinité électronique χ (eV)	4	4	4,22	4,22
Permittivité relative ϵ	11.9	11.9	11.9	11.9
Densité de défauts Uniforme N_t (cm^{-3})	/	/	$3 \cdot 10^{10}$	$1 \cdot 10^{11}$
Vitesse thermique V_{th} (cm/s)	10^7	10^7	10^7	10^7

Mobilité des électrons μ_n (cm^2/Vs)	25	25	1450	1450
Mobilité des trous μ_p (cm^2/Vs)	5	5	450	450
Densité d'états effective dans la BC N_C (cm^{-3})	2.10^{20}	2.10^{20}	$2.8 \cdot 10^{19}$	$2.8 \cdot 10^{19}$
Densité d'états effective dans la BV N_V (cm^{-3})	2.10^{20}	2.10^{20}	$1.04 \cdot 10^{19}$	$1.04 \cdot 10^{19}$

Modélisation des défauts dans le silicium amorphe :

Dans le silicium amorphe, il existe des états localisés dans le gap. Ces états proviennent de la distorsion du réseau cristallin (représentés par des queues de bande sous forme de courbes exponentielles, appelées aussi « queues d'Urbach ») et proviennent aussi des liaisons pendantes (représentées par des Gaussiennes). La structure de bande du silicium amorphe est représentée sur la figure 2.

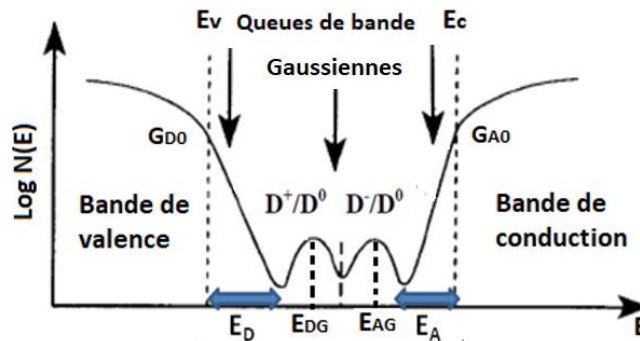


Figure III-2: Diagramme de bande du silicium amorphe hydrogéné.

Distribution dans les queues de bandes :

Les queues de bande des états donneurs sont modélisées par l'équation :

$$g_{DT}(E) = G_{D0} e^{-\frac{E}{E_D}} \quad [3.1]$$

Les queues de bande des états accepteurs sont modélisées par l'équation :

$$g_{AT}(E') = G_{A0} e^{-\frac{E'}{E_A}} \quad [3.2]$$

Avec :

- E est mesurée à partir de E_v ;
- E' est mesurée à partir de E_c ;
- G_{D0}, G_{A0} : les pré-facteurs des queues de bande des états donneurs et des états accepteurs respectivement.
- g : représente la densité d'états (D.O.S. ($cm^{-3}eV^{-1}$)).
- E_D et E_A : représentent les énergies caractéristiques des queues de bande de la bande de valence et de conduction, respectivement.

Distribution au milieu du gap :

La distribution des défauts au milieu du gap peut être modélisée de 2 façons : Le modèle en U et le modèle en gaussienne que nous avons utilisé dans nos simulations.

Le modèle en U (U-shaped model) :

Dans ce modèle, la densité d'états dans le gap est une valeur constante égale à G_{mg} (Figure3).

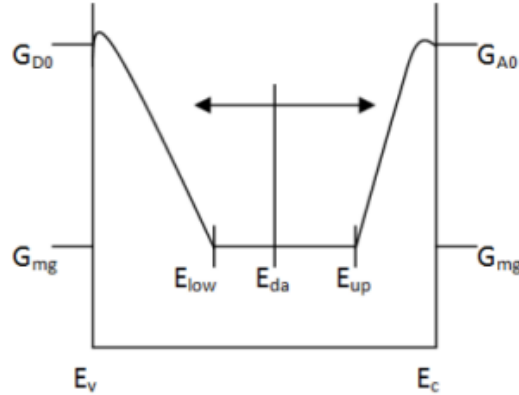


Figure III-3: Le modèle en U. [21]

E_{up} et E_{low} sont mesurées positivement à partir de E_c et E_v respectivement et sont modélisées par les équations suivantes :

$$E_{up} = E_A \ln \left(\frac{G_{A0}}{G_{mg}} \right) \quad [3.3]$$

$$E_{low} = E_D \ln \left(\frac{G_{D0}}{G_{mg}} \right) \quad [3.4]$$

Le modèle en gaussiennes :

La distribution de la densité d'états dans le gap est modélisée en utilisant deux gaussiennes. La première Gaussienne se compose d'états donneurs ($D^{+/0}$) de densité d'états N_{DG} (cm^{-3}). La deuxième Gaussienne ($D^{-/0}$) se compose d'états accepteurs de densité d'états N_{AG} (cm^{-3}). Les expressions des densités d'états sont données dans les deux cas par les équations ci-dessous :

$$g_{AG}(E'') = \left(\frac{N_{AG}}{\sqrt{2\pi}\sigma_{AG}} \right) e^{-\frac{(E'' - E_{AG})^2}{2\sigma_{AG}^2}} \quad [3.5]$$

$$g_{DG}(E''') = \left(\frac{N_{DG}}{\sqrt{2\pi}\sigma_{DG}} \right) e^{-\frac{(E''' - E_{DG})^2}{2\sigma_{DG}^2}} \quad [3.6]$$

Où :

- E_{AG} et E_{DG} : représentent les positions en eV des pics des deux Gaussiennes. E_{AG} est mesurée à partir de la bande de conduction et E_{DG} est mesurée à partir de la bande de valence.
- σ_{AG} et σ_{DG} : représentent l'écart type des deux gaussiennes.
- Les énergies E'' et E''' sont mesurées respectivement à partir des pics E_{AG} et E_{DG} .

Les paramètres des queues de bandes et des gaussiennes que nous avons utilisés dans nos simulations sont résumés dans le tableau 2.

