الجـــــــــــــــمهـوريـــة الجـــــــــزائرية الديمـــــقراطية الشـــــــعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التـــــــــــــــــــــعليـم العـــــالي والبـــــــحث العـــلـمـي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département d'électromécanique

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Electrotechnique

Spécialité : Énergies renouvelables

Par : - BENDAHER Abderrazak

- BENYAHIA Karim

Sujet

Effet de la couche tampon $Cd_{1-x}Z_xS$ dans l'amélioration du rendement électrique des cellules solaires CdTe.

Soutenu publiquement, le 02/ 07 / 2025, devant le jury composé de :

Mr. KHATIR Abdelfatah	MCB	**Univ-BBA**	Président
Mr. SLAMA Fateh	MCB	**Univ-BBA**	Examinateur
Mme. BENABBAS Sabrina	MCB	**Univ-BBA**	Encadrant

Année Universitaire 2024/2025

Remerciement

Avant tout nous remercions ALLAH le tout puissant pour le courage, la volonté et la passion qu'il nous a accordé pour réaliser ce travail.

Nous tenons à exprimer toutes nos gratitudes à madame BENABBAS SABRINA pour avoir encadré et dirigé ce travail avec une grande rigueur scientifique et pour sa disponibilité, sa patience, sa compétence, ses précieux conseils.

Merci à tous les membres du jury, pour nous avoir fait l'honneur d'accepter de présider et d'examiner ce mémoire.

Merci à toutes les personnes qui de diverses façons et à différents moments nous apporté leur aide.

Dédicace

Nous dédions affectueusement ce travail à :

Nos parents pour leur aide, leurs encouragements et leur soutien moral aux moments difficiles.

Nos chère grands-mères et grands-pères

Nos sœurs et frères

Nos tentes et oncles

Toute la famille BENYAHIA et BENDAHER

Tous nos amis sans exception

Table des matières

Introduction générale..... 2

Chapitre I

I.1. Introduction..... 6

I.2. Historique du photovoltaïque 6

I.3. Énergie renouvelable et solaire 7

I.4. Le rayonnement solaire 8

I.5. Les cellules solaires 10

I.5.1. Définition 10

I.5.2. Structure d'une cellule solaire 11

I.5.3. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque 11

I.6. Générations de la cellule solaire 12

I.6.1. Première génération 13

I.6.2. Deuxième génération 13

I.6.3. Troisième génération 14

I.7. Les semi-conducteurs 14

I.8. Type des semi-conducteurs 15

I.8.1. Semi-conducteur intrinsèque 15

I.8.2. Semi-conducteur extrinsèque 16

I.8.2.1. Semi-conducteur dopé n 16

I.8.2.2. Semi-conducteur dopé p 16

I.9. Modèle équivalent d'une cellule photovoltaïque 17

I.10. Paramètres électriques d'une cellule solaire 20

I.10.1. Courant de court-circuit Icc 20

I.10.2. Tension de circuit ouvert (tension à vide) 20

I.10.3. Puissance crête - Point de puissance maximale P_{max} (P_{pm}) ……..……..…20

I.10.4. Facteur de forme FF 21

I.10.5. Rendement électrique ou efficacité η 21

I.10.6. Rendement Quantique RQ ……21

I.11. Conclusion 23

Chapitre II

II.1. Introduction 27

II.2. Les cellules solaires à couches minces 27

II.3. Intérêts des couches minces..... 28

II.4. Structure de cellules solaires en couches minces 28

II.4.1. Le substrat 30

II.4.2. L'électrode de contact arrière 30

II.4.3. Couche absorbante 31

II.4.4. Couche tampon 31

II.4.5. La couche fenêtre (TCO) 31

II.4.6. L'électrode de contact avant (la grille) 32

II.5. Type des Cellules solaires en couches minces 33

II.5.1. Couches minces de silicium (mono ou multi-cristallin et amorphe) 33

II.5.2. Couches minces de tellurure de cadmium (CdTe) 33

II.5.3. Couches minces de di-séléniure de cuivre-indium (CIS/CIGS) 34

II.6.Matériaux utilisés dans notre simulation et leurs caractéristiques physiques ……..34

II.6.1. Le tellurure de cadmium (CdTe) 34

II.6.2. Le sulfure de cadmium (CdS) 35

II.6.3. L'oxyde de zinc (ZnO) 36

II.6.4. Le sulfure de cadmium et de zinc ($Cd_{1-x}Zn_xS$) 37

II.7. Techniques de dépôts de couches minces 37

II.7.1. Méthodes physiques 38

II.7.2. Méthodes chimiques 38

II.8.Les avantages et les inconvénients de la technologie de type mince …….39

II.8.1. Les avantages 39

II.8.2. Les inconvénients 39

II.9. Conclusion…….…….....40

Chapitre III

III.1. Introduction 45

III.2. Définition du logiciel de simulation AMPS-1D 45

III.3. Aperçu sur le fonctionnement de l'AMPS 46

III.4. Utilisation de l'AMPS 46

III.5. Propriétés générales du dispositif et du matériau 47

III.5.1. Propriétés du matériau 47

III.5.2. Propriétés générales du dispositif 48

III.6. Paramètres de modélisation 49

III.7. Description de notre étude 49

III.8. La structure de référence ZnO/CdS/CdTe/Mo 50

III.8.1. Paramètres de la modélisation 51

III.8.2. Analyse des performances de la structure 52

III .9. La structure propose ZnO/$Cd_{1-x}Zn_xS$/CdTe/Mo 54

III.9.1. Paramètres de la modélisation 55

III.9.2. Analyse des performances de la structure proposée 56

III.10. Comparaison des deux structures 58

III.11. Effet de la température sur les performances des deux structures 61

III.12. Les caractéristiques J-V 61

III.13. Le rendement quantique 62

III.14. Conclusion..... 63

Conclusion générale 66

Liste des figures

Figure.I.1. Prévision des capacités cumulées de l'énergie solaire photovoltaïque par région dans le monde d'ici 2050 7

Figure I.2. Schéma indiquant les Air Mass en fonction de la zone spatiale 8

Figure. I.3. Spectre solaire à la surface de l'atmosphère Terrestre (AM0) et à la surface du sol (AM1.5G et AM1.5D) 9

Figure I.4. Cellule photovoltaïque 10

Figure I.5. Structure de base d'une cellule solaire photovoltaïque 11

Figure I.6. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque 12

Figure I.7. Différentes générations de la cellule solaire. 12

figure I.8. (a) Exemples de technologies photovoltaïques (b) Etat du développement pour ces technologies photovoltaïques……..…13

Figure I.9. Représentation des bandes d'énergie. 14

Figure 1.10. Types de semi-conducteurs extrinsèque au zéro absolu. 17

Figure I.11. Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire PV idéale sous éclairement.. 18

Figure I.12. Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire PV réelle sous éclairement (modèle à une seule diode) 18

Figure I.13. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque (modèle à deux diodes)……19

Figure I.14. Courbes caractéristiques d'un générateur PV. 21

Figure I.15. Allure des courbes caractéristiques I – V d'un générateur PV, (a) pour différents éclairements et pour une température fixée de la cellule, (b) pour différentes températures de la cellule sous un rayonnement fixé. 22

Figure I.16. Allure des courbes caractéristiques P – V d'un générateur PV, (a) pour différents éclairements et pour une température fixée de la cellule, (b) pour différentes températures de la cellule sous un rayonnement fixé. 22

Figure II.1. Structure standard d'une cellule à base de CIGS. 29

FigureII.2. schéma simplifié de composant d'une cellule photovoltaïque en couches minces..32

Figure II.3. Représentation du tellurure de cadmium (CdTe). Les atomes de cadmium Cd sont représentés en noir et les atomes de tellurure en rouge 35

Figure II.4. Structure du composé (CdS). (a -zinc blende), (b - Wurtzite) 36

Figure II.5. Structure cristallographique du (ZnO) (Würtzite) 37

Figure II.6. Différentes techniques de dépôt des couches minces. 39

Figure III.1. La fenêtre principale d'AMPS-1D 46

Figure III.2. La fenêtre principale d'AMPS-1 47

Figure III.3. Fenêtre d'informations des couches « layer info »..... 48

Figure III.4. Fenêtre d'informations du dispositif : (a) Contact avant, (b) Contact arrière. ... 48

Figure III.5. La structure de référence. 50

Figure III.6. Variation du rendement électrique en fonction de l'épaisseur de la couche de CdTe. 52

Figure III.7. Variation du Tension de circuit ouvert (V_{CO}) en fonction de l'épaisseur de la couche de CdTe. 52

Figure III.8. Variation du courant de court-circuit (J_{SC}) en fonction de l'épaisseur de la couche de CdTe. 53

Figure III.9. Variation du facteur de forme (FF) en fonction de l'épaisseur de la couche de. 53

Figure III.10. La structure proposée. 54

Figure III.11. Variation du Rendement électrique en fonction de l'épaisseur de la couche de CdTe. 56

Figure III.12. Variation du Tension de circuit ouvert (Voc) en fonction de l'épaisseur de la couche de CdTe. 57

Figure III.13. Variation du courant de court-circuit (J_{SC}) en fonction de l'épaisseur de la couche de CdTe. 57

Figure III.14. Variation du facteur de forme (FF) en fonction de l'épaisseur de la couche de CdTe. 58

Figure III.15. Variation du Rendement électrique en fonction de l'épaisseur de la couche de CdTe…….58

Figure III.16. Variation du Tension de circuit ouvert (Voc) en fonction de l'épaisseur de la couche de CdTe. 59

Figure III.17. Variation du courant de court-circuit (JSC) en fonction de l'épaisseur de la couche de CdTe. 59

Figure III.18. Variation du facteur de forme (FF) en fonction de l'épaisseur de la couche de CdTe. 60

Figure III.19. Effet de la température de fonctionnement sur les performances des cellules. 61

Figure III.20. La caractéristique J-V. 62

Figure III.21. Le rendement quantique de CdS/CdTe et $Cd_{1-x}Zn_xS$/CdTe 62

Liste des Tableaux

Tableau II.1. Différents milieux de dépôt de couches minces. 37

Tableau III.1. Paramètres de chaque couche de la cellule utilisés dans la simulation..... 51

Tableaux III.2. Paramètres de chaque couche de la cellule utilisés dans la simulation..... 55

Tableaux III.3. Effet du remplacement de Cd1-xZnxS par CdS sur la performance de la cellule solaire à base de CdTe (1000 nm)…….60

Liste des symboles

CO_2 : dioxyde de carbone.

ER : énergies renouvelables.

AM : coefficient de masse d'air

θ : L'angle d'incidence du rayonnement.

c-Si : silicium massif.

GaAs : l'arséniure de gallium.

CdTe : tellurure de cadmium.

$CuInSe_2$: di-séléniure de cuivre et d'indium.

TiO_2 : dioxyde de titane.

PV : photovoltaïque.

I : courant (A).

V : tension (V).

P : puissance.

η : rendement de conversion ou efficacité de conversion.

Pmax : Puissance crête - Point de puissance maximale.

Vco : tension en circuit ouvert.

Icc : densité de courant de court-circuit.

FF : facteur de forme.

RQ : Rendement Quantique.

Ipm (I_{opt}): courant optimal (A).

Vpm (Vopt) : Vpm : tension au point de puissance maximale (tension optimale) (V).

a-Si : silicium amorphe.

