



République Algérienne Démocratique et
Populaire



Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique



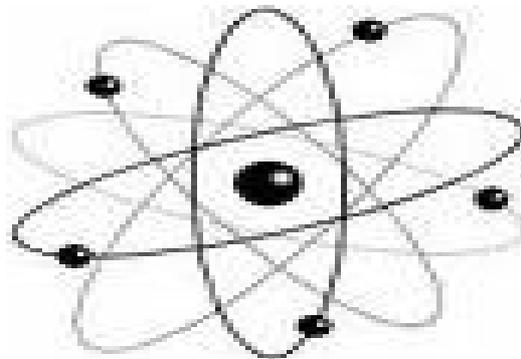
----- Université Med Khider Biskra -----

Département des Sciences de la Matière

Domaine des Sciences de la Matière

Filière de Physique

Spécialité Physique des Matériaux



Mémoire de fin d'étude en Master
Intitulé :

-Étude des caractéristiques
électriques d'une cellule solaire à
hétérojonction (CdS/CdTe) par

Presenté par:

Bouheraoua

khalfa

Devant le Jury Composé par :

<i>N.</i>	<i>M.C. «</i>	<i>Université Med</i>	<i>Présid</i>
<i>Abdess</i>	<i>B»</i>	<i>Khider- Biskra</i>	<i>ent</i>
<i>elem</i>			
<i>Am.</i>	<i>Profes</i>	<i>Université Med</i>	<i>Rappo</i>
<i>Meftah</i>	<i>seur</i>	<i>Khider- Biskra</i>	<i>rteur</i>
<i>N.Mess</i>	<i>M.A. «</i>	<i>Université Med</i>	<i>Exami</i>

Année Universitaire

2012-2013

REMERCIEMENTS

Avant tout je remercie Dieu qui m'a aidé à réaliser ce travail.

C'était pour moi une grande chance de pouvoir préparer cette thèse avec le *Laboratoire des Matériaux Semi-conducteurs et Métalliques*, que je dois le réaliser grâce à la contribution d'un grand nombre de personnes, et cela n'importe ce que je dis, je ne pourrai jamais en mesure autant elles à remercier.

*Je remercie mon encadreur Melle **Meftah Amdjad** , Professeur à l'université de Biskra, pour m'avoir suivi durant mon travail dans le cadre de ce mémoire, pour ses conseils précieux et la compétence de son encadrement.*

Il m'est aussi très agréable de remercier à **N.A.Abdesselem**, *Maître de conférences* à l'université de Biskra, qui me fait l'honneur de présider le jury de mémoire.

Mes remerciements les plus élogieux à **N.Messei**, *Maître de conférences* à l'université de Biskra, qui a bien voulu accepter de faire partie du jury et d'examiner mon travail.

Je remercier également à tous mes amis avec qui j'ai divisé tant de moments de la vie, contente et difficile, et qui m'a aidé à croiser certains essais au cours de cette période.

Sommaire

Dédicace.....
.....*i*

Remerciement.....
.....*ii*

Résumé.....
.....*iii*

Sommaire.....
.....*iv*

Chapitre I:

Conversion photovoltaïque et cellules solaires en couche mince à base CdTe.

Introduction générale.....01

II-1 : Introduction.....05

I.2. Rayonnement solaire.....05

I.2.1.Normalisation.....
..06

I.3.Historique du photovoltaïque.....07

I.4 .Notions de base sur les cellules solaires.....09

I.4.1.Concepts importants sur les semi-conducteurs.....09

I.5. La conversion photovoltaïque.....12

I.5.1.Description de la cellule solaire.....13

I.5.2.Principe physique de fonctionnement.13

I.5.3.Architecture de la cellule photovoltaïque.
.....18

I.5.4. Les principaux éléments dans la cellule.....	18
I.6. Cellules solaires en couches minces.	21
I.7. Les différentes technologies.....	22
I.7.1. La filière au CdS/CdTe.....	23
I.7.1.1. Méthodes de déposition.....	24
I.7.1.2. Elaboration de la cellule solaire à base de CdTe.....	26
I.7.1.3. L'hétérojonction CdS/CdTe.....	27
I.7.1.4. Cellule solaire à hétérojonction SnO ₂ /CdS/CdTe.....	28
I.8. Caractérisation électrique de la cellule solaire.....	31
I.8.1. Densité de courant -Voltage.....	31
I.8.2. Rendement quantique.....	33

Chapitre II : le transport dans la cellule solaire en CdTe.

II.1. Introduction.....	3
II.2. L'équation de transport.....	37
II.3. Absorption- Génération optique des paires électron-trou et recombinaison	39
II.3-1. Absorption optique	39
II.3.2 Génération optique des porteurs.....	41

II.2.3 :	
Recombinaison	42

Chapitre III : Logiciel de modélisation AMPS.

III.1.Introduction.....	49
III.2.Généralités sur le programme.....	49
III.2.1. Définition du logiciel.....	49
III.2.2.Bref historique	49
III.2.3.L'objectif d'AMPS.....	50
III.2.4.Capacités d'AMPS	50
III-3 : Description ducas de base.....	50

ChapitreIV: Résultats et discussion.

IV.1.Introduction.....	59
IV.2. Structure de la cellule étudiée	59
IV.3.Résultats et discussion	62
IV.3.1. Effet de l'épaisseur sur les caractéristiques électriques de la cellule	62
IV.3.2.Effet de la densité des défauts sur les caractéristiques électriques de la cellule.....	80
IV.4.Conclusion.....	86
Conclusion générale.....	89
Référence bibliographiques.....	92
Résumé.	

ملخص :

في هذا العمل قمنا بدراسة الخصائص الكهربائية لخلية شمسية (n-p) ذات وصلة متغايرة (CdS/CdTe) تحت الإضاءة AM1.5 باستعمال برنامج النمذجة الرقمية أحادية البعد **AMPS-1D**. سمحت الدراسة باستخلاص الخصائص: كثافة التيار - جهد ($J-V$)، الخصائص: المردود الكوانتي - طول الموجة ($QE - \lambda$) وكذلك كثافة تيار الدارة القصيرة (J_{cc})، جهد الدارة المفتوحة (V_{co})، معامل التعبئة (FF)، و مردود التحول الفوتوفولطائي (η). دُرست هذه الخصائص الفوتوفولطائية تحت أثر تغيير السمك و كثافة العيوب في كل من المنطقة (p-CdTe) الممتصة و المنطقة الأمامية (n-CdS). اتضح أن التغييرات المطبقة على خصائص الطبقة الممتصة (p-CdTe) لها على العموم تأثير معتبر على الخصائص الفوتوفولطائية للخلية. بزيادة السمك (x_p) للطبقة الممتصة (p-CdTe)، نلاحظ تزايد في كل من (J_{cc})، (V_{co})، و مردود التحول الفوتوفولطائي (η). أحسن مردود للتحول الفوتوفولطائي ($\eta = 17.83\%$) تحقق من أجل ($x_p = 3 \mu m$). بزيادة السمك (x_n) للطبقة الأمامية (n-CdS)، نلاحظ عموماً تناقصاً في الخصائص الفوتوفولطائية خاصة J_{cc} الذي ينقص من 27.06 mA/cm^2 إلى 24.89 mA/cm^2 و مردود التحول (η) الذي ينقص من 18.05% إلى 16.53% ، أحسن قيمة للمردود ($\eta = 18.05\%$) تحققت من أجل ($x_n = 0.015 \mu m$) من أجل كثافة عيوب D_p مختزلة في الطبقة (p-CdTe) ($D_p = 2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$)، يصل مردود التحول الفوتوفولطائي (η) إلى قيمة جيدة 20.35% ثم يتناقص بشكل معتبر مع زيادة D_p فيما يتناقص J_{cc} بشكل طفيف. كذلك فإن زيادة كثافة العيوب D_n للطبقة الأمامية (n-CdS) تؤثر بشكل طفيف على نقصان J_{cc} ، أما كل من معامل التعبئة (FF) و مردود التحول الفوتوفولطائي (η) فيعرفان تناقصاً معتبراً خاصة من أجل $D_n = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ حيث ($FF = 63.94\%$ و $\eta = 15.24\%$). على العموم النتائج المتحصل عليها هي في مجال ما وجد من خلال الأبحاث التجريبية و النظرية المجراة على الخلايا الشمسية ذات الوصلة المتغايرة (CdS/CdTe).

Abstract

In this work, we have studied the electrical characteristics of (n-p) (CdS/CdTe) hetero-junction solar cell under AM1.5 illumination, by using the one dimensional numerical simulation logical **AMPS-1D**. The study allowed to extract the current density - voltage ($J-V$) characteristic, the quantum efficiency - wave length ($QE - \lambda$) characteristic and the short circuit current density (J_{cc}), the open circuit voltage (V_{co}), the fill factor (FF) and the photovoltaic conversion efficiency (η). We have studied these photovoltaic characteristics under the variation of thickness and defect density in (p-CdTe) absorbing layer and (n-CdS) frontal layer. It has been proved that changes carried out on the properties of the (p-CdTe) absorbing layer have generally a significant effect on the photovoltaic characteristics of the cell. An increase of J_{cc} , V_{co} and η is notified when the x_p thickness of the (p-CdTe) layer increases. The best conversion efficiency is obtained ($\eta = 17.83\%$) when x_p reach $3 \mu m$. With increasing the x_n thickness of the (n-CdS) layer, we observe a general decrease in the photovoltaic parameters. J_{cc} decreases from 27.06 mA/cm^2 to 24.89 mA/cm^2 . The conversion efficiency η decreases from 18.05% to 16.53% . The best conversion efficiency $\eta = 18.05\%$ is obtained for $x_n = 0.015 \mu m$. With a reduced defect density D_p in (p-CdTe) layer of ($2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$), The conversion efficiency η reach a good value of 20.35% after what it decreases significantly with increasing D_p ; while J_{cc} decreases slightly. Increasing the defect density D_n in the (n-CdS) frontal layer affect slightly on the decrease of J_{cc} ; while the FF and the conversion efficiency η know a significant reduction when D_n reach 10^{19} cm^{-3} ($FF = 63.94\%$ and $\eta = 15.24\%$). Generally, the obtained results are in the range of what has been found by experimental and theoretical works carried on (CdS/CdTe) hetero-junction solar cells.

Résumé

Dans ce travail nous avons étudié les caractéristiques électriques d'une cellule solaire (n-p) à hétérojonction (CdS/CdTe) sous l'éclairement AM1.5 en utilisant le logiciel de simulation numérique unidimensionnelle **AMPS-1D**. L'étude a permis d'extraire les caractéristiques densité de courant - tension (J - V), les caractéristiques rendement quantique -longueur d'onde ($QE - \lambda$) ainsi que la densité de courant de court circuit (J_{cc}), la tension de circuit ouvert (V_{co}), le facteur de remplissage (FF), et le rendement de conversion photovoltaïque (η).

Nous avons étudié ces caractéristiques photovoltaïques sous l'effet de variation de l'épaisseur et de la densité de défauts dans la région absorbante (p-CdTe) et la région frontale (n-CdS). Il s'est avéré que les changements apportés aux propriétés de la couche absorbante (p-CdTe) ont généralement un effet considérable sur les caractéristiques photovoltaïques de la cellule. Une augmentation de J_{cc} , V_{co} et η est notifiée lorsque l'épaisseur x_p de la couche p-CdTe augmente. Le meilleur rendement de conversion est obtenu ($\eta = 17.83\%$) lorsque l'épaisseur x_p atteint $3 \mu\text{m}$. Avec l'augmentation de l'épaisseur x_n de la couche (n-CdS), nous remarquons une générale diminution des paramètres photovoltaïques. Le J_{cc} diminue de 27.06 mA/cm^2 à 24.89 mA/cm^2 . Le rendement de conversion η diminue de 18.05% à 16.53% . Le meilleur rendement de conversion $\eta = 18.05 \%$ est obtenu pour $x_n = 0.015 \mu\text{m}$. Pour une densité de défauts D_p réduite dans la couche (p-CdTe) à $(2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3})$, le rendement de conversion (η) atteint une bonne valeur de 20.35% puis il diminue considérablement avec l'augmentation de D_p alors que J_{cc} diminue légèrement. L'augmentation de la densité de défauts D_n de la couche frontale (n-CdS) influe légèrement sur la diminution de J_{cc} , alors que FF et le rendement de conversion η connaissent une notable réduction lorsque D_n atteint 10^{19} cm^{-3} ($FF=63.9493\%$ et $\eta=15.2425\%$). Généralement, les résultats obtenus sont dans la gamme de ce qu'a été trouvé par les travaux expérimentaux et théoriques menés sur les cellules solaires à hétérojonction (CdS/CdTe).

Introduction générale

Aujourd'hui, plus de 85% d'énergie utilisée dans le monde provient de gisements de combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz) ou d'uranium, constitués au fil des âges et de l'évolution géologique. Ces énergies sont considérées comme des énergies de stock. En d'autres termes, elles sont épuisables. Actuellement d'utilisations largement majoritaires, les ressources fossiles posent plusieurs problèmes.

Une des solutions les plus prometteuses pour le futur énergétique de l'humanité, est le développement d'une autre forme d'énergie dite « *énergie renouvelable* ». Ces énergies renouvelables ont toutes l'immense avantage d'être d'origines naturelles, inépuisables et non polluantes puisqu'elles n'émettent pas de gaz favorisant l'effet de serre.

Dans le contexte global de la diversification de l'utilisation des ressources naturelles, le recours aux énergies renouvelables et en particulier le solaire photovoltaïque se fait de plus en plus fort. Plusieurs technologies sont actuellement développées pour la réalisation de cellules photovoltaïques. Les degrés de maturité, de performance et de durée de vie sont très différents d'une technologie à l'autre. Les efforts de recherche et développement actuels entraînent des progrès rapides, faisant de la filière photovoltaïque une filière en constante évolution.

L'énergie photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité. Cette conversion se produit au sein de matériaux semi-conducteurs, qui ont comme propriété de libérer leurs porteurs de charge (électrons et trous) sous l'influence d'une excitation extérieure.

Dans le domaine de la conversion photovoltaïque, bien que différentes filières et technologies se partagent le marché, on constate que c'est toujours le silicium cristallin qui en occupe la plus grosse place. Néanmoins, dans un souci de réduction de coût, un autre axe de recherche s'est créé à partir des années 1980, avec un objectif prioritaire la réduction du coût de fabrication. L'un des moyens proposés pour la diminution du coût par watt, est de diminuer le coût de fabrication de la cellule photovoltaïque. Autrement dit, diminuer considérablement la quantité de matériaux semi-conducteurs entrant dans la composition de chaque cellule et

augmenter sa durée de vie. Ceci a par conséquent conduit à l'émergence de nouvelles filières technologiques, dites de « deuxième et troisième génération », basées sur l'utilisation de couches minces et de nanomatériaux.

Dans le domaine des couches minces, il existe trois principales filières : - la filière à base de silicium microcristallin et/ou amorphe, - la filière à base de Tellure de Cadmium / Sulfure de Cadmium (CdTe/CdS) , - la filière à base des composés à structure chalcopyrite basée sur le CuInSe₂ (CIS),-La filière à base des composés III-V, principalement le AsGa ; un matériau à coût important et principalement utilisé en technologie spatiale.

La filière au CdS/CdTe représente une approche prometteuse pour les cellules de nouvelle génération. Le CdTe paraît être un matériau idéal pour les cellules solaires en films minces pour au moins trois raisons :— le gap d'énergie est de type direct : ainsi le coefficient d'absorption est élevé ($> 10^5 \text{ cm}^{-1}$ dans le visible) et la couche absorbante ne nécessite pas plus de quelques micromètres pour absorber 90 % du spectre solaire, autorisant par conséquent l'utilisation de ces matériaux,— la valeur du gap $E_g = 1.45 \text{ eV}$ est idéale pour la conversion photovoltaïque du spectre solaire , — de nombreuses méthodes existent pour déposer le CdTe avec une vitesse de dépôt très élevée tout en gardant une qualité raisonnable.

Ce travail est destiné à l'étude par simulation numérique des caractéristiques électriques de la cellule solaire à base de CdTe, de structure à hétérojonction SnO₂/CdS/CdTe. Le SnO₂ (dont la largeur du gap est $\sim 3.6 \text{ eV}$) associé au CdS de type n (largeur du gap $\sim 2.4 \text{ eV}$) sont utilisés comme des fenêtres d'entrée de la lumière et comme barrière de potentiel au CdTe. La couche CdTe de type p est l'absorbeur de la cellule (c'est-à-dire la zone où les paires électrons trous sont générées sous illumination).

La cellule est supposée être soumise à l'éclairement AM1.5, et en utilisant le logiciel de simulation numérique **AMPS-1D** nous allons générer les caractéristiques électriques de la cellule telles que: la caractéristique densité de courant - tension ($J-V$), la caractéristique rendement quantique -longueur d'onde ($QE -\lambda$), ainsi que la densité de courant de court circuit (J_{cc}), la tension de circuit ouvert (V_{co}), le facteur de remplissage (FF), et le

rendement de conversion photovoltaïque (η). Ces caractéristiques sont étudiées et analysées sous la variation des grandeurs des paramètres : épaisseur et densité des défauts de la couche (n-CdS) et (p-CdTe).

Le mémoire est structuré en quatre chapitres plus une introduction et une conclusion générale.

Dans le premier chapitre, on présente un rappel sur tous les éléments concernant la conversion photovoltaïque depuis le rayonnement solaire jusqu'aux cellules solaires en couches minces à base de CdTe.

Le deuxième chapitre est consacré aux modèles physiques appropriés pour décrire les phénomènes de transport, d'absorption, de génération et de recombinaison, se produisant dans un milieu semi-conducteur et notamment dans une cellule solaire à hétérojonction CdS/CdTe.

Le troisième chapitre décrit le logiciel de simulation numérique unidimensionnelle *AMPS-1D* utilisé pour calculer les caractéristiques électriques de la cellule solaire telles que : la caractéristique densité de courant - tension ($J-V$), et la caractéristique rendement quantique - longueur d'onde ($QE-\lambda$).

Dans le dernier chapitre, nous présentons et discutons les résultats essentiels obtenus de l'étude des caractéristiques électriques de la cellule solaire à hétérojonction $\text{SnO}_2/\text{CdS}/\text{CdTe}$. Ses caractéristiques sont étudiées et analysées sous la variation des grandeurs des paramètres : épaisseur et densité des défauts de la couche (n-CdS) et (p-CdTe).

Chapitre I:
Conversion
photovoltaïque et
cellules solaires en
couche mince à base
CdTe.

I.1. Introduction

Parmi les couples de matériaux utilisables sous forme d'hétérojonctions en couches minces destinées à la conversion photovoltaïque terrestre de l'énergie solaire, l'association n-CdS/p-CdTe représente l'une des approches les plus prometteuses. La largeur de bande interdite du CdTe (1.45 eV) est idéalement adaptée au spectre solaire et son très grand coefficient d'absorption autorise l'utilisation d'épaisseurs de l'ordre du micromètre pour absorber la quasi-totalité du spectre solaire, entraînant ainsi une consommation très réduite de matière.

Le développement de ces cellules photovoltaïques s'est accéléré ces dernières années avec des rendements supérieurs à 10% en envisageant plusieurs techniques de dépôt des couches minces de CdS et de CdTe.

Dans ce premier chapitre on présente des notions générales concernant la conversion photovoltaïque et le rayonnement solaire, et parmi les différentes filières photovoltaïques développées en couches minces, la description spécifiquement présentée est sur les cellules solaires à base de CdTe.

I.2. Rayonnement solaire.

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne Terre-soleil de 150 Millions de km), c'est ce que l'on appelle la constante solaire égale à 1367W/m².

La part d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air AM.

Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de 1000 W/m² et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1). Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc

inférieure à 1000 W/m². Les scientifiques ont donné un nom au spectre standard de la lumière du soleil sur la surface de la terre : AM1.5G ou AM1.5D.

Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith, correspondant à une inclinaison du soleil de 45° par rapport au zénith est donné par la formule :

$$(I-1) \quad OM = \frac{OA}{\sin h}$$

Donc l'Air Masse :

$$\frac{OM}{OA} = \frac{1}{\sin h} \quad (I-$$

2)

Le « G » représente le rayonnement "global" incluant rayonnement direct et rayonnement diffus. Le rayonnement diffus concerne tout le rayonnement dont la trajectoire entre le soleil et le point d'observation n'est pas géométriquement rectiligne et qui est dispersé ou réfléchi par l'atmosphère ou bien le sol. En considérant ceci, on obtient une référence du spectre global AM1.5G avec une puissance de 1000W/m², et la lettre « D » tient compte seulement du rayonnement direct.

I.2.1.Normalisation.

Les conditions standards de qualification des modules photovoltaïques sont : un spectre AM1.5 sous un éclaircissement de 1000W/m² et une température de 25°C. L'irradiation solaire dépend :

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

La combinaison de tous ces paramètres produit la variabilité dans l'espace et le temps de l'irradiation journalière.

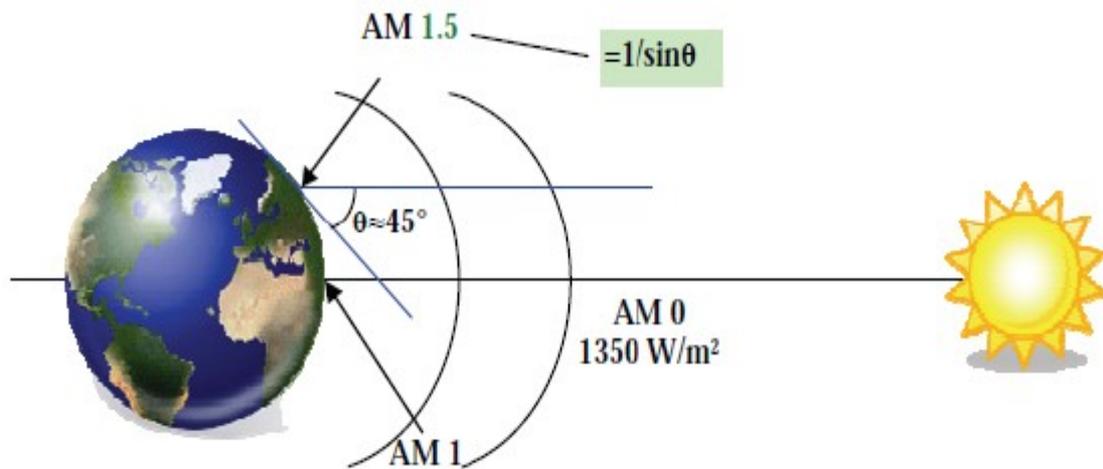


Figure I-1 : Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM [1].

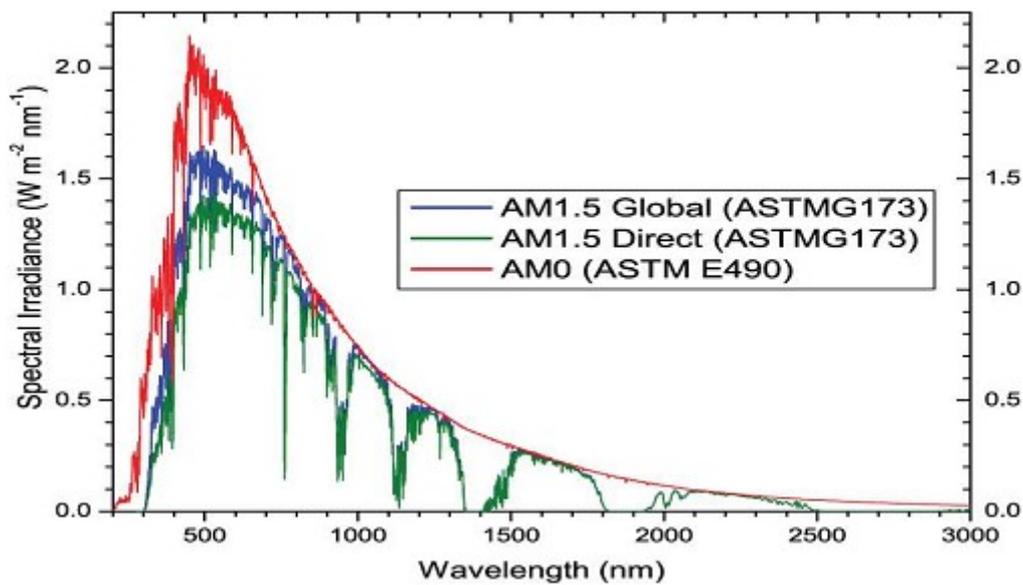


Figure I- 2 : Spectres Solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM.
Source NREL solarspectrum [1].

I.3.Historique du photovoltaïque.

C'est en 1839 qu'Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. En 1873 Willoughby Smith découvre la photoconductivité du sélénium, et en 1875, Werner Von Siemens expose

devant l'académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs, en 1877 W.G. Adams et R.E. Day développent une jonction solide à base de sélénium dont le rendement était de l'ordre de 1%. Cependant, la première véritable vision de l'énergie photovoltaïque est due à Charles Fritts, qui, en reprenant les travaux d'Adams et Day, a cherché à établir un développement industriel des cellules au sélénium. Fritts pensait pouvoir faire concurrence aux technologies de production électrique naissantes de l'époque, sa vision était que chaque bâtiment pouvait être équipé de cellules solaires et être indépendant de la distribution centralisée. Albert Einstein a découvert, en travaillant sur l'effet photoélectrique, que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon est donnée par la relation :

$$E = \frac{hc}{\lambda} = hv$$

(I-3)

Où h est la constante de Planck, c la vitesse de la lumière et λ sa longueur d'onde. Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Cette découverte value à Albert Einstein le prix Nobel en 1905.

En 1954, Carl Fuller, au sein des laboratoires de la société Bell, cherchait à améliorer les diodes au silicium en y introduisant certains dopants. Son collègue Gerald Pearson eut l'idée de mesurer le courant produit sous illumination par les diodes de Fuller. A la surprise générale, un courant important fut observé. Ce fut le début d'un véritable projet de cellules solaires au sein de la société Bell où un rendement de 6 % fut rapidement démontré. 1954 est aussi le début des cellules en couches minces basées sur des diodes Schottky avec le CdS. A cause de leur prix élevé, la seule véritable, mais très importante, application pour les premières cellules solaires a été dans le domaine spatial qui fut le terrain de développement du photovoltaïque jusqu'au début des années 70. 1958 voit le lancement de plusieurs satellites équipés de systèmes photovoltaïques. La forte

pression du programme spatial engendre des progrès très rapides en termes de rendement des cellules. De 8 % en 1957, et 9 % en 1958, on atteint 10 % en 1959 pour arriver à 14 % en 1960. Les années 60 voient un ralentissement de l'évolution du rendement des cellules au silicium mais des progrès rapides en ce qui concerne les cellules à base de CdS.

10 filiales, 40 distributeurs, 80 pays



Figure I-3: Le photovoltaïque dans le monde.

Cependant, au cours des années 80, la technologie photovoltaïque terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelques mégawatts, et même est devenue familière des consommateurs à travers de nombreux produits de faible puissance y faisant appel : montres, calculatrices, balises radio et météorologiques, pompes et réfrigérateurs solaires.

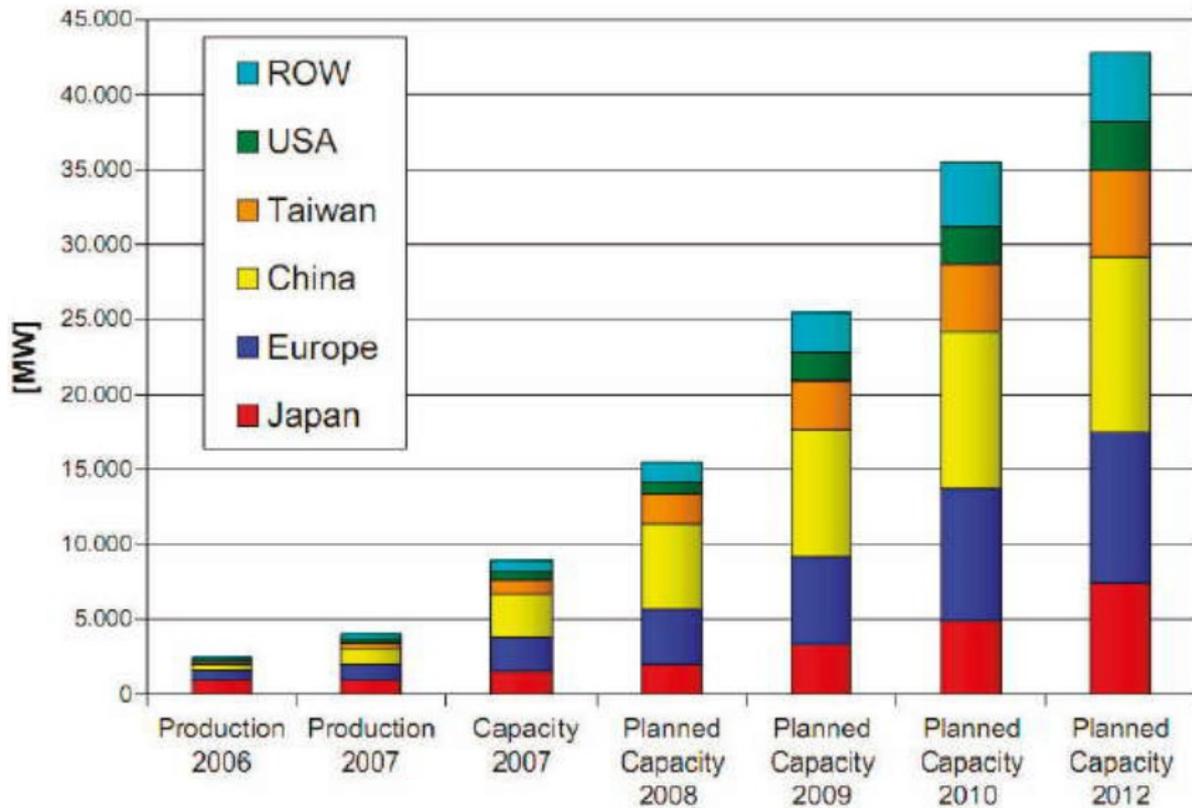


Figure I-4: production de PV mondiale [2].

I.4 . Notions de base sur les cellules solaires.

I.4.1 .Concepts importants sur les semi-conducteurs.

Les semi-conducteurs sont une famille des solides ayant un gap d'énergie modéré (jusqu'à quelques électrons volts) dans la distribution des états d'énergie permise. À $T = 0$ K dans un matériau pur, ce gap sépare une bande entièrement remplie (bande de valence) de celle qui est entièrement vide (bande de conduction). Pour $T > 0$ K, un nombre fini d'états électroniques sont occupés dans la bande de conduction ("électrons libres") et un nombre fini d'états sont inoccupés dans la bande de valence ("trous libres"). Ces électrons et trous libres peuvent gagner de l'énergie cinétique depuis un quasi-continuum d'états plus ou moins élevés mis à leur disposition, respectivement, et ils sont donc en mesure de répondre à des champs électriques et des gradients de concentration qui permettent la circulation du courant macroscopique.

Les concentrations à l'équilibre des électrons et des trous peuvent être modifiées par des dopants extrinsèques, mais aussi par les niveaux des défauts (états additionnels à l'intérieur du gap d'énergie) qui sont intrinsèques dans le semi-conducteur. L'occupation des états de la bande de conduction et de valence est régie par les statistiques de Fermi-Dirac,

$$F(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_f}{KT}\right)}$$

(I- 4)

Où K est la constante de Boltzmann et T la température absolue. L'équation (I- 4) décrit la probabilité d'occupation d'électrons dans la bande de conduction et, similairement, le $1-F(E)$ décrit la probabilité pour les trous dans la bande de valence. Si le niveau de Fermi E_f n'est pas très proche de l'un des bords de la bande, $E_c - E_f \gg kT$ et $E_f - E_v \gg kT$, $F(E)$ et $1-F(E)$ peuvent pour des causes pratiques, être remplacés par les facteurs de Boltzmann

$$\exp\left(\frac{-E - E_f}{KT}\right) \text{ et } \frac{-E_f - E}{KT} \exp\left(\frac{-E_f - E}{KT}\right)$$

(I- 5)

Pour les électrons dans la bande de conduction et les trous dans la bande de valence, respectivement.