Tableau III-2: Paramètres des défauts de la couche de passivation et l'émetteur.

	$E_A \setminus E_D$ (eV) [42]	N_t Total (cm^{-3}) [21]	N_t peak ($cm^{-3} eV^{-1}$)
Defect 1 (VB Tail) , g_{DT}	$E_D = 0.05$	$2.8 * 10^{15}$	$5.6 * 10^{16}$
Defect 2 (Gaussian) , g_{DG}	$E_D = 0.1$	$9 * 10^{15}$	$5.078 * 10^{16}$

p-a-Si :H	Defect 3 (Gaussian) , g_{AG}	$E_A = 0.1$	$9 * 10^{15}$	$5.078 * 10^{16}$
	Defect 4 (CB Tail) , g_{AT}	$E_A = 0.03$	$1.6 * 10^{15}$	$5.33 * 10^{16}$
i-a-Si :H	Defect 1 (VB Tail) , g_{DT}	$E_D = 0.07$	$2 * 10^{15}$	$2.857 * 10^{16}$
	Defect 2 (Gaussian) , g_{DG}	$E_D = 0.1$	$9 * 10^{15}$	$5.078 * 10^{16}$
	Defect 3 (Gaussian) , g_{AG}	$E_A = 0.1$	$9 * 10^{15}$	$5.078 * 10^{16}$
	Defect 4 (CB Tail) , g_{AT}	$E_A = 0.04$	$1.2 * 10^{15}$	$3 * 10^{16}$

Résultats et discussions :

Effet de l'épaisseur de la couche intrinsèque sur la performance de la cellule :

Nous avons fait varier l'épaisseur de la couche intrinsèque a-Si : H de 1,5 à 20 nm [43]. Le tableau 3 montre les effets de cette variation sur les paramètres de performance de la cellule qui sont : la tension de circuit-ouvert V_{oc} , la densité de courant de court-circuit J_{sc} , le facteur de forme **FF** et le rendement η .

Tableau III-3: Paramètres PV pour différentes épaisseurs de la couche intrinsèque i-a-Si : H.

Epaisseur de la couche intrinsèque a-Si : H (nm)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
1.5	0,742	42.95	78.39	24.99
2	0,742	42.94	78.37	24.98
3	0,742	42.91	78.34	24.95

5	0,742	42.87	78.23	24.89
10	0,742	42.81	77.7	24.68
15	0,742	42.77	76.63	24.33
20	0.742	42.75	74.4	23.62

Nous avons tracé les résultats du tableau 3 sur la figure 4, pour voir plus clairement l'évolution des paramètres PV en fonction de l'épaisseur de la couche intrinsèque.

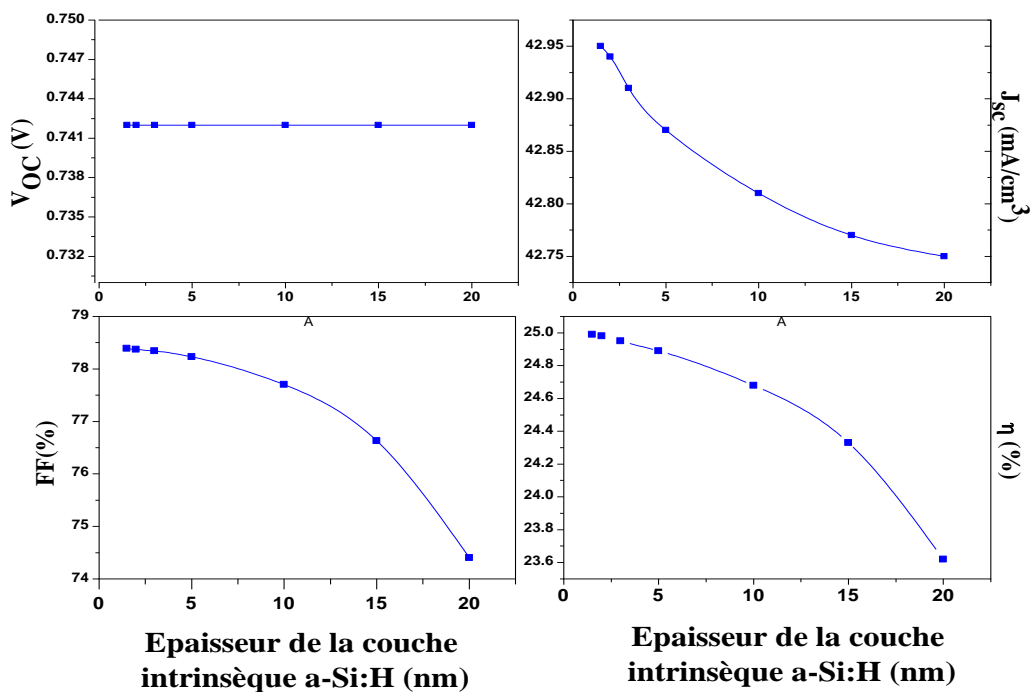


Figure III-4: Variation des paramètres photovoltaïques en fonction de l'épaisseur de l'a-Si:H intrinsèque.

Interprétation des résultats :

Nous remarquons que la densité de courant de court-circuit, le facteur de forme et le rendement de la cellule diminuent avec l'augmentation de l'épaisseur et que le V_{oc} n'est pas affecté par cette variation de l'épaisseur.

Pour interpréter ces résultats nous avons tracé le taux de recombinaison en fonction de la position dans la cellule pour deux valeurs de l'épaisseur (figure 5). Nous observons une augmentation du taux de recombinaison lorsque l'épaisseur augmente. Cette augmentation est dû

au fait que lorsque l'épaisseur de la couche a-Si :H augmente les trous photo-générés dans la couche absorbante (n-c-Si) doivent parcourir des distances plus grandes que leur longueur de diffusion, et se recombineront plus facilement.