CIGS : cuivre-indium-gallium.

TCO : La couche fenêtre.

Mo : molybdène.

CIS : cuivre-indium-sélénium

ZnO : L'oxyde de zinc

$Cd_{1-X}Zn_XS$: Le sulfure de cadmium et de zinc

InGaAs : l'arséniure/indium de gallium

Cd : Les atomes de cadmium

Zn^{+2} : atome de zinc

O^{2-} : atomes d'oxygène

CdS : sulfure de cadmium

ZnS : sulfure de zinc

PVD : physical vapor deposition (dépôt en phase vapeur)

CVD : dépôt en phase vapeur de produit chimique métalloorganique

MOCVD: Metal Organic Chemical Vapor Deposition

CBD: Chemical Bath Déposition

TFSi: thin film silicon

PECVD : Plasma Enhanced Chemical Vapor Déposition

AMPS-1D : logiciel de simulation

E_{Fi} : niveau de Fermi intrinsèque

Ec : niveau d'énergie minimale de la bande de conduction

Ev : niveau d'énergie maximale de la bande de valence

k : constante de Boltzmann

T : température absolue

Na : concentration en atomes accepteurs

Nc : densité d'états équivalents dans la bande de conduction

Nv : densité d'états équivalents dans la bande de valence

Nd : concentration en atomes donneurs

n : concentration des électrons

ni : concentration intrinsèque des porteurs

p : concentration des trous

nm : nanomètre

µm : micromètre

Wc : watt crête

Is : courant de saturation sous polarisation inverse,

J : la densité de courant total en sortie de la cellule (A/cm^2),

J0 : courant de saturation (équivalent à Is)

J_{ph} : la densité de courant générée par l'illumination,

J_d : la densité de courant traversant la diode,

J_{sh} : la densité de courant perdue à travers la résistance shunt.

V : tension aux bornes de la cellule,

J_{s1} : courant de saturation inverse dû à la diffusion des porteurs minoritaires dans la jonction

J_{s2} : courant de saturation inverse dû à la recombinaison/génération des porteurs via des centres de piégeage dans la zone de charge d'espace (ZCE)

q : charge élémentaire,

Rs : résistance série ($\Omega \cdot cm^2$)

T : température absolue (en Kelvin).

Vbi : barrière de potentiel interne,

Rsh: résistance shunt ($\Omega \cdot cm^2$),

I_{ph} : photo-courant généré par la cellule PV (A).

PHIBO : $Ec - Ef$ Pour : x = 0 (surface avant)

PHIBL : $Ec - Ef$ Pour : x = L (surface arrière)

(Δn), (Δp) : Le changement de la population des électrons (trous) dans la bande de conduction (valence) par rapport à la concentration à l'équilibre thermique n_0 (p_0).

$\tau_n \; et \; \tau_p$: Les durées de vie des électrons et des trous, respectivement.

Eg : L'énergie de gap

NA : la concentration de dopage de trou

ND :la concentration de dopage d'électrons

MUN : la mobilité d'électrons

MUP : la mobilité des trous

CHI : l'affinité électronique

EPS : la permittivité relative

NC : la densité d'états dans la bande de conduction

NV : la densité d'états dans la bande de valence

DOS : Densité des états électroniques (Density Of States)

Résumé

Ce travail porte sur l'étude des performances de cellules solaires à couches minces en CdTe, en comparant deux types de couches tampons : CdS et $Cd_{1-x}Zn_xS$ (x=0.2). Les simulations ont été réalisées avec le logiciel AMPS-1D. Les résultats montrent que l'utilisation de $Cd_{1-x}Zn_xS$ améliore les performances électriques de la cellule, notamment en termes de tension, courant, facteur de forme et rendement global. Cette amélioration met en évidence le potentiel de $Cd_{1-x}Zn_xS$ comme alternative efficace au CdS dans les cellules solaires à base de CdTe.

Abstract

This work investigates the performance of CdTe thin-film solar cells using two different buffer layers: CdS and $Cd_{1-x}Zn_xS$ (x = 0.2). Simulations were carried out using AMPS-1D software. The results show that replacing CdS with $Cd_{1-x}Zn_xS$ enhances the cell's electrical performance, including voltage, current, fill factor, and overall efficiency. These improvements highlight the potential of $Cd_{1-x}Zn_xS$ as an effective alternative buffer layer in CdTe-based solar cells.

الملخص

يهدف هذا العمل إلى دراسة أداء الخلايا الشمسية الرقيقة من مادة CdTe باستخدام طبقتين عازلتين مختلفتين: CdS و$Cd_{1-x}Zn_xS$ (حيث x=0.2). تم إجراء المحاكاة باستخدام برنامج AMPS-1D. أظهرت النتائج أن استخدام طبقة $Cd_{1-x}Zn_xS$ بدلاً من CdS أدى إلى تحسين الأداء الكهربائي للخلية، مما يشير إلى فعالية هذه الطبقة في رفع كفاءة خلايا CdTe الشمسية.

Mots-clés: Cellule solaire, Couches minces, Tellurure de cadmium (CdTe), Sulfure de cadmium (CdS), Sulfure de cadmium et de zinc ($Cd_{1-x}Zn_xS$), AMPS-1D, Couche tampon, Énergies renouvelables, Paramètres électriques : Voc, Jsc, FF, η, L'oxyde de zinc (ZnO)

Introduction Générale

Introduction générale

La croissance rapide de la population mondiale, l'industrialisation et l'épuisement progressif des ressources fossiles ont entraîné une hausse significative de la demande énergétique. Dans ce contexte, les énergies renouvelables en particulier l'énergie solaire s'imposent comme des alternatives durables, propres et abondantes. L'énergie solaire photovoltaïque, qui permet de convertir directement le rayonnement solaire en électricité grâce à des dispositifs appelés cellules solaires, joue un rôle de plus en plus central dans la transition énergétique mondiale [1].

Historiquement, les cellules photovoltaïques étaient principalement basées sur le silicium cristallin, un semi-conducteur performant, mais dont la fabrication reste à la fois énergivore et coûteuse. Afin de dépasser les limites des technologies conventionnelles, de nouvelles générations de cellules solaires ont émergé, reposant sur des matériaux organiques, hybrides ou entièrement inorganiques. Parmi ces alternatives, les cellules solaires inorganiques suscitent un intérêt croissant en raison de leur stabilité chimique, de leur durabilité à long terme et de leur compatibilité avec des procédés de fabrication à faible coût [2].

Parmi les technologies photovoltaïques émergentes, les cellules solaires à base de tellurure de cadmium (CdTe) en couches minces se distinguent par leur rendement élevé et leur faible coût de fabrication. Ces caractéristiques en font une solution particulièrement intéressante pour les applications à grande échelle, ainsi qu'un sujet de recherche très actif.

Cependant, l'amélioration de leurs performances électriques demeure un enjeu majeur. L'un des éléments clés influençant l'efficacité globale d'une cellule CdTe est la couche tampon, située entre la couche absorbante (CdTe) et la couche de transport avant. Cette couche joue un rôle essentiel dans la formation d'une interface de qualité, l'alignement optimal des niveaux d'énergie et la facilitation du transport des porteurs de charge, contribuant ainsi au bon fonctionnement de la cellule.

Dans ce cadre, notre étude s'intéresse à l'effet de la couche tampon $\mathbf{Cd_{1-x}Zn_xS}$, dans laquelle une partie du cadmium est remplacée par du zinc, sur les performances électriques de la cellule solaire **CdTe**. Pour ce faire, nous avons eu recours à la simulation numérique à l'aide du logiciel **AMPS-1D**, afin d'analyser l'impact de la variation des propriétés de la couche tampon sur le rendement de la cellule.

Ce travail est structuré en trois chapitres :

- Le **premier chapitre** est consacré aux généralités sur les cellules solaires, leurs types et leurs principes de fonctionnement.
- Le **deuxième chapitre** traite des cellules solaires à couches minces, avec un accent particulier sur la technologie CdTe.
- Le **troisième chapitre** présente les résultats des simulations et les analyses réalisées à l'aide du logiciel AMPS-1D, en étudiant l'influence de la couche $\mathbf{Cd_{1-x}Zn_xS}$ sur les performances de la cellule.

L'objectif principal de ce mémoire est de contribuer à l'optimisation des cellules solaires en couches minces à base de **CdTe**, en explorant l'effet potentiellement bénéfique d'une couche tampon modifiée sur leur rendement.

Chapitre I

Généralité sur les cellules solaires photovoltaïques

I.1. Introduction

Dans ce premier chapitre, nous introduisons les notions fondamentales relatives aux cellules solaires photovoltaïques. Nous débutons par un aperçu historique de la technologie Photovoltaïque ainsi qu'une présentation des principales caractéristiques du rayonnement solaire. Par la suite, nous définissons le concept de cellule photovoltaïque et abordons-les propriétés des matériaux semi-conducteurs qui constituent le cœur de ces dispositifs. Enfin, nous détaillons le principe de fonctionnement de la cellule solaire, son schéma équivalent, ainsi que ses caractéristiques électriques essentielles.

I.2. Historique du photovoltaïque

L'histoire du photovoltaïque remonte à 1839, lorsque le physicien français Edmond Becquerel découvre que certains matériaux produisent une faible quantité d'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Cet effet, appelé effet photovoltaïque, a été étudié plus en détail par Heinrich Hertz dans les années 1870, notamment sur des matériaux solides comme le sélénium. Bien que le sélénium ait montré des rendements d'environ 1%, il a rapidement trouvé une application dans le domaine de la photographie, en tant que luxmètre [3].

Le phénomène électro-optique a été expliqué en 1912 par Albert Einstein, qui a jeté les bases théoriques des technologies photovoltaïques. Cependant, c'est véritablement en 1954 que la première cellule photovoltaïque moderne, à base de silicium, a été développée par les chercheurs des Bell Labs aux États-Unis. Cette avancée a marqué le début des recherches intensives et des développements autour du silicium pour améliorer l'efficacité et la viabilité commerciale des cellules solaires.

La période suivante, de 2000 à nos jours, est marquée par une participation internationale croissante dans le déploiement des cellules photovoltaïques. Un tournant majeur a été la mise en place de la loi allemande sur les énergies renouvelables, qui a favorisé le développement d'un marché de l'énergie solaire en Europe. Parallèlement, des efforts de recherche soutenus ont permis de réduire considérablement les coûts de production des cellules photovoltaïques et ont conduit à des progrès notables en termes d'efficacité et de rentabilité [4].

I.3. Énergie renouvelable et solaire

La demande en énergie électrique ne cesse de croître, portée par la modernisation des besoins de la société et son utilisation accrue dans les secteurs industriel, domestique et agricole. En Afrique, et particulièrement en Algérie, cette demande est principalement satisfaite par l'exploitation massive des combustibles fossiles, tels que le pétrole et le charbon. Cependant, face aux défis environnementaux et à l'épuisement progressif de ces ressources, l'attention se tourne de plus en plus vers les énergies renouvelables (ER), avec un intérêt marqué pour l'énergie solaire.