Les semi-conducteurs sont classifiés en tant que type-n-ou type-p selon les quels des électrons ou trous sont les porteurs majoritaires. Le niveau de Fermi peut être calculé par les relations suivantes :

$$n = N_c \cdot \exp\left(\frac{-E_c - E_f}{KT}\right)$$

(I-6)

et

$$p = N_v \cdot \exp\left(\frac{-E_f - E_v}{KT}\right)$$

(I-7)

où:

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_e^i KT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \text{ et } N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_h^i KT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (I-8)$$

8)

Sont les densités effectives des états dans la bande de conduction et de valence. Pour les semi-conducteurs dopés soit avec des niveaux donneurs ou accepteurs peu profonds, n est similaire à la densité des donneurs et p est similaire à la densité des accepteurs. Tous les paramètres dans l'équation (I- 8) ont leur signification habituelle, m_e^i et m_h^i sont les masses effectives des électrons et des trous. A l'équilibre, le produit de n et p est constant et dépend seulement de la température, des masses effectives, et du gap d'énergie du semi-conducteur,

$$np = n_i^2 = N_c \cdot N_v \cdot \exp\left(\frac{-E_g}{KT}\right)$$

(I-9)

Non-équilibre :

Dans les conditions de non-équilibre, comme sous illumination ou sous injection des porteurs en raison de polarisation électrique appliquée extérieurement, aucun niveau uniforme de Fermi n'existe. Dans l'état stationnaire, cependant, des quasi-niveaux de Fermi E_{fn} et E_{fp} , peuvent être introduits, qui sont essentiels dans l'analyse et interprétation des semi-conducteurs. Ces quasi-niveaux de Fermi sont définis par

$$n = N_c \cdot \exp\left(\frac{-E_c - E_{fn}}{KT}\right)$$

(I-10)

et

$$p = N_v \cdot \exp\left(\frac{-E_{fp} - E_v}{KT}\right)$$

(I-11)

En supposant que E_{fn} et E_{fp} dans la région de type-n et de type-p d'une diode à jonction p-n sont en équilibre avec le contact électrique respectif, la différence entre les quasi-niveaux de Fermi à proximité de la région de charge d'espace de la diode est donnée par la tension appliquée V , et s'ensuit que le produit np est dépendant de la tension :

$$np = n_i^2 = \exp\left(\frac{qV}{KT}\right)$$

(I-12)

La solution numérique du problème de la jonction $p-n$, comprend les phénomènes de génération, de recombinaison et du transport qui seront discutés dans le 2^{ème} chapitre. Plus d'informations sur les propriétés des semi-conducteurs peuvent être trouvés dans de nombreux ouvrages sur les semi-conducteurs [3] et les cellules solaires [4-5].

I.5.La conversion photovoltaïque.

La conversion photovoltaïque est la transformation directe d'une énergie électromagnétique en énergie électrique continue. Cette énergie électromagnétique est le plus souvent le rayonnement solaire. En ce sens, l'énergie photovoltaïque utilise la fusion nucléaire. Pour des applications photovoltaïques, c'est le nombre de photons par unité de longueur d'onde qui est réellement utile puisque ce sont les photons qui créent des paires électron-trou.

Par exemple, avec un rendement quantique de 1, chaque photon crée une paire électron-trou. Par conséquent, le nombre de photons en fonction de la longueur d'onde est l'information pratique à connaître dans les applications photovoltaïques. En utilisant la formule de Planck, on déduit de l'irradiante (une énergie par unité de surface et de longueur d'onde) ce nombre de photons. On obtient alors le graphique 1.5. La longueur d'onde correspondant au maximum de photons est de l'ordre de 650 nm – 670 nm. Le nombre total de photons sur la plage « utile » 300 nm – 1107 nm est d'environ $2,72 \times 10^{21}$

La plupart des cellules photovoltaïques utilisent des semi-conducteurs (amorphes ou cristallins, alliages ou pas) pour transformer un photon en une paire électron-trou. Si l'on utilise un seul matériau semi-conducteur (simple jonction), il y a un compromis entre le nombre de photons utiles (qui peuvent être absorbés) et l'énergie délivrée par photon. Un matériau avec un gap important absorbe moins de photons car il a une longueur d'onde de coupure plus petite. Le courant est donc plus faible. Un matériau avec un faible gap absorbe plus de photons mais a une tension plus faible. En effet, les paires électron-trou créées thermalisent très vite à l'énergie égale à la bande interdite E_g du semi-conducteur. Ce compromis a été quantifié par Shockley et Queisser [6]. Avec un seul matériau et sans technologies « exotiques » le rendement de conversion maximal est de 31 % pour un gap d'environ 1,4 eV. Le gap du silicium cristallin n'est pas très loin de cet optimum, avec 1,12 eV le maximum théorique accessible pour une simple jonction en c-Si est d'environ 29 % [7].

I.5.1. Description de la cellule solaire.

Un cristal semi-conducteur dopé P est recouvert d'une zone très mince dopée N et d'épaisseur e égale à quelques millièmes de mm. Entre les deux zones se trouve une jonction. La zone N est couverte par une grille métallique qui sert de cathode k tandis qu'une plaque métallique recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode. L'épaisseur totale du cristal est de l'ordre du 121mm. Un rayon lumineux qui frappe le dispositif peut pénétrer dans le cristal au travers de la grille et provoquer l'apparition d'une tension entre la cathode et l'anode.

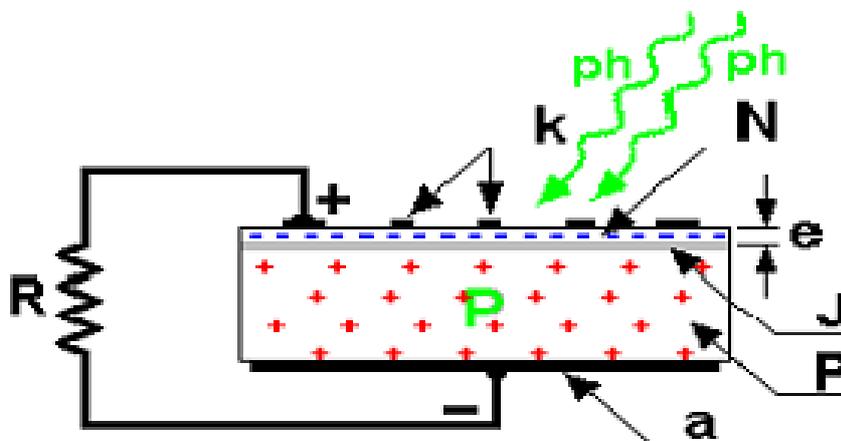


Figure I-5 : Vue en coupe d'une cellule photovoltaïque [8].

I.5.2. Principe physique de fonctionnement.

La conversion photovoltaïque est la transformation de l'énergie des photons en énergie électrique grâce au processus d'absorption de la lumière par la matière. Lorsqu'un photon est absorbé par le matériau, il passe une partie de son énergie par collision à un électron l'arrachant littéralement de la matière. Ce dernier étant précédemment à un niveau d'énergie inférieur où il était dans un état stable passe alors vers un niveau d'énergie supérieur, créant un déséquilibre électrique dans la matière se traduisant par une paire électron-trou, de même énergie électrique. Généralement, la paire électron-trou revient rapidement à l'équilibre en transformant son énergie électrique en énergie thermique [9].

La figure suivante résume les mécanismes essentiels mis en jeu, lors du processus de la conversion photovoltaïque :

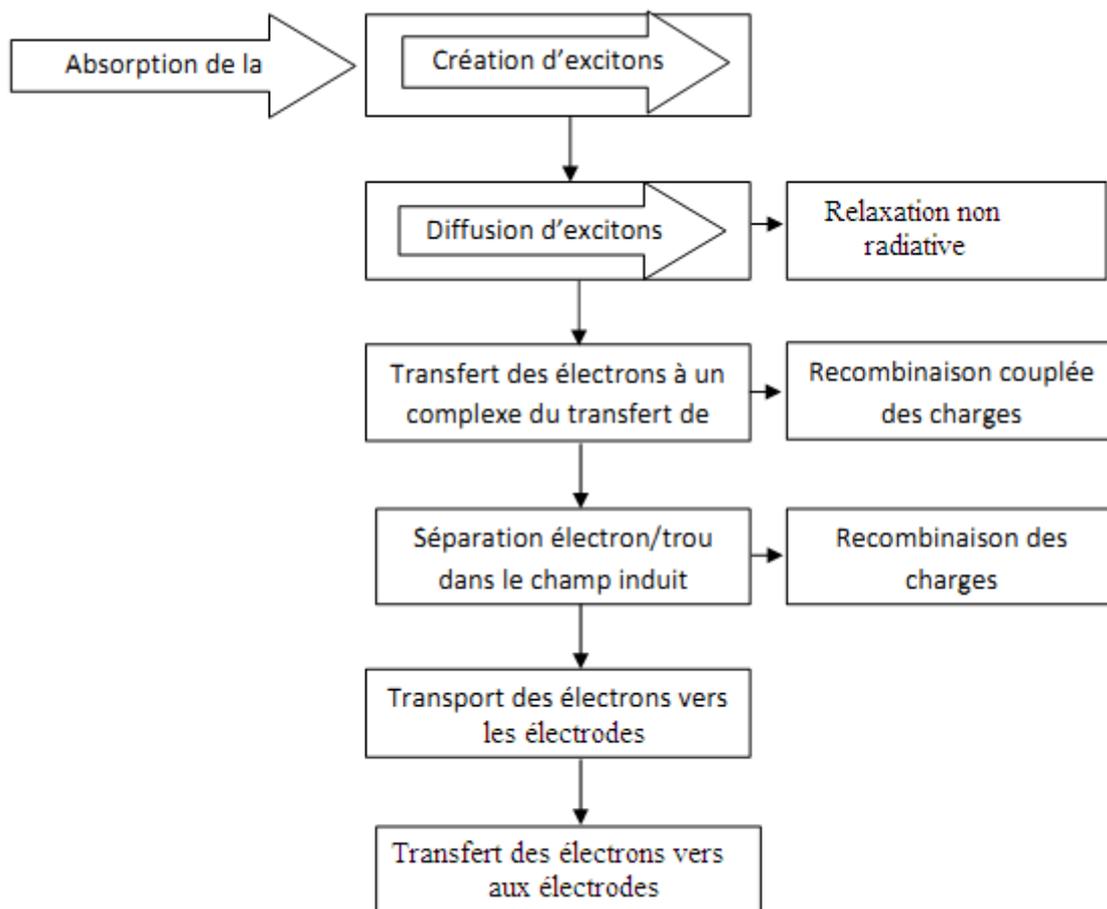


Figure I-6 : Mécanisme de la conversion photovoltaïque [10].

L'énergie produite par l'absorption d'un photon dans un matériau se traduit du point de vue électrique par la création d'une paire électron-trou. Cette réaction entraîne une différence de répartition des charges créant ainsi une différence de potentiel électrique, c'est l'effet photovoltaïque. Le fait d'avoir associé deux types de matériaux pour créer une jonction permet de pouvoir récupérer les charges avant que ces dernières ne se soient recombinées dans le matériau qui redevient alors neutre. La présence de la jonction P-N permet ainsi de maintenir une circulation de courant jusqu'à ses bornes. Le nombre de photons par unité de longueur d'onde est une donnée à connaître pour les applications photovoltaïques pour estimer l'énergie totale disponible.

La plupart des cellules photovoltaïques utilisent des semi-conducteurs pour récolter les paires électron-trou créées par la collision des photons dans le matériau. Cependant, selon le matériau utilisé, le nombre de photons utiles (qui peuvent être absorbés) diffère. En effet, chaque matériau possède son propre gap énergétique (bande d'énergie interdite). Tout photon possédant une énergie inférieure à ce gap et arrivant à la surface du matériau n'aura pas assez d'énergie pour arracher un électron au matériau même s'il entre en collision avec un. Le courant produit par un capteur PV est donc beaucoup plus faible que la quantité de photons arrivant sur le matériau car plusieurs conditions doivent être réunies pour que réellement l'énergie d'un photon se traduise en courant (compatibilité du matériau avec les longueurs d'ondes du spectre solaire, énergie des photons à leur arrivée sur le matériau, probabilité de rencontre d'un photon avec un électron, incidence du rayonnement, épaisseur du matériau,...). De plus, un autre compromis doit être fait par le concepteur de capteurs PV. Si le gap du matériau est grand, peu de photons auront assez d'énergie pour créer du courant mais aux bornes de la cellule, la tension en circuit ouvert sera grande et facilitera d'autant plus

l'exploitation de l'énergie électrique. A l'inverse, un matériau avec un faible gap absorbe plus de photons mais présente une tension plus faible à ses bornes [11].

Les cellules photovoltaïques effectuent « la transformation directe d'une énergie électromagnétique (lumière) en énergie électrique de type continu directement utilisable » en trois étapes :

- L'absorption de la lumière dans le matériau
 - Le transfert d'énergie des photons aux particules chargées électriquement
 - La collecte des charges
- a- **L'absorption de la lumière.**

La lumière se compose de photons. Ceux-ci peuvent pénétrer dans certaines matières, et même passer au travers. Plus généralement, un rayon lumineux qui arrive sur un solide peut subir principalement trois évènements optiques (fig. I-7) qui sont :

- la réflexion, auquel cas la lumière est renvoyée par la surface de l'objet
- la transmission, où cette fois la lumière traverse l'objet
- l'absorption, où ici la lumière pénètre dans l'objet et n'en ressort pas, l'énergie est restituée sous une autre forme, à savoir généralement sous forme thermique.

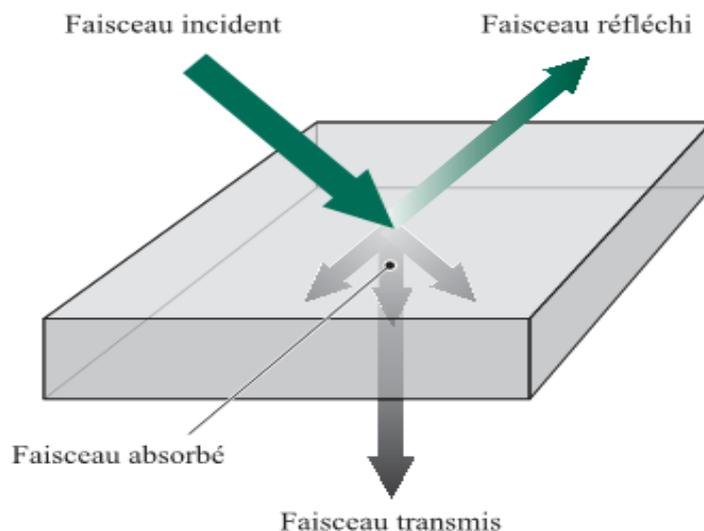


Figure .I-7. Les trois évènements optiques d'un rayon lumineux [12].

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

$$E = E_{inc} * \exp(-\alpha d)$$

(I-13)

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

$$E_{abs} = E_{inc} - E_{inc} \exp(-\alpha d) = E_{inc} (1 - \exp(-\alpha d)) \quad \text{(I-14)}$$

α : coefficient d'absorption, dépend du matériau et de la longueur d'onde de l'énergie incidente. Il s'exprime en cm^{-1} , l'épaisseur 'd' exprimée en cm

Matériaux	α [cm^{-1}]
Silicium cristallin	$4.5.10^3$
Silicium amorphe	$2.4.10^4$
GaAs	$5.4.10^4$
CdTe	$> 5.10^5$

Tableau I-1 : Le coefficient d'absorption pour les matériaux semi-conducteurs les plus utilisés dans la fabrication des cellules photovoltaïques.

Les matériaux doivent présenter un spectre d'absorption épousant au mieux le spectre d'émission du soleil. L'association de plusieurs polymères et/ou de molécules est l'un des moyens aujourd'hui mis en œuvre pour étendre le spectre d'absorption des cellules. Par ailleurs, la mobilité des charges dans les polymères semi-conducteurs étant plus faible que celle mesurée dans les matériaux inorganiques

crystallins ou poly-cristallins, l'épaisseur des films organiques ne doit pas excéder une centaine de nanomètres afin de s'affranchir du piégeage des charges photo- générées. Cela n'a pas d'incidence sur les capacités d'absorption optique de la cellule car les matériaux organiques ont un coefficient d'absorption très élevé.

b- Le transfert d'énergie des photons aux particules chargées électriquement :

Tout solide est constitué d'atomes qui comprennent un noyau et un ensemble d'(é) gravitant autour. Les photons absorbés vont tout simplement transférer leur énergie aux (é) périphériques (les plus éloignés des noyaux), leur permettant ainsi de se libérer de l'attraction de leur noyau. Ces (é) libérés sont susceptibles de produire un courant si l'on les attire ensuite vers l'extérieure. En régime permanent, l'(é) libéré laisse un(h) qui se traduit par une charge positive. Si cet (é) est attiré en dehors, c'est l'(é) d'un atome voisin qui va venir combler ce (h), laissant à nouveau un trou, lui-même comblé par un (é) voisin et ainsi de suite. On génère ainsi une circulation de charges élémentaires, d'(é) dans un sens, et de (h) dans l'autre sens; ce qui donne un courant électrique :

Ce phénomène physique, dit : la photoconductivité, est spécifique aux semi-conducteurs car il comporte des (é) libérables ; un seuil d'énergie minimum nécessaire à cette « libération » des (é) par les photons, si ce seuil dépend du matériau, c'est tout simplement parce que la structure électronique est différente pour chaque type d'atomes et donc les énergies mises en jeu également.

c- La collecte des charges.

Le comportement des porteurs libres diffère suivant le lieu de leur création. Dans les régions électriquement neutres « n » et « p », les photo-porteurs minoritaires diffusent, ceux qui atteignent la zone de charge d'espace sont propulsés par le champ électrique vers la région où ils deviennent majoritaires. Ces photo- porteurs contribuent au courant par

leur diffusion, il se crée un courant de diffusion. Dans la zone de charge d'espace, les pairs (e-h) créées par les photons sont dissociés par le champ électrique interne (jonction), l'(e)est propulsé vers la région de type « n » et le (h) vers la région de type « p ». Ces porteurs donnent naissance à un photo-courant de génération.

I.5.3 Architecture de la cellule photovoltaïque.

Les premières cellules solaires en silicium cristallin (c-Si) réalisées dans les années 1950 utilisaient des substrats de type n (dopés Phosphore). À cette époque, leur première application n'était pas terrestre, mais spatiale, pour l'alimentation de satellites. Les substrats de type p se révélant plus résistants aux radiations, les cellules PV ont ensuite été développées sur du c-Si dopé Bore. Ces premières cellules étaient seulement constituées d'une jonction diffusée (émetteur) et d'un contact ohmique. Par rapport à ces simples photodiodes, l'architecture des cellules PV a ensuite rapidement évolué, et abouti à une architecture dite « standard » schématisée sur la figure (I-8)

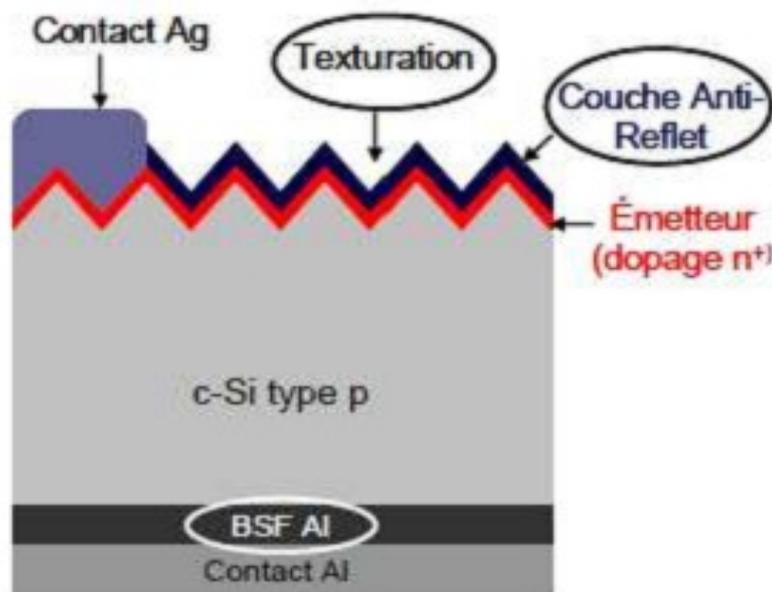


Figure I-8 : Schéma d'une cellule solaire standard [13].

I.5.4. Les principaux éléments dans la cellule.

- le substrat : le plus utilisé est le verre sodé ; on peut aussi utiliser des substrats flexibles (type Upolex) ou métalliques.
- un contact ohmique inférieur
- une couche absorbante
- une couche tampon
- un oxyde transparent conducteur (OTC) : ITO, ZnO
- un contact ohmique supérieur (grille métallique) : Ni-Al

A ceci est parfois ajoutée une couche antireflet (MgF_2). Ces matériaux ne sont bien évidemment pas choisis au hasard et doivent posséder des propriétés physico-chimiques bien particulières.

a- **La couche absorbante :**

Une couche absorbante doit être constituée d'un matériau à grand coefficient d'absorption dans le domaine du visible, il est donc préférable que celui-ci ait une bande interdite directe, dont la valeur soit de l'ordre de 1.1eV à 1.7 eV.

b- **La couche tampon :**

La couche tampon est une couche située entre la couche absorbante et la couche d'oxyde transparent conducteur (OTC). Si un contact couche absorbante/OTC est directement réalisé, une jonction photovoltaïque peut exister mais son rendement sera limité par :

- l'inadaptation des bandes interdites
- les courants de fuite dus à la présence de zones désordonnées aux joints de grains

De ce fait il est préférable d'introduire une fine couche, dite couche tampon, entre ces deux composés afin d'optimiser les performances de la cellule. Cette couche doit avoir les propriétés suivantes :

- une bande interdite intermédiaire permettant une transition «souple » entre celle du semi- conducteur et celle de l'OTC, soit une valeur comprise entre 2.4 et 3.2 eV.
- une conductivité de type n pour former la jonction avec la couche absorbante qui est, elle, de type p; de plus, afin d'éviter les effets de fuites de courant, sa conductivité doit être plus faible que celle de la couche absorbante.
- elle doit être morphologiquement très homogène pour éviter tout effet de court circuit au niveau des joints de grains.

c- ***La couche d'oxyde transparent conducteur (OTC) :***

Celle-ci doit être simultanément transparente et conductrice. Dans le domaine du spectre solaire la transmission des couches doit être supérieure à 80%. De telles propriétés sont obtenues en utilisant des couches minces de SnO_2 , In_2O_3 , de leur alliage ITO et de ZnO. Leur transparence est liée à la valeur de leur bande interdite tandis que leurs propriétés électriques dépendent de la composition des couches et d'un éventuel dopage. On dépose généralement une première couche non dopée de ZnO puis une couche dopée de ZnOAl ou de ITO. En effet, la couche de ZnO intrinsèque, donc non-conductrice, évite tout courant de fuite entre la couche absorbante et le contact supérieur. Il a été montré que cette couche pouvait être évitée si l'on déposait une couche tampon plus épaisse.

A la différence des dispositifs réalisés pour la microélectronique, la totalité du substrat de silicium cristallin est utilisé. Ces substrats (wafers) sont découpés à la scie à fil dans des lingots cristallisés selon différents procédés (CZ, FZ, Block-cast). Une épaisseur de 80 μm suffit théoriquement pour que la quasi-totalité des photons soit absorbée. Cependant les techniques actuelles de découpe de wafers ne permettent pas d'atteindre des épaisseurs inférieures à 100 μm . De plus, la réduction

des épaisseurs fragilise les plaques et augmente le taux de casse tout au long du procédé de fabrication (cellules et modules). Les substrats multicristallins les plus utilisés au niveau industriel ont une forme carrée d'approximativement 15 cm de côté, alors que pour le monocristallin c'est la forme pseudo-carrée de 12.5 cm de côté qui est la plus répandue. Trois grandes avancées technologiques, montrées sur la figure I.8, ont permis l'augmentation du rendement des cellules PV. Il s'agit de la texturation de surface, de l'usage d'une couche antireflet ainsi que celle d'un champ de surface arrière (Back Surface Field BSF).

d- Texturation et Couche Antireflet :

L'utilisation d'une structuration de la surface avant (texturation), alliée à une couche antireflet, permet de réduire drastiquement la réflexion du rayonnement incident. Le procédé de texturation consiste à créer un relief micrométrique à la surface du wafer de silicium. La forme généralement pyramidale du relief multiplie les réflexions et donc les chances pour la lumière de pénétrer dans le matériau. En effet, le rayonnement incident est constitué de longueurs d'onde inférieures aux dimensions des structures réalisées (quelques μm). Dans le cas d'un double réflexion, le coefficient de réflexion total devient R^2 , ce qui entraîne une baisse de la réflexion totale de cette surface. Les techniques industrielles de texturation se font le plus souvent par voie chimique alcaline (KOH, NaOH, TMAH). Cependant, les voies acide et sèche font l'objet d'un intérêt croissant en particulier pour les matériaux multi-cristallins [13].

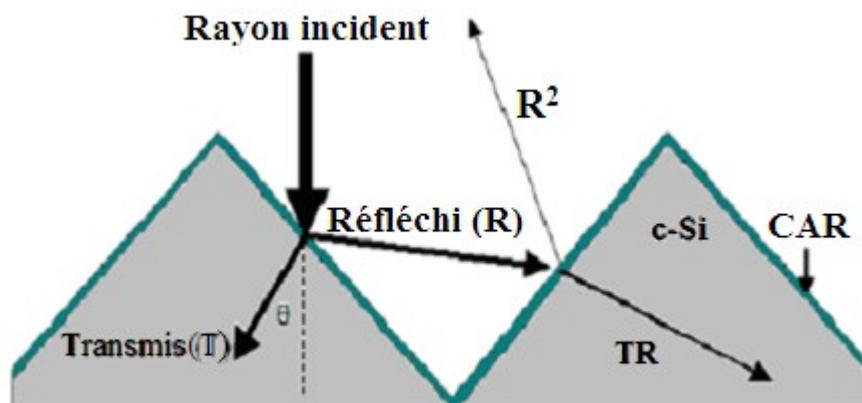


Figure I-9 : Schéma de principe des réflexions lumineuses sur une surface texturée. R est le coefficient de réflexion, T le coefficient de transmission et $T+R=1$ (l'absorption est négligée)[13].

Une couche antireflet déposée sur la face avant des cellules aide à améliorer le confinement optique. La CAR permet d'adapter l'indice optique entre le milieu extérieur et le semi-conducteur, et ainsi minimiser les réflexions. Pour cela, il est nécessaire que cette couche possède un indice de réfraction (n_{CAR}) ainsi qu'une épaisseur (e_{CAR}) adaptés au milieu extérieur d'indice n_{ext} .

I.6. Cellules solaires en couches minces.

La lumière du soleil est incidente sur la terre (au niveau de la mer) avec une densité de puissance $\sim 1000 \text{ W/m}^2$ et, par conséquent, pour réaliser une ampoule standard de 100W par l'énergie solaire, une surface d'environ 1 m^2 est nécessaire (même plus si l'ampoule fonctionne 24 heures ou les conditions météorologiques défavorables sont prises en compte). Pour une production considérable de l'énergie, des installations de cellules solaires à grande surface sont nécessaires. En comparaison avec la technologie de plaquette à base de Si, les cellules solaires en couches minces peuvent être déposées à faible coût sur des surfaces larges de verre de (soda-calcique) [14], d'acier inoxydable [15], ou même sur des substrats polyamide, ce qui rendrait ces cellules solaires vraiment légères [16, 17]. Un autre problème avec les cellules solaires traditionnelles à base de silicium est le temps de récupération de l'énergie nécessaire est à l'échelle de 2-3 ans et, par conséquent, 10% de la durée de vie d'un module solaire en silicium est perdu ; les cellules solaires en couches minces sont moins exigeantes et ont la capacité d'atteindre des temps de récupération d'un an [18]. En raison de ces arguments, mais aussi en raison de nombreux autres facteurs, les cellules solaires en couches minces sont la possibilité d'être considérablement moins coûteuses dans la production à grande échelle. Des études récentes ont montré que l'application des *technologies d'aujourd'hui (today's*

technologies) dans la fabrication à « échelle supère-grande » des cellules solaires en couches minces conduirait à des prix de l'électricité solaire qui concurrencent les sources d'énergie conventionnelles [19].

I.7. Les différentes filières photovoltaïques en couches minces :

Dans le domaine des couches minces, il existe trois principales filières :

- la filière à base de silicium microcristallin et/ou amorphe.
- la filière à base de Tellure de Cadmium / Sulfure de Cadmium.
- la filière à base des composés à structure chalcopyrite basée sur le $CuInSe_2$ (CIS).
- La filière à base des composés III-V, principalement le AsGa ; un matériau à coût important et principalement utilisé en technologie spatiale.

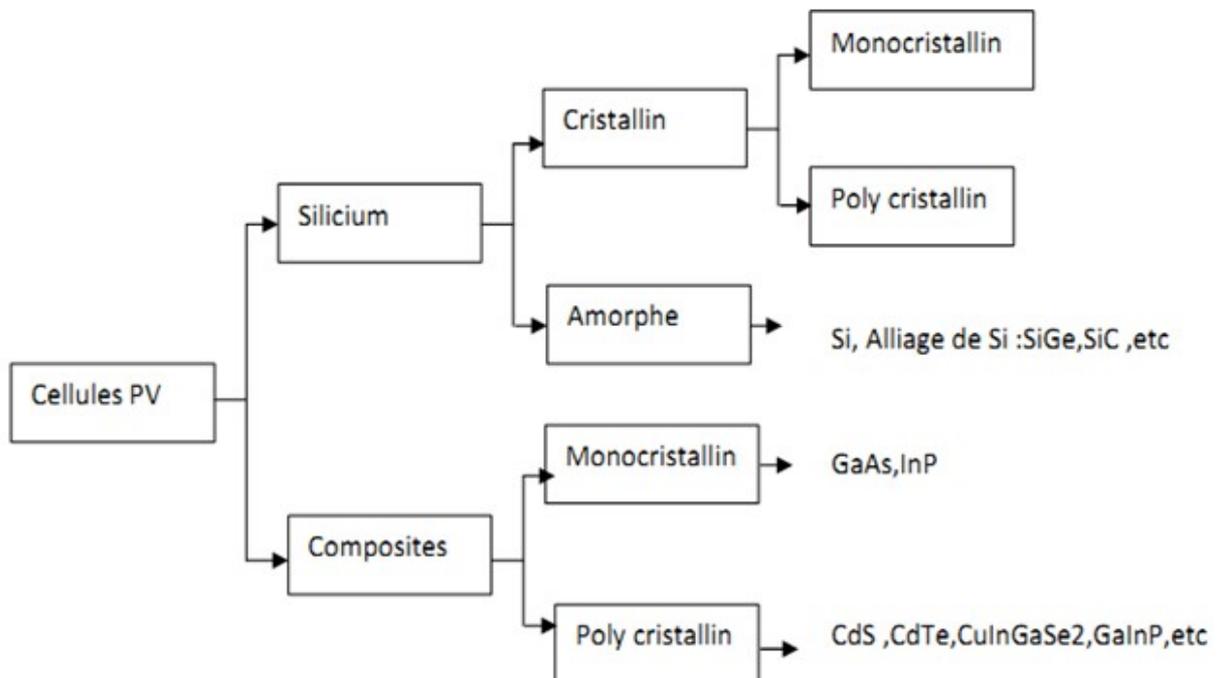


Figure I-10 : Les différentes filières photovoltaïques en couches minces.