Nous avons également tracé sur la figure 6 le diagramme de bandes d'énergie pour deux valeurs de l'épaisseur en fonction de la position dans la cellule. Nous remarquons une petite augmentation de la barrière au niveau de la bande de valence qui va empêcher le transport des trous photo-générés de la couche du silicium cristallin n-c-Si vers la couche p-a-Si : H. Cette augmentation contribue à l'augmentation de la recombinaison des trous et donc à la diminution des paramètres PV (J_{SC} , FF, et η).

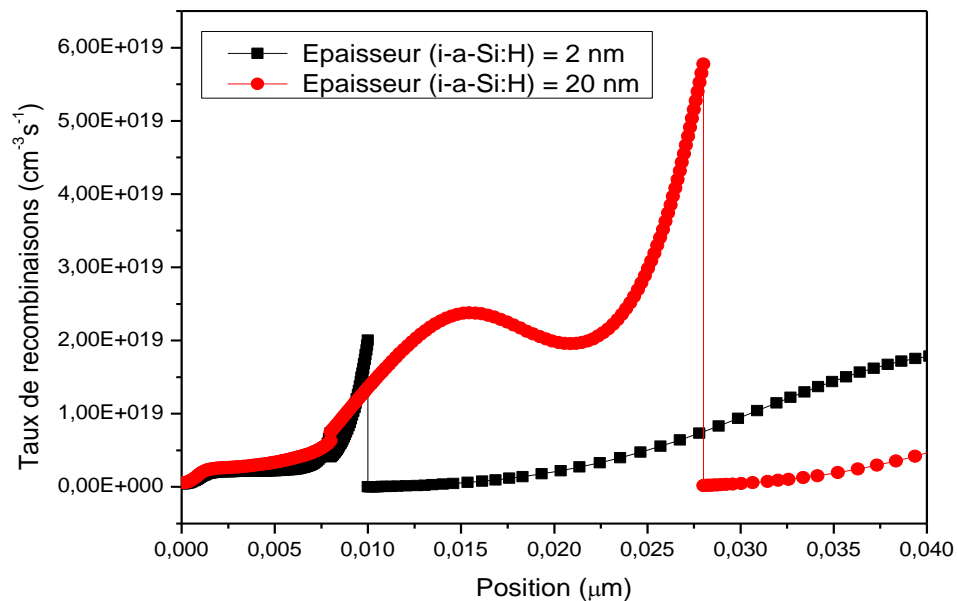


Figure III-5: Influence de l'épaisseur de la couche intrinsèque a-Si :H sur le taux de recombinaison dans la cellule.

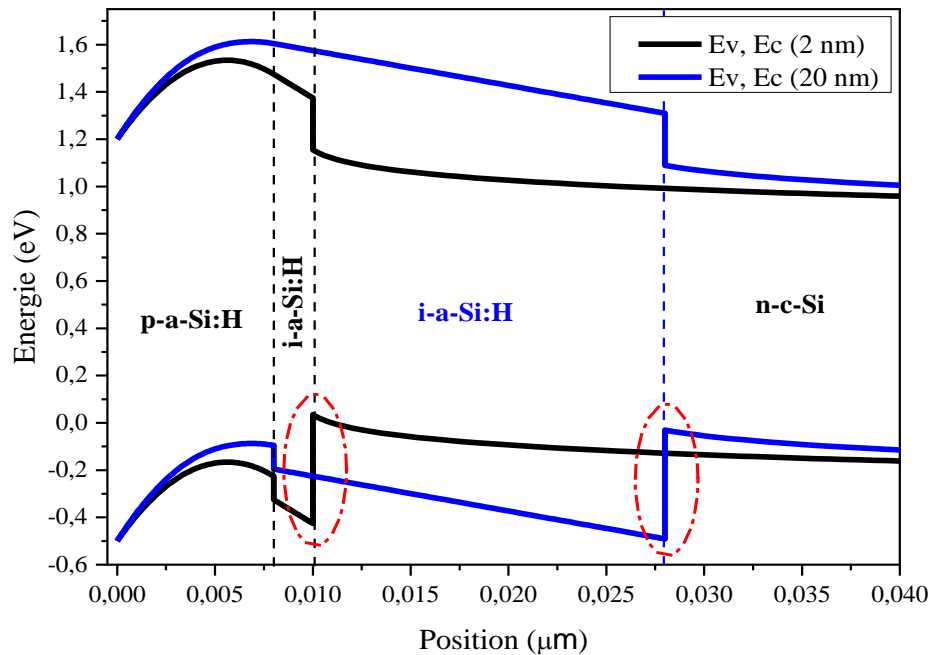


Figure III-6: Diagramme de bandes d'énergie en fonction de la position dans la cellule.

Nous avons également tracé le champ électrique au niveau de la jonction PN pour deux valeurs de l'épaisseur (Figure 7). Nous remarquons que le champ électrique est plus élevé pour une épaisseur de 2 nm, ce qui améliore la séparation et la collecte des porteurs photo-générés. Cela justifie également le faible taux de recombinaison et l'amélioration du rendement quantique (Figure 8) pour les longueurs d'ondes supérieures à 700 nm et pour de faibles épaisseurs de la couche i-a-Si : H.