Cette transition vers les énergies renouvelables inclut également l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique et certaines formes spécifiques de biomasse. Parmi ces sources, l'énergie solaire et l'énergie éolienne sont appelées à jouer un rôle clé dans le remplacement des énergies fossiles traditionnelles, permettant ainsi de réduire l'empreinte carbone du secteur énergétique. Selon les projections, leur déploiement à grande échelle pourrait non seulement atténuer les effets néfastes sur le climat d'ici 2050, mais aussi contribuer significativement à la décarbonisation de la production d'électricité. Cette perspective, illustrée dans la Figure I.1, démontre l'importance stratégique de ces technologies pour un avenir énergétique durable.

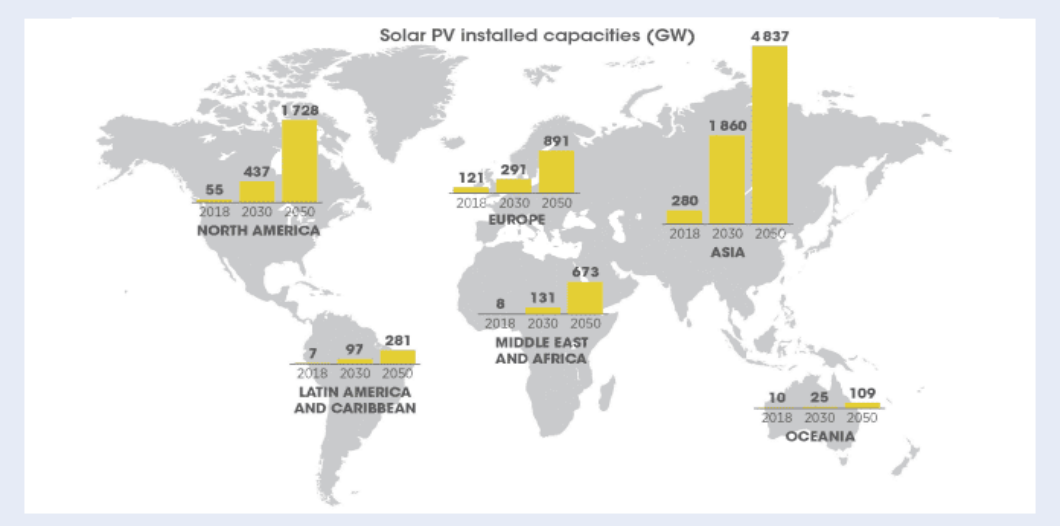


Figure I.1. Prévision des capacités cumulées de l'énergie solaire photovoltaïque par région dans le monde d'ici 2050 [5]

L'énergie solaire fait partie des sources d'énergie renouvelables avec le taux de croissance le plus rapide et, par conséquent, elle a le potentiel de réduire considérablement la dépendance aux combustibles fossiles et la quantité d'émissions de CO_2 rejetées dans l'atmosphère [6].

I.4. Le rayonnement solaire

Bien que notre planète soit continuellement traversée par divers rayonnements photoniques issus des réactions de fusion nucléaire au cœur des étoiles du système solaire, le soleil demeure la principale source de photons exploitables pour les applications photovoltaïques terrestres et spatiales. En raison de sa proximité, il émet un large spectre de photons, caractérisé par différentes longueurs d'onde. Ce spectre solaire, lors de son parcours vers la Terre, subit diverses interactions telles que la réflexion, la réfraction, la diffusion et l'absorption, cette dernière étant modérée pour les longueurs d'onde de la lumière visible.

Ces phénomènes sont principalement influencés par la présence de gaz atmosphériques (ozone, vapeur d'eau, CO_2) ainsi que par les aérosols, dont l'impact varie selon la fréquence des photons. Par ailleurs, la notion de coefficient de masse d'air (noté "AM") permet de caractériser l'épaisseur de l'atmosphère traversée par les rayons solaires. Ce coefficient est défini comme le rapport entre la longueur du trajet optique direct parcouru par le rayonnement à travers l'atmosphère terrestre (L) et la longueur de ce même trajet lorsque le Soleil est à son zénith soit :

$$\mathbf{AM=L/L0} \qquad \mathbf{(1)}$$

L'angle d'incidence du rayonnement, noté θ, correspond à l'angle formé entre le rayon solaire et la normale à la surface terrestre. Les Figures I.2 et I.3 illustrent les différents coefficients Air Mass ainsi que les spectres solaires qui leur sont associés [5].

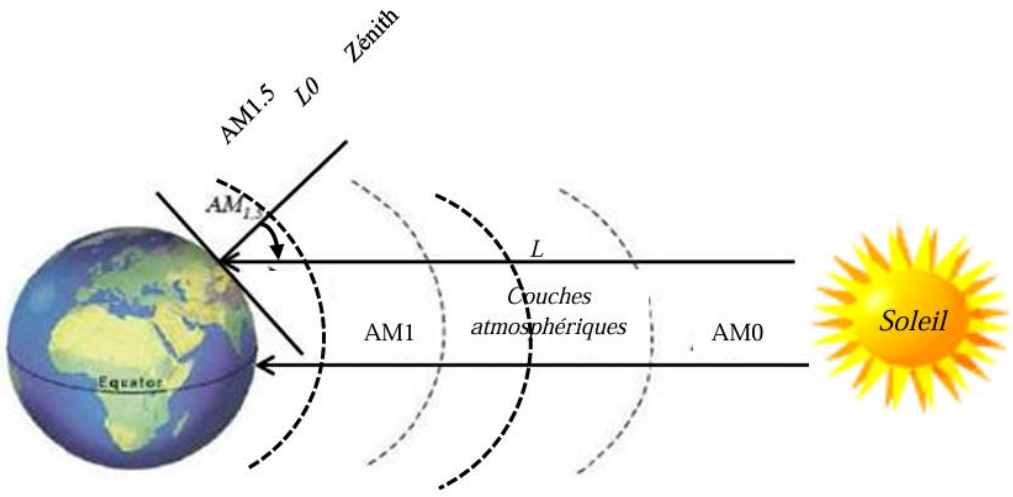


Figure I.2. Schéma indiquant les masses d'air en fonction de la zone spatiale

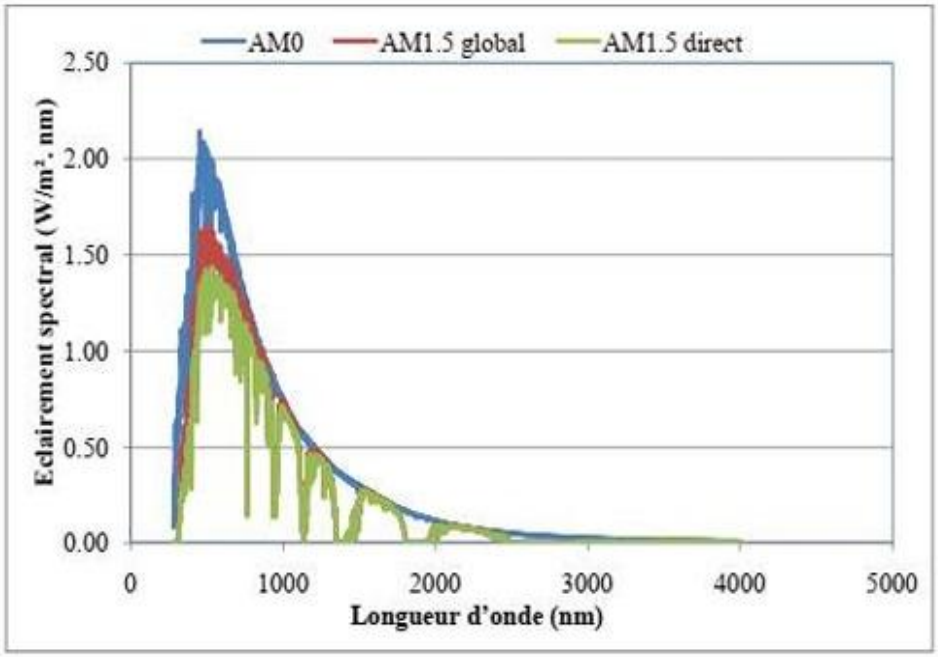


Figure I.3. Spectre solaire à la surface de l'atmosphère Terrestre (AM0) et à la surface du sol (AM1.5G et AM1.5D)

Le coefficient de masse d'air (AM) est couramment utilisé pour caractériser les performances des cellules solaires dans des conditions normalisées. Il définit les différents spectres solaires en fonction de l'épaisseur atmosphérique traversée par le rayonnement solaire avant d'atteindre la surface. On distingue principalement trois cas [7] :

AM0 (Zéro atmosphère) : Ce spectre correspond au rayonnement solaire mesuré au-delà de l'atmosphère terrestre, approximé par le spectre d'un corps noir à 5800 K. Il est utilisé pour caractériser les performances des cellules solaires dans les applications spatiales, telles que les satellites de communication et les engins spatiaux.

AM1 (Une atmosphère) : Ce spectre représente le rayonnement solaire lorsqu'il atteint directement la surface terrestre au zénith, c'est-à-dire avec un angle d'incidence de 0°. Il permet d'évaluer l'efficacité des cellules solaires dans les régions équatoriales et tropicales, où le soleil est à la verticale pendant une grande partie de l'année.

AM1.5 (Norme terrestre) : Ce spectre, d'une intensité de 1000 W/m², est utilisé comme référence standard pour tester et évaluer les cellules solaires terrestres, y compris celles employées dans les systèmes à concentration. Il correspond à un angle d'incidence de 45°. On distingue également deux variantes :

AM1.5G (Global) : Il prend en compte à la fois le rayonnement direct du soleil et le rayonnement diffusé par l'atmosphère.

AM1.5D (Direct) : Il ne considère que le rayonnement direct, sans les effets de diffusion atmosphérique.

I.5. Les cellules solaires

I.5.1. Définition

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est un composant opté-électrique, composé d'un matériau semi- conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en énergie électrique. Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés du rayonnement solaire et à celles des semi-conducteurs.

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule [8].

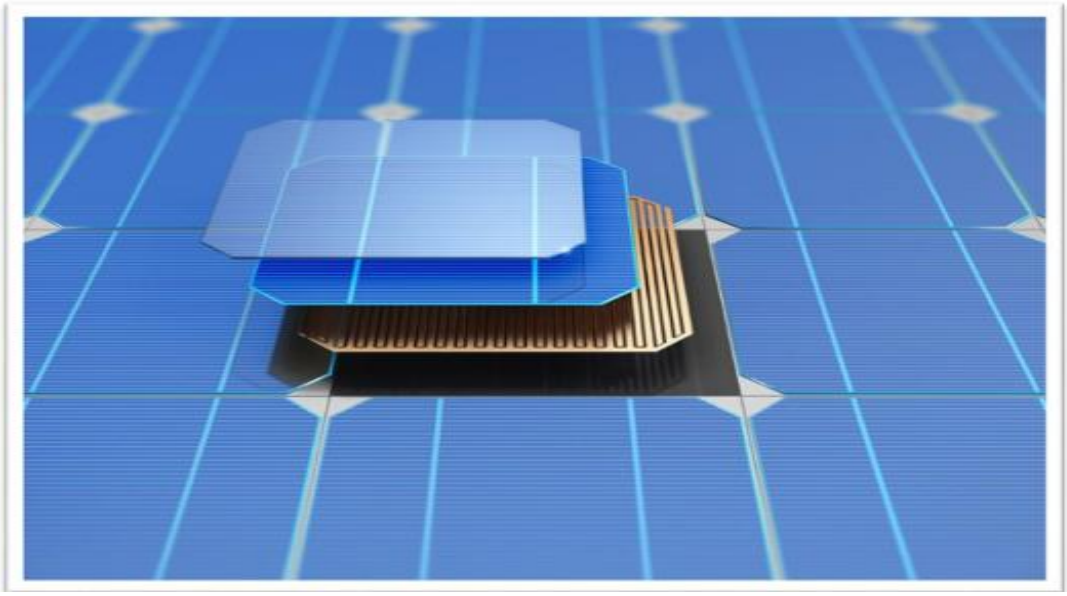


Figure I.4. Cellule photovoltaïque

I.5.2. Structure d'une cellule solaire

La structure la plus simple d'une cellule solaire (Figure I.5) est constituée d'une jonction entre deux zones dopées différemment d'un même semi-conducteur (homo-jonction p-n) ou entre deux semi-conducteurs différents (hétérojonction). Chacune des régions est reliée à une électrode métallique au moyen d'un contact ohmique de faible résistance [9].