I.7.1. La filière au CdS/CdTe.

La filière au CdS/CdTe représentait l'approche la plus prometteuse pour les cellules de nouvelle génération. CdTe paraissait être un matériau idéal pour les cellules solaires en films minces pour au moins trois raisons :

- le gap d'énergie est de type direct : ainsi le coefficient d'absorption est élevé ($> 10^5 \text{ cm}^{-1}$ dans le visible) et la couche absorbante ne nécessite pas plus de quelques micromètres pour absorber 90 % du spectre solaire, autorisant par conséquent l'utilisation de matériaux relativement impurs dont la longueur de diffusion des porteurs minoritaires ne dépasse pas quelques micromètres ;
- la valeur du gap $E_g = 1.45 \text{ eV}$ est idéale pour la conversion photovoltaïque du spectre solaire ;
- de nombreuses méthodes existent pour déposer le CdTe avec une vitesse de dépôt très élevée tout en gardant une qualité raisonnable.

La structure cristalline du CdS/CdTe est une structure tétragonale de chalcopyrite, qui est dérivé de la structure Zinc blend

La durée de vie des porteurs minoritaires s'élève à plusieurs ns, la longueur de diffusion des électrons est de l'ordre de quelques microns et la mobilité des électrons dans le cristal unique atteint jusqu'à $1100 \text{ cm}^2 / \text{Vs}$.

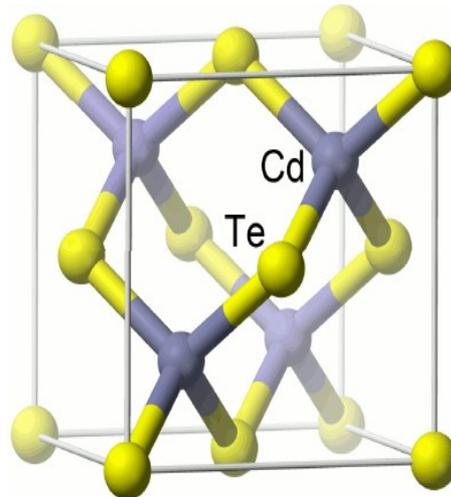


Figure I. 11: Structure cristalline de CdTe.

I.7.1.1. Méthodes de dépôt.

Depuis plus de trente ans que la recherche est active, les propriétés des films de CdS et de CdTe sont maintenant bien connues aux chercheurs. Au moins huit techniques de dépôt de couches telles que le CdS et le CdTe ont été envisagées :

- PVD (dépôt physique en phase vapeur) ;
- CVD (dépôt chimique en phase vapeur) ;
- CSVT (Close space vapour transport) ;
- ED (dépôt électrolytique) ;
- Screen Printing (sérigraphie) ;
- Spray Pyrolysis (vaporisation suivie de pyrolyse) ;
- Hot Wall Epitaxy (épitaxie en phase vapeur à courte distance) ;
- Atomic Layer Epitaxy (dépôt contrôlé de couches atomiques successives).

Méthode de dépôt	Sigle	a-Si:H	µc :Si	CdS	CIGS	CdTe
Techniques sous vide						

Physical vapour deposition	PVD				**	**
Hot wall epitaxy	HWE					**
Close spaced sublimation	CSS			*		**
Sputter deposition	SD	*			**	
Reactive laser evaporation	RLE	*				
Electron beam evaporation	EBE	*				
Réactions chimiques en phase vapeur						
Chemical vapour deposition	CVD			*		*
Plasma enhanced CVD	PECVD	***	***			
Photo CVD	PHCVD	*				
Hot wire chemical vapour deposition	HWCVD		*			
Metal-organic chemical vapour deposition	MOCVD					*
Solid vapour reaction	SVR					
Closed space vapour transport	CSVT					***
Autres procédés						
Liquid phase epitaxy	LPE		*			
Atomic layer epitaxy	ALE					*
Zone melting recrystallisation	ZMR		*			
Chemical bath deposition (electroless)	CBD			**	*	
Spray pyro lysis	SPL			*	*	*
Electro deposition	ED			***	**	**
Stacked layer reaction	SLR					*
Screen printing	SPR				*	***
<p>Les termes anglais utilisés par les chercheurs ont été maintenus : — les méthodes qui sont déjà les plus communément utilisées sont</p>						

repérées par *** ;

— les méthodes dans la phase préindustrielle par ** ;

— les méthodes encore au stade du laboratoire par *.

Tableau I-2 Les techniques de dépôt utilisées dans la production de modules en couches minces[20].

I.7.1.2.Élaboration de la cellule solaire à base de CdTe.

L'étape la plus importante est la formation de la couche absorbante en CdTe avec une épaisseur de 1,5 à 6 μm . De nombreuses techniques permettent de préparer des couches de type P de bonne cristallinité et de grande mobilité des électrons : sublimation/condensation (S), une modification de ce processus à savoir sublimation en espace clos (CSS), vaporisation chimique (CS), électrodéposition (ED), sérigraphie (SP), déposition de vapeur chimique (CVD) et sputtering. Chacune des méthodes recensées ci-dessus présente des avantages et des inconvénients qui n'ont pas la même valeur suivant que l'on se place du point de vue du chercheur de laboratoire ou de celui de « l'ingénieur méthodes » d'un centre de production. Bien qu'elles ne donnent pas les plus beaux cristaux, ce sont les méthodes du type CSS qui présentent de loin les plus grandes vitesses de dépôt (jusqu'à 1 $\mu\text{m/s}$ chez First Solar) et donc sont les plus intéressantes pour un investissement de production de masse.

a- Procédé de sérigraphie

Le procédé de sérigraphie (SPR) de Matsushita-Panasonic est d'une extrême simplicité puisqu'il met en œuvre cinq machines à sérigraphie et trois fours à passage :

— sérigraphie d'une couche d'Ag-In sur un support de verre borosilicaté suivi de la sérigraphie d'une pâte de CdS recuite sous atmosphère d'azote à 690 °C ;

- sérigraphie d'une pâte de CdTe recuite à 620 °C sous atmosphère d'azote ;
- sérigraphie d'une pâte de carbone suivie de la sérigraphie puis cuisson d'une couche d'Ag formant la grille positive face arrière.

b- Procédé par électrodéposition

Le verre est recouvert d'un oxyde d'étain (SnO_2) déposé par CVD en très grande série dans un four de float par le fabricant de verre.

La couche de CdS est déposée chimiquement par CBD (procédé « electroless ») à partir d'une solution aqueuse contenant de l'ammoniaque, qui complexe les ions Cd^{2+} et de la thio-urée comme source des ions soufre. L'épaisseur optimale est d'environ 80 nm ; les paramètres du dépôt sont faciles à contrôler. L'absorbeur est une couche de CdTe beaucoup plus lente et plus difficile à déposer. C'est une voie électrochimique contenant les ions Cd^{2+} et HTeO_2^+ nécessitant une injection de courant de façon suffisamment homogène sur toute la surface pendant une durée relativement longue (6 h environ pour une couche de 2 μm) et suivie d'un recuit à 400 °C. Le changement d'échelle lors du passage du laboratoire au pilote a posé de sérieux problèmes d'homogénéité. On imagine les difficultés pour le passage en production sur des modules de 60 cm \times 120 cm... Le contact ohmique peut être obtenu par différentes méthodes, toutes basées sur le fait qu'il faut enrichir la couche en Te. On mentionnera l'utilisation du Cu suivi d'un dépôt de Ni, mais on utilise aussi le carbone, suivi d'une évaporation d'Al et de Ni. Les interconnexions des cellules se font grâce à trois rayures laser comme indiqué sur la figure (I-16).

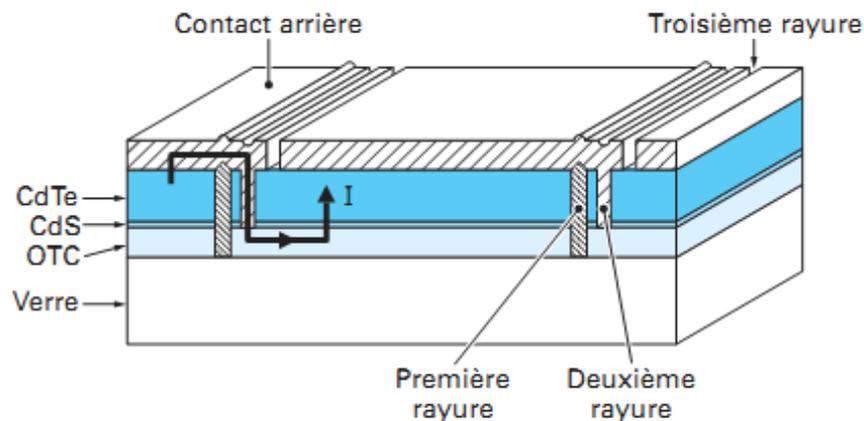


Figure .I.16 .Vue en coupe de l'interconnexion monolithique en tuiles d'un module CdTe[20].

Compte tenu de la simplicité, les performances à 8,7 % sur 1200 cm² peuvent être jugées comme relativement bonnes. Les tests de vieillissement accéléré font apparaître une légère dégradation de la résistance série conduisant à une perte de rendement de 1 % après 1 000 h d'exposition.

I.7.1.3.L'hétérojonction CdS/CdTe.

Comme le montre la figure (I-15), la plupart des cellules au CdTe utilisent une couche de CdS de type n, dont le gap très élevé, de 2,4 eV, lui permet d'agir comme une fenêtre d'entrée de la lumière (pas d'activité photoélectrique) et comme une barrière de potentiel (hétérojonction CdS/CdTe). Dans les premières cellules solaires dès 1970, le CdS a été utilisé en tant que partenaire de type n du CdTe de type p. La couche fenêtre a en général une épaisseur de quelques dixièmes de micromètres. Le procédé de fabrication nécessite qu'au moins une étape se fasse à plus de 400 °C, qu'il s'agisse du dépôt de CdTe ou du recuit postérieur indispensable. Au-dessus de 450 °C, le composé est un solide extrêmement stable. En effet, la matière condense de façon stœchiométrique tant que le substrat est maintenu au-dessus de cette température. Dans ce procédé haute température, les films sont en général naturellement de type p avec une concentration de porteurs p

inférieure à 10^{15} cm^{-3} provenant d'un léger manque de Cd. Il est remarquable que CdS et CdTe puissent être déposés en utilisant les mêmes techniques. La dernière étape est la formation de l'électrode arrière.

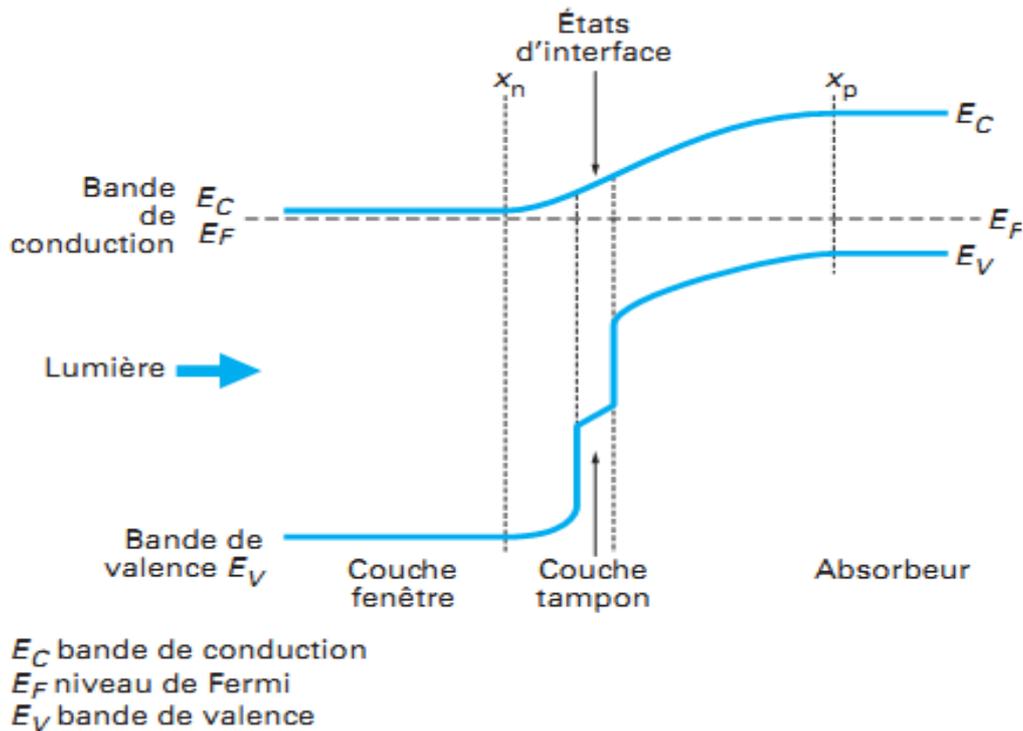


Figure .I-15 - Diagramme de bandes de l'hétérojonction CdS/CdTe[20].

Sous illumination, les porteurs sont surtout générés dans la zone de charge d'espace du CdTe de type p. Donc la collecte des porteurs se fait par le champ plutôt que par la diffusion. Comme il n'y a presque pas de zone de charge d'espace dans le CdS qui est fortement dopé et parce que la durée de vie des porteurs minoritaires y est très courte, la couche CdS est en fait une couche morte du point de vue photovoltaïque. Il est souhaitable de minimiser son épaisseur pour réduire les pertes d'absorption optique.

I.7.1.4. Cellule solaire à hétérojonction SnO₂/CdS/CdTe.

Trois couches essentielles entrent dans la composition de la cellule : L'oxyde conducteur transparent de type n (n-SnO₂), la couche fenêtre de CdS de type n (n-CdS), et la couche absorbante de CdTe de type p (p-

CdTe). Les valeurs typiques des paramètres de ces couches sont présentées dans le tableau I.3.

Les propriétés générales de la cellule		Front	Arrière
Φ_b (eV)		$\Phi_{bn}=0.1$	$\Phi_{bp}=0.4$
S_e (cm/s)		10^7	10^7
S_h (cm/s)		10^7	10^7
Réflectivité		0.1	0.8
Propriétés des couches	des SnO ₂	CdS	CdTe
W (nm)	500	25	4000
ϵ_0 / ϵ_0	9	10	9.4
μ_e (cm ² /Vs)	100	100	320
μ_h (cm ² /Vs)	25	25	40
$N_{D/A}$ (cm ⁻³)	$N_D : 10^{17}$	$N_D : 1.1 \times 10^{18}$	$N_A : 2 \times 10^{14}$
E_g (eV)	3.6	2.4	1.5
N_c (cm ⁻³)	2.2×10^{18}	2.2×10^{18}	8×10^{17}
N_v (cm ⁻³)	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}
ΔE_C	0 - 0.1		
États des défauts selon la distribution gaussienne	SnO ₂	CdS	CdTe
N_{DG}, N_{AG} (cm ⁻³)	D: 10^{15}	A: 10^{18}	D: 2×10^{14}
E_A, E_D (eV)	Milieu du gap	Milieu du gap	Milieu du gap
W_G (eV)	0.1	0.1	0.1
σ_e (cm ²)	10^{-12}	10^{-17}	10^{-12}
σ_h (cm ²)	10^{-15}	10^{-12}	10^{-15}

Tableau I.3: Paramètres d'entrée de la cellule solaire à base de CdTe.

Dans le tableau I.3; les hauteurs des barrières énergétiques sont $\Phi_{bn} = E_c - E_f$ et $\Phi_{bp} = E_f - E_v$; S la vitesse de recombinaison surfacique; W la largeur de la couche; ϵ_0 la constante diélectrique; μ la mobilité; N_D et N_A les densités des dopants peu profonds; E_g le gap d'énergie; N_c et N_v les

densités des états effectives ; ΔE_c la discontinuité de E_c entre deux régions adjacentes ; N_{DG} et N_{AG} les densité des défauts donneurs ou accepteurs ; E_A et E_D positions énergétiques des maximums des distributions gaussiennes des défauts accepteurs ou donneurs ; W_G la largeur de la distribution gaussienne ; σ la section efficace de capture. Les indices (e/h) indiquent respectivement les propriétés des électrons /trous.

Les bandes de conduction à l'interface SnO_2/CdS sont alignées en accord avec l'expérience [21, 22]. La discontinuité de E_c à l'interface CdS/CdTe est $\Delta E_c = -0,1\text{eV}$ en accord avec les mesures de spectroscopie [23]. Le contact arrière est choisi comme une barrière de Schottky modérée [24, 25].

La figure (1-12) montre une structure typique d'une cellule solaire à hétérojonction $\text{SnO}_2/\text{CdS}/\text{CdTe}$. Elle consiste en une hétérojonction CdS/CdTe . Le CdS du type n est déposé sur le verre couvert d'une couche d'OTC (oxyde transparent conducteur) tel que (In_2O_3 ou SnO_2).

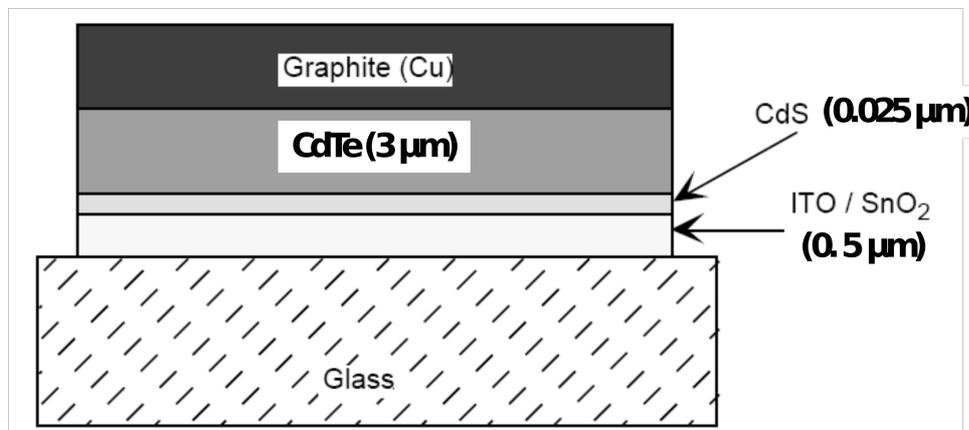


Figure 1-12- Structure typique d'une cellule solaire à hétérojonction $\text{SnO}_2/\text{CdS}/\text{CdTe}$.

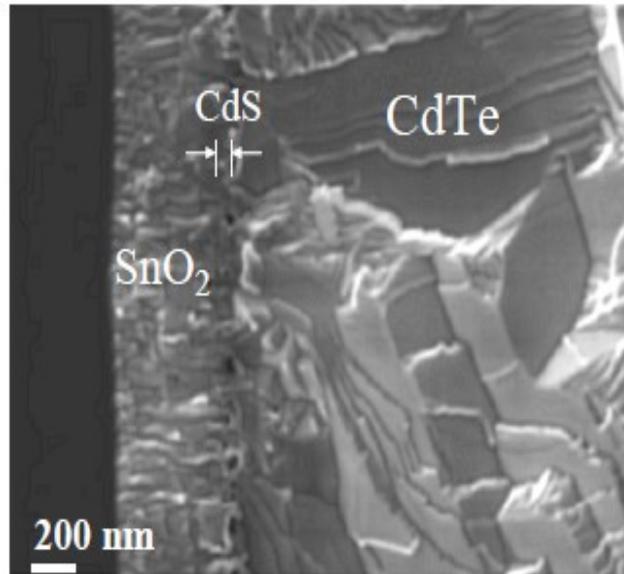


Figure I-13. Image par MEB d'une section de cellule solaire à hétérojonction SnO₂/CdS/CdTe [26].

Les couches de CdTe montrent une structure granulaire colonnaire avec des grains de taille submicronique.

I.8.Caractérisation électrique de la cellule solaire.

Dans la gamme large des méthodes de caractérisation disponibles pour les cellules solaires en couches minces, la mesure des courbes de la densité de courant-voltage ($J-V$) est d'une grande importance, puisqu'elle détermine le rendement auquel la cellule solaire convertit la puissance du soleil en électricité. Cependant, autre que la caractéristique fondamentale du rendement de conversion, une courbe $J-V$ porte peu d'informations concernant le dispositif présent. Une extension d'une mesure régulière de la courbe $J-V$ est la mesure de la réponse du courant dépendant de la longueur d'onde, typiquement effectuée en polarisation zéro. Cela est référé à ce qu'on appelle le "rendement quantique" (QE) qui, après une normalisation appropriée, représente la fraction des photons de longueur d'onde λ qui sont convertis en paires électron-trouet collectées en tant que courant. Les mesures de QE sous la lumière ou la polarisation électrique, peuvent également être trompeuses et l'analyse prudente est nécessaire [27, 28].

Les simulations numériques des cellules solaires ont l'avantage de bien contrôler les propriétés du dispositif et du matériau comme elles sont les paramètres à introduire du modèle, et, par conséquent, l'évaluation des tendances et des changements quantifiés dans les mesures de J - V ou QE sont possibles. Bien que quelques outils du logiciel permettent aussi la simulation des techniques liées à la mesure de capacité [29, 30].

I.8.1. Densité de courant -Voltage.

La mesure standard de J - V est réalisée à température ambiante et sous l'illumination standard « one-sun » [31]. Expérimentalement, il est nécessaire de refroidir la cellule solaire durant l'illumination, sinon la lumière intense va augmenter la température de la cellule. En bref, la cellule solaire est soumise à une source de lumière calibrée, deux contacts sont utilisés pour appliquer une tension de polarisation, et deux contacts supplémentaires sont utilisés pour déterminer le courant de la cellule résultant.

Un exemple de la caractéristique électrique J - V d'une cellule solaire sous illumination est représenté sur la figure (I.14), et à partir d'une telle caractéristique, les paramètres de performance essentiels de la cellule peuvent être extraits comme il est indiqué dans le tableau (I.5).

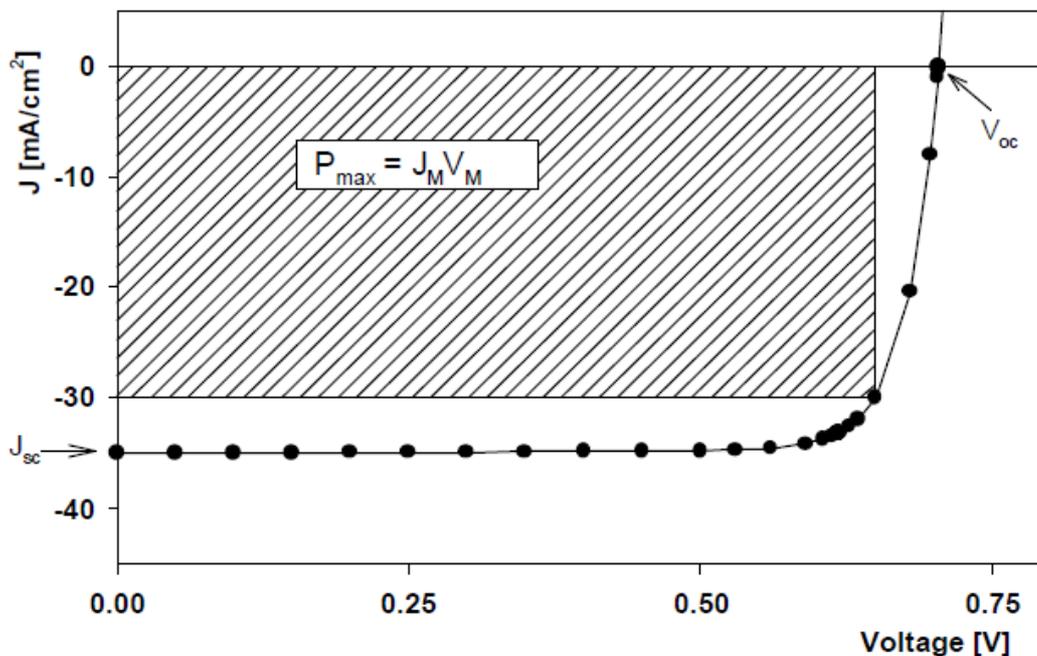


Figure I. 14 : Caractéristique électrique J - V d'une cellule solaire sous illumination, les paramètres de performance de la cellule sont aussi indiqués.

Paramètre	Symbole	Unité	déterminé par
Tension en circuit ouvert	V_{co}	V	$J=0$
La densité de courant de court-circuit	J_{cc}	mA/cm ²	$V=0$
La tension maximale	V_{max}	V	V à $(J \square V)_{max}$
Le courant maximal	J_{max}	mA/cm ²	J à $(J \square V)_{max}$
Facteur de remplissage	FF	%	$(J \square V)_{max} / (V_{co} J_{cc})$
Efficacité	η	%	$(J \square V)_{max} / P_{incident}$

Tableau I.5: Paramètres de performance de la cellule extraits d'après la courbe J - V .

Idéalement, une courbe J - V de la cellule solaire est égale à celle d'une diode à jonction

p - n décalée par le courant photo-généré (J_L), $J_L \approx J_{cc}$:

$$J(V) = J_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{KT}\right) - 1 \right] - J_L \tag{I.15}$$

Cependant, l'application de cette équation aux cellules solaires en couches minces exige que les pertes parasites soient incluses :

$$J(V) = J_0 \left[\exp\left(\frac{q(V - R_s J)}{AKT}\right) - 1 \right] + \frac{V - R_s J}{r_{sh}} - J_L \tag{I.16}$$

La résistance en série R_s , la résistance de shunt ou en parallèle r_{sh} , et le facteur de qualité de la diode A décrivent ces non-idéalités.

Le facteur de remplissage FF est lié à la puissance maximale (P_{max}) fournie par la cellule par :

$$FF = \frac{J_{\square V}^{max}}{J_{cc} V_{co}} = \frac{P_{max}}{J_{cc} V_{co}} \tag{I.17}$$

I.8.2.Rendement quantique.

La mesure de la réponse du courant à la tension de polarisation zéro et la normalisation de ce courant par la densité de flux de la lumière incidente permet de calculer le rendement quantique :

$$QE(\lambda) = \frac{J_{ph}(\lambda)}{q\phi(\lambda)} = \frac{\text{nombre des paires (electron-trou) collectées}}{\text{nombre des photons incidents}} \quad (I.18)$$

Le faisceau optique de la densité de flux total ϕ (unités de [nombre / cm²s]) est monochromatique, mais son pic à une longueur d'onde varie dans la gamme spectrale selon l'application de la cellule solaire.

Un exemple d'une courbe du rendement quantique QE avec l'inclusion des mécanismes de perte est illustré dans la figure. (I.15).

Les pertes par "réflexion" sont introduites par un revêtement partiel de la surface frontale par des contacts non-transparents (c. doigts de contact métalliques) ou par réflexion aux interfaces du matériau. Expérimentalement, ces pertes sont minimisées par l'application d'un revêtement anti-réfléctif.

L'absorption de la couche "Fenêtre" dans la région de courte longueur d'onde est négligeable en raison du gap d'énergie large du matériau de la fenêtre. Cependant, l'absorption dans la couche de SnO₂ peut diminuer le rendement quantique dans la région des longueurs d'onde élevées.

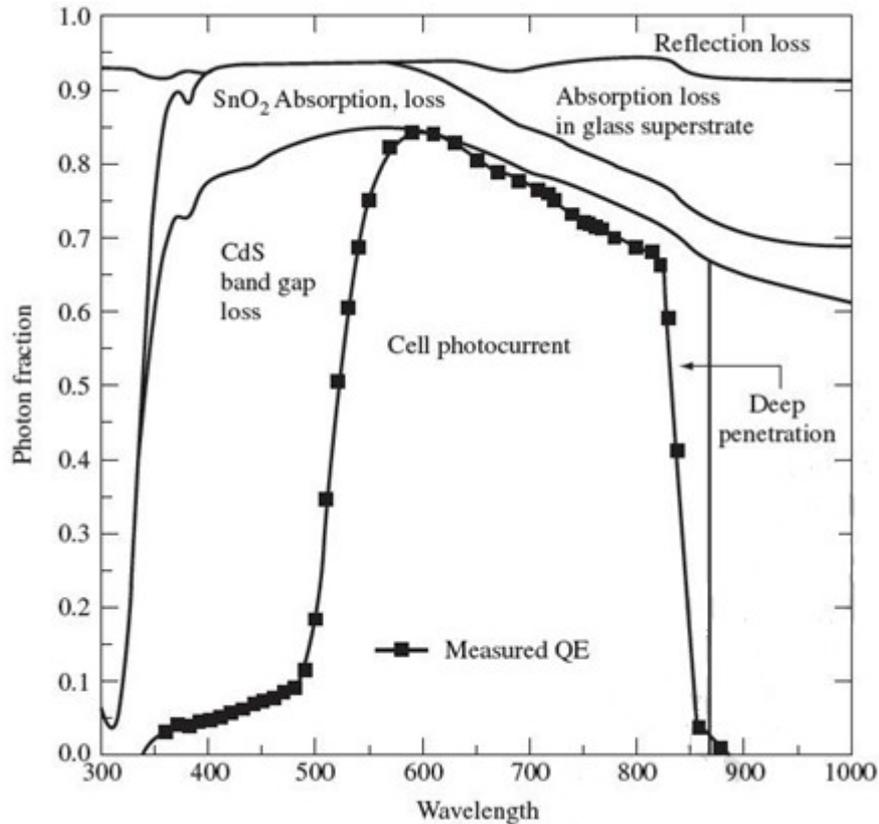


Figure. I-15 : Exemple d'une courbe du rendement quantique pour une cellule solaire à base de CdTe avec l'inclusion des pertes possibles [32].

L'absorption dans la couche "tampon" représente l'une des principales pertes dans les cellules solaires actuelles en couche mince à base de CdTe et CIGS. L'amincissement de la couche CdS ou la remplacer par un matériau à gap d'énergie plus large sont des alternatives possibles.

Les pertes "de recombinaison" sont introduites par des rendements de collection des porteurs photo-générés moins - que - l'idéal. Plus la longueur d'onde est longue, plus la photo-génération des porteurs est profonde, et plus la probabilité de recombinaison est élevée.

La « pénétration profonde » des porteurs. Ces pertes sont inhérentes à chaque semi-conducteur comme la lumière avec des photons d'énergie

$h \nu < E_g$ n'est pas absorbé.

La figure (I-16) montre les courbes du rendement quantique QE (\square) de la cellule solaire à base de CdTe dépendant des méthodes de déposition [20].