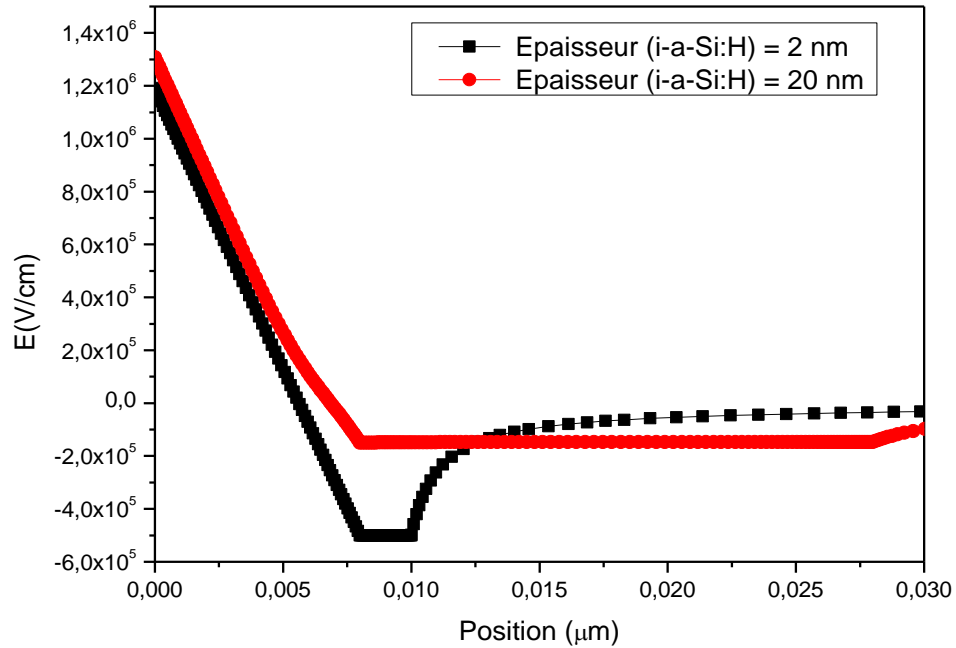


Figure III-7: Influence de l'épaisseur de la couche intrinsèque *a-Si:H* sur le champ électrique au niveau de la jonction PN dans la cellule.

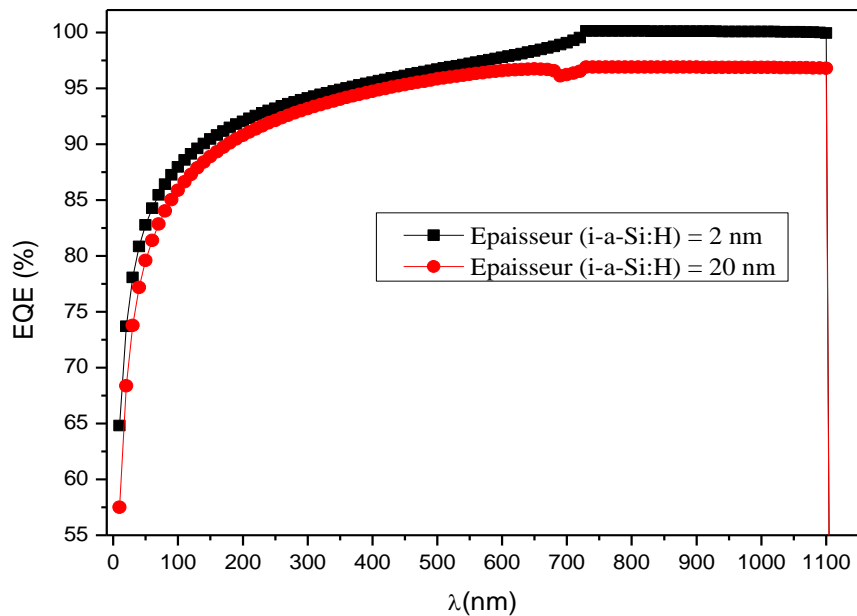


Figure III-8: Le rendement quantique externe pour deux épaisseurs de la couche *a-Si:H*.

Étude de l'utilisation de différents matériaux comme couche de passivation sur la performance de la cellule :

Nous avons changé les matériaux de la couche de passivation en utilisant l'épaisseur optimale de 2 nm, en choisissant du silicium microcristallin hydrogéné (i- μ c-Si :H), du silicium amorphe faiblement hydrogéné (i-a-Si :H), du silicium amorphe précédemment utilisé (i-a-Si :H) et du silicium polymorphe (i-pm-Si : H). Les paramètres utilisés dans la simulation pour ces 4 matériaux sont résumés dans le Tableau 4.

Tableau III-4 : Paramètres des différents matériaux utilisés comme couche de passivation.

	i- μ c-Si :H [44]	i-a-Si: H faiblement hydrogéné [45]	i-a-Si: H [46]	i-pm-Si :H [44]
Energie de gap E_g (eV)	1.4	1,6	1,8	1.96
Affinité électronique χ (eV)	4	4	4	3.95
Permittivité relative ϵ	11.9	11.9	11.9	11.9
Densité de défauts Uniforme N_t (cm⁻³)	/	/	/	/
Vitesse thermique V_{th} (cm/s)	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁷
Mobilité des électrons μ_n (cm²/Vs)	32	25	25	20
Mobilité des trous μ_p (cm²/Vs)	8	5	5	12
Densité d'états effective dans la BC N_C (cm⁻³)	2.10 ²⁰	2.10 ²⁰	2.10 ²⁰	2.10 ²⁰
Densité d'états effective dans la BV N_V (cm⁻³)	2.10 ²⁰	2.10 ²⁰	2.10 ²⁰	2.10 ²⁰

Le tableau 5 résume les paramètres de sortie de la cellule obtenus pour chaque matériau utilisé.

Tableau III-5: Paramètres PV pour différents matériaux de de la couche de passivation.

Matériaux	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/m ²)	FF (%)	η (%)
i- μ c-Si :H (1.4 eV)	0,742	43.016	78.58	25.08
i-a-Si :H faiblement hydrogéné (1.6 eV)	0,742	42.93	78.59	25.04
i-a-Si :H (1.8 eV)	0,742	42.94	78.37	24.98
i-pm-Si :H (1.96 eV)	0,742	43.13	41.57	13.31

Nous avons tracé sur la figure 9 les caractéristiques J(V) de la cellule pour les différents matériaux utilisés pour la couche de passivation.