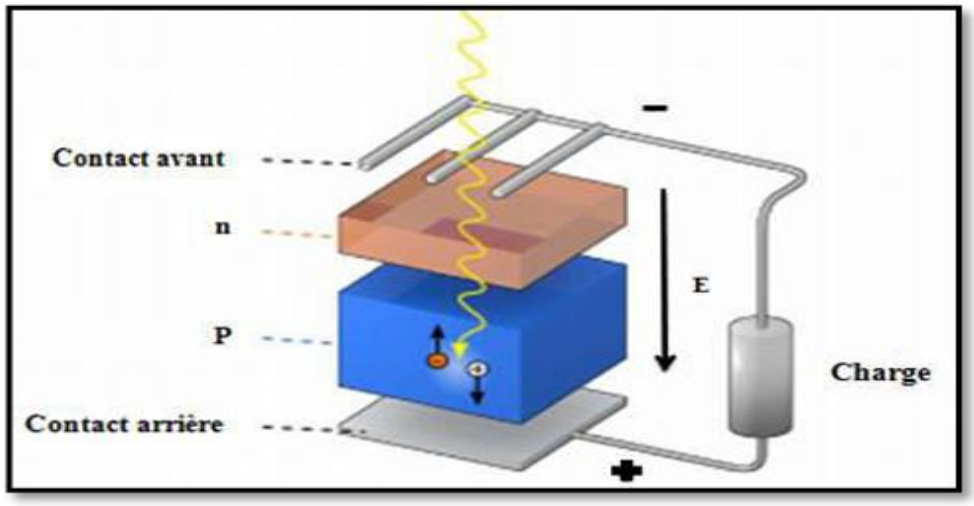


Figure I.5. Structure de base d'une cellule solaire photovoltaïque

I.5.3. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction (dite p-n) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron-trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent

les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel : le courant électrique circule (figure I.6) [10].

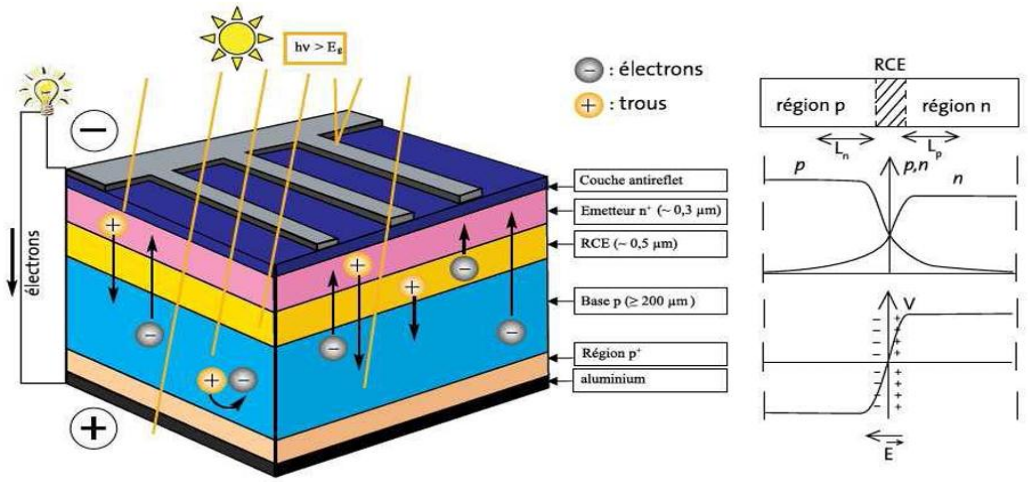


Figure I.6. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

I.6. Générations de la cellule solaire

L'objectif de la recherche dans le domaine du photovoltaïque est bien sûr d'améliorer le rendement des cellules tout en maintenant voir en diminuant le coût de fabrication de ces cellules. Différentes technologies existent et sont généralement classées en trois générations dont les caractéristiques sont résumées dans le schéma suivant [11].

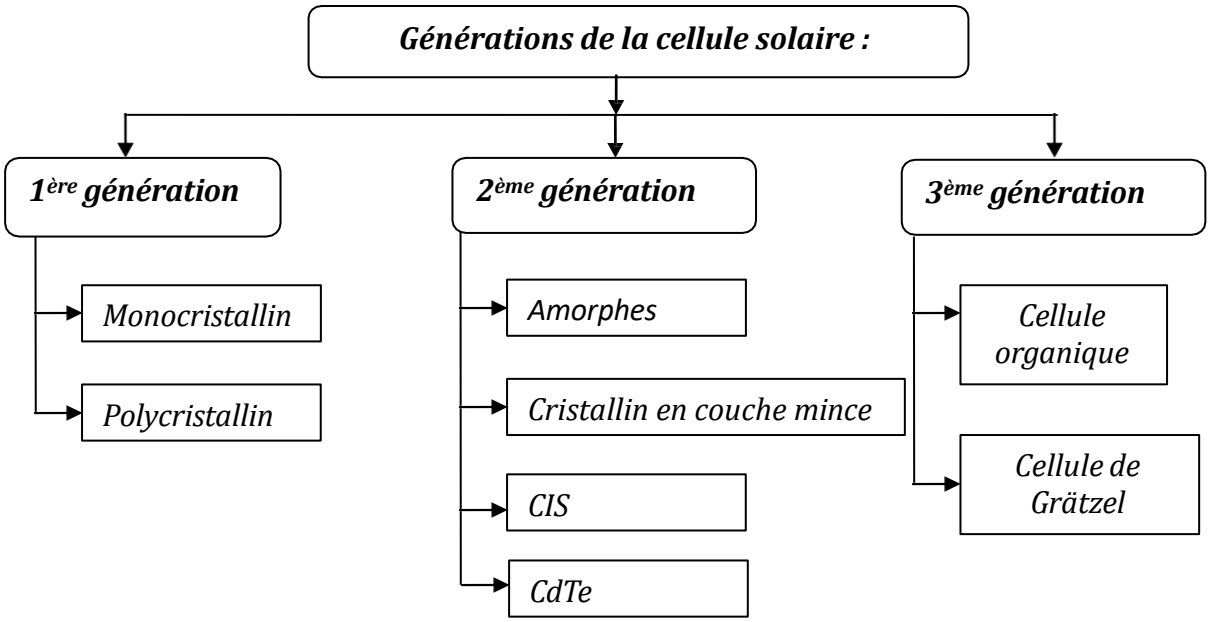


Figure I.7. Différentes générations de la cellule solaire

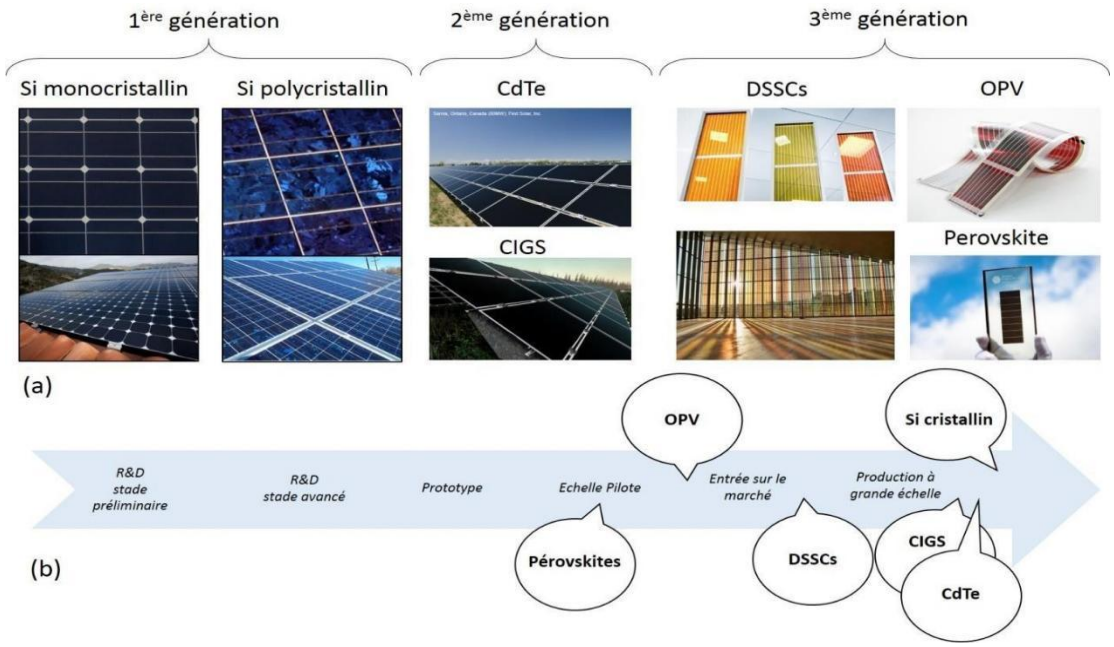


Figure I.8. (a) Exemples de technologies photovoltaïques (b) Etat du développement pour ces technologies photovoltaïques

I.6.1. Première génération

Elle concerne les cellules solaires classiques du silicium massif (c-Si) de substrat à épaisseur supérieure à 100 µm. Pour ses deux types monocristallin et multi-cristallin, la technologie de cette génération est mature et bien maitrisée. Elle présente une production mondiale d'environ 84 % du marché PV (37% monocristallin, 2% ruban et 45% multi-cristallin). Son rendement se situe dans la fourchette 15-26 % [12].

I.6.2. Deuxième génération

Elle concerne les cellules solaires à couches minces d'épaisseur inférieure à 50 µm utilisant le silicium amorphe ou des matériaux de composés III-V comme l'arséniure de gallium (GaAs), le tellurure de cadmium (CdTe), le di-séléniure de cuivre et d'indium ($CuInSe_2$) et le dioxyde de titane (TiO_2). Il est possible de réduire les coûts de production de ces types de cellules solaires par rapport à la première génération. De plus, elles sont flexibles et leur utilisation est plus variée. Cependant, les étapes de production exigent plus d'énergie car on utilise des procédés sous vide et des traitements à haute température [11].

I.6.3. Troisième génération

Il y a beaucoup de recherche en cours dans le photovoltaïque pour des types de cellules qui peuvent dépasser le rendement de 20%, ce qu'on appelle les cellules solaires de la 3ème génération. Cette génération est basée sur la variété de nouveaux matériaux en dehors du silicium, y compris des nanotubes, les cellules à concentration, des fils de silicium, des encres solaires en utilisant des technologies de presse d'impression classiques, des colorants organiques et des polymères. À l'heure actuelle, la plupart des travaux sur les cellules solaires de la 3ème génération est réalisée en laboratoire, et en cours d'élaboration par les nouvelles entreprises car le coût de production reste élevé. Ces cellules ne sont pour la majorité qu'à l'état d'expérimentation [11].