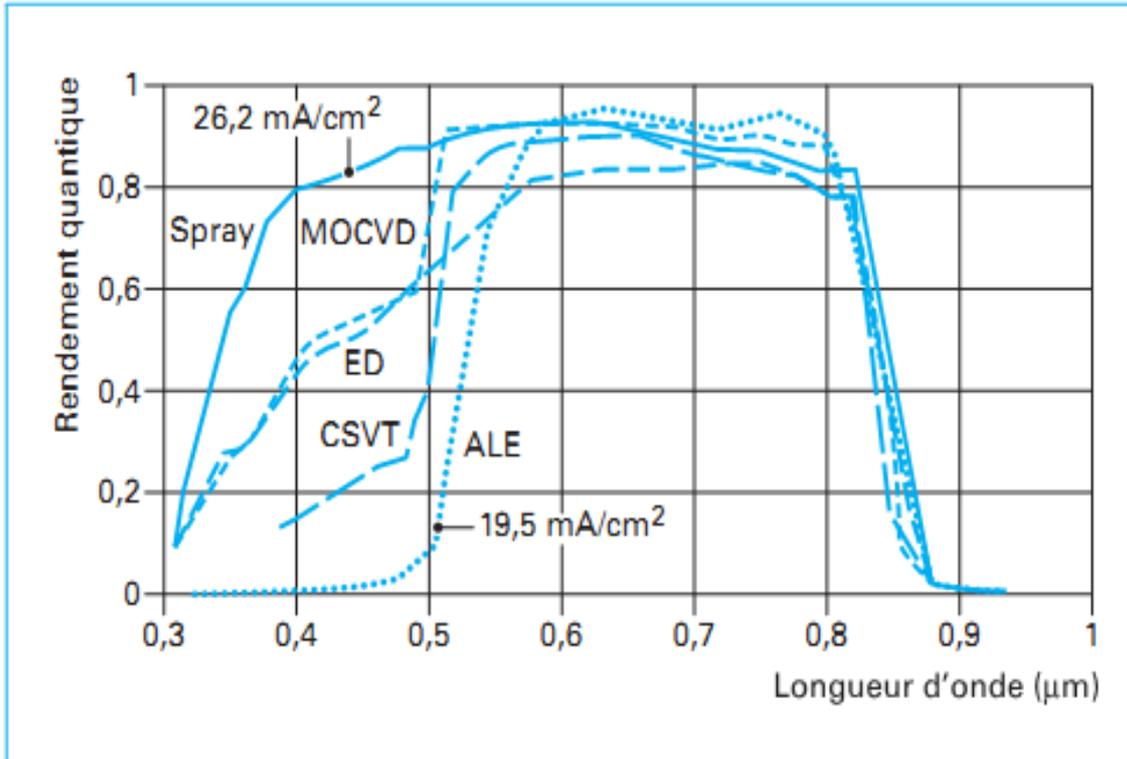


Figure. I-16 : Courbes du rendement quantique QE (\square) de la cellule solaire à base de CdTe dépendant des méthodes de déposition [20].

Les meilleurs résultats obtenus l'on tété par l'équipe de T. L. Chu et Sh. S. Chu de l'université de « South Florida » qui ont déposé le CdS par CBD et le CdTe par CSS ; ils ont en outre ajouté un film de MgF_2 agissant comme antireflet sur la surface du verre. Ils obtiennent :

- un facteur de qualité $n = 1.6$;
- une densité de courant de saturation $J_s = 2 \times 10^{-11} A/cm^2$;
- une tension de circuit ouvert $V_{co} = 0.843 V$;
- une tension d'utilisation $V_{pm} = 0.720 V$;
- une densité de courant de court-circuit $J_{cc} = 25.1 mA/cm^2$;

- un facteur de forme $FF = 0.745$;
- un rendement de conversion $\eta = 15.8\%$ sous un spectre AM 1.5.

Chapitre II :

Le transport dans la
cellule solaire en CdTe

1 : Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons les modèles physiques appropriés pour décrire les phénomènes de transport, d'absorption, de génération et de recombinaison, se produisant dans un milieu semi-conducteur. Ces modèles constituent les éléments de base dans la conception de la simulation numérique, particulièrement dans les applications des cellules solaires.

II-2 Equations de transport:

L'ensemble des équations phénoménologiques décrivant le processus de transport dans un dispositif à base de semi-conducteur contient [33, 34,35], généralement, l'équation de Poisson (équation (II.1)), les équations de continuité des électrons et des trous libres (équations (II.2)-(II.3)), et les équations des densités de courants des électrons et des trous (équation (II.4)-(II.5)). En absence d'un champ magnétique et d'un gradient de température le long du dispositif, les équations s'écrivent comme suit:

$$\Delta\psi = -\frac{\rho}{\epsilon_r\epsilon_0} \tag{II.1}$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \text{div } J_n - U_n + G \tag{II.2}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \text{div } J_p - U_p + G \tag{II.3}$$

$$J_n = -qn\mu_n \text{ grad } \psi + qD_n \text{ grad } n \tag{II.4}$$

$$J_p = -qp\mu_p \text{ grad } \psi - qD_p \text{ grad } p \tag{II.5}$$

Dans ces équations, t est le temps (s), $\epsilon_r\epsilon_0$ la permittivité du semi-conducteur (F cm^{-1}), ψ est le potentiel électrique (V). ρ la densité de

charge d'espace ($C\text{ cm}^{-3}$). J_n et J_p les densités de courants des électrons et des trous ($A\text{ cm}^{-2}$). G est le taux de génération optique ($\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$). U_n et U_p sont les taux nets de recombinaison des électrons et des trous ($\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$) respectivement. n et p les densités des électrons et des trous libres (cm^{-3}). μ_n et μ_p sont les mobilités des électrons et des trous ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$). D_n et D_p sont les coefficients de diffusion des électrons et des trous (cm^2s^{-1}). $\frac{\partial n}{\partial t}$ et $\frac{\partial p}{\partial t}$ sont les taux de variation des densités des électrons et des trous libres avec le temps ($\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$).

Pour le cas stationnaire, en considérant la cellule comme un dispositif unidimensionnel, ces équations s'écrivent comme suit [33,34]:

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_r \epsilon_0} \tag{II.6.a}$$

$$\frac{1}{q} \frac{dJ_n(x)}{dx} - U_R(x) + G(x) = 0 \tag{II.6.b}$$

$$-\frac{1}{q} \frac{dJ_p(x)}{dx} - U_R(x) + G(x) = 0 \tag{II.6.c}$$

avec

$$\rho(x) = q(p(x) - n(x) + p_t(x) - n_t(x) + N_{AD}(x)) \tag{II.7.a}$$

$$J_n(x) = -q\mu_n n(x) \frac{d\psi(x)}{dx} + k_B T \mu_n \frac{dn(x)}{dx} \quad (\text{II.7.b})$$

$$J_p(x) = -q\mu_p p(x) \frac{d\psi(x)}{dx} - k_B T \mu_p \frac{dp(x)}{dx} \quad (\text{II.7.c})$$

$$J_T = \frac{1}{d} \int_0^d (J_n(x) + J_p(x)) dx \quad (\text{II.7.d})$$

Ici, les coefficients de diffusion $D_{n,p}$ sont exprimés en fonction de $\mu_{n,p}$

selon la relation d'Einstein $D_{n,p} = \frac{k_B T}{q} \mu_{n,p}$. J_T est la densité du courant total

(A cm^{-2}).

Dans l'équation (II.7.a), $n_t(x)$ et $p_t(x)$ sont les densités de charges (cm^{-3}) négatives et positives dans les états des défauts :

$N_{AD}(x)$ est la densité du dopage le long de la cellule. Pour une cellule à jonction *n-p* abrupte :

$$N_{AD}(x) = \begin{cases} +N_d \text{ a l'é gauche} \\ -N_a \text{ a l'é droite} \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

En cas d'illumination, le taux de génération optique, $G(x)$, dans les équation (II.6.b)-(II.6.c), est donné par la loi exponentielle décroissante depuis la région de photo-génération.

Dans l'état stationnaire, le taux de recombinaison total des électrons à égale à celui des trous. On peut définir le taux de recombinaison total

$U_R(x)$
; tel que

$$U_n(x) = U_p(x) = U_R(x) \quad (II.11)$$

Les équations de transport, définies par les équations (II.6)-(II.7), sont des équations couplées formant un système non linéaire. Ce système ne peut être résolu analytiquement mais par des méthodes numériques avec l'approche typique : (1) discrétisation (maillage) du dispositif, (2) discrétisation des équations (II.6)-(II.7), (3) application des conditions aux limites (contacts), et (4) résolution de l'équation matricielle résultante par

itération. Lors de la résolution, le potentiel ψ , les densités n et p des électrons et des trous libres sont utilisées comme étant les variables principales (primaires) à déterminer. Les autres quantités telles que ; le

champ électrique ξ , les densités de courant J_n et J_p , sont les variables dérivées ou secondaires calculées d'après la dérivation des variables principales. Les densités de charges dans les états des défauts et le taux de recombinaison dépendent aussi des densités des électrons et trous libres.

II-3 : Absorption- Génération optique des paires électron-trou et recombinaison :

II-3-1 : Absorption optique :

Le phénomène d'absorption qui se produit dépend de l'énergie (fréquence) de la lumière (photon) incidente. L'énergie minimale nécessaire au photon incident pour provoquer la transition électronique dépend de la largeur du gap d'énergie E_g du matériau constituant la cellule

[36], les photons de faibles énergies, ($h\nu < E_g$), passent à traves le semi-conducteur, n'apportant alors aucune contribution à la conversion photovoltaïque. Le coefficient d'absorption est négligeable et la radiation lumineuse traverse le matériau avec une atténuation quasiment nulle. Si, les photons sont de grandes énergies ($h\nu \geq E_g$), l'absorption augmente. En outre, l'énergie au-dessus de E_g n'augmente pas l'absorption au-dessus de son seuil. Cet excès est perdu sous forme de chaleur [36].

L'énergie des photons correspondant à une radiation donnée est reliée à sa longueur d'onde par la relation [37] :

$$E_p = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{II-13})$$

ν : fréquence de la radiation , λ : longueur d'onde de la radiation en μm , c : vitesse de la lumière, E_p : Energie du photon en eV et h : constante de Planck.

Une radiation lumineuse rencontrant un semi-conducteur est absorbée suivant la loi de Bougner-Lambert [37] :

$$I(x) = I_0 (1-R) \exp(-\alpha x) \quad (\text{II-14})$$

$I(x)$: intensité du flux lumineux au point x à l'intérieur du matériau, I_0 : intensité du flux incident sur la surface du matériau, $\alpha(\lambda)$: coefficient d'absorption, traduit la probabilité d'absorption d'un photon par unité de longueur. Il change selon le matériau, R : coefficient de réflexion représentant la part de l'énergie lumineuse incidente I , réfléchi à la surface du matériau et x : profondeur d'absorption du faisceau dans le matériau à partir de la surface du semi-conducteur.

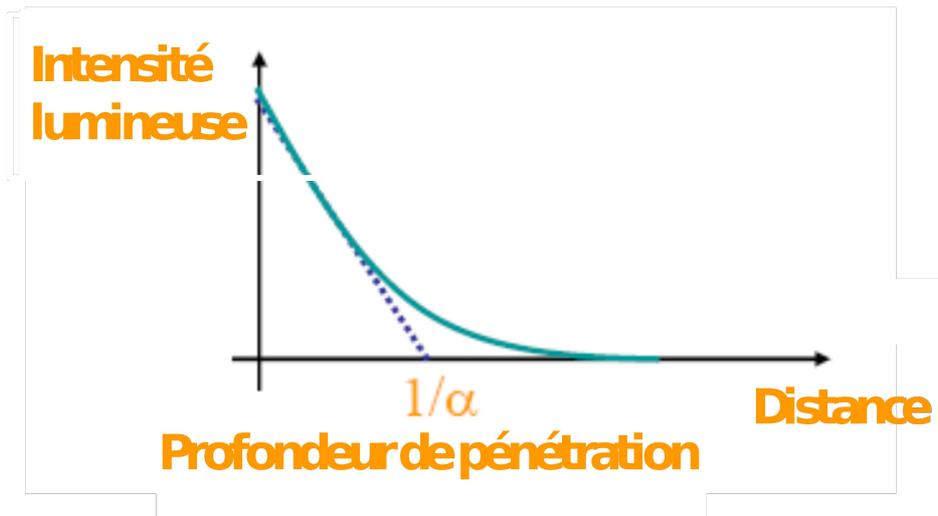


Figure II. 1 : Profondeur de pénétration lumineuse.

L'inverse de la profondeur de pénétration optique définit le coefficient d'absorption α (cm^{-1}). C'est une caractéristique optique du matériau. La figure II.2 présente le spectre du coefficient d'absorption $\alpha(\lambda)$ pour différents matériaux semi-conducteurs y compris le CdTe.

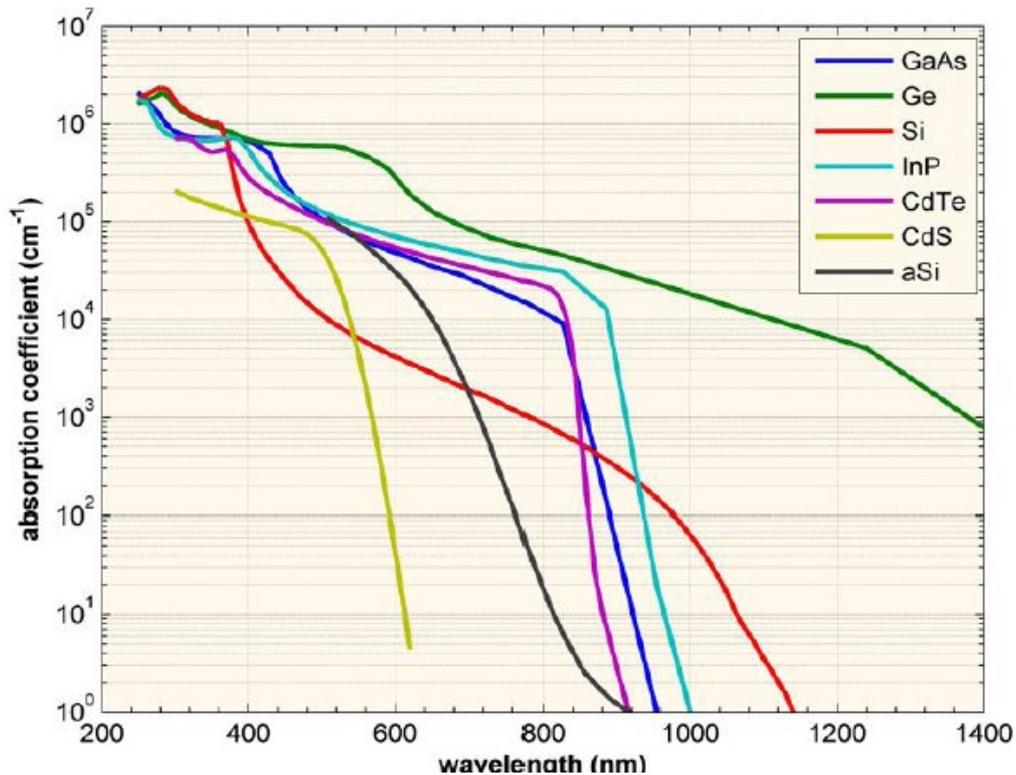


Figure II-2 : Spectre d'absorption ($\alpha(\lambda)$) pour différents matériaux semi-conducteurs y compris le CdTe.

Quand les photons incidents ont une énergie suffisante pour provoquer le transfert des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction, des paires électron-trou peuvent se créer. Ce phénomène, appelé mode d'absorption intrinsèque ou fondamentale, prédomine dans les cellules solaires [37].

II-3-2 : Génération optique des porteurs :

La génération des porteurs est un processus pour reconstituer l'équilibre d'un semi-conducteur qui a été perturbé [38]. Dans un semi-conducteur homogène, l'intensité de radiation incidente diminue dans le matériau en vertu d'une loi exponentielle avec la profondeur x . On définit la densité de flux $\Phi(x)$ à la profondeur x de la surface x_0 par [39] :

$$\Phi(x) = \Phi(x_0) \cdot \exp(-\alpha_m(x-x_0)) \tag{II-15}$$

$\Phi(x_0)$: la densité du flux de photons à la surface x_0 (photons/cm²s).
 $\alpha_m(\lambda)$: le coefficient d'absorption et m un indice reflétant le matériau ou la région (SnO₂, CdS ou CdTe) dont le coefficient d'absorption est α_m .

Le taux de génération $G(x)$ est [39] :

$$G(x) = \frac{-d\Phi}{dx} = \alpha_m \Phi(x_0) \exp(-\alpha_m(x-x_0)) \tag{II-16}$$

Cette équation s'applique dans toutes les régions de la cellule en considérant les $\Phi(x_0)$ et x_0 appropriés à chaque région (SnO₂, CdS ou CdTe). La réflexion arrière implique qu'une fraction de la lumière qui atteint le contact arrière, $R_B < 1$, inverse sa direction de propagation au niveau du contact arrière et devient incidente sur le dispositif "depuis l'arrière." Si

l'épaisseur de la couche absorbante CdTe est W_{CdTe} , l'intensité de la lumière réfléchie est [39].

$$\Phi_{\text{reflected}} = R_B \cdot \Phi(W_{\text{CdTe}}) \quad (\text{II-17})$$

L'équation (II-16) décrit la génération due à une source de lumière monochromatique. Dans la pratique, la lumière incidente a tout un spectre et la simulation suppose une illumination standard "one-sun", également désignée par "AM1.5" [40]. Le taux de génération totale est la somme de tous les taux de génération fonction de λ .

II-2-3 : Recombinaison :

Quand un semi-conducteur est ramené hors d'équilibre, par une illumination instantanée ou par une polarisation électrique, les concentrations des électrons et des trous libres tendent à relaxer vers leurs valeurs de l'équilibre par un processus appelé **recombinaison** dans lequel un électron de la bande de conduction tombe dans la bande de valence en éliminant un trou. Il existe plusieurs types de recombinaison. La recombinaison indirecte à travers un état de défauts dans le gap interdit, la recombinaison **radiative** directe (bande de conduction-bande de valence), et la recombinaison **Auger** [41]. Ces trois processus sont illustrés dans la figure (II-3).

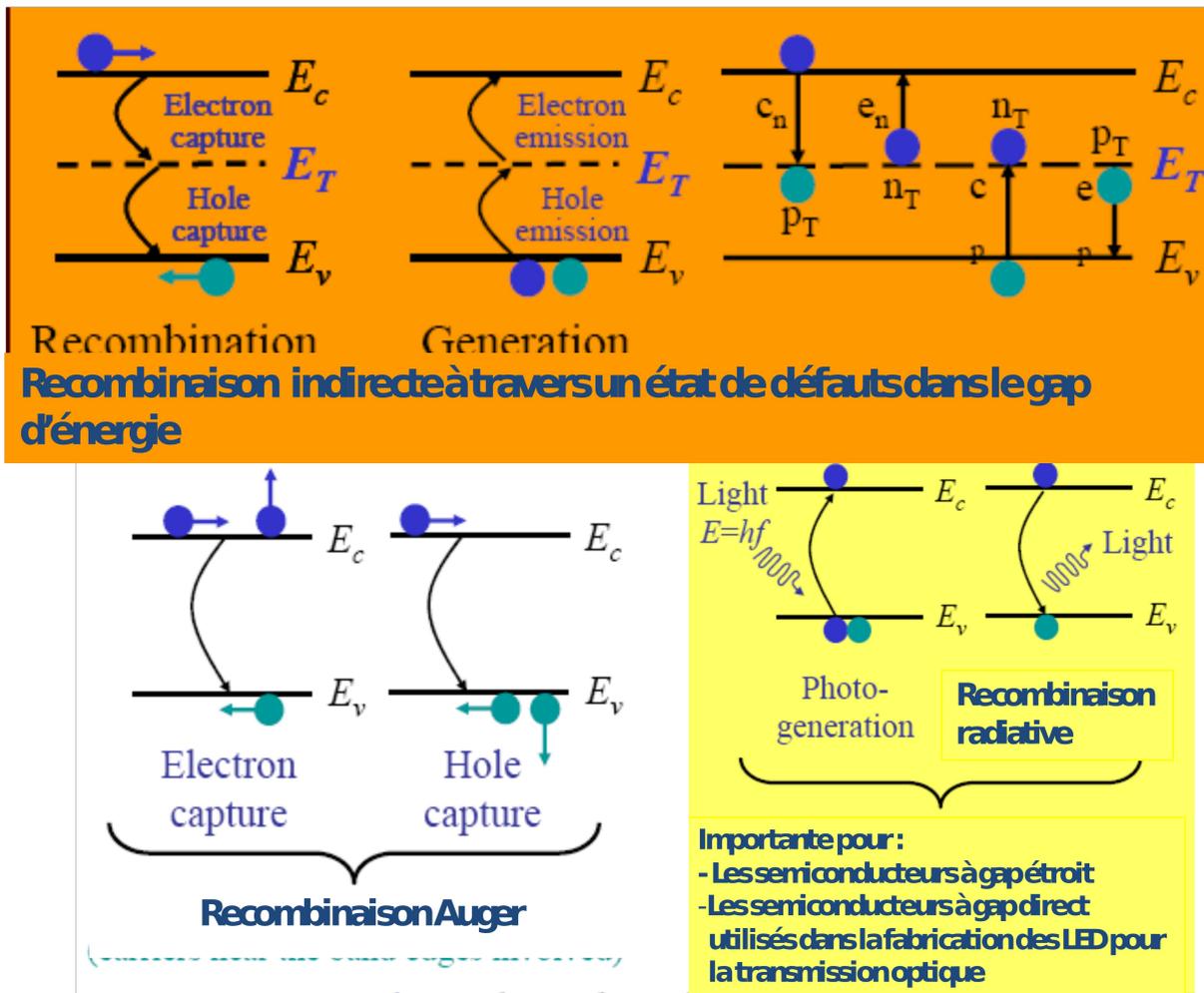


Figure II-3 : Les processus des recombinaisons dans un semi-conducteur.

Le taux de recombinaison net à travers l'état de défaut E_T supposé être au milieu du gap d'énergie, appelé également le taux de recombinaison Shockley -Read -Hall est donné par [42]:

$$R_{srh} = \frac{E_T}{E_i - E_T} \frac{e^{(E_i - E_T)/kT} + \tau_{srh,p} \frac{p + n_i e^{(E_i - E_T)/kT}}{n \cdot p - n_i^2}}{\tau_i} \quad (II-19)$$

Où la durée de vie des porteurs est donnée par [14]:

$$\tau_{srh} = \frac{1}{\sigma \vartheta_{th} N_T} \quad (II-20)$$

σ est la section efficace de capture, ϑ_{th} est la vitesse thermique des porteurs libres, N_T la densité des défauts, n_i la concentration intrinsèque et E_i le niveau de Fermi intrinsèque. Dans la figure II-3 sont présentés aussi les taux d'émission (e_n et e_p) des électrons et trous depuis l'état de défauts E_T , ainsi que les coefficients de leur capture (C_n et C_p) dans cet état.

La probabilité de piégeage augmente lorsque la concentration des défauts augmente, par conséquent la durée de vie des porteurs libres est inversement proportionnelle à la concentration des défauts [41].

Quelques simplifications raisonnables permettent de simplifier l'équation (II-19). Si le matériau est de type -p, $p \approx p_0 \gg n$ et si le niveau d'énergie du piège est près du milieu du gap, le taux de recombinaison peut s'écrire [41]:

$$R_{srh} = \frac{n - n_0}{\tau_{srh}} \quad (\text{II-21})$$

La recombinaison radiative bande vers bande est simplement l'inverse du processus de génération optique. Il est plus important dans les semi-conducteurs à gap direct. Quand la recombinaison directe se produit l'énergie de l'électron recombiné se transforme en un photon, c'est le principe de fonctionnement des diodes lasers et des diodes électroluminescentes (LED). Dans les semi conducteurs à gap indirect une partie de l'énergie de recombinaison peut être sous forme de phonons.

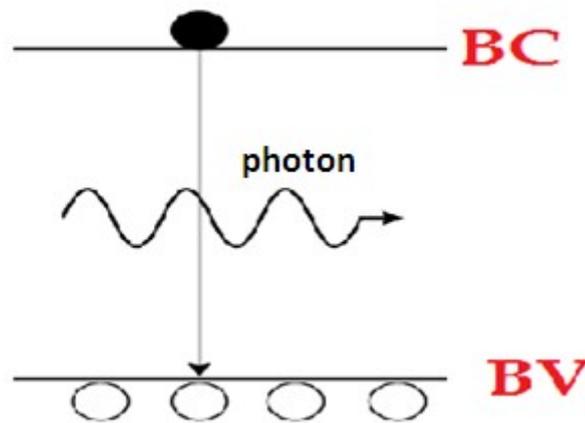


Figure II-4. Schéma descriptif du processus de recombinaison de type radiatif [43].

Le taux net de recombinaison radiative est donné par [41]:

$$R_d = B(n \cdot p - n_i^2) \quad (\text{II-22})$$

Si nous avons un semi-conducteur de type n ($n \approx n_0 \gg p$), le taux de recombinaison radiative peut s'écrire en terme de la durée de vie effective

$\tau_{d,p}$ [41]:

$$R_d = \frac{p - p_0}{\tau_{d,p}} \quad (\text{II-23})$$

Ou [12]:

$$\tau_{d,p} = \frac{1}{B \cdot n_0} \tag{II-24}$$

Une expression similaire peut être déduite pour un semi-conducteur de type p.

La recombinaison Auger un peu à la recombinaison directe sauf que l'énergie de l'électron recombinaison est transmise à un autre électron dans la bande de conduction (ou à un trou de la bande de valence). L'électron va occuper un niveau d'énergie plus haut dans la bande de conduction ensuite il se désexcite vers le minimum de la bande de conduction en émettant un phonon (voir la figure (II-3) ou la figure (II-5)).

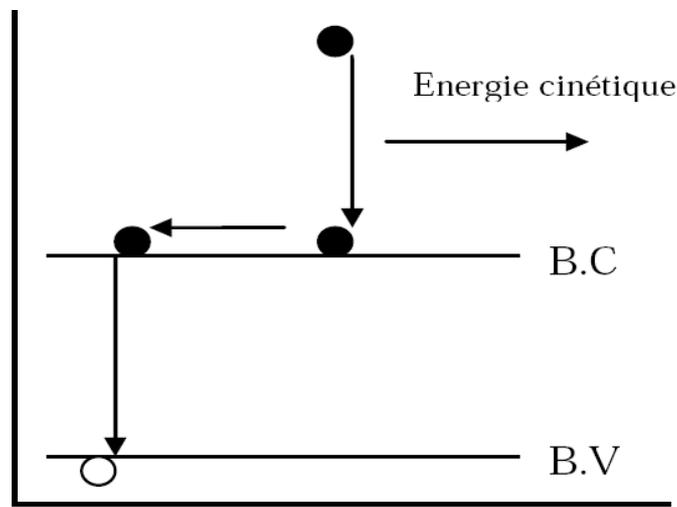


Figure II.5. Schéma descriptif du processus de recombinaison de type Auger [43].

Le taux net de la recombinaison Auger est donné par [41]:

$$R_{Auger} = (\Delta_n n + \Delta_p p) (n \cdot p - n_i^2) \tag{II-25}$$

Dans un semiconducteur de type n , le taux de recombinaison Auger peut être simplifié à [41] :

$$R_{Auger} = \frac{p - p_0}{\tau_{Auger,p}} \tag{II-26}$$

avec :

$$\tag{II-27}$$

$$\tau_{Auger, p} = \frac{1}{\Delta_n n_0^2}$$

Une expression similaire peut être déduite pour la durée de vie des électrons minoritaire dans un matériau de type p.

Ces processus de recombinaison peuvent se dérouler en même temps, par conséquent le taux de recombinaison total est donné par [41]:

$$R = \sum_i R_{srh,i} + R_d + R_{Auger} \quad (II-28)$$

Une durée de vie effective de porteurs minoritaires est donnée par [41]:

$$\frac{1}{\tau} = \sum_i \frac{1}{\tau_{srh,i}} + \frac{1}{\tau_d} + \frac{1}{\tau_{Auger}} \quad (II-29)$$

Les états de surface sont différentes du volume à cause de la fin abrupte du réseau cristallin. Ceci est le cas d'un contact semiconducteur –métal ou le contact entre deux semiconducteurs différents [41].

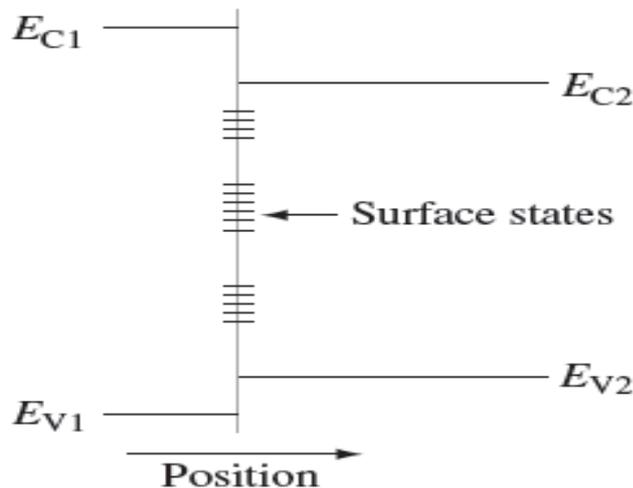


Figure II-6 Illustration des états de surface dans une surface semi-conductrice ou une interface entre deux matériaux différents tels que deux semi-conducteurs différents (hétérojonction) ou un métal et un semi-conducteur (contact Schottky) [41].

Les pièges des surfaces donnent un taux de recombinaison par unité de surface et par unité de temps qui est exprimé par la relation suivante pour un semiconducteur de type- n [42]:

$$R_s = S_p (p - p_0) \quad (\text{II-30})$$

et par la relation suivante pour un semiconducteur de type- p [42]:

$$R_s = S_n (n - n_0) \quad (\text{II-31})$$

S_n , S_p sont, respectivement, les vitesses de recombinaison surfacique des électrons et des trous.

Le courant de transport dans une hétérojonction telle que la cellule solaire $\text{SnO}_2/\text{CdS}/\text{CdTe}$ est donc influencé par les trois mécanismes de : - recombinaison dans le volume de la couche absorbante ($p\text{-CdTe}$), - recombinaison à travers les états d'interface et - effet tunnel vers les états d'interface.

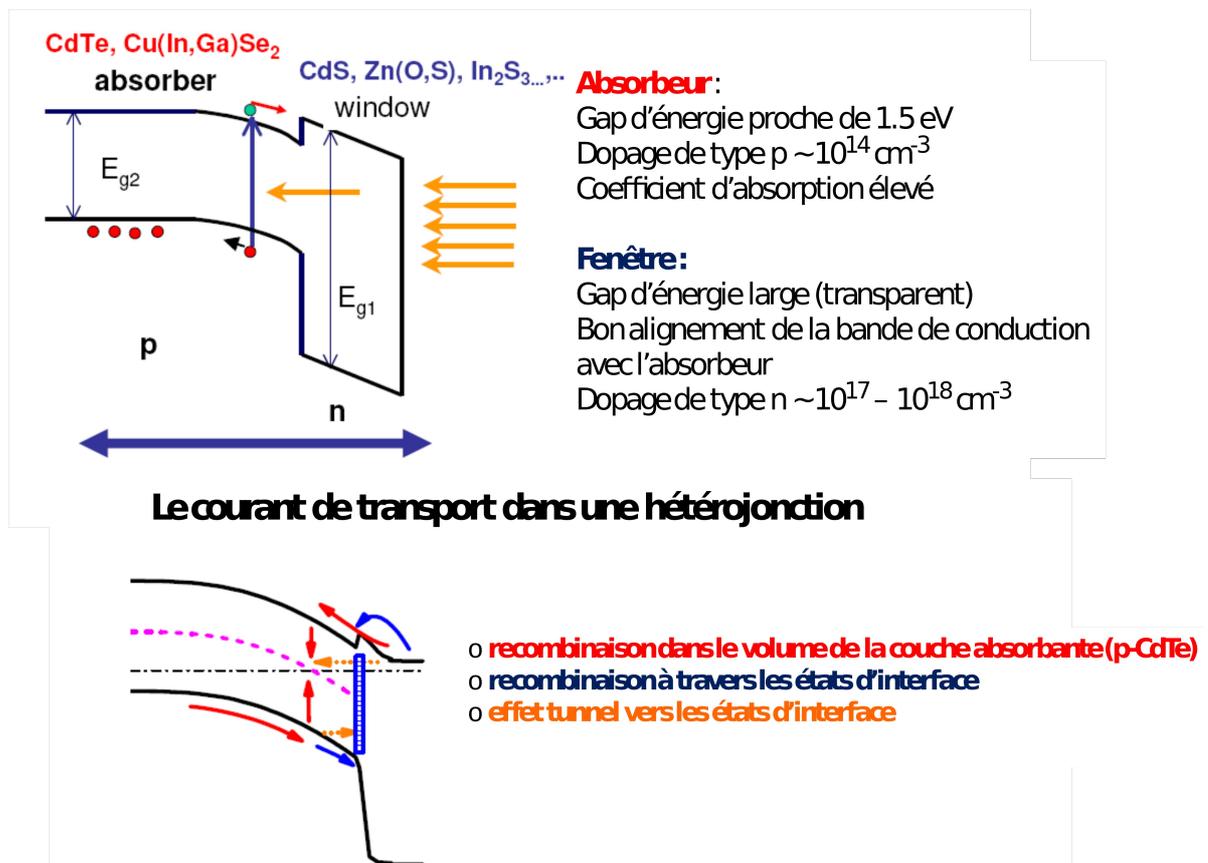


Figure II-7 : Mécanismes influençant le courant de transport dans une hétérojonction telle que la cellule solaire $\text{SnO}_2/\text{CdS}/\text{CdTe}$.