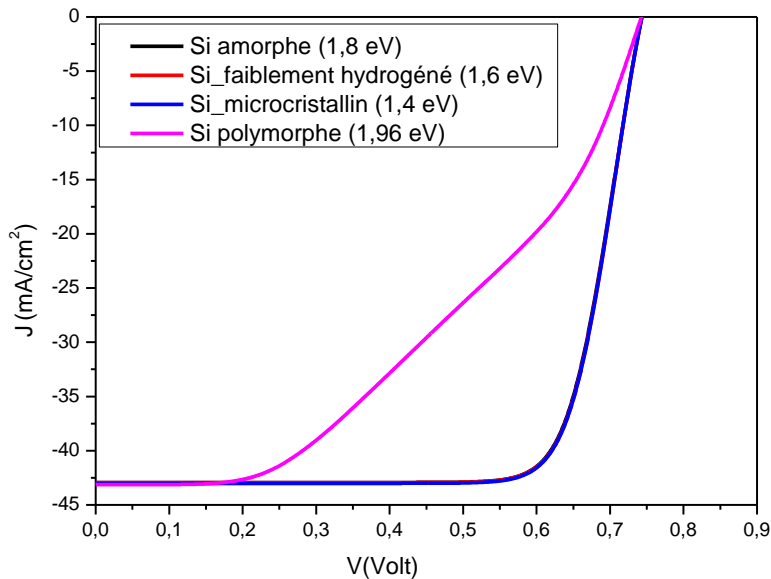


Figure III-9 : Les caractéristiques J(V) pour différents matériaux de la couche de passivation.

Nous remarquons que pour les valeurs de gap 1.4 eV, 1.6 eV et 1.8 eV, les courbes sont superposées. Lorsque l'énergie de gap du matériau de la couche de passivation augmente, la performance de la cellule diminue. Le rendement de conversion passe de 25.08% pour un matériau avec un gap de 1.4 eV à 13.31% pour un matériau avec un gap de 1.96 eV. Pour comprendre pourquoi, nous avons tracé sur la figure 10 le diagramme de bande d'énergie pour les quatre matériaux utilisés.

Nous remarquons clairement que lorsque la largeur de la bande interdite augmente, une barrière importante est créée au niveau de la bande de valence (interface couche de passivation / n-c-Si) ce qui gêne le transport des porteurs majoritaires photo-générés (trous) et contribue à la diminution de collecte des paires. Cela implique la diminution du rendement quantique représenté sur la figure 11, surtout pour le silicium polymorphe qui a le plus grand gap.

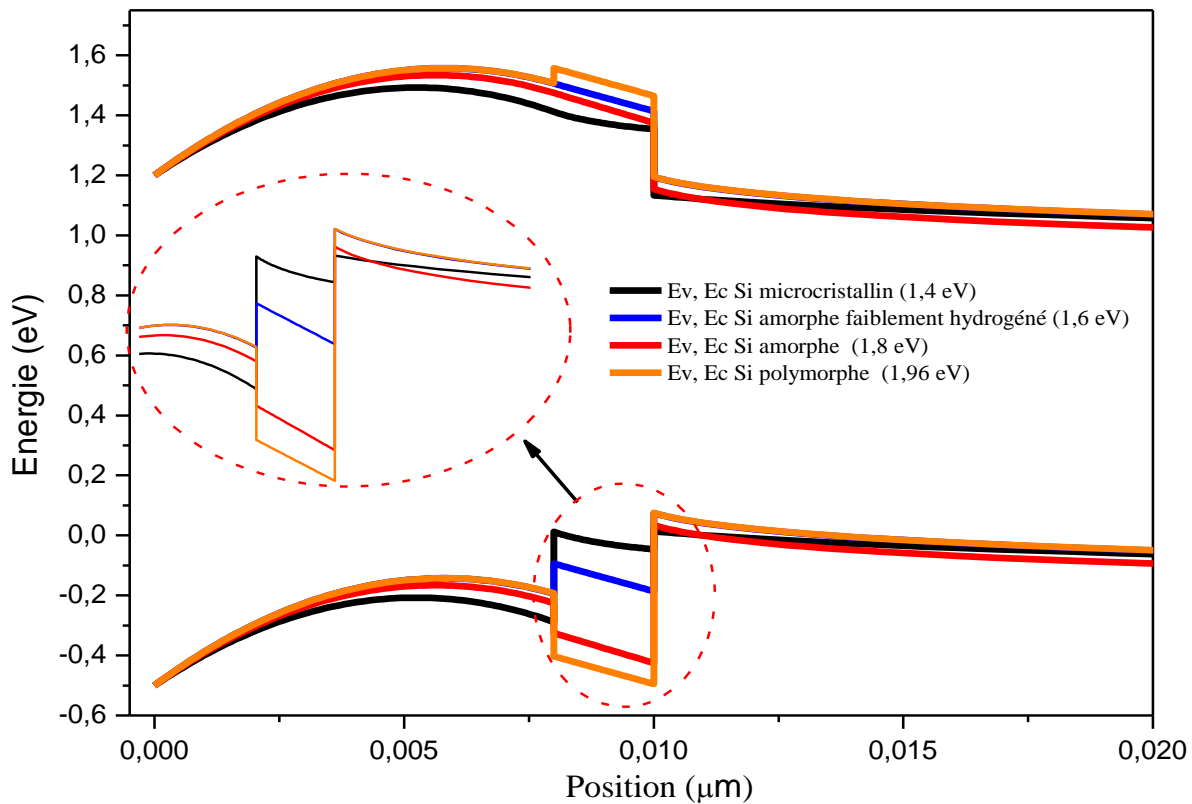


Figure III-10: Diagramme de bandes d'énergie en fonction de la position dans la cellule pour quatre matériaux différents utilisés comme couche de passivation.