I.7. Les semi-conducteurs

Un semi-conducteur est un corps cristallin dont les propriétés de conductibilité électrique sont intermédiaires entre celles des métaux et celles des isolants.

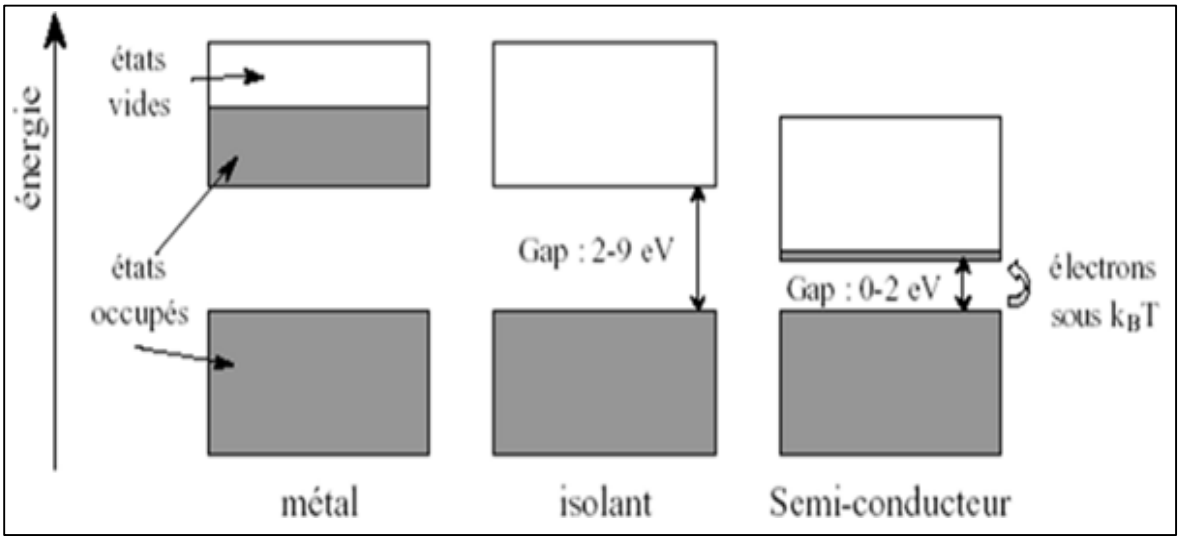


Figure I.9. Représentation des bandes d'énergie

En physique la conductivité intrinsèque d'un cristal semi-conducteur est liée à son nombre de porteurs de charge intrinsèques (électrons et trous). La libération d'un électron c'est-dire son passage de la bande de valence à la bande de conduction laisse un trou dans la bande de valence, qui participe à la conduction électrique comme un électron de charge électrique positive. Contrairement à un métal, à une température de zéro kelvin le semi-conducteur est isolant, cela est dû à l'agitation thermique qui suffit à fournir l'énergie nécessaire au passage d'un électron de la bande de valence à la bande de conduction, la conductivité résulte donc à l'augmentation de la température. Un rayonnement électromagnétique peut également provoquer le passage d'un électron dans la bande de conduction (photoconduction).

La semi-conduction extrinsèque est obtenue par le biais d'introduction d'impuretés, par dopage n (pour négatif) ou p (pour positif), ce qui augmente de beaucoup la conductivité des semi-conducteurs intrinsèques. Les porteurs libres introduisent une bande d'énergie supplémentaire dans la bande interdite du semi-conducteur (à un niveau accepteur ou donneur selon le type de dopage p ou n). On retrouve Les semi-conducteurs en électronique pour réaliser des composants tels que des diodes, des transistors, des thyristors, des circuits intégrés ainsi que des lasers à semi-conducteur.

Les semi-conducteurs sont les éléments de base pour la réalisation des cellules solaires qui sont composées d'un matériau semi-conducteur absorbant l'énergie lumineuse et la transformant directement en courant électrique. Pour expliquer cela avec plus de détail le principe de fonctionnement de ces cellules, nous rappelons tout d'abord que la cellule solaire est un dispositif semi-conducteur élaboré à partir d'une jonction PN soit la juxtaposition de deux semi- conducteurs l'un de type N et l'autre de type p. Illuminée, le déséquilibre de la charge électrique dans les régions N et P provoque un mouvement des charges à travers la jonction produisant ainsi de l'électricité [13].

I.8. Type des semi-conducteurs

I.8.1. Semi-conducteur intrinsèque

Un semi-conducteur dit intrinsèque est un matériau idéal ne possédant ni défaut physique ni défaut chimique [14]. Dans un semi-conducteur intrinsèque la concentration des électrons est identique à la concentration des trous [15].

Le niveau de Fermi d'un semi-conducteur intrinsèque ni est obtenu en faisant : $n = p$, par conséquent [16] :

$$\boldsymbol{E_{Fi} = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{kT}{2} Ln\left(\frac{N_v}{N_c}\right)} \qquad \textbf{(2)}$$

Aussi le niveau de Fermi d'un semi-conducteur intrinsèque est très proche du milieu de la bande interdite à la température ordinaire. La concentration intrinsèque des porteurs de charge est donnée par :

$$\boldsymbol{n_i^2 = n \cdot p = N_c \cdot N_v \cdot exp - \frac{E_g}{kT}} \qquad \textbf{(3)}$$

I.8.2. Semi-conducteur extrinsèque

On peut modifier de façon considérable la concentration de porteurs de charge d'un semi-conducteur intrinsèque en lui ajoutant de faibles quantités d'atomes astucieusement choisis et que l'on appelle impuretés dopantes ou tout simplement dopants. On obtient alors un semi- conducteur extrinsèque ou dopé [17].

Selon la nature des atomes introduits, soit le nombre d'électrons devient très supérieur au nombre de trous et le semi-conducteur est appelé de type n, soit le nombre de trous devient très supérieur à celui des électrons et le semi-conducteur est appelé de type p [17].

I.8.2.1. Semi-conducteur dopé n

Les atomes de silicium ou de germanium par exemple se cristallisent dans une structure où chaque atome est relié à 4 atomes voisins par des liaisons covalentes impliquant 2 électrons pour chaque liaison. Si on introduit un atome ayant 5 électrons de valence (phosphore, arsenic ou antimoine), cet atome prend la place d'un atome du cristal : 4 des électrons de l'impureté participeront aux 4 liaisons avec les 4 atomes voisins du cristal, le 5ème électron restera célibataire. A cet atome d'impureté est associé un niveau d'énergie appelé niveau donneur Nd qui se situe juste en dessous de la bande de conduction. L'écart entre ce niveau et la bande de conduction étant faible, un électron d'un niveau donneur peut facilement passer dans la bande de conduction sous l'action de l'agitation thermique. A température ambiante, presque toutes les impuretés sont ionisées et si la concentration en atomes donneurs est Nd, la densité de porteurs libres du semi-conducteur sera [14].

$$\mathbf{n} = \boldsymbol{n_0} + \boldsymbol{N_d} \qquad \textbf{(4)}$$

Où n_0 est la densité d'électrons générés par le processus de rupture de liaisons de covalence qui engendre des paires électrons-trous.

I.8.2.2. Semi-conducteur dopé p

Si on introduit un atome d'impureté trivalent (bore, aluminium ou gallium), cet atome en se plaçant dans le réseau ne peut saturer que 3 liaisons sur 4. Il manque donc une liaison par atome d'impureté auquel correspond un niveau d'énergie situé juste au-dessus de la bande de valence. Ce niveau est appelé niveau accepteur Na. Au zéro absolu, ces niveaux accepteurs sont vides ; lorsqu'on augmente la température, ils peuvent être occupés par des électrons provenant de la bande de valence [18].

De la même façon que pour le semi-conducteur dopé n, la concentration en trous du semi-conducteur sera :

$$p = p_0 + N_a \quad (5)$$

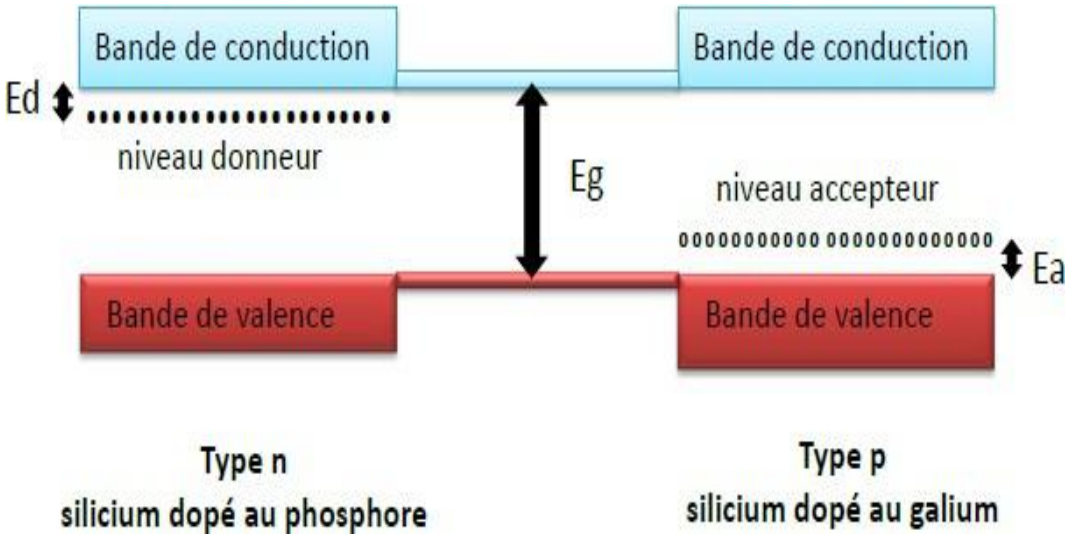


Figure I.10. Types de semi-conducteurs extrinsèques au zéro absolu

I.9. Modèle équivalent d'une cellule photovoltaïque

Le tracé du circuit électrique équivalent d'un système est fréquemment utilisé afin de décrire son comportement électrique à l'aide de composants électriques (Source, résistance, diode). Nous allons décrire ici par cette méthode une cellule PV inorganique ou organique dans l'obscurité et sous illumination. Dans l'obscurité, une cellule solaire suit le comportement d'une diode classique. Selon si la tension appliquée est supérieure ou inférieure à une tension seuil, la diode est respectivement passante ou bloquante. La densité de courant Jd dans la diode suit une équation de type Schrockley :

$$J_d = J_s \cdot \left(e^{\frac{q\cdot(v+R_s\cdot J)}{k_B T}}\right) \quad (6)$$

Avec Is le courant de saturation sous polarisation inverse, $V=V_{appliquée} - V_{bi}$ (V_{bi} barrière de potentiel interne) et n le facteur d'idéalité ($0< n \leq 1$ où 1 est le cas idéal).