Chapitre III :

Logiciel de modélisation

AMPS

III-1 : Introduction :

L'étude théorique de la cellule solaire est réalisée généralement par deux approches :

III-1-a : Approche analytique :

Ici nous considérons des simplifications et des approximations permettant de résoudre les équations de transport qui décrivent le comportement de la cellule analytiquement.

III-1-b : Approche numérique :

Renoncer à toutes les simplifications et les hypothèses conduisant à la solution analytique nécessite des approches numériques pour résoudre les équations de transport.

Dans ce chapitre nous définissons le logiciel **AMPS-1D** et les étapes de son utilisation qui permettent de calculer numériquement les caractéristiques électriques de la cellule solaire à hétérojonction (CdS/CdTe) (cadmium-sulfide/ cadmium- tellurure) :

- ◆ La caractéristique densité de courant - tension (J - V).
- ◆ La caractéristique rendement quantique - longueur d'onde (QE - λ).

Ainsi que la densité de courant de court circuit (J_{cc}), la tension de circuit ouvert (V_{co}), le facteur de remplissage (FF), et le rendement de conversion photovoltaïque (η).

III-2 : Généralités sur le programme :

III-2-1 : Définition du logiciel :

AMPS-1D est une abréviation de la phrase anglaise : **A**nalysis of **M**icroelectronic and **P**hotonic **S**tructures-**O**ne **D**imensional (analyse unidimensionnelle des structures micro-électroniques et photoniques) [44]. Il a été conçu pour être un outil informatique très général et polyvalent pour la conception, la simulation et l'analyse physique

unidimensionnelle des dispositifs à deux terminales comme les diodes, les capteurs à photodiodes et les dispositifs photovoltaïques [44].

III-2-2 : Bref historique :

AMPS a été développé par le professeur *Stephen Fonash* et un certain nombre de chercheurs et post-doctorants à l'institut « Electric Power Research Institute (EPRI) » de l'université de Pennsylvanie. Le projet **AMPS-1D** a été initié et développé pour le système d'exploitation UNIX. Quelques années plus tard, il y avait une demande d'AMPS-1D sur PC. Par conséquent, une version PC a été développée pour le système d'exploitation OS / 2.

A l'origine, les versions PC étaient avec des interfaces textuelles UNIX et OS / 2. Avec la popularité croissante de Windows 95, 98 et NT, la version **AMPS-1D** pour Windows 95/98/NT a été développée et c'est cette version qui va être utilisée dans ce travail.

III-2-3 : L'objectif d'AMPS :

Il permet de définir les propriétés du matériau (par exemple : la largeur de sa bande interdite (gap d'énergie), l'affinité, le dopage, les mobilités ;... etc.), et la conception du dispositif ; structure contrôlant l'ensemble de la physique du dispositif et sa réponse à la lumière, à la tension appliquée et à la température [44].

L'utilisation d'**AMPS** permet d'obtenir la réponse du dispositif à une situation donnée, par exemple à la polarisation par la lumière, par la tension électrique ou le changement de la température. Et l'exploration des changements que subissent les paramètres internes du dispositif tels que le diagramme de bande, la composante du courant, le taux de recombinaison et le champ électrique en fonction de la position, de l'intensité lumineuse, de la tension électrique et de la température. [44].

III-2-4 : Capacités d'AMPS :

Générer les caractéristiques ($J-V$) sous illumination et sans éclairage.

Générer le rendement quantique (quantum efficiency) (QE) pour des cellules solaires et des photodiodes sous tension de polarisation et lumière.

Traiter avec des dispositifs composés d'un matériau monocristallin, poly-cristallin, amorphe, ou toute une combinaison de ceux-ci [44].

III-3 : Description du cas de base :

Trois types de paramètres sont nécessaires avant le lancement de la simulation par **AMPS** :

- A) Les conditions environnementales.
- B) Les propriétés du matériau de chaque couche.
- C) Les paramètres de modélisation : le type du modèle, l'espacement de la grille pour les calculs numériques, les tensions de polarisation pour lesquelles la sortie ($J-V$) et (QE) doit être générée [45].

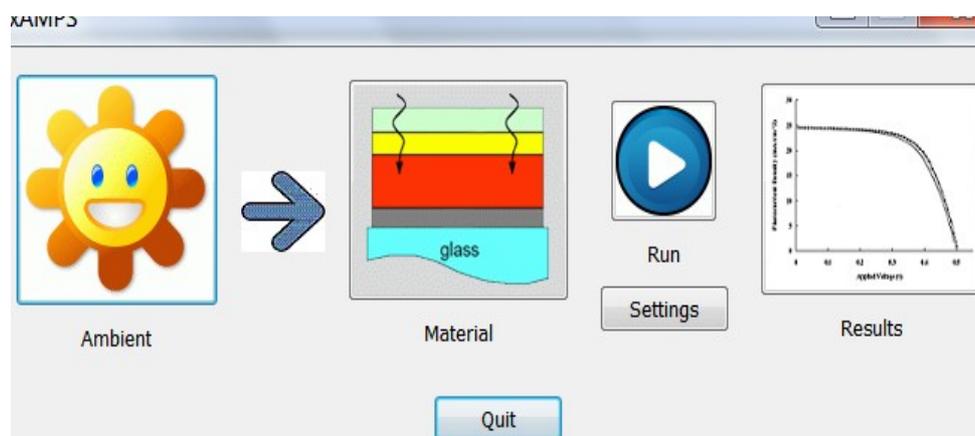


Figure III-1 : L'interface d'AMPS

A) Conditions environnementales :

Nous contrôlons la température à 300 °K (température ambiante). Si on augmente ou on diminue la température nous entrons le facteur de température dans la simulation.

Si on simule en présence de la lumière on coche dans la case correspondante.

Si on définit l'éclairage au spectre Full AM1.5.spe ; ici l'angle 41.8° correspond à la position du soleil au moment du levé ou du couché du soleil (figure III-2);

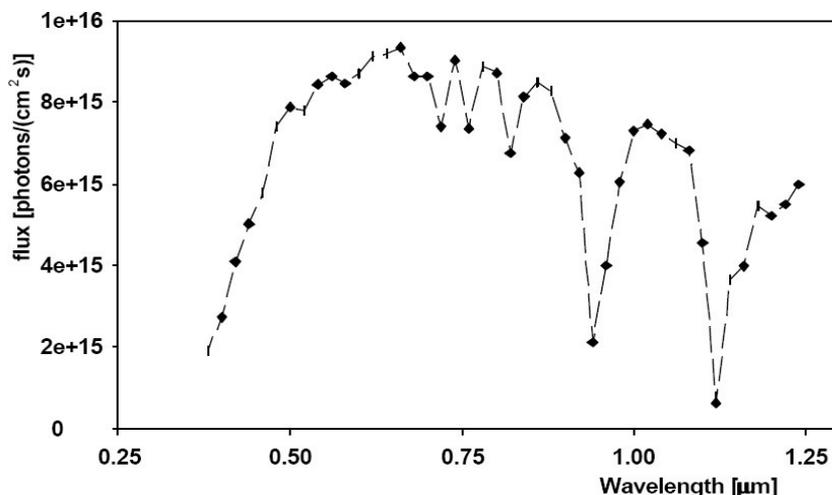


Figure III-2: Spectre d'illumination AM1.5 [45].

$I_{dis}(\lambda_i)$ est donnée par [45]:

$$I_{dis}(\lambda_i) = \int_{\lambda_i - 0.01 \mu m}^{\lambda_i + 0.01 \mu m} I_{AM1.5}(\lambda) d\lambda \quad (3-1)$$

Avec $I_{dis}(\lambda_i)$ le spectre discret. λ la longueur d'onde (μm). $I_{AM1.5}(\lambda)$ le flux des photons (nombre des photons par unité de surface de temps et de longueur d'onde [(photons/(cm²·s)/μm)]).

Si on coche dans la case de QE , le calcul comprendra aussi le calcul du rendement quantique $QE(\lambda)$:

$$QE(\lambda) = \frac{I_{ph}(\lambda)}{q\phi(\lambda)}$$

(3-2)

Définir la polarisation appliquée par la case « **Bias voltages** », en cliquant sur « **load** » on choisit la tension voulue, par exemple le choix (Light0_0.4_1.vol) (figure III-3) signifie une gamme de tension de 0 volt à 1 volt avec un pas de 0.4 volt.

Enfin, nous appuyons sur le bouton « **ok** ».

La figure III-3 présente l'interface des conditions environnementales :

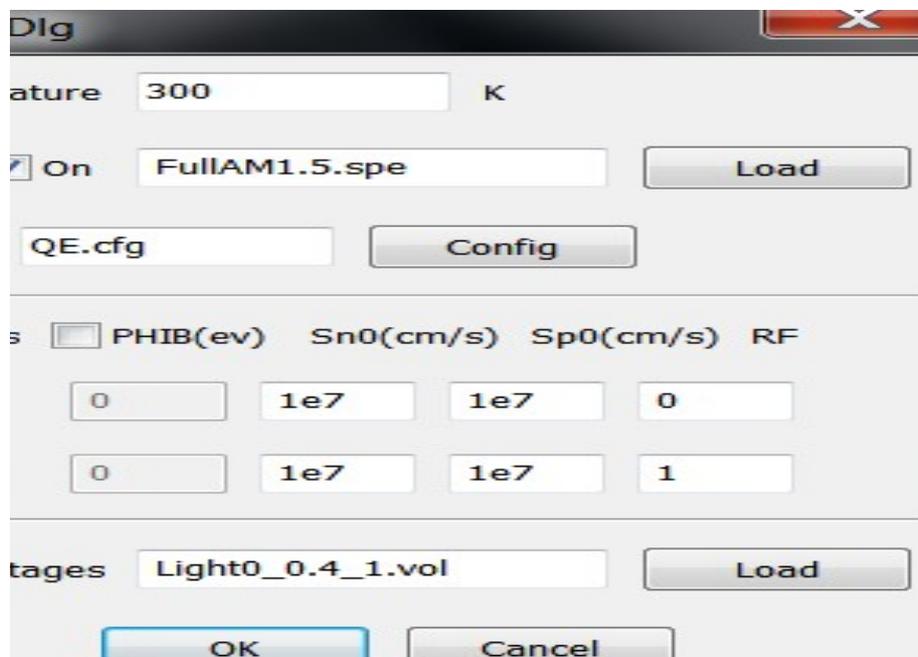


Figure III-3 : L'interface des conditions environnementales.

Observations :

Propriétés générales de la structure		
	Surface avant (x = 0µm)	Surface arrière (x = 3.1µm)
$\phi_{b0/L} = E_C - E_F$	0 eV	0 eV
Vitesse de recombinaison surfacique des électrons	10^7 cm/s	10^7 cm/s
Vitesse de recombinaison surfacique des trous	10^7 cm/s	10^7 cm/s

Réflectivité	0	1
--------------	---	---

Tableau III-1 : Propriétés générales de la structure.

B) Propriétés du matériau de chaque couche:

En cliquant sur (load) (figure III-4) on peut choisir la structure à simuler, par exemple : (CdTe_Gloeckler.dev) présente une cellule solaire à hétérojonction (CdS/CdTe) constituée de trois couches : SnO₂ d'épaisseur 0.5µm, CdS d'épaisseur 0.025 µm et CdTe d'épaisseur 4 µm. En cliquant sur la case de SnO₂ on peut apprendre ses caractéristiques (figures III-4, III-5).

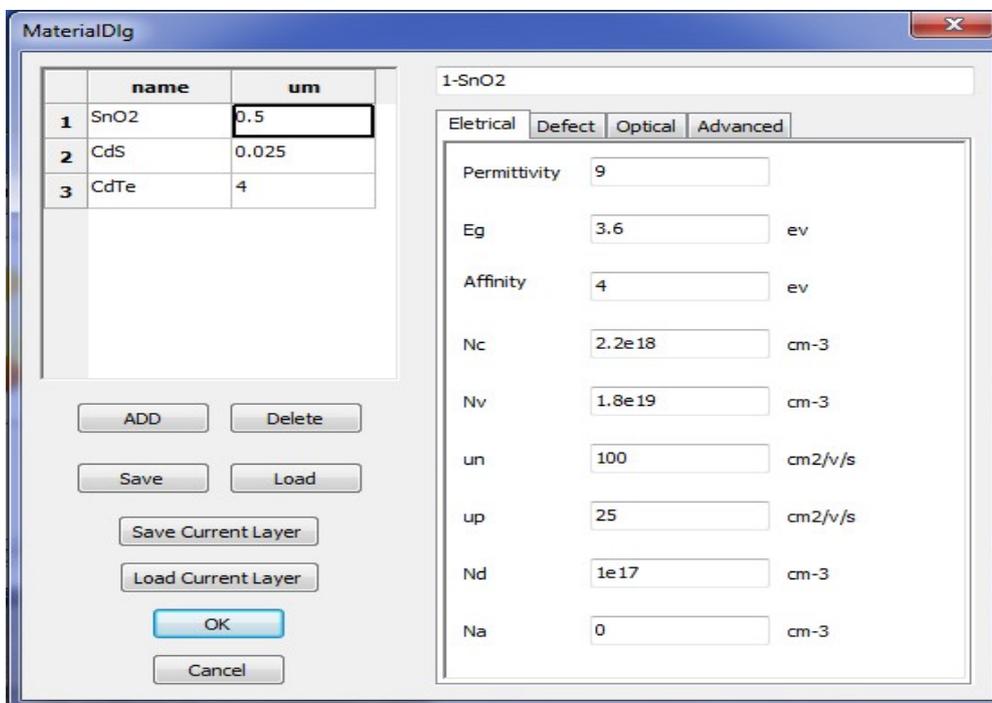


Figure III-4 : l'interface des propriétés électriques de la couche SnO₂.

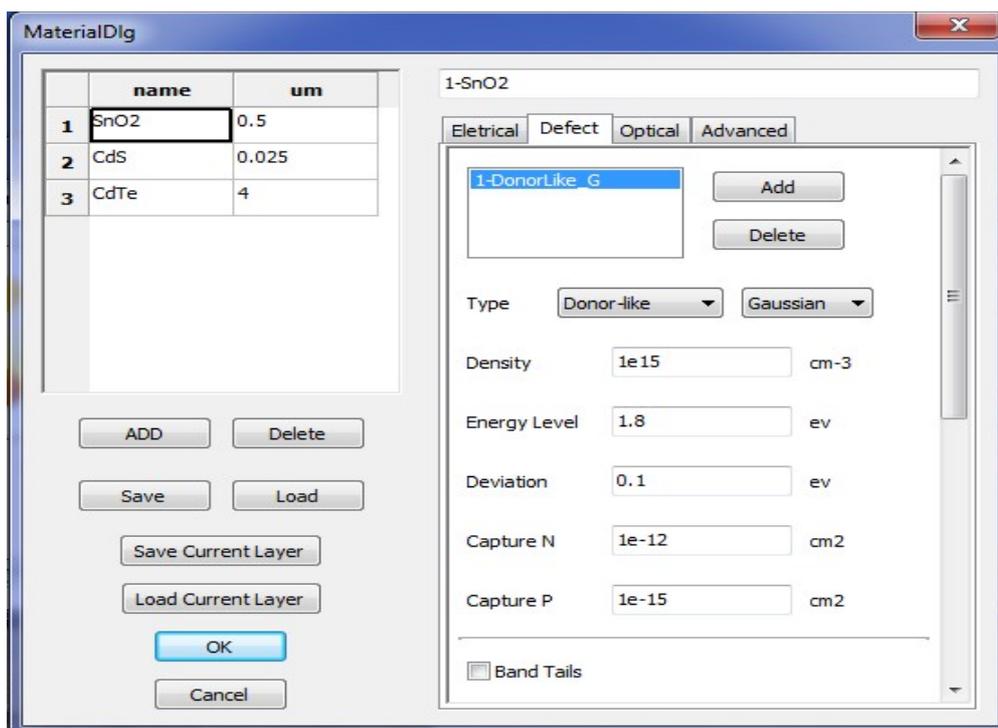


Figure III-5 : l'interface des défauts de la couche SnO₂.

De même pour les couches (CdS) et (CdTe) (figures III-6, III-7, III-8, III-9).

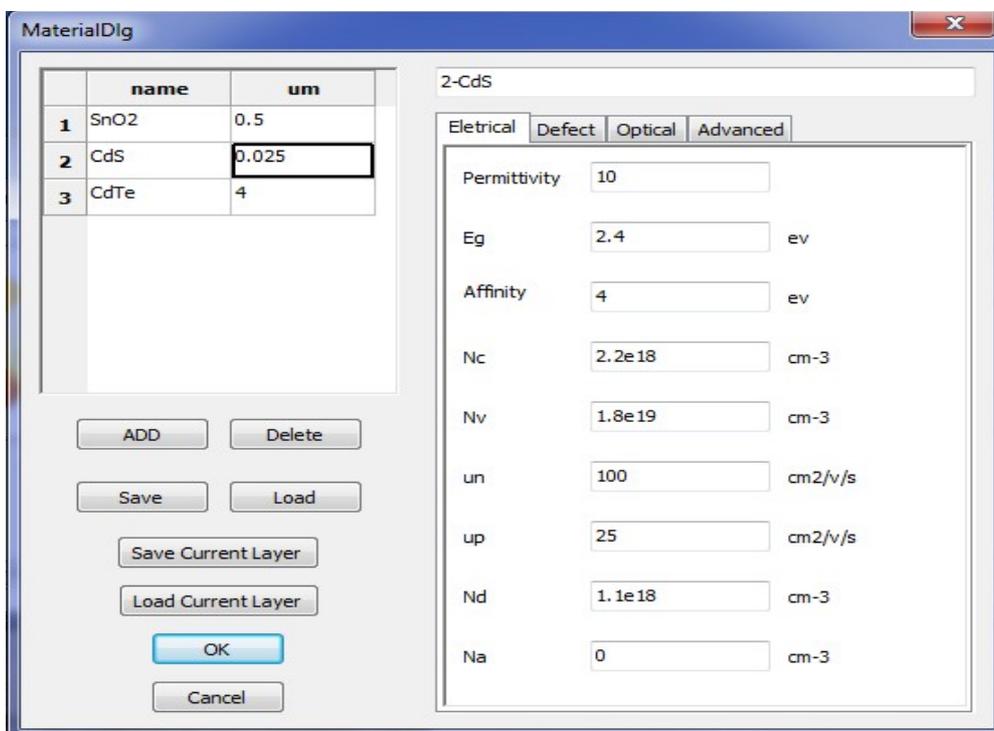


Figure III-6 : l'interface des propriétés électriques de la couche CdS.

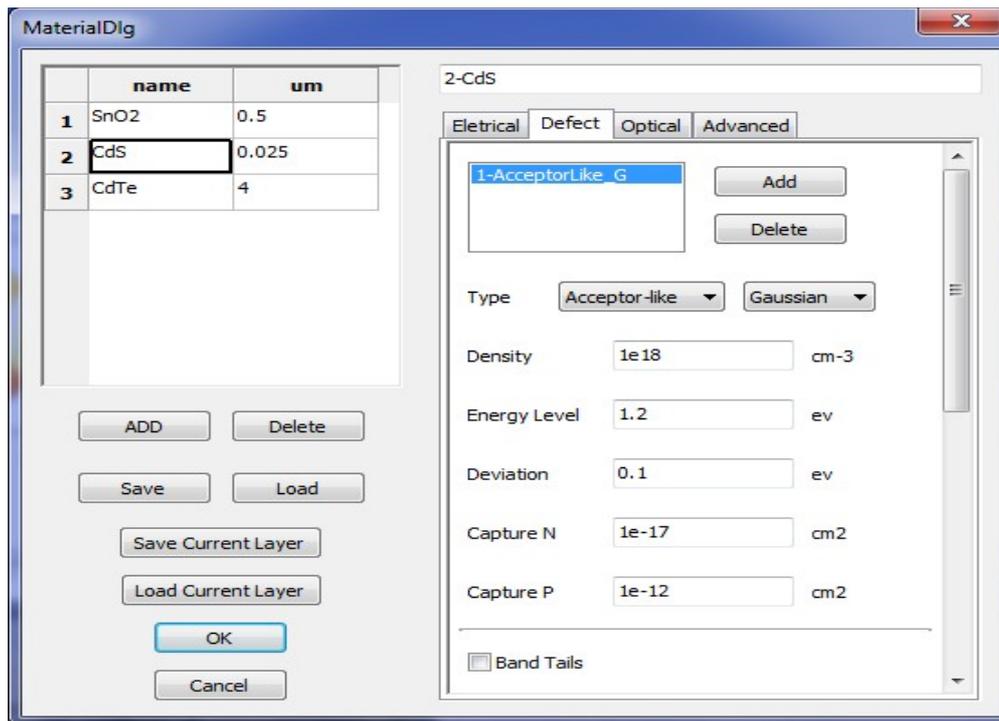


Figure III-7 : l'interface des défauts de la couche CdS.

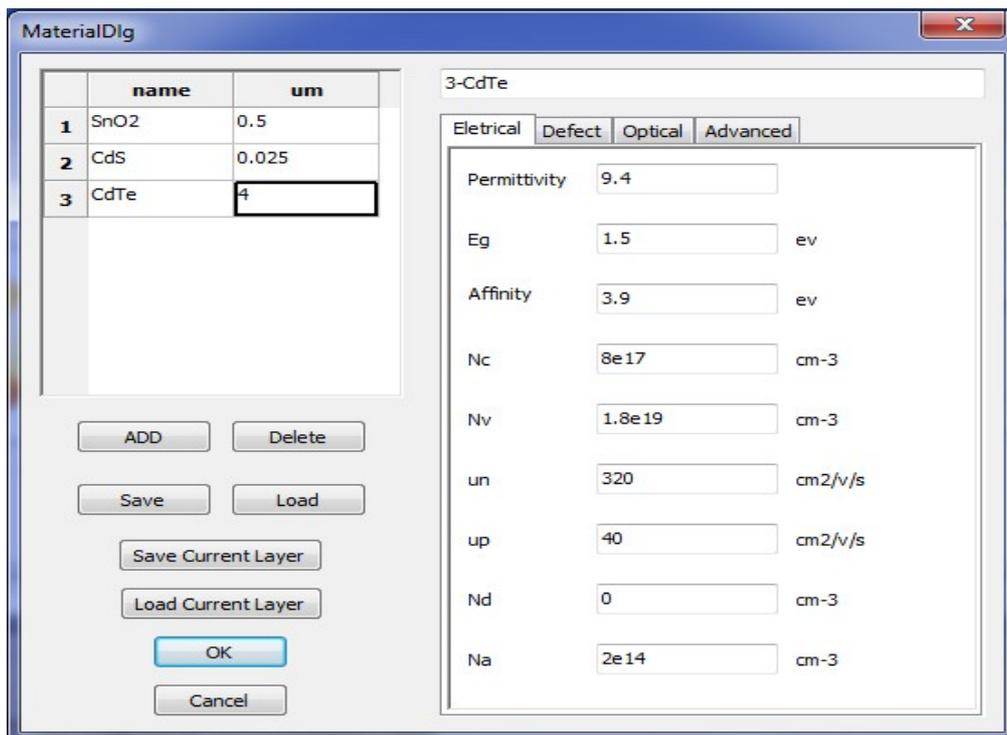


Figure III-8 : l'interface des propriétés électriques de la couche CdTe.

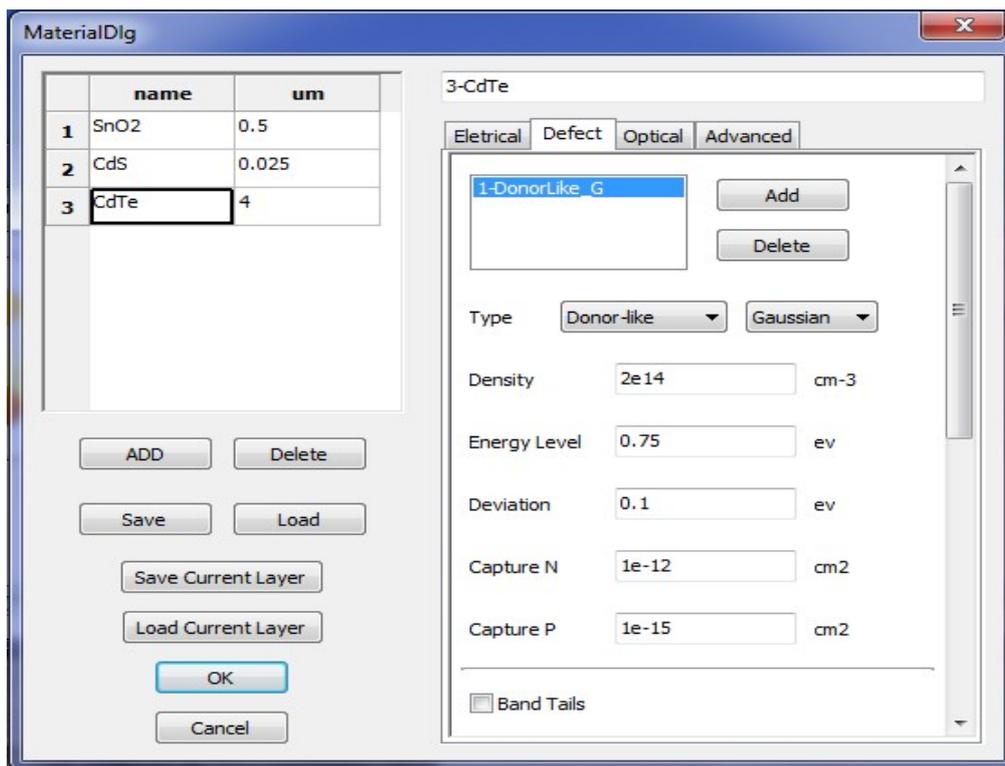


Figure III-9 : l'interface des défauts de la couche CdTe.

Enfin nous appuyons sur le bouton « ok ».

C) Les paramètres de modélisation:

Pour la simulation, nous cochons sur la case « **oui** » et ainsi le logiciel commence l'exécution de l'exemple (CdTe_Gloeckler.dev) correspondant à la structure à hétérojonction (CdS/CdTe) (figure III-10).

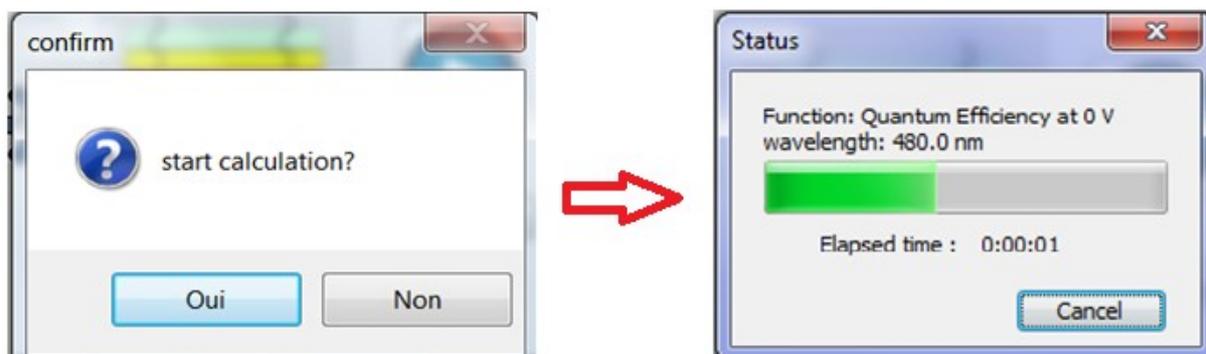


Figure III-10 : L'interface de l'exécution.

Logiciel de modélisation AMPS

Une fois le calcul est terminés, les résultats sont stockée et présentés par des courbes comme il est illustré sur la figure III-11. Connaître les résultats de la simulation de l'image suivante :

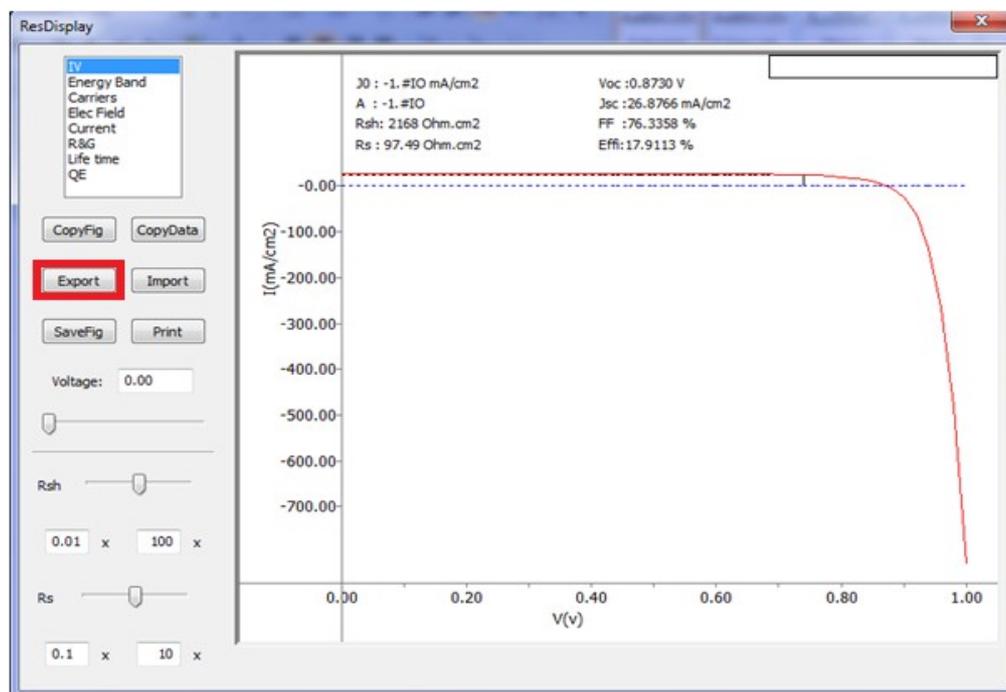


Figure III-11 : L'interface des résultats.