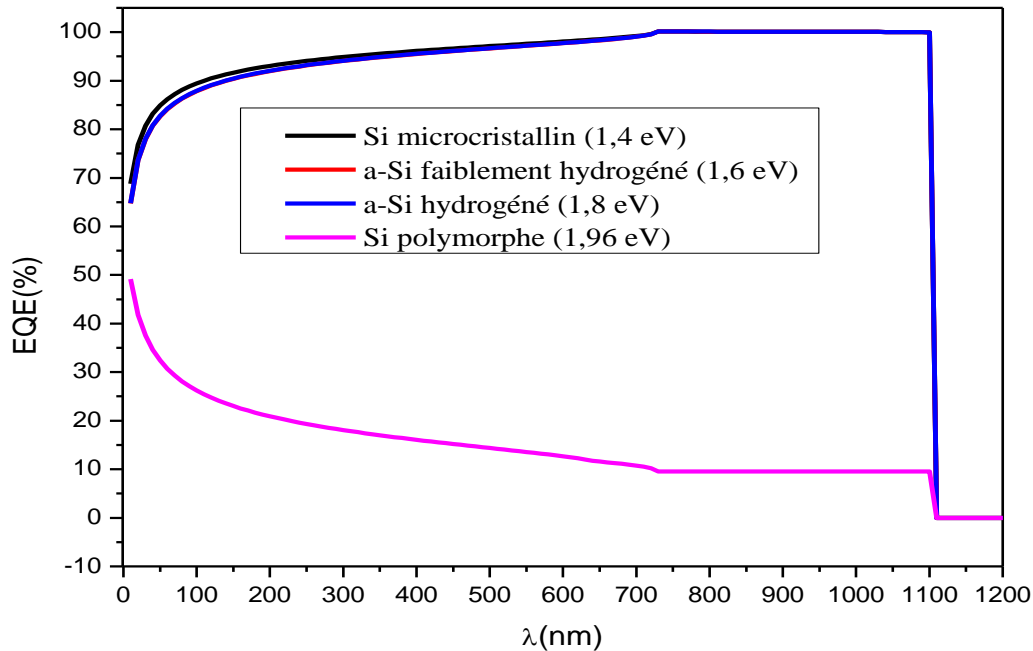


Figure III-11 : Le rendement quantique externe de la cellule pour les différentes couches de passivation.

Donc, d'après les résultats obtenus, nous pouvons conclure que les matériaux qui donnent des meilleures performances sont : le silicium amorphe faiblement hydrogéné (1.6 eV) et le silicium microcristallin (1.4 eV) car leur énergie de gap est inférieure à celle de l'émetteur.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de simulations que nous avons obtenus, dans le but d'optimiser la couche de passivation d'une cellule solaire HIT de type N, qui est à base de silicium amorphe intrinsèque. Le rôle de cette couche est de passiver les défauts à l'interface (p-a-Si :H/n-c-Si). Nous avons conclu que l'épaisseur de cette couche (i-a-Si :H) doit être très mince (de l'ordre de 2 nm), car dans ce cas un champ électrique important a été observé, ce qui a donné une meilleure séparation des porteurs de charge et donc une meilleure collecte. Nous avons également trouvé que les matériaux qui donnent les meilleures performances sont : le silicium amorphe faiblement hydrogéné (1.6 eV) et le silicium microcristallin (1.4 eV). Avec des gaps plus élevés une barrière importante est créée au niveau de la bande de valence (A l'interface couche de passivation / n-c-Si). Cette barrière est bien entendu nuisible à la collecte des trous par le contact avant de la cellule.

Conclusion générale

L'utilisation des énergies renouvelables, et particulièrement l'énergie solaire, a connu un grand développement ces dernières années. L'élément de base de cette énergie est la cellule photovoltaïque qui a été l'objet de nombreux travaux de recherche.

Ce travail de mémoire a pour objectif d'optimiser numériquement la couche de passivation d'une cellule solaire à base d'hétérojonction de silicium de type N dans le but d'améliorer le rendement de conversion.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les bases essentielles pour comprendre le fonctionnement physique d'une cellule photovoltaïque. Nous avons d'abord évoqué quelques notions sur le rayonnement solaire. Ensuite, nous avons expliqué le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques. Nous avons également présenté les différentes filières de la technologie photovoltaïque ainsi que les principales caractéristiques des cellules solaires à hétérojonction silicium.

Dans le deuxième chapitre nous avons introduit les différents concepts liés à la cellule photovoltaïque ; La caractéristique I-V et ses circuits électriques équivalents et ses principales grandeurs caractéristiques. Parmi ces grandeurs, le rendement de conversion est le facteur le plus important dans l'industrie des cellules solaires car il comprend la tension en circuit ouvert (V_{co}), le courant de court-circuit (I_{cc}) et le facteur de forme (FF). C'est aussi le paramètre utilisé pour comparer les performances des cellules solaires. Nous avons également découvert les logiciels de simulation disponibles qui peuvent être utilisés et nous avons détaillé le logiciel SCAPS-1D que nous utiliserons pour effectuer des simulations de cellules HIT de type N, afin d'étudier l'influence des paramètres de la couche de passivation sur les paramètres PV de la cellule.

Les résultats de simulations que nous avons obtenus ont été présentés dans le troisième chapitre. Ils peuvent être résumés dans les points suivants :

L'épaisseur de la couche intrinsèque (i-a-Si : H) doit être très fine, car dans ce cas il y a un fort champ électrique, ce qui donne une meilleure séparation des porteurs de charge et donc de meilleures performances. Nous avons également trouvé que les matériaux qui donnent des meilleures performances sont : le silicium amorphe faiblement hydrogéné (1.6 eV) et le silicium microcristallin (1.4 eV) car leur énergie de gap est inférieure à celle de l'émetteur. Nous avons pu conclure que lorsque la largeur de la bande interdite augmente, une barrière importante est créée au niveau de la bande de valence (Interface couche de passivation / n-c-Si). Cette barrière est bien entendu nuisible à la collecte des trous par le contact avant de la cellule.

Dans le cadre de l'amélioration de ce travail, il serait intéressant de réaliser et de caractériser cette cellule expérimentalement.

Aujourd'hui les études tendent à remplacer la couche d'oxyde transparent conducteur (ITO) par du ZnO qui est moins cher. Il est préférable de bien choisir le travail de sortie de cette couche pour avoir les meilleures performances.

La passivation des défauts à l'interface c-Si/a-Si : H reste un sujet riche d'un point de vue scientifique, car les phénomènes physiques qui se produisent sont complexes.