Les schémas de la Figure I.11 présentent les circuits électriques équivalents d'une cellule solaire PV idéale sous éclairement. Une source de courant a été mise en parallèle à la jonction (diode). Cette source de courant génère le photo courant J_{PH} sous illumination. Rc est la résistance

de charge du circuit extérieur. On modélise sous éclairement la densité de courant J du circuit extérieur comme étant la somme de Jd et de J_{PH} [19] :

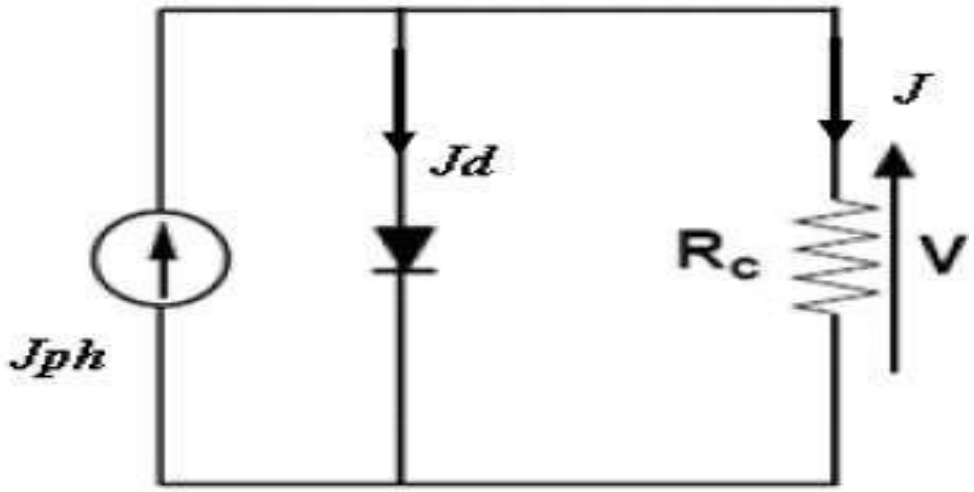


Figure I.11. Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire PV idéale sous éclairement

Pour passer aux cas d'une cellule solaire réelle (Figure I.12), il faut modifier le schéma électrique en prenant en compte les pertes dues aux résistances série et shunt (R_s et R_{sh}) de la cellule. La loi des nœuds donne :

$$J + J_{PH} = J_d + J_{\text{sh}} \quad (7)$$

$$v = J \cdot R_s + J_{sh} \cdot R_{sh} \quad (8)$$

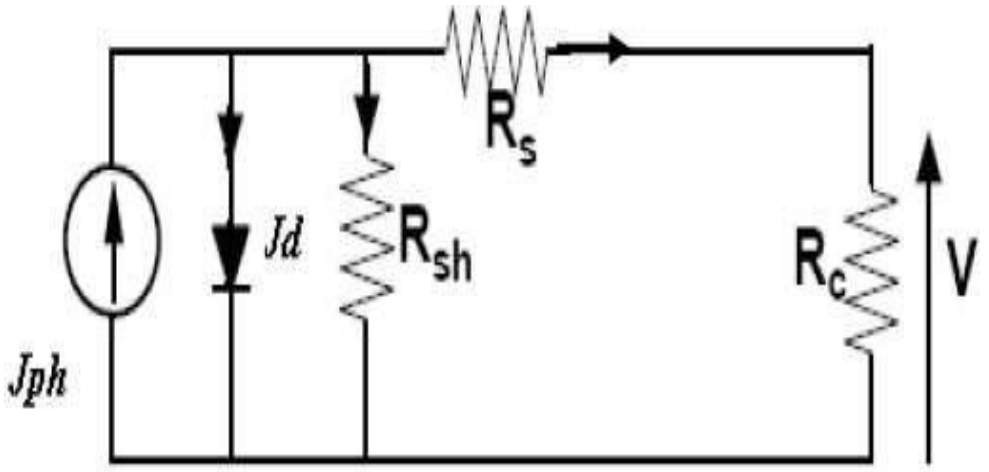


Figure I.12. Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire PV réelle sous éclairement (modèle à une seule diode)

L'équation déterminant la densité de courant est alors :

$$J = J_{pH} - J_s\left[exp\left(\frac{q(V+R_sJ)}{nk_BT}\right) - 1\right] - \frac{(v+R_sJ)}{R_{sH}} \quad (9)$$

R_s : résistance série (idéalement <50Ω) est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de celle des électrodes et du contact métal-semiconducteur ;

R_{sh} : résistance shunt (idéalement ~MΩ) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction : elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

Il existe aussi un autre schéma équivalent qui est souvent utilisé pour la modélisation des cellules photovoltaïques et qui utilise une deuxième diode en parallèle avec la première comme montre le schéma ci-dessous :

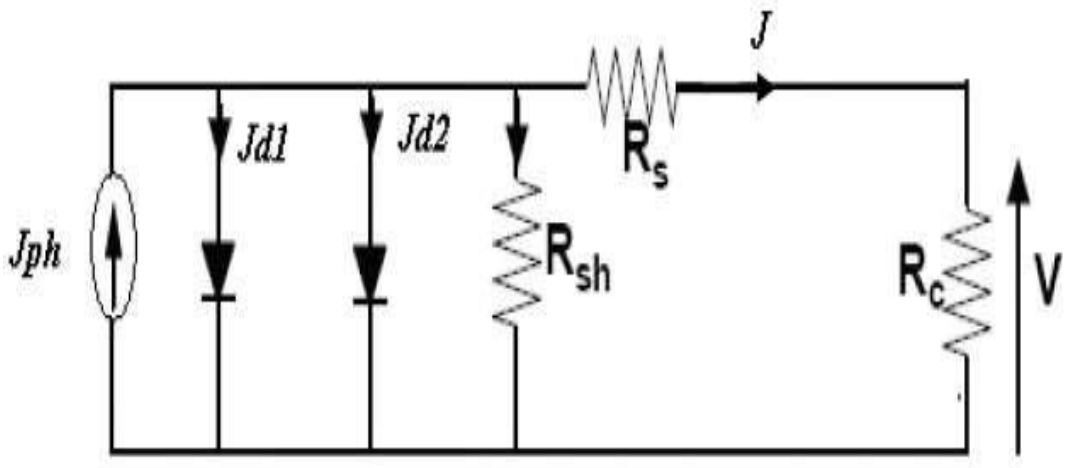


Figure I.13. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque (modèle à deux diodes)

L'équation déterminant la densité de courant dans ce modèle est donc :

$$J = J_{pH} - J_{S1}\left[exp\left(q\frac{(v+R_SJ)}{K_B \cdot T}\right) - 1\right] - J_{s2}\left[exp\left(q\frac{(v+R_SJ)}{n \cdot k_B \cdot T}\right)\right] - \frac{v+R_SJ}{R_{SH}} \quad (10)$$

Où J_{S1} et J_{S2} sont respectivement la densité de courant de saturation inverse dû à la diffusion des porteurs minoritaires dans la jonction et la densité de courant de saturation dû aux recombinaison et génération des porteurs à travers de centres localisés dans la zone de charge d'espace [10].

I.10. Paramètres électriques d'une cellule solaire

La figure I.14 montre les courbes caractéristiques typiques I –V et P –V d'une cellule PV pour un rayonnement et une température de cellule donnés. Chaque point de la courbe correspond à une charge appliquée aux bornes de la cellule. La tension augmente avec la charge, tandis que le courant devient plus faible. Les points caractéristiques à retenir sont :

I.10.1. Courant de court-circuit Icc

C'est le courant maximal qu'on peut obtenir, il correspond au courant généré lorsque la cellule PV est court-circuitée, c'est-à-dire une tension nulle aux bornes de la cellule. Tout comme le photo-courant I_{ph}, le courant de court-circuit est proportionnel à l'éclairement incident (Figure I.15a). En effet, un nombre élevé de photons incidents sur la cellule, permet de générer plus d'électrons libres qui peuvent contribuer à la conduction du courant. D'autre part, le courant de court-circuit augmente aussi avec la température de la cellule (Figure I.15b), en raison de l'augmentation de l'énergie des électrons qui nécessitent alors un faible éclairement pour passer à la bande de conduction. Cependant l'influence de la température sur Icc est plus faible que celui induit par l'éclairement [20].

I.10.2. Tension de circuit ouvert (tension à vide)

C'est la tension maximale aux bornes d'une cellule PV obtenue lorsqu'aucun courant ne passe, donc la résistance entre les bornes de la cellule est infinie (Figure I.14). Elle est principalement affectée par la température de la cellule (Figure I.15b), généralement pour chaque élévation de température d'un degré Celsius par rapport à la valeur standard (TC=25°C), la tension de circuit ouvert d'une cellule en silicium décroit en moyenne de 0.4%. Par ailleurs, cette tension V_{co} augmente faiblement avec l'éclairement (Figure I.15a).

I.10.3. Puissance crête - Point de puissance maximale P_{max} (P_{pm})

C'est la puissance maximale que peut générer une cellule PV, elle est égale au produit de I_{pm} par V_{pm} ou (I_{opt} et V_{opt}) c'est le point associé à la charge optimale de la cellule. Les figures I.16 a et b montrent que la puissance générée par la cellule PV augmente avec l'éclairement et décroit avec l'augmentation de la température de fonctionnement [20].

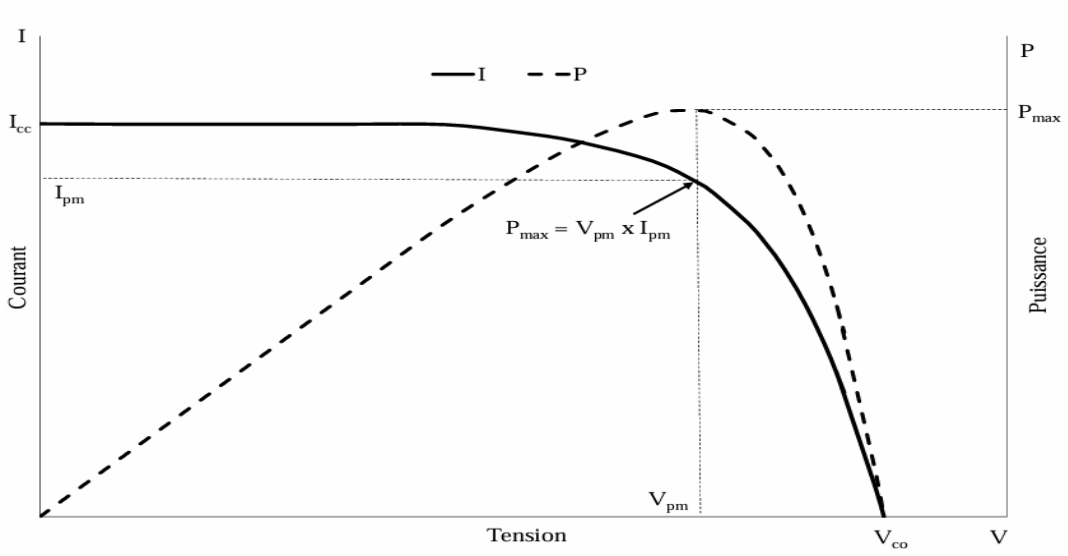


Figure I.14. Courbes caractéristiques d'un générateur PV

I.10.4. Facteur de forme FF

C'est le rapport entre la puissance maximale générée par la cellule PV et le produit de Icc, par Vco. La bonne qualité d'une cellule solaire correspond à un facteur de forme proche de 1. Pour FF égale à 1, la cellule est dite idéale.