Les résultats concernent les caractéristiques (J - V) à l'obscurité et sous éclairage, les valeurs de la densité de courant de saturation (J_0), du facteur d'idéalité (A), de la résistance parallèle (shunt) R_{sh} , de la résistance série R_s , de la densité de courant de court circuit (J_{cc}), de la tension de circuit ouvert (V_{co}), du facteur de remplissage (FF), du rendement de conversion photovoltaïque (η), du rendement quantique externe (QE (\square)) ainsi que les grandeur internes comme le diagramme du gap d'énergie, les densités des porteurs libres ou piégés, le champ et potentiel électrique, le taux de recombinaison, les composantes du courant des électrons et des trous, les durées de vie..etc.

On peut sauvegarder tous les résultats comme des fichiers de données (fichier.dat) par la commande « **Export** » puis les tracer par un autre logiciel des graphes comme Origin.

Chapitre IV :

Résultats de la
simulation et discussion

IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons l'étude des caractéristiques électriques de la cellule solaire à hétérojonction $\text{SnO}_2/\text{CdS}/\text{CdTe}$ de structure (n-p). Où le semiconducteur de type p, le CdTe, est l'absorbeur de la cellule (c'est-à-dire la zone où les paires électrons trous sont générées sous illumination). La largeur du gap d'énergie du CdTe (~ 1.5 eV) est idéalement adaptée au spectre solaire et son très grand coefficient d'absorption autorise l'utilisation d'épaisseurs de l'ordre du micromètre pour absorber la quasi-totalité du spectre solaire. Le SnO_2 (dont la largeur du gap est ~ 3.6 eV) associé au CdS de type n (largeur du gap ~ 2.4 eV) sont utilisés comme des fenêtres d'entrée de la lumière et comme barrière de potentiel au CdTe. Une épaisseur de CdS autour de 0.025 μm permet de transmettre les radiations de longueurs d'onde inférieures à 500 nm, ce qui accroît la densité du photocourant de la cellule photovoltaïque [46].

La cellule est supposée être soumise à l'éclairement AM1.5, et en utilisant le logiciel de simulation numérique **AMPS-1D** nous allons générer les caractéristiques électriques de la cellule telles que: la caractéristique densité de courant - tension ($J-V$), la caractéristique rendement quantique -longueur d'onde ($QE - \lambda$), ainsi que la densité de courant de court circuit (J_{cc}), la tension de circuit ouvert (V_{co}), le facteur de remplissage (FF), et le rendement de conversion photovoltaïque (η). Ces caractéristiques sont étudiées et analysées sous la variation des grandeurs des paramètres : épaisseur et densité des défauts de la couche (n-CdS) et (p-CdTe).

IV.2. Structure de la cellule étudiée :

La cellule solaire étudiée dans ce travail est une hétérojonction $\text{SnO}_2/\text{CdS}/\text{CdTe}$ de structure (n-p) contenant les couches suivantes (figure IV.1) :

- La couche (1) : SnO_2 (un oxyde conducteur transparent.).
- La couche (2) : CdS (de type n.).
- La couche (3) : CdTe (de type p.).

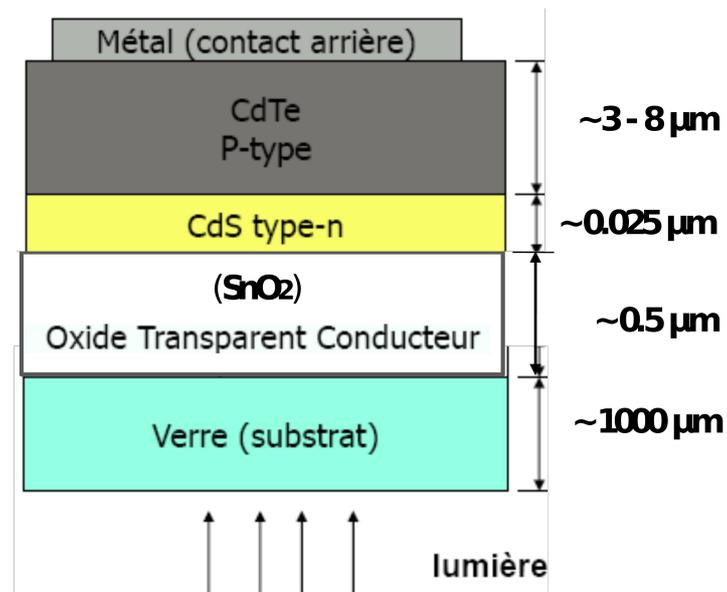


Figure IV.1 : Structure de la cellule solaire à hétérojonction (SnO₂/CdS/CdTe).

La cellule étudiée est éclairé par le spectre **AM1.5**

Les propriétés de la couche **SnO₂** sont présentées dans le tableau IV.1.

Permittivité	9	
E_g	3.6	eV
Affinité	4	eV
N_c	2.2×10^{18}	cm ⁻³
N_v	1.8×10^{19}	cm ⁻³
μ_n	100	cm ² /V/ s
μ_p	25	cm ² /V/

		s
N_d	1×10^{17}	cm^{-3}
N_a	0	cm^{-3}
Densité de défauts	1×10^{15}	cm^{-3}

Tableau IV.1 : Les propriétés de la couche SnO₂.

Les propriétés de la couche CdS sont présentées dans le tableau IV.2.

Permittivité	10	
E_g	2.4	eV
Affinité	4	eV
N_c	2.2×10^{18}	cm^{-3}
N_v	1.8×10^{19}	cm^{-3}
μ_n	100	$\text{cm}^2/\text{V}/\text{s}$
μ_p	25	$\text{cm}^2/\text{V}/\text{s}$
N_d	1.1×10^{18}	cm^{-3}
N_a	0	cm^{-3}
Densité de défauts	1×10^{18}	cm^{-3}

Tableau IV.2 : Les propriétés de la couche CdS.

Les propriétés de la couche CdTe sont présentées dans le tableau IV.3.

Permittivité	9.4	
E_g	1.5	eV
Affinité	3.9	eV
N_c	8×10^{17}	cm^{-3}
N_v	1.8×10^{19}	cm^{-3}
μ_n	320	$\text{cm}^2/\text{V}/\text{s}$
μ_p	40	$\text{cm}^2/\text{V}/\text{s}$

		S
N_d	0	cm^{-3}
N_a	2×10^{14}	cm^{-3}
Densité de défauts	2×10^{14}	cm^{-3}

Tableau IV.3 : Les propriétés de la couche CdTe.

IV.3. Résultats et discussion :

IV.3 .1 Effet de l'épaisseur sur les caractéristiques électriques de la cellule :

Les épaisseurs des différentes couches de la cellule étudiée sont groupées dans le tableau IV.4.

	Région	Epaisseur (μm)
1	n-SnO ₂	0.5
2	n-CdS	0.025
3	p-CdTe	4

Tableau IV.4: L'épaisseur de chaque couche de la cellule étudiée.

Pour étudier l'effet de l'épaisseur de chacune des couches (CdS et CdTe), on commence par changer l'épaisseur de la couche CdTe (x_p) dans la gamme (0.1 μm à 4 μm) tout en fixant l'épaisseur de la couche CdS (x_n) à 0.025 μm tel que présenter dans le tableau IV.4. Puis, on varie l'épaisseur x_n du (CdS) dans la gamme (0.015 μm à 0.065 μm) tout en fixant l'épaisseur x_p du (CdTe) à (4 μm).

Les résultats de la variation de l'épaisseur x_p du (CdTe) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule $\text{SnO}_2/\text{CdS}/\text{CdTe}$ sont groupés dans le tableau IV.5 Où le pas de variation Δx_p a été choisi à $0.1 \mu\text{m}$.

x_p (μm)	V_{co} (mA/cm^2)	J_{cc} (volt)	FF (%)	η (%)
0.1	0.6432	13.0086	82.983	6.9431
0.2	0.6665	21.2593	80.7054	11.4362
0.3	0.6801	23.3634	80.5215	12.7935
0.4	0.6878	24.4142	81.1469	13.6253
0.5	0.6967	25.0031	81.1326	14.1340
0.6	0.7041	25.3665	81.2144	14.5051
0.7	0.7115	25.6094	81.4219	14.8368
0.8	0.7208	25.7830	81.1963	15.0895
0.9	0.7284	25.9137	81.0914	15.3057
1	0.7392	26.0164	80.9061	15.5592
1.1	0.7488	26.0995	80.6558	15.7628
1.2	0.7616	26.1684	80.2162	15.9860
1.3	0.7738	26.2264	79.8876	16.2116
1.4	0.7866	26.2761	79.4702	16.4247
1.5	0.7998	26.3188	79.1163	16.6531
1.6	0.8090	26.3558	78.9897	16.8424
1.7	0.8188	26.3881	78.8932	17.0461
1.8	0.8251	26.4161	78.8783	17.1913
1.9	0.8307	26.4405	78.8959	17.3294
2	0.8363	26.4616	78.8826	17.4560
2.1	0.8409	26.4798	78.8138	17.5497
2.2	0.8438	26.4952	78.8114	17.6197
2.3	0.8466	26.5081	78.7468	17.6722
2.4	0.8493	26.5186	78.6384	17.7114

Résultats de la simulation et discussion

2.5	0.8519	26.5271	78.5321	17.7477
2.6	0.8545	26.5337	78.4306	17.7821
2.7	0.8569	26.5386	78.2968	17.8062
2.8	0.8593	26.5421	78.1387	17.8219
2.9	0.8609	26.5444	78.0282	17.8308
3	0.8621	26.5456	77.9269	17.8340
3.1	0.8633	26.5461	77.8099	17.8324
3.2	0.8645	26.5459	77.8099	17.8266
3.3	0.8656	26.5452	77.6798	17.8173
3.4	0.8668	26.5441	77.3879	17.8049
3.5	0.8679	26.5426	77.2291	17.7898
3.6	0.8689	26.5410	77.0633	17.7723
3.7	0.8700	26.5391	76.8914	17.7526
3.8	0.8710	26.5371	76.7142	17.7310
3.9	0.8720	26.5350	76.5324	17.7075
4	0.8729	26.5328	76.3465	17.6824

Tableau IV.5 : Effet de l'épaisseur x_p de la couche (CdTe) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à hétérojonction (CdS/CdTe).

Nous choisissons quelques valeurs de l'épaisseur x_p de la couche (CdTe) pour tracer :

- ✓ La caractéristique densité de courant - voltage ($J-V$).
- ✓ La caractéristique rendement quantique -longueur d'onde ($QE-\lambda$).
- ✓ Le rendement de conversion la cellule solaire étudiée (η_c).

La caractéristique $J-V$ pour l'épaisseur $x_p = 0.2 \mu\text{m}$ (CdTe) est illustrée dans la figure IV.2.

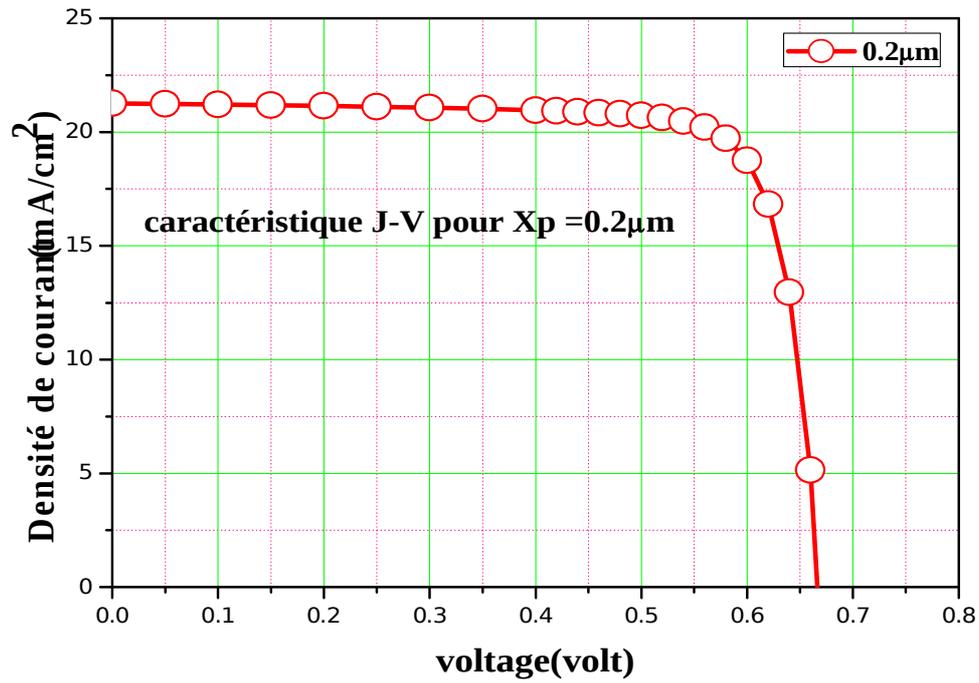


Figure IV.2 : Caractéristique J - V pour $x_p = 0.2 \mu\text{m}$ (CdTe).

La caractéristique $QE - \lambda$ pour l'épaisseur $x_p = 0.2 \mu\text{m}$ est montrée dans la figure IV.3.

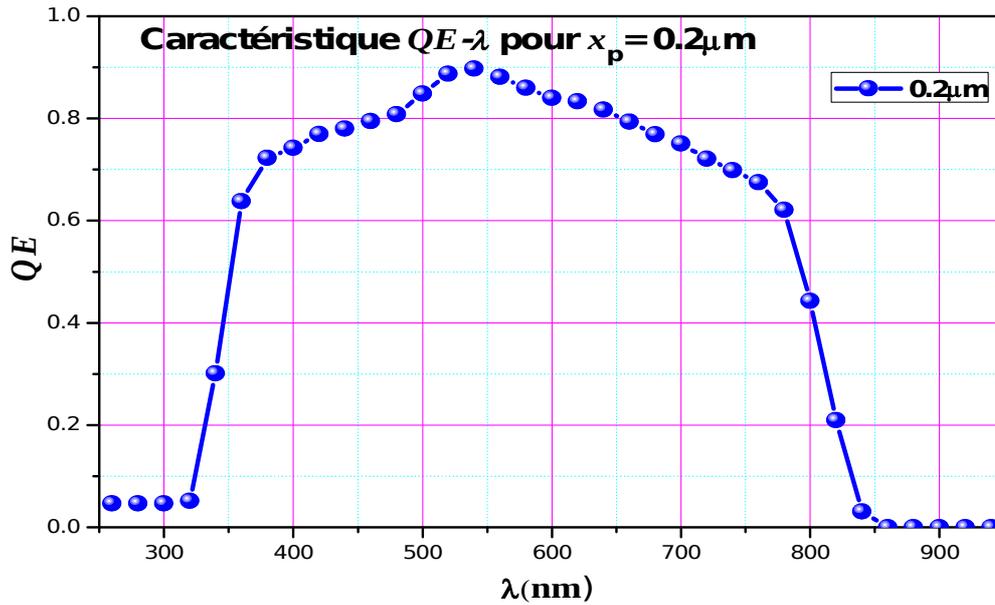


Figure IV.3 : Caractéristique $QE-\lambda$ pour l'épaisseur $x_p = 0.2 \mu\text{m}$

Les valeurs des paramètres photovoltaïques de la cellule pour l'épaisseur $x_p = 0.2 \mu\text{m}$ sont groupées dans le Tableau IV.6.

J_{cc} (mA/cm ²)	V_{co} (volt)	FF (%)	η (%)
21.2593	0.6665	80.7054	11.4362

Tableau IV.6 : Valeurs des paramètres photovoltaïques de la cellule pour l'épaisseur $x_p = 0.2 \mu\text{m}$.

On remarque que le rendement de conversion photovoltaïque est légèrement faible ($\eta \sim 11\%$), ceci est du à la petite valeur de l'épaisseur de la couche absorbante CdTe (**0.2 μm**).

La caractéristique J - V pour l'épaisseur $x_p = 1.3 \mu\text{m}$ (CdTe) est illustrée dans la figure IV.4.

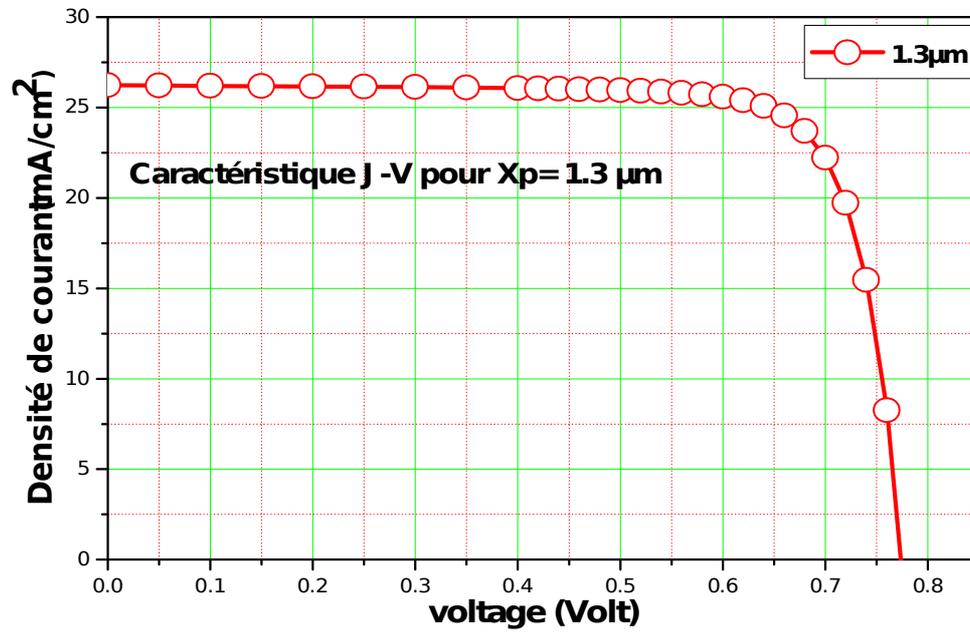


Figure IV.4 : Caractéristique J - V pour $x_p = 1.3 \mu\text{m}$ (CdTe).

La caractéristique $QE - \lambda$ pour l'épaisseur $x_p = 1.3 \mu\text{m}$ est montrée dans la figure IV.5.

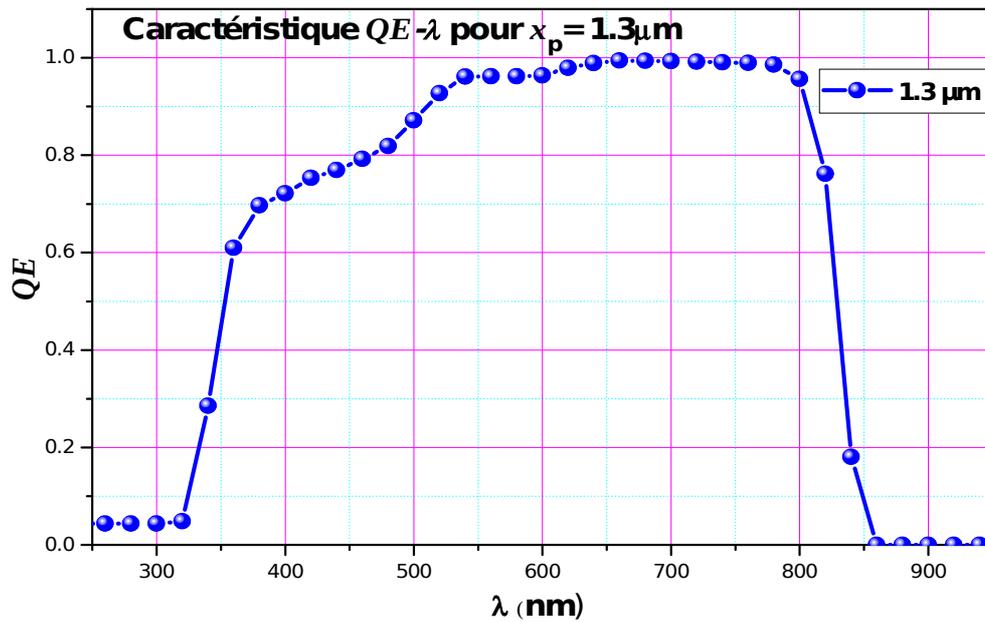


Figure IV.5 : Caractéristique $QE-\lambda$ pour l'épaisseur $x_p = 1.3 \mu\text{m}$.

Les valeurs des paramètres photovoltaïques de la cellule pour l'épaisseur $x_p = 1.3 \mu\text{m}$ sont groupées dans le Tableau IV.7.

$J_{cc} (\text{mA}/\text{cm}^2)$	$V_{co} (\text{volt})$	$FF (\%)$	$\eta (\%)$
26.2264	0.7738	79.8876	16.2116

Tableau IV.7 : Valeurs des paramètres photovoltaïques de la cellule pour l'épaisseur $x_p = 1.3 \mu\text{m}$.

La caractéristique $J-V$ pour l'épaisseur $x_p = 3 \mu\text{m}$ est illustrée dans la figure IV.6.

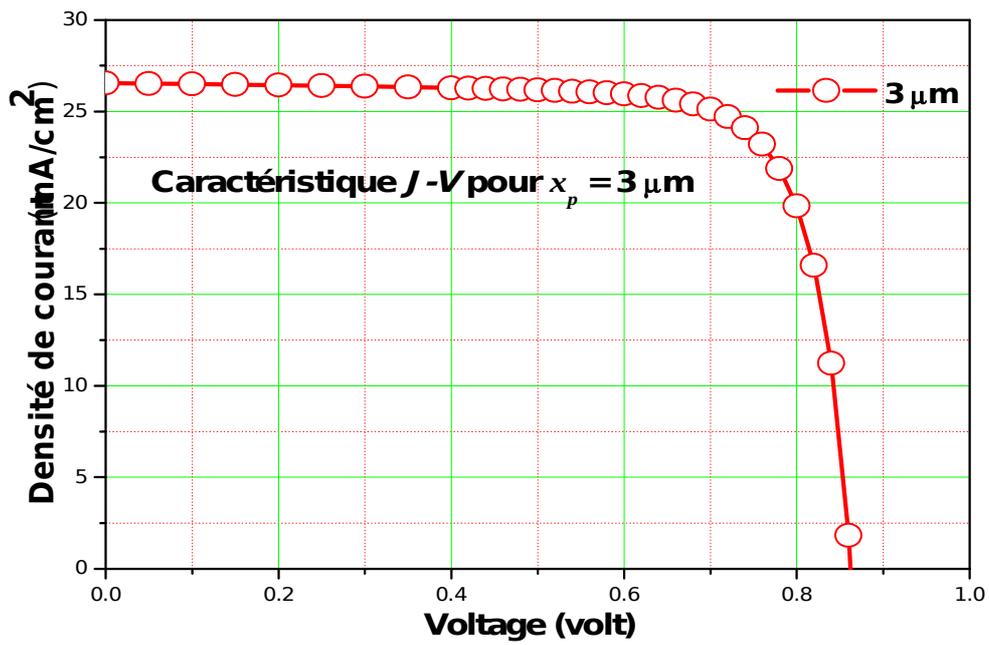


Figure IV.6 : Caractéristique J - V pour l'épaisseur $x_p = 3 \mu\text{m}$.

La caractéristique QE - λ pour l'épaisseur $x_p = 3 \mu\text{m}$ est illustrée dans la figure IV.7

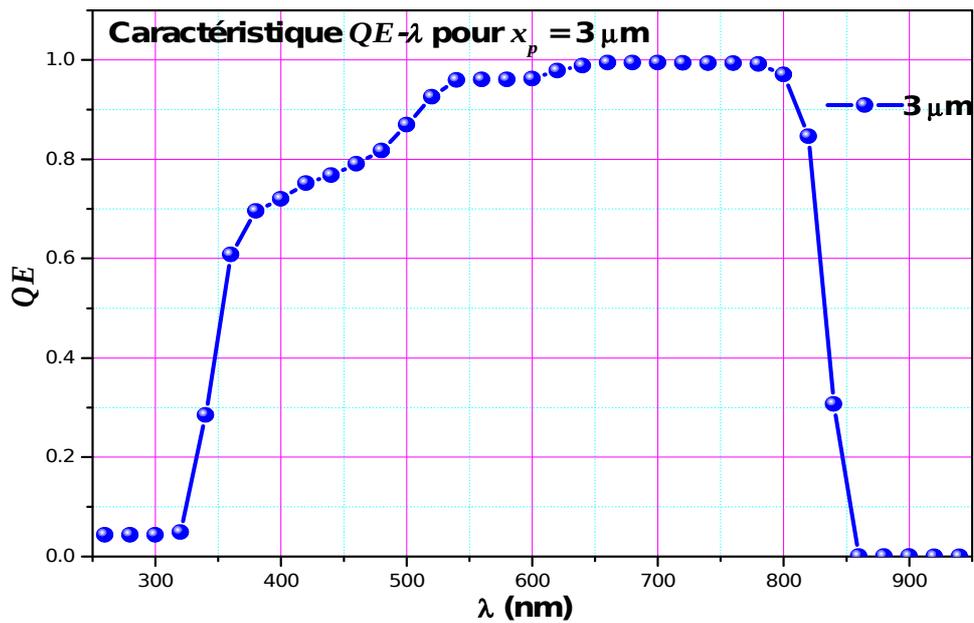


Figure IV.7 : Caractéristique $QE-\lambda$ pour l'épaisseur $x_p = 3 \mu\text{m}$.

Les valeurs des paramètres photovoltaïques de la cellule pour $x_p = 3 \mu\text{m}$ sont groupées dans le Tableau IV.8.

$J_{cc}(\text{mA}/\text{cm}^2)$	V_{co} (volt)	FF (%)	η (%)
26.5456	0.8621	77.9269	17.8340

Tableau IV.8: Valeurs des paramètres photovoltaïques de la cellule pour $x_p = 3 \mu\text{m}$.

La caractéristique $J-V$ pour $x_p = 4 \mu\text{m}$ est montrée dans la Figure IV.8.

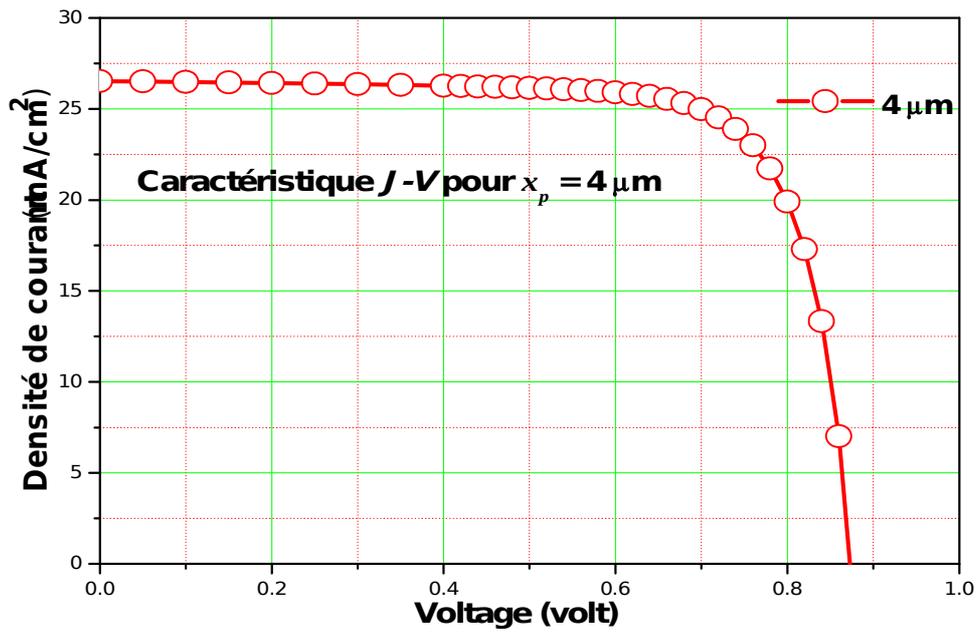


Figure IV.8 : Caractéristique $J-V$ pour l'épaisseur $x_p = 4 \mu\text{m}$.

La caractéristique $QE-\lambda$ pour $x_p = 4 \mu\text{m}$ est montrée dans la figure IV.9.

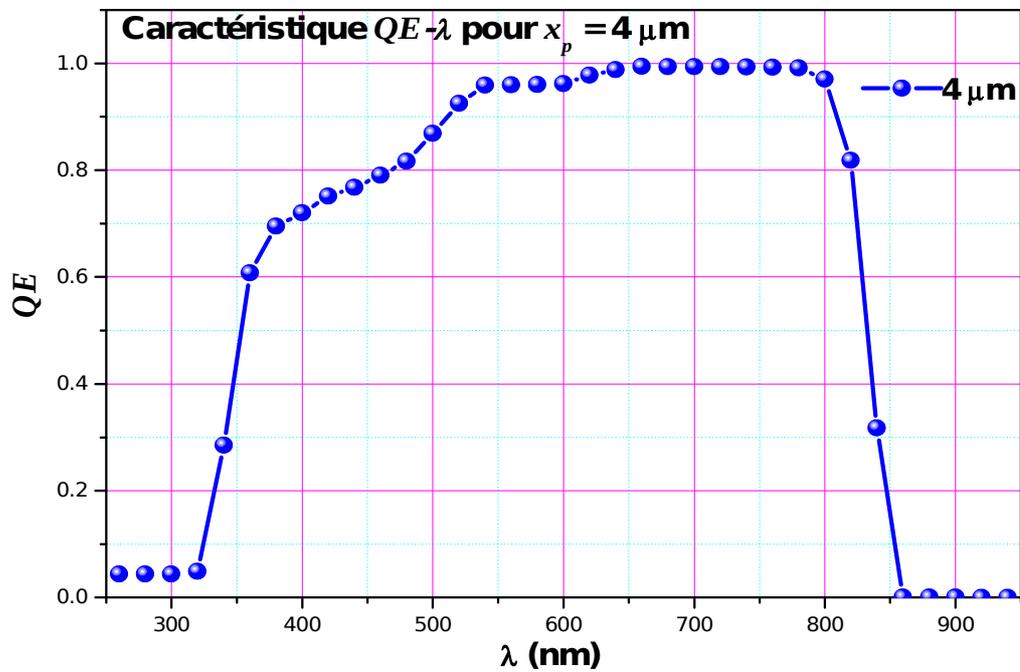


Figure IV.9 : Caractéristique $QE-\lambda$ pour $x_p = 4 \mu\text{m}$

Les valeurs des paramètres photovoltaïques de la cellule pour $x_p = 4 \mu\text{m}$ sont groupées dans le Tableau IV.9.

$J_{cc}(\text{mA}/\text{cm}^2)$	V_{co} (volt)	FF (%)	η (%)
26.5328	0.8729	76.3465	17.6824

Tableau IV.9: Valeurs des paramètres photovoltaïques de la cellule pour $x_p = 4 \mu\text{m}$.

Dans la figure IV.10 sont présentées les caractéristiques (J - V) correspondantes aux différentes valeurs de l'épaisseur x_p de la couche absorbante p-CdTe.

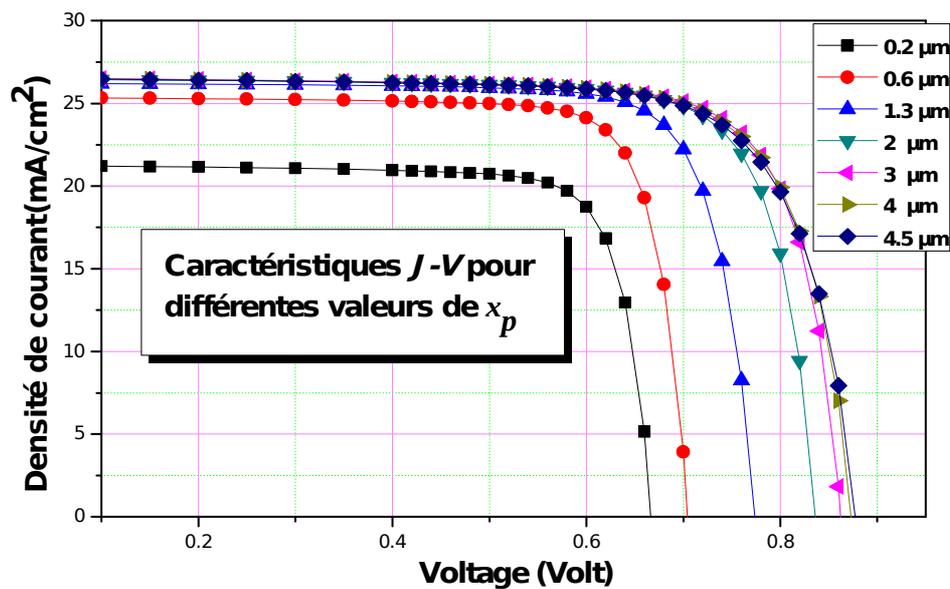


Figure IV.10 : Caractéristiques J - V pour différentes valeurs de l'épaisseur x_p .