Références

- [1] H.Mansour, « Simulation numérique d'une cellule solaire à hétérojonction HIT en silicium par le logiciel TCAD-SILVACO », mémoire de Master, Biskra, 2013.
- [2] C.Fabienne, « Les énergies renouvelables, » Courrier hebdomadaire du CRISP, Vols. 1 sur 22252-2253, n° 17, pp. 5-72, 2015.
- [3] Y.Sayad, «Détermination de la longueur de diffusion des porteurs de charge minoritaires dans le silicium cristallin par interaction lumière matière,» Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2019.
- [4] A.Joffre, «SANYO lance le module photovoltaïque le plus performant au monde» 05 12 2010. [En ligne]. Available: https://tecsol.blogs.com/mon_weblog/2010/12/sanyo-lance-le-module-photovolta%C3%AFque-le-plus-performant-au-monde.html. [Accès le 20 05 2023].
- [5] «photovoltaic research» [En ligne]. Available: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>. [Accès le 08 02 2023].
- [6] «Le soleil» [En ligne]. Available: <https://www.fbls.net/soleilindex.htm>. [Accès le 12 Février 2023].
- [7] D. Sera, R. Teodorescu, P. Rodriguez, « PV panel model based on datasheet values », 2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vigo, Spain, 2007, pp. 2392-2396, doi: 10.1109/ISIE.2007.4374981.
- [8] Y. A.Soukeur, « Etude du rayonnement solaire global (Willaya de Biskra) pour la gestion de la production d'énergie photovoltaïque », Mémoire de Master, Université de Mohamed Khider–Biskra, 2019.
- [9] A. Oudrane, B. Aour, B. Zeghmati, X. Chesneau, H. Messaoud. « Étude Fondamentale Du Gisement Solaire Pour Une Maison Désertique Située à Adrar, » Journal Al-Wahat pour la recherche et les études, vol. 10, pp. 136-149, 01 2017.
- [10] T.Dugnolle, «Dualité onde-corpuscule», [En ligne]. Available: https://wikimonde.com/article/Dualit%C3%A9_onde-corpuscule. [Accès le 12 Février 2023].

- [11] J.P. Joly, «L'énergie solaire», 26 3 2018. [En ligne]. Available: <https://www.encyclopedie-energie.org/energie-solaire-les-bases-theoriques-pour-la-comprendre/>. [Accès le 14 Février 2023].
- [12] S. C.B.Honsberg, «Air Mass», 2019. [En ligne]. Available: www.pveducation.org. [Accès le 15 Février 2023].
- [13] F.Slama, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique »,Thèse de Doctorat, Université de Sétif, 2018.
- [14] O.Saket, « Caractérisation électrique de nanofils de semi-conducteurs III-V pour des applications photovoltaïques »,Thèse de Doctorat, Université Paris-Saclay, 2020.
- [15] S. Belaid Lalouni, « Energie Solaire Photovoltaïque ». Cours, Université A. MIRA de BEJAIA, 2015.
- [16] L.Schlur, « Elaboration de cellules photovoltaïques hybrides solides à base d'oxyde de zinc nanostructuré »,Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg, 2012.
- [17] H. Melhem, « Nouvelles électrodes poreuses de TiO₂ à base des nanocristaux synthétisés par pyrolyse laser pour cellules solaires sensibilisées à colorant à l'état solide »,Thèse de Doctorat, Université de Limoge, 2011.
- [18] <https://www.alamyimages.fr/photos-images/bell-laboratories.html?sortBy=relevant>, [Accès le 19 02 2023].
- [19] Le Photovoltaïque "Fonctionnement Et Technologies", Bruxelles, 2010, pp. 3-6.
- [20] M.Boudjema, « Etude et identification des défauts de matériaux utilisés dans les systèmes photovoltaïques », Thèse de Doctorat, 2016.
- [21] D. Rached, « Etude et modélisation d'une cellule HIT à base de silicium polymorphe », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Boudiaf des sciences et de la technologie, 2010.
- [22] S. Guarnay, « Étude des mécanismes de dégradation de la mobilité sur les architectures FDSOI pour les nœuds technologiques avancés (< 20 nm) »,Thèse de Doctorat, Université Paris Sud, 2015.
- [23] J.-F. Lelievre, « Elaboration de SiN_x: H par PECVD: optimisation des propriétés optiques, passivantes et structurales pour applications photovoltaïques,» Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2007.
- [24] R. Ahmed-Yassine, « Propriétés Optiques et Électriques du Silicium Amorphe Hydrogéné »,Thèse de Doctorat, Université Mohamed BOUDIAF de M'Sila, 2017.

- [25] M.Salmi, « Le gisement solaire », Polycopie de cours, M'sila, 2015.
- [26] S.De-Vecchi, « Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonction de silicium et contacts interdigités en face arrière »,Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, 2013.
- [27] M.Rahmouni, « Etude des cellules photovoltaïques 'HIT' en vue d'améliorer leur rendement », Thèse de Doctorat, l'université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2010.
- [28] A.Arras, « Caractérisation des cellules photovoltaïques à base d'hétérojonction de silicium a-Si/c-Si »,Thèse de Doctorat, Tlemcen, 2018.
- [29] T.Desrues, « Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonctions silicium et contacts en face arrière »,Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale Matériaux de Lyon, 2009.
- [30] W.Favre, « Silicium de type n pour cellules à hétérojonctions : caractérisations et modélisations » »,Thèse de Doctorat, Paris, Université Paris Sud, 2011.
- [31] S.Abouda, Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques: application aux systèmes de pompage »,Thèse de Doctorat, co-tutelle de l'Université de Reims Champagne-Ardenne et de l'Université de Sfax, 2015.
- [32] A.Belaout, « Étude et diagnostic des défauts fréquents aux systèmes photovoltaïques (PV) par emploi de la caractéristique courant-tension »,Thèse de Magistère, 2014.
- [33] S.Koffi, «Modélisation et simulation d'un générateur photovoltaïque: Cas du module polycristallin Ecoline LX-260P installé au dispensaire de Sévagan (Togo) »» vol. 19, pp. 633-645, Décembre 2016.
- [34] A. Adaine, « Optimisation numérique de cellules solaires à très haut rendement à base d'InGaN »,Thèse de Doctorat, Université de Lorraine, 2018.
- [35] K. Helali, « Modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative, Mémoire de Magistère », Université de Mouloud Mammeri, 2012.
- [36] Y. Sayade, « Détermination de la longueur de diffusion des porteurs de charge minoritaires dans le silicium cristallin par interaction lumière matière », Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences appliquées, 2009.
- [37] S. Rebiai, « Composants optoelectroniques », Polycopié de cours, Université de Constantine.
- [38] A. Djeghbal, « Etude par simulation numérique de l'effet du Dopage et des épaisseurs », mémoire de Master, Université med khider biskra, 2012.