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} = \frac{I_{max} \cdot V_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad \textbf{(11)}$$

I.10.5. Rendement électrique ou efficacité η

C'est le rapport entre la puissance électrique produite par un panneau PV de surface S, et l'intensité de rayonnement solaire incident sur cette même surface. Il s'exprime par :

$$\eta = \frac{p_{max}}{E \cdot S} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{E \cdot S} \quad \textbf{(12)}$$

E : Eclairement (W/m²)

S : Surface de la cellule (m²)

I.10.6. Rendement Quantique RQ

Le rendement quantique d'une cellule solaire est le rapport entre le nombre d'électrons collectés par la cellule et le nombre de photons incidents sur la surface de la cellule, généralement exprimé en pourcentage [21].

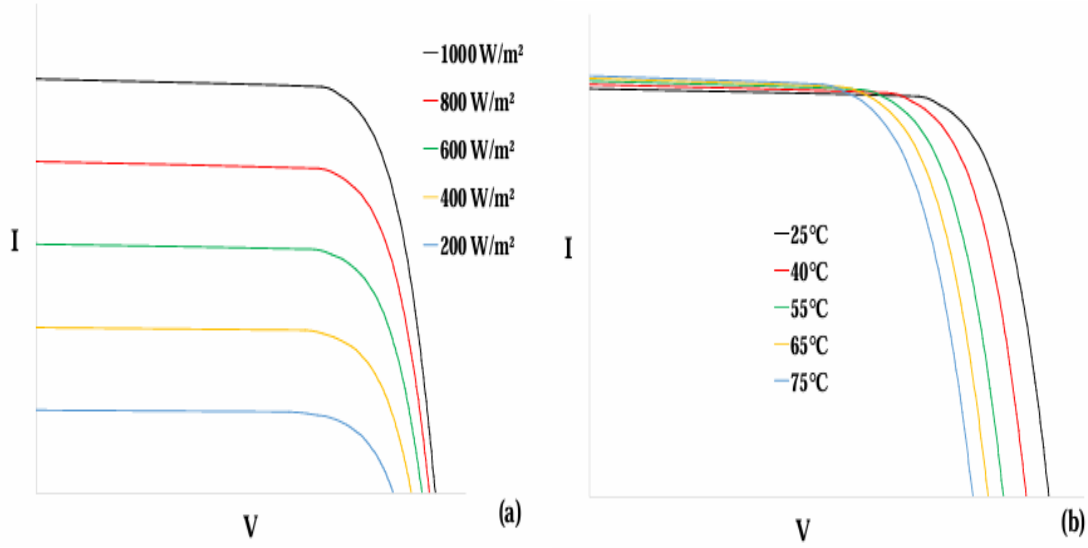


Figure I.15. Allure des courbes caractéristiques I – V d'un générateur PV, (a) pour différents éclairements et pour une température fixée de la cellule, (b) pour différentes températures de la cellule sous un rayonnement fixé

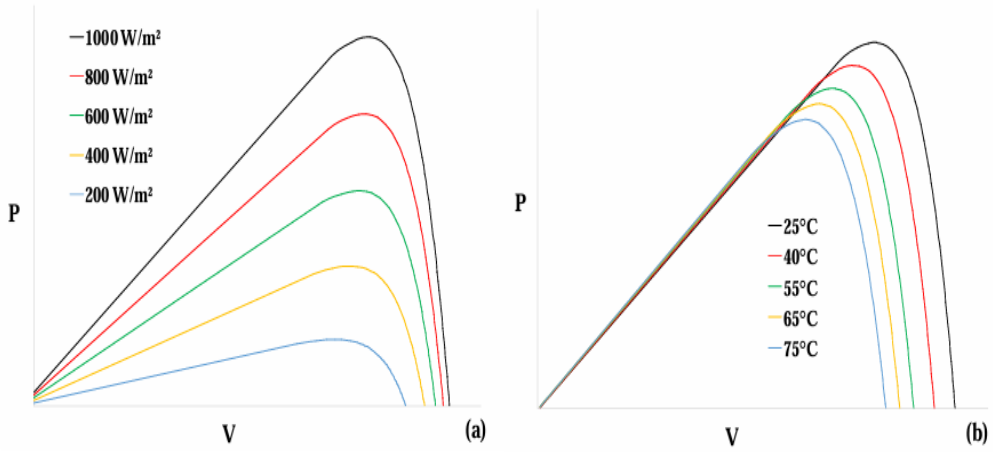


Figure I.16. Allure des courbes caractéristiques P – V d'un générateur PV, (a) pour différents éclairements et pour une température fixée de la cellule, (b) pour différentes températures de la cellule sous un rayonnement fixé

I.11. Conclusion

Au terme de ce premier chapitre, nous avons passé en revue les notions fondamentales des cellules solaires photovoltaïques, tant sur le plan du principe de fonctionnement que sur le plan des technologies utilisées.

- Nous avons notamment souligné :
  L'essor des énergies renouvelables, avec l'énergie solaire en tant que ressource stratégique afin d'amorcer la transition énergétique ;
- Le fonctionnement des dispositifs photovoltaïques, basé sur l'absorption de photons par le semi-conducteur, générant des paires électrons-trous ;
- Les principaux types de semi-conducteurs (intrinsèques et extrinsèques), le rôle des dopants, et la formation de la jonction p-n ;
- Les générations de cellules photovoltaïques, leur structure, leur rendement, et leur domaine d'application.

Ces connaissances constituent le socle indispensable afin d'aborder le cas particulier des cellules solaires à couches minces, que nous étudierons en détail dans le chapitre suivant.
Ce dernier sera l'occasion d'en explorer le fonctionnement, les avantages, les contraintes de fabrication, et le potentiel de cette technologie dans le domaine de l'énergie photovoltaïque.

Chapitre II

Les cellules solaires à couches minces

II.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude des cellules solaires à couches minces, une technologie photovoltaïque innovante caractérisée par l'utilisation de matériaux semi-conducteurs déposés en fines couches sur différents types de substrats. Nous présentons les principaux types de cellules utilisées dans ce domaine, notamment le silicium amorphe (a-Si), le tellurure de cadmium (CdTe) et le di séléniure de cuivre-indium-gallium (CIGS).

Nous abordons ensuite les intérêts spécifiques de cette technologie, qui se distinguent par une faible consommation de matière première, un coût de fabrication réduit et une meilleure adaptabilité à des surfaces flexibles. Par la suite, nous décrivons en détail la structure des cellules à couches minces, en expliquant le rôle de chaque couche : le substrat, l'électrode de contact arrière, la couche absorbante, la couche tampon, la couche fenêtre (TCO) et l'électrode de contact avant. Enfin, nous analysons les avantages et les inconvénients de cette technologie en comparaison avec les cellules photovoltaïques classiques, en mettant en lumière les défis à surmonter pour atteindre une efficacité optimale et une production à grande échelle.

II.2. Les cellules solaires à couches minces

Une couche mince (Thin film en anglais) est un revêtement dont l'épaisseur peut varier de quelques couches atomiques à une dizaine de micromètres. La technologie des cellules solaires à couches minces n'utilise que la quantité de matériau photosensible nécessaire pour absorber l'essentiel du rayonnement solaire (quelques micromètres d'épaisseur suffisent). Ce qui rend ces cellules peu gourmandes en matériaux de fabrication et facilement adaptables à des supports flexibles [22].

Cependant, le principal inconvénient de cette technologie est son rendement relativement faible, ainsi que la toxicité de certains matériaux utilisés, tels que le cadmium. Les cellules à couches minces utilisent des couches absorbantes polycristallines ou amorphes, incluant principalement le silicium amorphe hydrogéné (a-Si), l'arséniure de gallium (GaAs), le tellurure de cadmium (CdTe), le séléniure de cuivre et d'indium ($CuInSe_2$) ainsi que sa variante le séléniure de cuivre, indium et gallium (Cu (In, Ga) Se_2, ou CIGS). Ces matériaux sont considérés comme les meilleurs choix pour la production de cellules solaires à couches minces, en raison de leurs excellentes propriétés optiques et de leurs bandes interdites adaptées à l'absorption du spectre solaire [22].

Les technologies à couches minces ont commencé à pénétrer le marché mondial du photovoltaïque et représentaient déjà 15 % du marché en 2012, ce qui témoigne de leur intérêt en tant que solution photovoltaïque prometteuse [23]. À ce jour, trois technologies concurrentes dominent le secteur des cellules photovoltaïques à couches minces : le a-Si, le CdTe et le CIGS, qui sont utilisées pour la production d'énergie terrestre à grande échelle ainsi que pour diverses applications électroniques grand public.

II.3. Intérêts des couches minces

Plusieurs raisons peuvent être avancées pour décrire l'importance grandissante des couches minces :

La première raison, plutôt générale, réside dans la tendance actuelle à la miniaturisation des composants électroniques, qui a conduit au développement de circuits basés sur des films minces. Ces films représentent seulement une fraction du volume occupé par les dispositifs utilisant des céramiques massives ou des matériaux monocristallins.

Ensuite, les films minces sont non seulement beaucoup moins coûteux que les monocristaux, mais ils offrent également la possibilité de créer des motifs variés et de les déposer sur des substrats de géométries diverses. Cette flexibilité permet d'étendre leur utilisation à un large éventail d'applications.

Enfin, les nouvelles technologies, notamment dans le domaine des communications sans fil, requièrent des matériaux dits « intelligents » qui possèdent intrinsèquement les propriétés recherchées, telles que l'adaptabilité, la légèreté, et l'efficacité énergétique. Les films minces répondent parfaitement à ces exigences, ce qui explique leur adoption croissante dans ces secteurs [24].

II.4. Structure de cellules solaires en couches minces

Bien que la physique sous-jacente des dispositifs à couches minces soit plus complexe que celle des cellules photovoltaïques en silicium cristallin, ces technologies présentent deux avantages principaux [25] :

- **Réduction des coûts de matériaux :** L'épaisseur des couches actives est inférieure de deux à trois ordres de grandeur par rapport aux dispositifs en silicium cristallin, grâce à une absorption optique élevée. Cette caractéristique permet de réduire considérablement la quantité de matériau nécessaire, limitant ainsi son coût à une petite partie du coût total de la cellule.

- **Adaptabilité au dépôt de grandes surfaces :** Le processus de dépôt des couches minces peut être facilement adapté à des surfaces de grande taille, tout en conservant un traitement continu en « chaîne de production ». Bien que les procédures à grande échelle et les équipements pour produire des réseaux de cellules solaires à couches minces en continu représentent un défi (contrairement à la technologie au silicium, qui dispose déjà d'une infrastructure établie), une fois ces technologies développées, elles devraient permettre un rendement massif, réduisant ainsi le coût unitaire de production.