Dans la figure IV.11. sont présentées les caractéristiques ($QE-\lambda$) correspondantes aux différentes valeurs de l'épaisseur x_p de la couche absorbante p-CdTe.

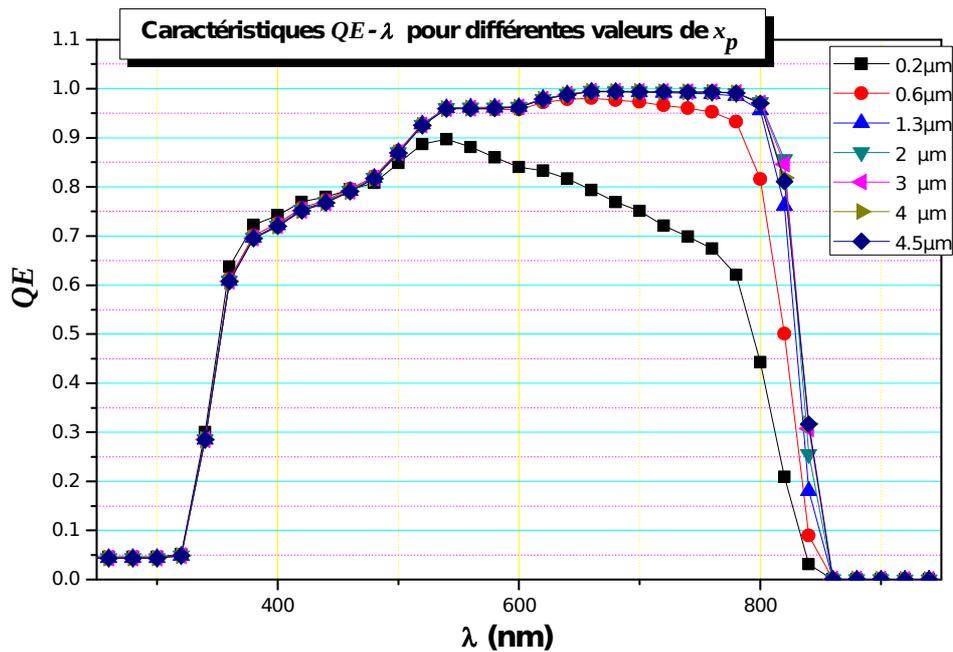


Figure IV.11 : Caractéristiques $QE-\lambda$ pour différentes valeurs de l'épaisseur x_p .

D'après le tableau IV.5 et les différentes courbes précédentes (figures IV.2 -IV.11), nous remarquons que l'influence de l'épaisseur x_p de la couche absorbante p-CdTe est remarquable sur les caractéristiques électriques de la cellule ainsi que sur ses paramètres photovoltaïques ; une générale augmentation de J_{cc} , V_{co} et η est notifiée lorsque l'épaisseur x_p de la couche p-CdTe augmente. Le meilleur rendement de conversion est obtenu ($\eta = 17.8340\%$) lorsque l'épaisseur x_p

atteint 3 μm . Au delà de 3 μm jusqu'au 4 μm , le rendement de conversion commence à diminuer lentement. L'influence de l'épaisseur x_p sur le rendement quantique QE est remarquable pour les longueurs d'ondes λ dans la gamme $\sim 500 \text{ nm}$ à 900 nm .

Dans la figure IV.12 est présenté le rendement de conversion photovoltaïque (η) pour différentes épaisseurs x_p de la couche p-CdTe.

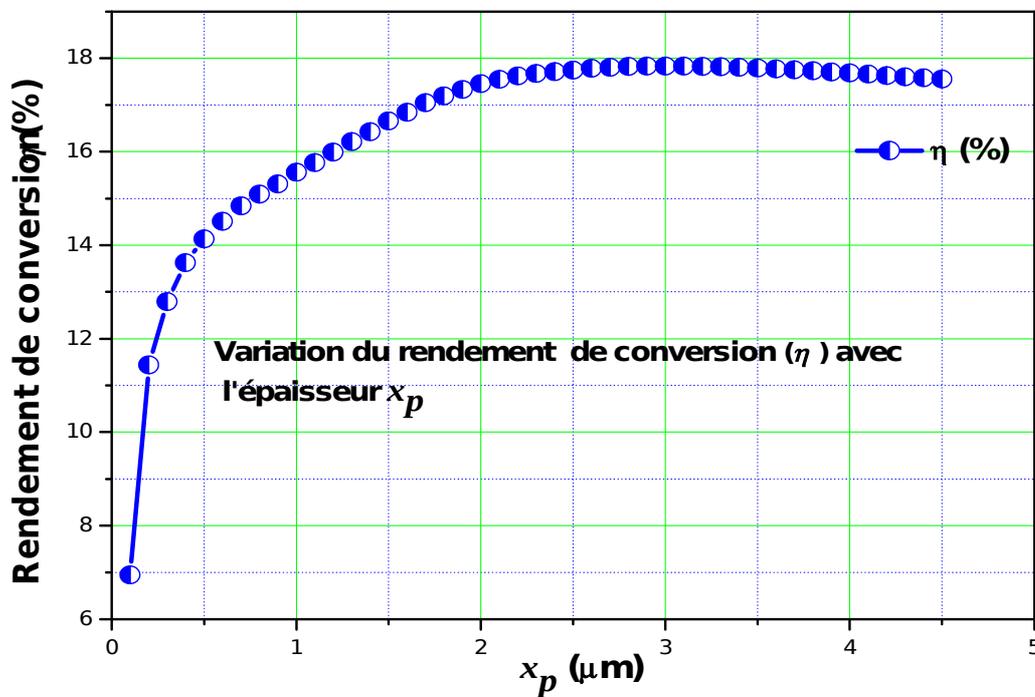


Figure IV.12 : Variation du rendement de conversion photovoltaïque (η) avec l'épaisseur x_p .

Le tableau IV.10 regroupe les valeurs du rendement correspondantes à la figure IV.12.

x_p (μm)	η (%)
0.1	6.9431
0.3	12.7935

1	15.5592
1.5	16.6531
1.8	17.1913
2.6	17.7821
3	17.8340
3.5	17.7898
4	17.6824

Tableau IV.10: Valeurs du rendement de conversion (η) correspondantes aux différentes épaisseurs x_p de la couche CdTe.

Nous passons maintenant à l'étude de l'effet de l'épaisseur (x_n) de la couche frontale n-CdS. x_n (CdS) est variable dans la gamme (0.015 μm à 0.065 μm), x_p (CdTe) est fixée à (4 μm).

Les résultats de la variation de l'épaisseur x_n de la couche (n-CdS) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule sont groupés dans le tableau IV.11.

x_n (μm)	V_{co} (V)	J_{cc} (mA/cm^2)	FF (%)	η (%)
0.015	0.8735	27.0621	76.3771	18.0542
0.025	0.8729	26.5328	76.3465	17.6824
0.035	0.8724	26.0645	76.3143	17.3530
0.045	0.8719	25.6397	76.2822	17.0538
0.055	0.8715	25.2528	76.2509	16.7813
0.065	0.8711	24.8998	76.2219	16.5338

Tableau IV.11: Effet de l'épaisseur x_n de la couche (CdS) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule solaire à hétérojonction (CdS/CdTe).

Avec l'augmentation de l'épaisseur x_n de la couche (n-CdS), nous remarquons une générale diminution des paramètres photovoltaïques. La diminution de J_{cc} et du rendement de conversion photovoltaïque η est plus

remarquable que celle de V_{co} et FF . Ces derniers présentent des variations plus lentes autour des valeurs 0.87 volt pour le V_{co} et 76% pour le FF (tableau IV.11). La densité de courant du court circuit J_{cc} diminue de 27.0621 mA/cm² à 24.8998 mA/cm². Le rendement de conversion η diminue de 18.0542 % à 16.5338 %. Le meilleur rendement de conversion $\eta = 18.0542$ % est obtenu pour x_n la plus mince (0.015 μ m).

La caractéristique J - V pour l'épaisseur $x_n = 0.015$ μ m (CdS) est illustrée dans la figure IV.13.

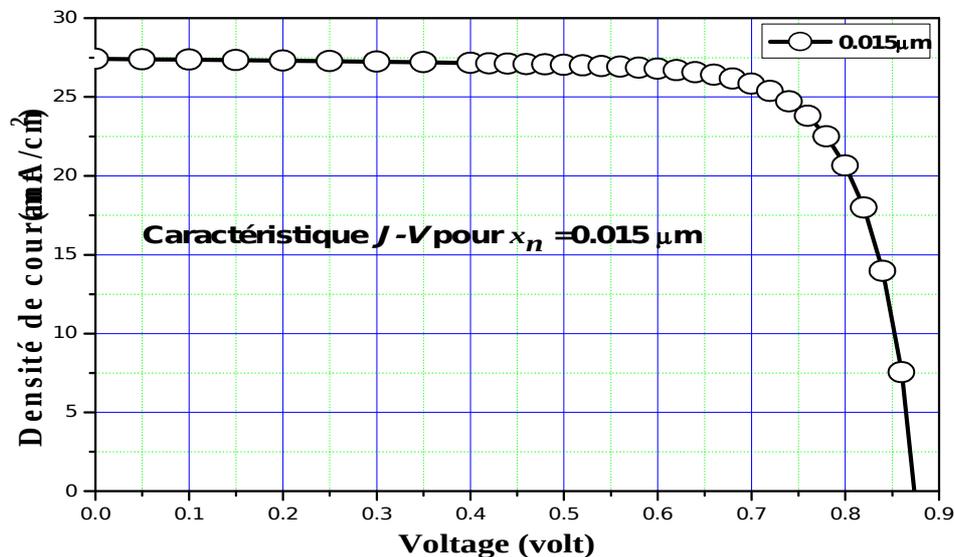
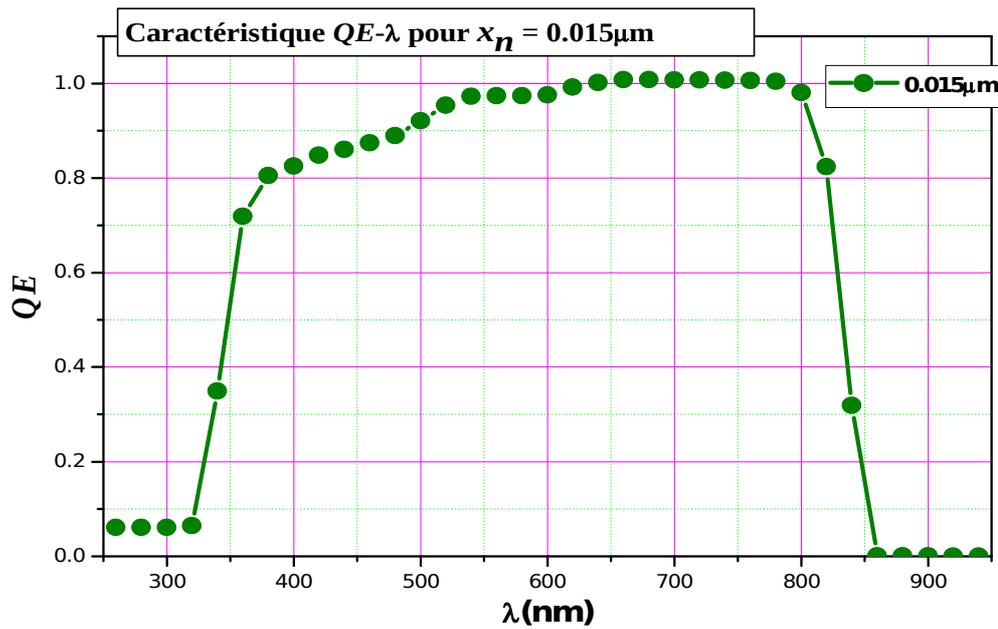


Figure IV.13 : Caractéristique J - V pour $x_n = 0.015$ μ m (CdS).

La caractéristique QE - λ pour $x_n = 0.015$ μ m (CdS) est montrée dans la figure IV.14.



Fig

ure IV.14 : Caractéristique $QE-\lambda$ pour $x_n = 0.015 \mu\text{m}$ (CdS).

Les valeurs des paramètres photovoltaïques de la cellule pour $x_n = 0.015 \mu\text{m}$ sont groupées dans le tableau IV.12.

$J_{cc}(mA/cm^2)$	V_{co} (volt)	FF (%)	η (%)
0.8735	27.0621	76.3771	18.0542

Tableau IV.12: Valeurs des paramètres photovoltaïques de la cellule pour l'épaisseur $x_n = 0.015 \mu\text{m}$ (CdS).

La caractéristique $J-V$ pour $x_n = 0.035 \mu\text{m}$ est montrée dans la figure IV.15.

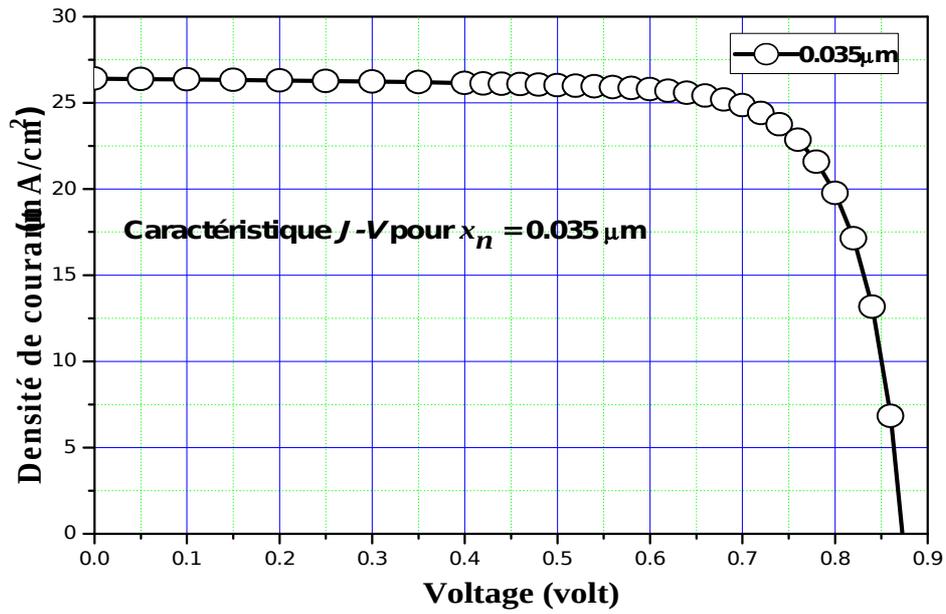


Figure IV.15 : Caractéristique J - V pour $x_n = 0.035 \mu\text{m}$.

La caractéristique $QE - \lambda$ pour $x_n = 0.035 \mu\text{m}$ est montrée dans la Figure IV.16.

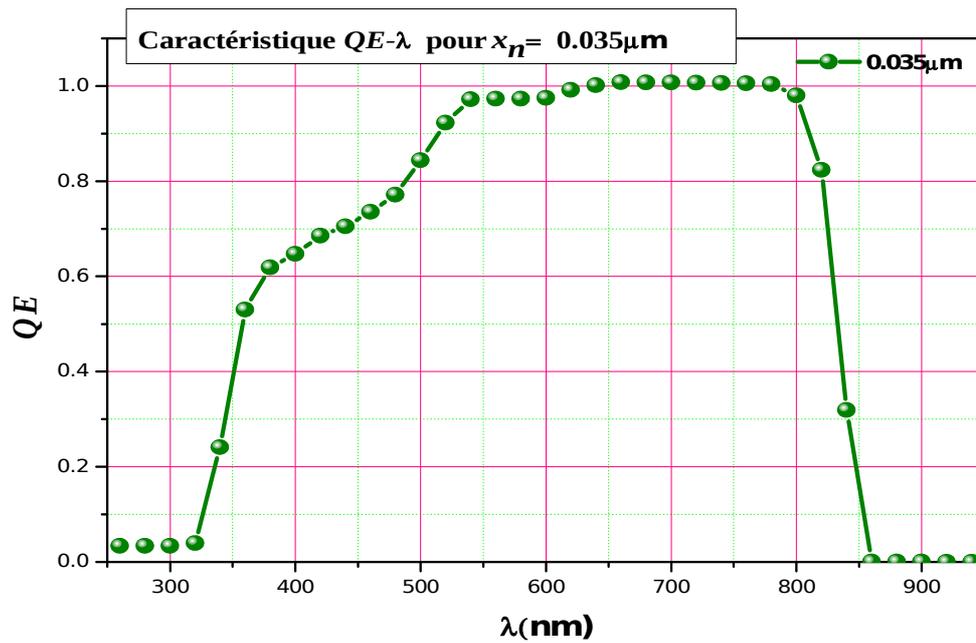


Figure IV.16 : Caractéristique $QE-\lambda$ pour $x_n = 0.035 \mu\text{m}$.

Les valeurs des paramètres photovoltaïques de la cellule pour $x_n = 0.05 \mu\text{m}$ sont groupées dans le Tableau IV.13.

$J_{cc}(\text{mA}/\text{cm}^2)$	$V_{co} (\text{volt})$	$FF (\%)$	$\eta (\%)$
0.8724	26.0645	76.3143	17.3530

Tableau IV.13: Valeurs des paramètres photovoltaïques de la cellule pour $x_n = 0.035 \mu\text{m}$.

La caractéristique J - V pour $x_n = 0.055 \mu\text{m}$ est montrée dans la figure IV.17.

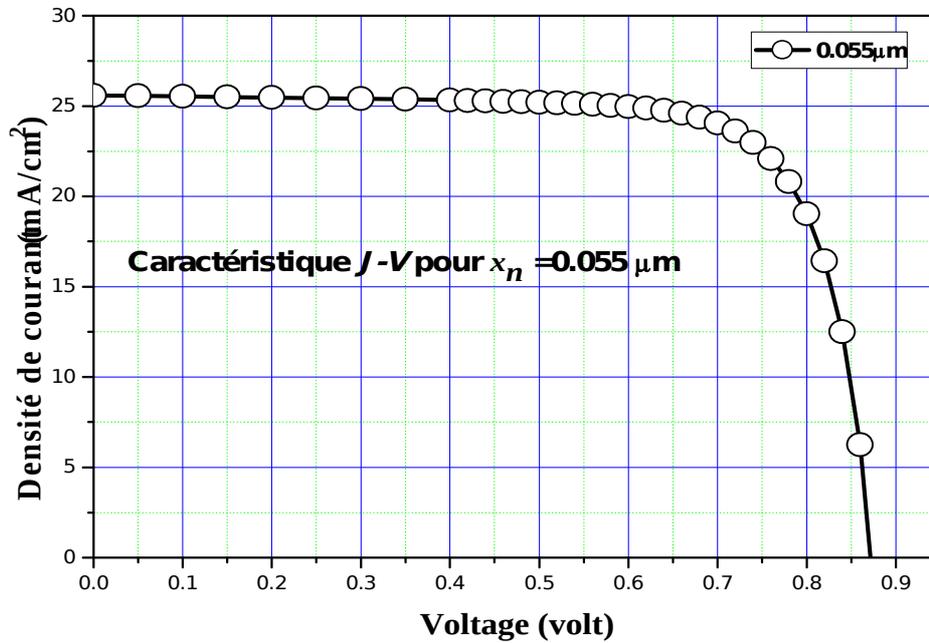


Figure IV.17 : Caractéristique J - V pour $x_n = 0.055 \mu\text{m}$.

La caractéristique $QE - \lambda$ pour $x_n = 0.055 \mu\text{m}$ est montrée dans la Figure IV.18.

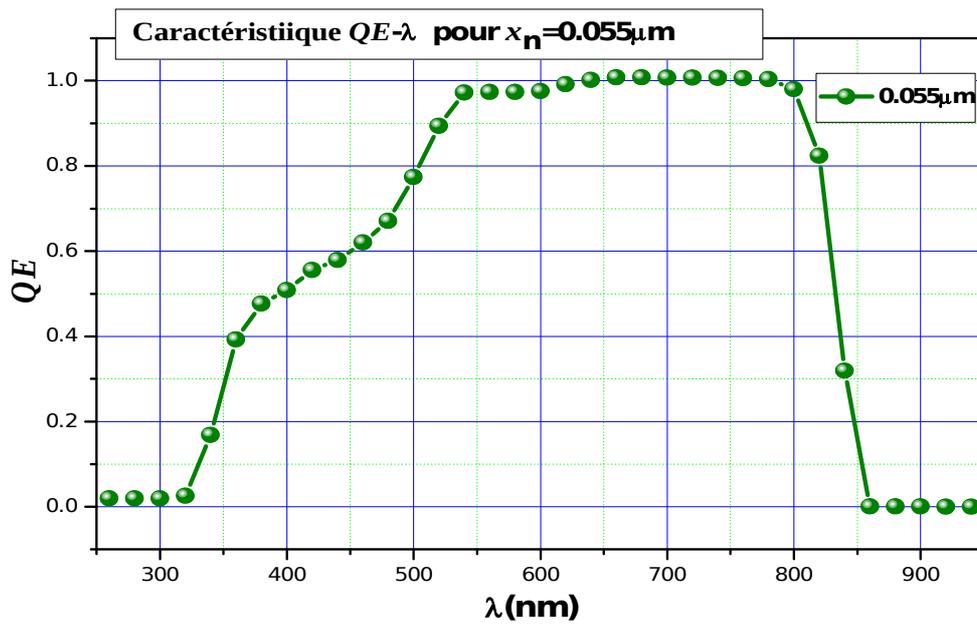


Figure IV.18 : Caractéristique $QE-\lambda$ pour $x_n = 0.055\mu m$.

Les valeurs des paramètres photovoltaïques de la cellule pour $x_n = 0.055 \mu m$ sont groupées dans le Tableau IV.14.

$J_{cc}(mA/cm^2)$	V_{co} (volt)	FF (%)	η (%)
0.8715	25.2528	76.2509	16.7813

Tableau IV.14: Valeurs des paramètres photovoltaïques de la cellule pour $x_n = 0.055 \mu m$.

Dans la figure IV.19. Sont présentées les caractéristiques ($J-V$) correspondantes aux différentes valeurs de l'épaisseur x_n de la couche n-CdS.

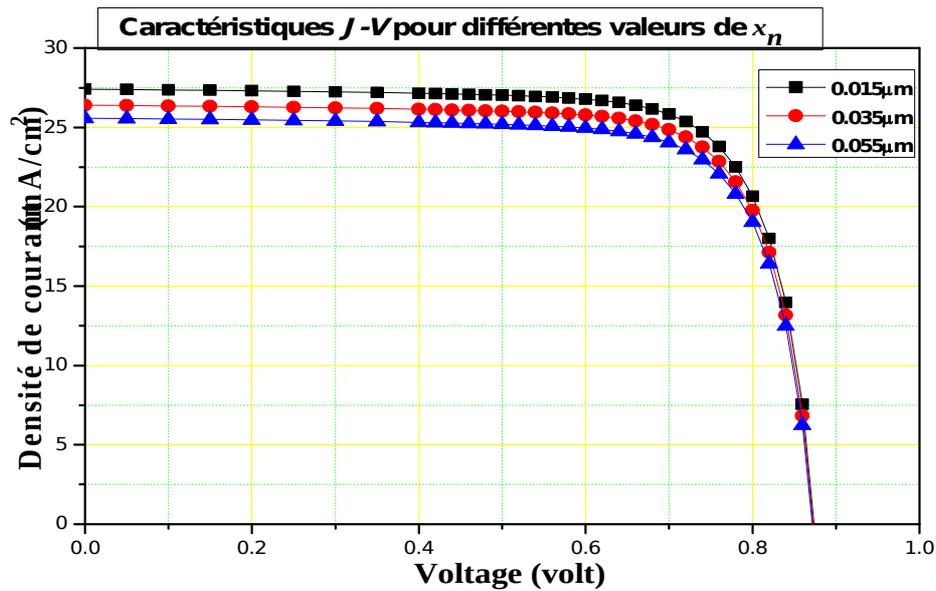


Figure IV.19 : Caractéristiques J - V pour différentes valeurs de l'épaisseur x_n .

Le fait que la région (n-CdS) soit d'une épaisseur x_n très mince (quelques dizaines de nm) en comparaison avec l'épaisseur x_p de la couche (p-CdTe) absorbante (quelques μm), l'influence de la variation de x_n sur les caractéristiques électriques de la cellule est moins considérable que celle de x_p .

Dans la figure IV.20. sont présentées les caractéristiques $QE-\lambda$ correspondantes aux différentes valeurs de l'épaisseur x_n de la couche n-CdS.

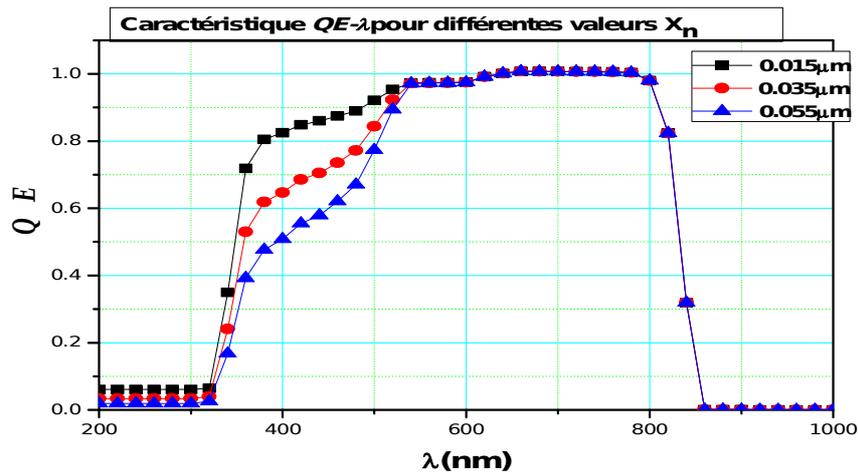
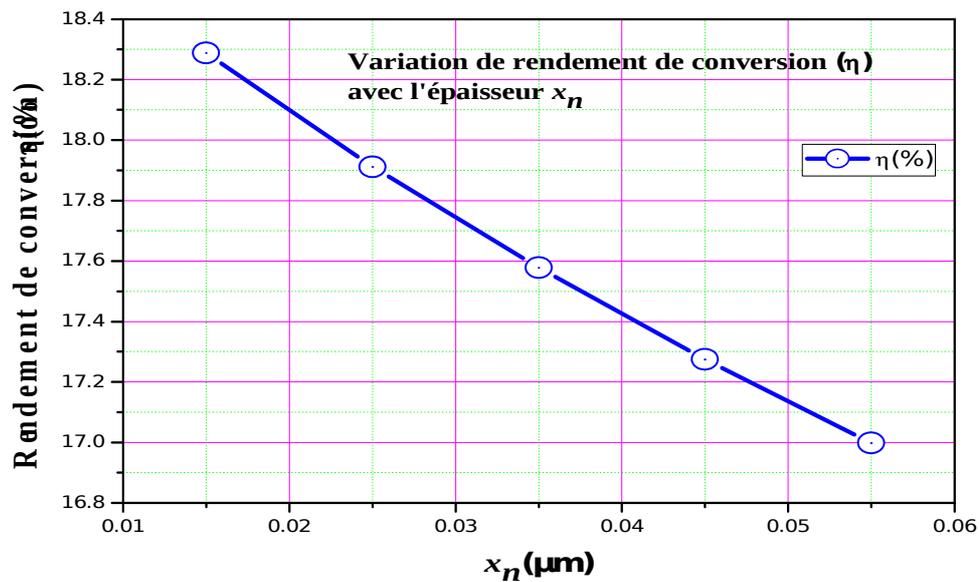


Figure IV.20 : Caractéristiques $QE-\lambda$ pour différentes valeurs de l'épaisseur x_n .

La diminution du rendement quantique externe $QE(\lambda)$ avec l'augmentation de x_n est plus notable dans la gamme des longueurs d'ondes ($\sim 350 \text{ nm} - 500 \text{ nm}$) puisqu'il s'agit de varier l'épaisseur de la couche (n-CdS) frontale. Le meilleur $QE(\lambda)$ est obtenu pour $x_n = 0.015 \mu\text{m}$.

Dans la figure IV.21 est présenté le rendement de conversion photovoltaïque (η) pour différentes épaisseurs x_n de la couche n-CdS.



Fig

ure IV.21 : Variation du rendement de conversion photovoltaïque (η) avec l'épaisseur x_n .

Les valeurs du rendement de conversion (η).correspondantes aux différentes valeurs de l'épaisseur x_n sont présentées dans le tableau IV.15.

x_n (μm)	η (%)
0.015	18.0542
0.025	17.6824
0.035	17.3530
0.045	17.0538
0.055	16.7813
0.065	16.5338

Tableau IV.15 : Valeurs du rendement de conversion (η).correspondantes aux différentes épaisseurs x_n .

D'après les résultats, la couche (n-CdS) doit être très mince pour assurer un bon rendement. Ceci est vérifié pour $x_n = 0.015 \mu\text{m}$ ($\eta=18.0542\%$). Le fait que la couche frontale (n-CdS) soit très mince (0.015 μm), cela permet d'éviter la recombinaison d'une proportion

considérable des porteurs photo-générés et assurer leur collection (longueurs de diffusion et durées de vie assez suffisantes pour assurer la collection des porteurs photo-générés). L'augmentation de l'épaisseur de couche (n-CdS) risque d'affecter la qualité de la cellule par les pertes dans le photo-courant à cause des recombinaisons.

IV.3 .2 : Effet de la densité des défauts sur les caractéristiques électriques de la cellule :

En étudiant l'effet des défauts, nous fixons les valeurs des épaisseurs (x_n) de la couche CdS et (x_p) de la couche CdTe à celles qui ont donné un bon rendement (tableau IV.16).

	Région	Epaisseur (μm)	Densité de défauts (cm^{-3})
1	n-SnO ₂	0.5	10^{15}
2	n-CdS	0.015	10^{18}
3	p-CdTe	3	2×10^{14}

Tableau IV.16: Valeurs des épaisseurs et densité de défauts dans chaque couche de la cellule.

Nous rappelons les paramètres photovoltaïques obtenus avec ces valeurs :

$J_{cc}(\text{mA}/\text{cm}^2)$	V_{co} (volt)	FF (%)	η (%)
27.0750	0.8625	77.9874	18.2119

Tableau IV.17: Valeurs des paramètres photovoltaïques correspondantes aux valeurs du tableau IV.16.

On commence par changer la densité de défauts (D_p) de la couche (p-CdTe) dans la gamme ($2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ à $4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$). et fixer celle de la couche (n-CdS) (D_n) à 10^{18} cm^{-3} .

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau IV.18.

$(D_p) (cm^{-3})$	$V_{co} (V)$	J_{cc} (mA/cm^2)	$FF (%)$	$\eta (%)$
2×10^{13}	0.8883	27.1328	84.4230	20.3481
2×10^{14}	0.8625	27.0750	77.9874	18.2119
4×10^{14}	0.5442	26.8310	64.7650	9.4568

Tableau IV.18 : Effet de la densité de défauts (D_p) de la couche (p-CdTe) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule (CdS/CdTe).