- [39] K. A. Rahmani, « Etude des performances d'une cellule photovoltaïque à hétérojonctions », Mémoire de Master, Université de Moulay Tahar-Saida, 2017.
- [40] D. Boughanem, « Influence des propriétés du silicium amorphe hydrogéné sur la performance d'une Cellule solaire HIT », Mémoire de Master, Université Abdelhamid Ben Badis – Mostaganem, 2018.
- [41] A. Aili, A. Benhabireche, « Etude numérique des cellules photovoltaïques à hétérojonction », mémoire de Master, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, 2016.
- [42] A. Datta, P. Chatterjee, « Modeling of Heterojunction with Intrinsic Thin Layer "HIT" Solar Cells: Sensitivity Issues and Insights Gained », 2011.
- [43] F.Azzemou, « Optimisation des performances des cellules solaires à base d'hétérojonctions de silicium », Thèse de Doctorat, Université de Mostaganem, 2022.
- [44] Z. Dahlal, F. Hamdache, D. Rached, W.L. Rahal, « Comparative Study of the Influence of $\mu\text{c-Si:H}$, a-Si:H , pm-Si:H and $\mu\text{c-SiO}_x$ as a Passivation Layer on the Performance of HIT nc-Si Solar Cells », Journal of Nano and- Electronic Physics, Vol. 13 No 6, 06002(4pp), 2021.
- [45] W. Futako, S. Takeoka, C. M. Fortmann, I. Shimizu, « Fabrication of narrow-band-gap hydrogenated amorphous silicon by chemical annealing. », Journal of applied physics, 84(3), 1333-1339, 1998.
- [46] V.A. Dao, S. Kim, Y. Lee, S. Kim, J. Park, S. Ahn, J. Yi, « High-efficiency heterojunction with intrinsic thin-layer solar cells: a review ». Current photovoltaic research, 1(2), pp.73-81., 2013.

Optimisation de la couche de passivation dans les cellules solaires à hétérojonction de silicium.

Présenté par: BOUHENNI Nour el Houda

Résumé:

Dans les cellules solaires à hétérojonction de silicium HIT (heterojunction with Intrinsic Thin layer), la réduction des liaisons pendantes présentes à l'interface absorbeur/émetteur s'effectue grâce à l'ajout d'une couche mince de silicium amorphe hydrogéné intrinsèque, appelé couche de passivation. Dans ce travail, nous avons utilisé le logiciel SCAPS-1D pour étudier l'effet de l'épaisseur de la couche de passivation sur les paramètres photovoltaïques de la cellule (Densité de courant de court-circuit, tension en circuit ouvert, facteur de forme et rendement en puissance). Nous avons par la suite analysé l'impact de plusieurs matériaux utilisés pour l'élaboration de cette couche sur la performance de la cellule. Nous avons trouvé que les matériaux qui donnent les meilleurs résultats sont le silicium amorphe faiblement hydrogéné ($E_g=1.6$ eV) et le silicium microcristallin ($E_g=1.4$ eV) grâce à leur énergie de gap adaptée. Un rendement de 25.08% a pu être atteint.

Mots-clés : Cellule solaire, paramètres photovoltaïques, HIT, silicium, passivation, SCAPS-1D.

Abstract:

In HIT (heterojunction with Intrinsic Thin layer) solar cells, the dangling bonds present at the absorber/emitter interface are reduced by adding a thin layer of intrinsic hydrogenated amorphous silicon, called passivation layer. In this work, we used the SCAPS-1D software to study the effect of the passivation layer thickness on the photovoltaic parameters of the cell (Short-circuit current density, open-circuit voltage, fill factor and power efficiency). We then analyzed the impact of several materials used for the development of this layer on the cell performance. We found that the materials which give the best results are: weakly hydrogenated amorphous silicon ($E_g=1.6$ eV) and microcrystalline silicon ($E_g=1.4$ eV) thanks to their adapted gap energy. An efficiency of 25.08% was achieved.

Keywords: Solar cell, Photovoltaic parameters, HIT, silicon, passivation, SCAPS-1D.

ملخص

في الخلايا الشمسية السليكونية غير المتجانسة مع الطبقة الرقيقة الداخلية، يتم تقليل الروابط المتدللية الموجودة في واجهة الممتص/الباعث بفضل إضافة طبقة رقيقة من السيليكون غير المتبلور المهدرج جوهرياً، تسمى التخميل. في هذا العمل، استخدمنا برنامج لدراسة تأثير سماكة طبقة التخميل على المعلمات الكهروضوئية للخلية (كثافة تيار الدائرة القصيرة، جهد الدائرة المفتوحة، عامل الشكل وكفاءة الطاقة) ثم قمنا بتحليل تأثير العديد من المواد المستخدمة لتطوير هذه الطبقة على أداء الخلية. وجدنا أن المواد التي تعطي أفضل النتائج هي السيليكون غير المتبلور المهدرج بشكل ضعيف والسيليكون الجريزوفولفين بفضل طاقة الفجوة المتكيفة. تم تحقيق عائد 25.08%.

الكلمات المفتاحية: الخلايا الشمسية، المعلمات الكهروضوئية، HIT، السيليكون، التخميل، SCAPS-1D.