Pour une densité de défauts $D_p = 2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, le rendement de conversion (η) atteint une bonne valeur de 20.3481% (tableau IV.19). L'augmentation de la densité des défauts entraîne une diminution remarquable des paramètres photovoltaïques. Notamment le V_{co} diminue de 0.8883 Volt à 0.5442 Volt, le FF diminue de 84.4230% à 64.7650 % et le rendement de conversion η diminue de 20.3481% à 9.4568%. La densité de courant de court circuit J_{cc} connaît cependant une faible réduction de 27.1328 mA/cm^2 à 26.8310 mA/cm^2 .

Les caractéristiques (J - V) pour différentes valeurs de la densité de défauts (D_p) sont présentées dans la figure IV.22

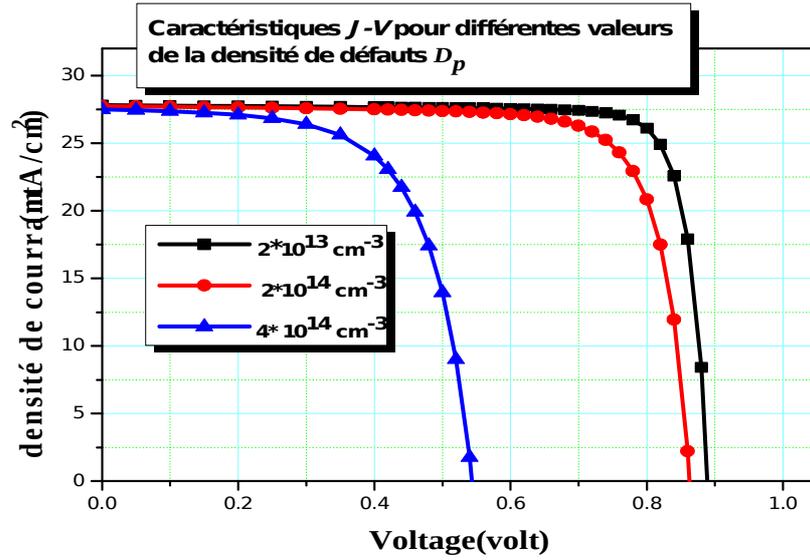


Figure IV.22 : Caractéristiques (J - V) pour différentes valeurs de la densité de défauts (D_p).

Les caractéristiques (QE - λ) pour différentes valeurs de la densité de défauts (D_p) sont présentées dans la figure IV.23.

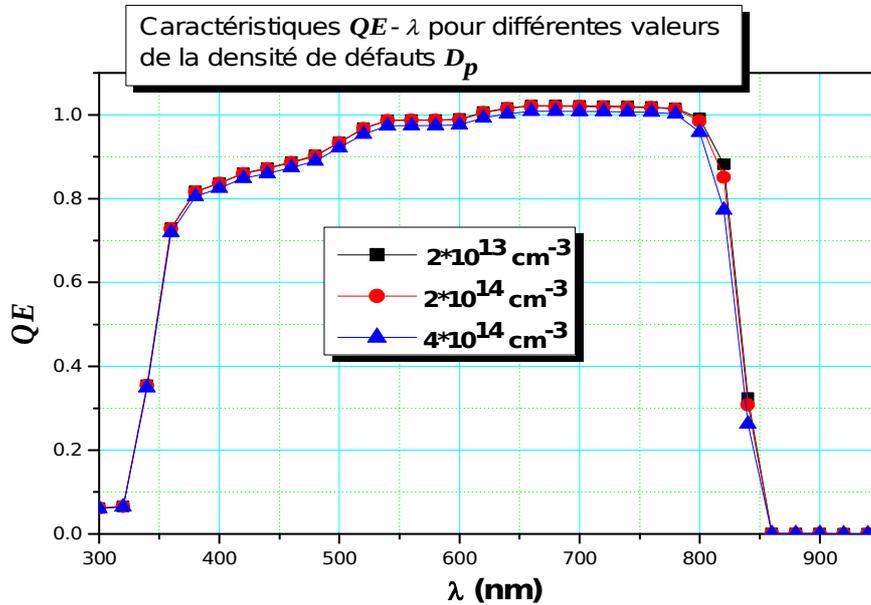


Figure IV.23 : Caractéristiques (QE - λ) pour différentes valeurs de la densité de défauts (D_p).

Le rendement quantique $QE(\lambda)$ connaît une faible dégradation avec l'augmentation de la densité des défauts D_p (figure IV.23).

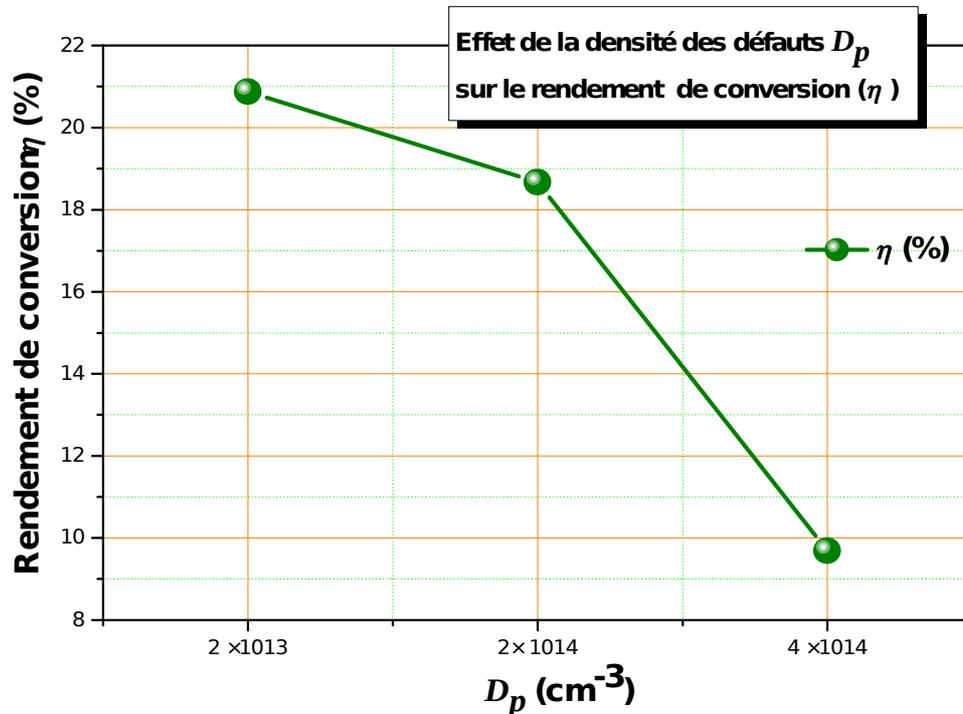


Figure IV.24 : Effet de la densité des défauts (D_p) sur le rendement de conversion (η).

Les défauts de la couche (p-CdTe) ont une distribution gaussienne dans le gap d'énergie avec une largeur de 0.2 eV autour du maximum situé à 0.75 eV, le gap d'énergie E_g étant égale à 1.5 eV, ces défauts se localisent presque au milieu du gap et agissent de ce fait comme des centres de recombinaison. L'augmentation de leur densité rend les phénomènes de recombinaisons plus considérables (durées de vie plus courtes) et entraîne la diminution des paramètres photovoltaïques de la cellule.

On passe maintenant à faire varier la densité de défauts (D_n) de la couche (n-CdS) dans la gamme (10^{17} cm^{-3} à 10^{19} cm^{-3}) et fixer celle la couche (p-CdTe) (D_p) à ($2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$).

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau IV.19.

$(D_n) (\text{cm}^{-3})$	$V_{co} (V)$	J_{cc} (mA/cm^2)	$FF (\%)$	$\eta (\%)$
10^{17}	0.8617	27.4762	78.3415	18.5474
10^{18}	0.8625	27.0750	77.9874	18.2119
10^{19}	0.8841	26.9603	63.9493	15.2425

Tableau IV.19 : Effet de la densité de défauts (D_n) de la couche (n-CdS) sur les paramètres photovoltaïques de la cellule (CdS/CdTe).

L'augmentation de la densité des défauts de la couche (n-CdS) de 10^{17} cm^{-3} à 10^{19} cm^{-3} entraîne la diminution du courant de court circuit J_{cc} de $27.4762 \text{ mA}/\text{cm}^2$ à $26.9603 \text{ mA}/\text{cm}^2$; une diminution qui est relativement faible. Alors que le FF et le rendement de conversion η connaissent une notable réduction lorsque D_n atteint 10^{19} cm^{-3} ($FF=63.9493\%$ et $\eta=15.2425\%$).

Les caractéristiques (J - V) pour différentes valeurs de la densité de défauts (D_n) sont présentées dans la figure IV.25.

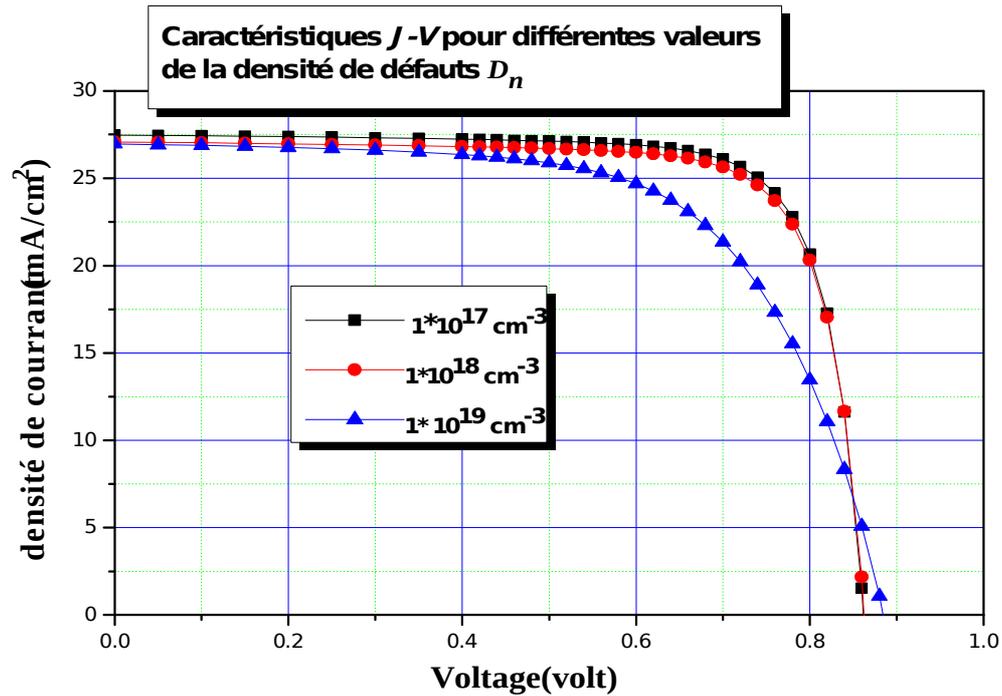


Figure IV.25 : Caractéristiques (J - V) pour différentes valeurs de la densité de défauts (D_n).

Les caractéristiques (QE - λ) pour différentes valeurs de la densité de défauts (D_n) sont présentées dans la figure IV.26 et le rendement de conversion η est présenté sur la figure IV.27.

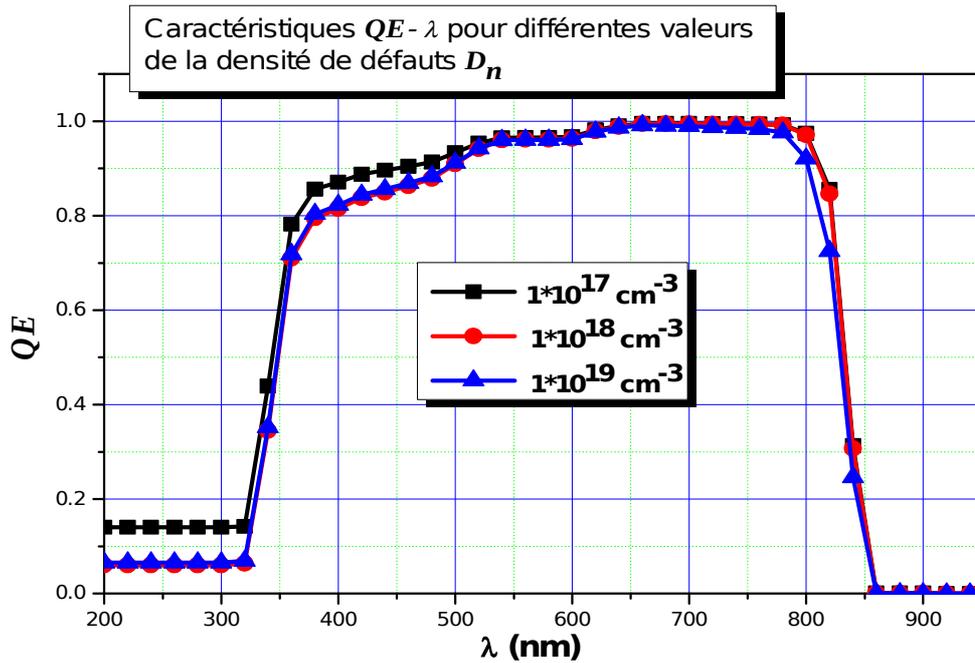


Figure IV.26 : Caractéristiques ($QE - \lambda$) pour différentes valeurs de la densité de défauts (D_n).

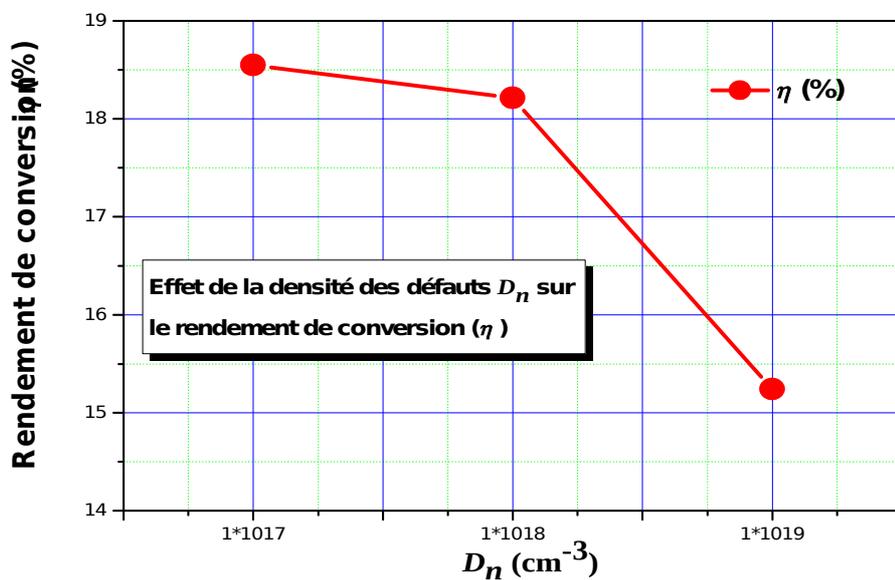


Figure IV.27 : Effet de la densité des défauts (D_n) sur le rendement de conversion (η).

Le rendement quantique $QE(\lambda)$ connaît une faible dégradation avec l'augmentation de la densité des défauts D_n dans la gamme des longueurs d'ondes (350 nm à 500 nm) (figure IV.26).

Les défauts de la couche (n-CdS) ont aussi une distribution gaussienne dans le gap d'énergie avec une largeur de 0.2 eV autour du maximum situé à 1.2 eV, le gap d'énergie E_g étant égale à 2.4 eV, ces défauts se localisent presque au milieu du gap et agissent aussi comme des centres de recombinaison.

IV.4. Conclusion

Dans ce travail, nous avons étudié les caractéristiques électriques de la cellule solaire à hétérojonction $\text{SnO}_2/\text{CdS}/\text{CdTe}$ de structure (n-p). Où le SnO_2 associé au CdS de type n sont utilisés comme des fenêtres laissant entrer la lumière et comme barrière de potentiel au CdTe ; le semiconducteur de type p présentant la couche absorbante de la cellule (c'est-à-dire la zone où les paires électrons trous sont générées sous illumination). La largeur du gap d'énergie du CdTe est idéalement adaptée au spectre solaire et son très grand coefficient d'absorption autorise l'utilisation d'épaisseurs de l'ordre du micromètre pour absorber la quasi-totalité du spectre solaire. Une épaisseur de CdS autour de 0.025 μm permet de transmettre les radiations de longueurs d'onde inférieures à 500 nm, ce qui accroît la densité du photocourant de la cellule photovoltaïque.

La cellule est supposée être soumise à l'éclairement AM1.5, et en utilisant le logiciel de simulation numérique **AMPS-1D** nous avons pu générer les caractéristiques électriques de la cellule telles que: la caractéristique densité de courant - tension ($J-V$), la caractéristique rendement quantique -longueur d'onde ($QE - \lambda$), ainsi que la densité de courant de court circuit (J_{cc}), la tension de circuit ouvert (V_{co}), le facteur de remplissage (FF), et le rendement de conversion photovoltaïque (η). Ces caractéristiques sont étudiées et analysées sous la variation des grandeurs des paramètres : épaisseur et densité des défauts de la couche (n-CdS) et (p-CdTe).

L'influence de l'épaisseur x_p de la couche absorbante p-CdTe est remarquable sur les caractéristiques électriques de la cellule ainsi que sur ses paramètres photovoltaïques ; une générale augmentation de J_{cc} , V_{co} et η est notifiée lorsque l'épaisseur x_p de la couche p-CdTe augmente. Le meilleur rendement de conversion est obtenu ($\eta = 17.8340\%$) lorsque l'épaisseur x_p atteint $3 \mu\text{m}$. Au delà de $3 \mu\text{m}$ jusqu'à $4 \mu\text{m}$, le rendement de conversion commence à diminuer lentement.

Avec l'augmentation de l'épaisseur x_n de la couche (n-CdS), nous remarquons une générale diminution des paramètres photovoltaïques. La diminution de J_{cc} et du rendement de conversion photovoltaïque η est plus remarquable que celle de V_{co} et FF . Ces derniers présentent des variations plus lentes autour des valeurs 0.87 volt pour le V_{co} et 76% pour le FF . La densité de courant du court circuit J_{cc} diminue de 27.0621 mA/cm^2 à 24.8998 mA/cm^2 . Le rendement de conversion η diminue de 18.0542% à 16.5338% . Le meilleur rendement de conversion $\eta = 18.0542 \%$ est obtenu pour x_n la plus mince ($0.015 \mu\text{m}$).

Pour une densité de défauts $D_p = 2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ dans la couche (p-CdTe), le rendement de conversion (η) atteint une bonne valeur de 20.3481% . L'augmentation de la densité des défauts entraîne une diminution remarquable des paramètres photovoltaïques. Notamment le V_{co} diminue de 0.8883 Volt à 0.5442 Volt, le FF diminue de 84.4230% à 64.7650% et le rendement de conversion η diminue de 20.3481% à 9.4568% . La densité de courant de court circuit J_{cc} connaît cependant une faible réduction de 27.1328 mA/cm^2 à 26.8310 mA/cm^2 .

L'augmentation de la densité des défauts D_n de la couche (n-CdS) de 10^{17} cm^{-3} à 10^{19} cm^{-3} entraîne la diminution du courant de court circuit J_{cc} de 27.4762 mA/cm^2 à 26.9603 mA/cm^2 ; une diminution qui est relativement faible. Alors que le FF et le rendement de conversion η

connaissent une notable réduction lorsque D_n atteint 10^{19} cm^{-3} ($FF=63.9493\%$ et $\eta=15.2425\%$).

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons étudié les caractéristiques électriques de la cellule solaire à hétérojonction $\text{SnO}_2/\text{CdS}/\text{CdTe}$ de structure (n-p). Où le SnO_2 (dont la largeur du gap est ~ 3.6 eV) associé au CdS de type n (largeur du gap ~ 2.4 eV) sont utilisés comme des fenêtres laissant entrer la lumière et comme barrière de potentiel au CdTe ; le semiconducteur de type p présentant la couche absorbante de la cellule (c'est-à-dire la zone où les paires électrons trous sont générées sous illumination). La largeur du gap d'énergie du CdTe (~ 1.5 eV) est idéalement adaptée au spectre solaire et son très grand coefficient d'absorption autorise l'utilisation d'épaisseurs de l'ordre du micromètre pour absorber la quasi-totalité du spectre solaire. Une épaisseur de CdS autour de $0.025 \mu\text{m}$ permet de transmettre les radiations de longueurs d'onde inférieures à 500 nm , ce qui accroît la densité du photocourant de la cellule photovoltaïque.

La cellule est supposée être soumise à l'éclairement AM1.5, et en utilisant le logiciel de simulation numérique **AMPS-1D** nous avons pu générer les caractéristiques électriques de la cellule telles que: la caractéristique densité de courant - tension ($J-V$), la caractéristique rendement quantique -longueur d'onde ($QE - \lambda$), ainsi que la densité de courant de court circuit (J_{cc}), la tension de circuit ouvert (V_{co}), le facteur de remplissage (FF), et le rendement de conversion photovoltaïque (η). Ces caractéristiques sont étudiées et analysées sous la variation des grandeurs des paramètres : épaisseur et densité des défauts de la couche (n-CdS) et (p-CdTe).

L'influence de l'épaisseur x_p de la couche absorbante p-CdTe est remarquable sur les caractéristiques électriques de la cellule ainsi que sur ses paramètres photovoltaïques ; une générale augmentation de J_{cc} , V_{co} et η est notifiée lorsque l'épaisseur x_p de la couche p-CdTe augmente. Le meilleur rendement de conversion est obtenu ($\eta = 17.8340\%$) lorsque l'épaisseur x_p atteint $3 \mu\text{m}$. Au delà de $3 \mu\text{m}$ jusqu'au $4 \mu\text{m}$, le rendement de conversion commence à diminuer lentement.

Avec l'augmentation de l'épaisseur x_n de la couche (n-CdS), nous remarquons une générale diminution des paramètres photovoltaïques. La diminution de J_{cc} et du rendement de conversion photovoltaïque η est plus remarquable que celle de V_{co} et FF . Ces derniers présentent des variations plus lentes autour des valeurs 0.87 volt pour le V_{co} et 76% pour le FF . La densité de courant du court circuit J_{cc} diminue de 27.0621 mA/cm² à 24.8998 mA/cm².

Le rendement de conversion η diminue de 18.0542 % à 16.5338 %. Le meilleur rendement de conversion $\eta = 18.0542$ % est obtenu pour x_n la plus mince (0.015 μ m).

Pour une densité de défauts $D_p = 2 \times 10^{13}$ cm⁻³ dans la couche (p-CdTe), le rendement de conversion (η) atteint une bonne valeur de 20.3481%. L'augmentation de la densité des défauts entraîne une diminution remarquable des paramètres photovoltaïques. Notamment le V_{co} diminue de 0.8883 Volt à 0.5442 Volt, le FF diminue de 84.4230% à 64.7650 % et le rendement de conversion η diminue de 20.3481% à 9.4568%. La densité de courant de court circuit J_{cc} connaît cependant une faible réduction de 27.1328 mA/cm² à 26.8310 mA/cm².

L'augmentation de la densité des défauts D_n de la couche (n-CdS) de 10^{17} cm⁻³ à 10^{19} cm⁻³ entraîne la diminution du courant de court circuit J_{cc} de 27.4762 mA/cm² à 26.9603 mA/cm² ; une diminution qui est relativement faible. Alors que le FF et le rendement de conversion η connaissent une notable réduction lorsque D_n atteint 10^{19} cm⁻³ ($FF=63.9493\%$ et $\eta=15.2425\%$).

En conclusion, nous pouvons dire que les caractéristiques électriques de la cellule solaire à hétérojonction à base de CdTe dépendent notablement de celles des couches individuelles qui la constituent, et de ses interfaces. Généralement, les résultats obtenus sont

dans la gamme de ce qui a été trouvé par les travaux expérimentaux et théoriques menés sur les cellules solaires à hétérojonction (CdS/CdTe).

Référence

- [1] : M. Orgeret, 'Les piles Solaires, le Composant et ses Applications', Edition Masson, (1985)
- [2] : Ozge TUZEN, « Polycrystalline Silicon Films by Aluminum Induced Crystallization and Epitaxy: Synthesis, Characterizations and Solar Cells » Thèse de doctorat à l'Université de Strasbourg, 2009.
- [3] S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices (John Wiley & Sons, 1981), 2nd ed.
- [4] M. A. Green, Solar Cells (Prentice Hall, Englewood Cliff, NJ, 1982).
- [5] A. Luque and S. Hegedus, eds., Handbook of Photovoltaic Energy Conversion and Engineering (John Wiley & Sons Ltd, Chichester, West Sussex, England, 2003).
- [6] W. Shockley , H.J. Queisser. « Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells ». J. Appl. Phys, 32 :510–519, 1961.
- [7] Jérôme Damon-Lacoste. « Vers une ingénierie de bandes des cellules solaires à hétérojonctions a-Si :H/c-Si .rôle prépondérant de l'hydrogène ».2007
- [8] H. Mourad. « Mise en oeuvre d'une méthodologie pour l'étude de rayonnement parasite basse fréquence de panneaux solaires sur des capteurs situés en zone proche ». N° 24-2007
- [9] Emery, K.; Burdick, J.; Caiyem, Y.; Dunlavy, D.; Field, H.; Kroposki, B.; Moriarty, T.; Ottoson, L.; Rummel, S.; Strand, T.; Wanlass, M.W.; «Temperature dependence of photovoltaic cells, modules and systems Photovoltaic Specialists Conference », 1996, Conference Record of the Twenty Fifth IEEE, 13-17 May 1996 Page(s):1275 – 1278
- [10] D. Hatem*, F. Nemmar et M.S. Belkaid. « Cellules solaires organiques: choix des matériaux, structures des dispositifs et amélioration du rendement et de la stabilité» Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°1 (2009) 77 – 86
- [11] W. Shockley , Hans J. Queisser ; « detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells » ; J. APPL. PHYS. 32, 510 (1961); DOI:10.1063/1.1736034.
- [12] : [http:// www.editionsdumoniteur.com](http://www.editionsdumoniteur.com)
- [13] :T. Desrues. " Developement des cellules solaires à hétérojonctions " N° d'ordre 2009ISAL0084
- [14] W. N. Shafarman and L. Stolt, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering (Wiley Chichester, 2003), chap. Cu(In,Ga)Se₂ Solar Cells, pp. 567–616.
- [15] L. J. Simpson, J. S. Britt, S. Wiedeman, M. E. Beck, B. S. Joshi, T. L. Vincent, J. P. Delplanque, R. J. Kee, N. B. Gomez, K. M. Williams, et al., in Proc. NCPV and Solar Program Review Meeting (2003), p. 604.
- [16] G. Jensen, J. Schaefer, G. M. Hanket, E. Eser, and S. Wiedeman, in Proc. NCPV and Solar Program Review Meeting (2003), p. 877.
- [17] R. Birkmire, E. Eser, S. Fields, and W. Shafarman, Prog. Photovoltaics 13, 141 (2005).
- [18] National Renewable Energy Laboratory, What is the energy payback for PV?, URL

- <http://www.nrel.gov/docs/fy04osti/35489.pdf>.
- [19] M. S. Keshner and R. Arya, Tech. Rep., National Renewable Energy Laboratory,
<http://www.nrel.gov/docs/fy05osti/36846.pdf> (2004).
- [20] : Alain Ricaud, « Module Photovoltaïques, Filières Technologiques»,
Techniques de l'ingénieur D 3940, 2005.
- [21] : [21] F. Sauerlich and A. Klein, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 763, 471 (2003).
- [22] D. W. Nilas, D. Rioux, and H. Höchst, J. Appl. Phys. 4586-4590 (1993).
- [23] J. Fritsche, T. Schulmeyer, D. Kraft, A. Thißen, A. Klein, and W. Jaegermann, Appl. Phys. Lett. 81, 2297 (2002).
- [24] G. Stollwerck and J. R. Sites, in Proc. 13th European Photovoltaic Sol. Energy Conf. (1995), pp. 2020-2022.
- [25] A. Niemegeers and M. Burgelman, J. Appl. Phys. 81, 2881 (1997).
- [26] X. Wu, J.C. Keane, R.G. Dhere, C. Dehart, D.S. Albin, A. Duda, T.A. Gesert, S. Asher, D.H. Levi, P. Shedon, et al, 17th European Photovoltaic Solar Energy Conf., p. 995 (2001).
- [27] J. R. Sites, H. Tavakolian, and R. A. Sasala, Solar Cells 29, 39 (1990).
- [28] M. Gloeckler and J. R. Sites, J. Appl. Phys. 95, 4438 (2004).
- [29] J. T. Heath, J. D. Cohen, and W. N. Shafarman, J. Appl. Phys. 95, 1000 (2004).
- [30] M. Burgelman, P. Nollet, and S. Degraeve, Thin Solid Films 361-362, 527 (2000).
- [31] K. Emery, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering (Wiley Chichester, A. Luque and S. Hegedus (Ed.), 2003), pp. 702-711 (Based on R. Bird, R. Hulstrom, and C. Riordan, Solar Cells 14, 193 [1985]).
- [32] Stollwerck G, MS thesis, Colorado State University (1995).
- [33] Selberherr, S. (1984) "Analysis and Simulation of Semiconductor Devices" (Berlin : Springer)
- [34] Kurata, M. (1982) "Numerical Analysis for Semiconductor Devices" (Lexington, MA : Heath)
- [35] Zeman, M., Kroon, M., and Heuvel, J. (1999) "Amorphous Semiconductor Devices", User's Manual of Optoelectronic Simulator for Amorphous Semiconductor Devices, Delft University of Technology, Netherlands 1999
- [36] L. Zighed, " Etude de l'influence de nouveaux films antiréfléchissants sur la conversion photovoltaïque", Thèse doctorat, Université de Mentori Constantine.2007.
- [37] M. Orgeret, "les piles solaires le composant et ses applications", Masson,, paris, 1985.
- [38] M.Benaïcha, " Etude des matériaux semiconducteur III-V Application à la conversion photovoltaïque", mémoire Magister, Université de Batna , 2007.
- [39] M. Gloeckler, « Device Physics of Cu (In, Ga) Se₂ Thin-Film Solar Cells», thesis of Doctor of Philosophy, 2005, Colorado State University.

- [40] K. Emery, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering (Wiley Chichester, A. Luque and S. Hegedus (Ed.), 2003), pp. 702-711 (Based on R. Bird, R. Hulstrom, and C. Riordan, Solar Cells 14, 193 [1985]).
- [41] Jeffery L. Gray "The Physics of the Solar Cel" Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA.
- [42] Pierret R, in Pierret R, Neudeck G (Eds), *Modular Series on Solid State Devices, Volume VI:Advanced Semiconductor Fundamentals*, Chap. 5, Addison-Wesley, Reading, MA, 139-179 (1987).
- [43] N. Benabdallah, « Propriétés physiques des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et Simulation des cellules solaires à base de Si et SiGe », thèse de magister, 2006, université Abou Bekrbelkaid Tlemcen.
- [44] S.J. Fonash et al., A manual for AMPS-1D for Windows 95/ NT; A one-dimensional device simulation program for the analysis of microelectronic and photonic structures, Pennsylvania State University, 1997. See also <http://www.ampsmodeling.org>.
- [45] M. Gloeckler, « Numerical Modeling of CIGS Solar Cells», thesis of master, 2003, Colorado State University
- [46] C. Ferekides, J. Britt, Y. Ma and L. Killian ; Proc. 22nd IEEE Photovoltaic Specialists Conf., 1993, pp.389-393.