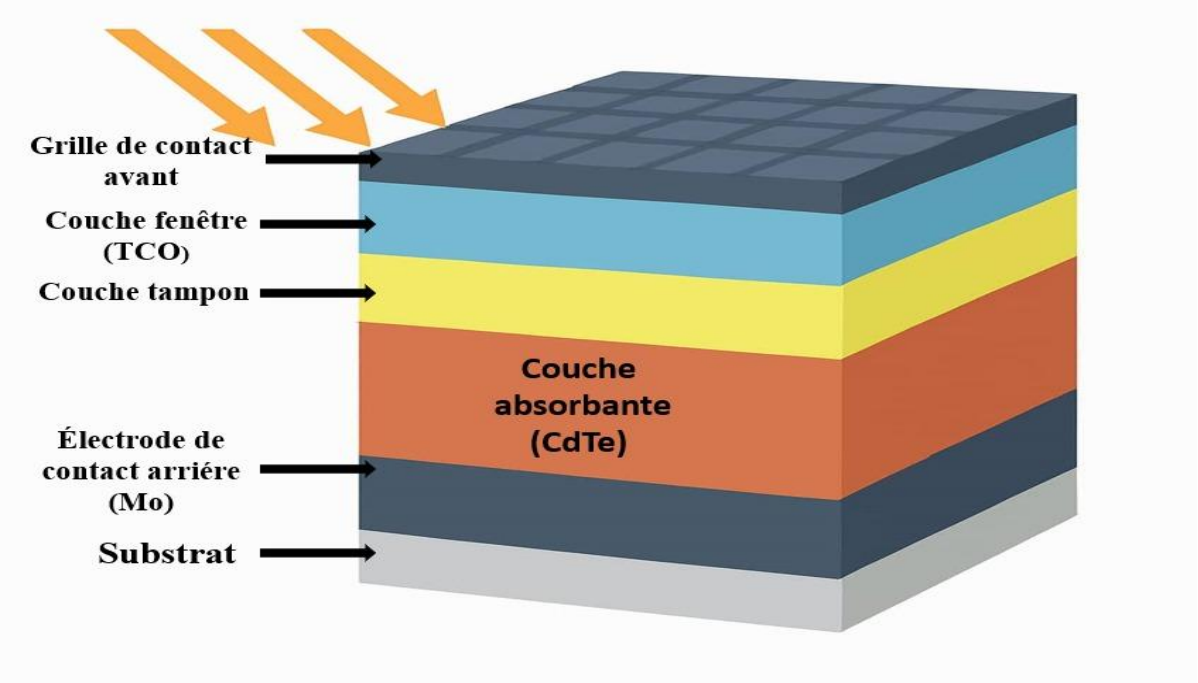


Figure II.1. Structure standard d'une cellule à base de CdTe

Une cellule solaire à couches minces peut être fabriquée en utilisant divers matériaux déposés sous forme de fines couches. En général, elle se compose des éléments suivants (Figure II.1) :

II.4.1. Le substrat

Le substrat est le support permettant la tenue mécanique d'un empilement des couches qui ne dépasse pas quelques micromètres d'épaisseur. Le choix du substrat est important et doit répondre à différents critères chimiques et mécaniques. Son utilisation varie selon la technique de synthèse appliquée. Le verre est le matériau de substrat le plus couramment utilisé, car il est disponible en grande quantité et à faible coût [26,27].

Le verre est le plus adapté en recherche pour trois raisons principales :

- Un coefficient de dilatation thermique qui s'adapte à la croissance de la couche mince à haute température.
- Une faible rugosité par rapport aux autres substrats. Il a été souligné par plusieurs chercheurs [26,27].
- Une meilleure adhérence à haute température permettant de minimiser le courant de fuite dans les couches déposées.

II.4.2. L'électrode de contact arrière

Elle a pour rôle principal de collecter les charges générées dans la cellule. Elle doit, comme le substrat, répondre à différents critères chimiques, mécaniques et économiques.

D'un point de vue électrique, elle doit notamment être un bon conducteur électrique puisqu'elle constitue le pôle positif du générateur photovoltaïque. Cette couche est composée du molybdène (Mo) et son épaisseur est d'environ 300 nm à 1 µm. La méthode de dépôt la plus utilisée pour le contact arrière est la pulvérisation cathodique. Il joue également un rôle important et doit répondre aux critères suivants [28] :

- Il doit être un bon conducteur électrique.
- Résister aux températures élevées rencontrées lors du dépôt de la couche absorbante (de 550 °C - 600 °C).
- Assurer une bonne adhésion au niveau de l'interface.

De plus, la conductivité du contact arrière affecte considérablement l'efficacité de l'ensemble la cellule solaire.

Les différentes interactions du Mo au sein de la cellule ont été décrites par plusieurs chercheurs en mettant l'accent sur les phénomènes de diffusion et leurs impacts sur la nature et la composition physico-chimique de l'interface [28].

II.4.3. La couche absorbante

Les performances des cellules solaires à couches minces à hétérojonction dépendent essentiellement du choix du matériau absorbant optimal car l'absorption de la lumière et la génération des supports ont lieu dans le matériau de la couche absorbante. La bande interdite du matériau absorbant doit être suffisamment petite pour permettre l'absorption d'une partie appréciable du spectre solaire et en même temps suffisamment grande pour minimiser la densité

de courant de saturation inverse. Les semi-conducteurs à bande interdite directe (1,2- 1,7 eV) à coefficient d'absorption élevé sont préférés à cet effet [29]. Par conséquent, en général, les semi-conducteurs de type p sont utilisés comme couches absorbantes.

Les modules actuels en couches minces sont basés sur du Si amorphe (dans une configuration à jonction unique ou à jonctions multiples), ainsi que sur les composés de chalcogénure CdTe ou $CuInS_2$ (CIS).

II.4.4. La couche tampon

La fonction principale d'une couche tampon dans une hétérojonction est de former une jonction efficace avec la couche absorbante, tout en permettant le passage d'une quantité maximale de lumière vers cette jonction. Cette couche joue un rôle crucial dans l'optimisation de l'efficacité de la cellule solaire, en réduisant les pertes optiques et les défauts d'interface [30].

Pour être sélectionné comme matériau de couche tampon, un certain nombre de critères doivent être remplis :

- Bande interdite plus large pour une transmission maximale dans la région visible.
- Structure cristalline non concordante du réseau minimum.
- Capacité à maintenir une plus grande densité de dopage.

II.4.5. La couche fenêtre (TCO)

Cette couche dans une cellule solaire doit être capable de transporter le courant de la cellule solaire et en même temps, il doit être transparent pour la plupart du rayonnement incident. Dans la plupart des cellules solaires à couches minces, un semi-conducteur à large bande interdite est utilisé comme couche avant (ou couche supérieure) [31]. Ce semi-conducteur est généralement un oxyde conducteur transparent (TCO), parmi lesquels on retrouve :

- ZnO (oxyde de zinc),

- In_2O_3/SnO_2 (ITO) (oxyde d'indium-étain),

- SnO_2 : F (FTO) (oxyde de fluorure d'étain).

Afin d'être transparent pour la lumière visible, le contact avant devait avoir une bande interdite supérieure à 3,3 eV environ, ce qui est le cas pour les TCO mentionnés.

II.4.6. L'électrode de contact avant (la grille)

Le contact avant est réalisé en ajoutant à l'empilement une grille qui collectera le maximum des charges générées par le dispositif en raison d'une meilleure résistivité. Ces grilles sont composées d'une superposition d'une couche de nickel (~50 nm) et d'une couche d'aluminium (~2 µm) déposées par évaporation par canon à électrons. La couche de Ni améliore l'adhésion du contact d'aluminium qui forme un contact ohmique sur la face avant du dispositif et permet d'éviter l'oxydation de l'Al lié à la présence sous-jacente du TCO. Chaque matériau utilisé dans la structure de la cellule possède des propriétés chimiques et physiques qui peuvent affecter le comportement global du dispositif. Les interfaces formées ont également un impact notable sur les performances des cellules [32].

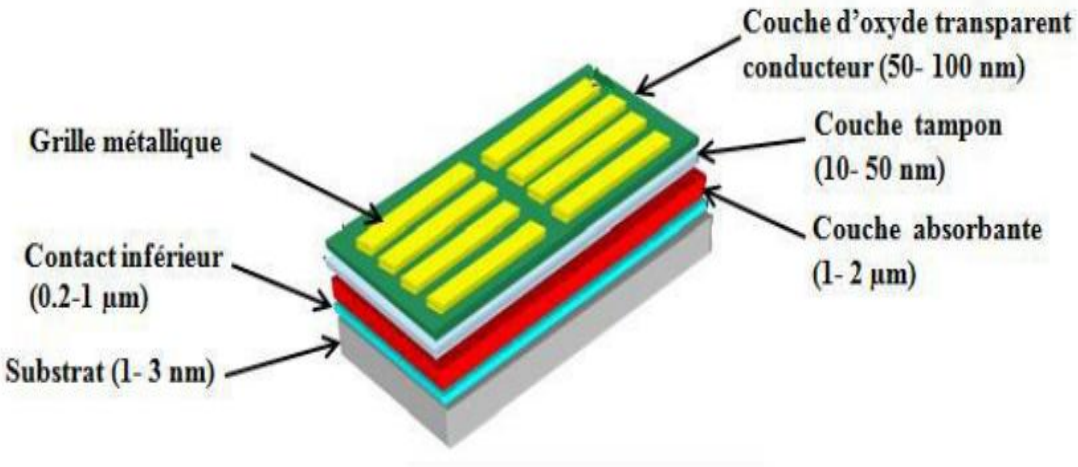


Figure II.2. Schéma simplifié de composant d'une cellule photovoltaïque en couches minces

II.5. Type des Cellules solaires en couches minces

Les cellules solaires à couches minces se déclinent en plusieurs technologies, chacune reposant sur des matériaux et des procédés spécifiques. Les principales variantes, ayant fait l'objet de nombreuses recherches, sont décrites ci-après :

II.5.1. Couches minces de silicium (mono ou multicristallin et amorphe)

Dans la technologie TFSi (thin film silicon), basée sur le silicium non cristallisé, le silicium amorphe peut être directement déposé sur un substrat de verre à basse température, grâce à un procédé de dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma (PECVD, Plasma Enhanced Chemical Vapor Déposition) [33]. Ce procédé de fabrication est très flexible : il permet à la fois

de réduire significativement les coûts de production et de générer de grandes surfaces unitaires, de l'ordre du mètre carré, en un seul tenant.

Le silicium amorphe possède un coefficient d'absorption optique supérieur à celui du silicium monocristallin, ce qui réduit considérablement l'épaisseur nécessaire à la fabrication des cellules solaires, à quelques microns seulement. Cela diminue les coûts en matière première et limite le risque de pénurie de silicium. Cependant, malgré un rendement de conversion faible (6 à 7 %) dû à un taux de recombinaison élevé, plusieurs pistes d'amélioration existent. Par exemple, des jonctions microcristallines (µc-Si) peuvent être intégrées, ou encore l'incorporation de germanium pour former des couches minces de type SixGe1-x ($0 \leq x \leq 1$) [33].

L'introduction de ces matériaux innovants est prometteuse pour la technologie TFSi à long terme, bien que la stabilité et la dégradation à long terme restent des défis majeurs.

II.5.2. Couches minces de tellurure de cadmium (CdTe)

Jusqu'à une date récente, la filière CdS/CdTe représentait l'approche la plus prometteuse des cellules solaires à couches minces. Le CdTe est un semi-conducteur à bande interdite directe Eg = 1,45 eV, qui est une valeur idéale pour la conversion photovoltaïque du spectre solaire puisqu'elle s'approche de l'optimum théorique Eg =1.4 eV [34]. En raison de la méthode de fabrication relativement facile et un bon coefficient d'absorption dans le spectre solaire visible, le rendement de la cellule CdS / CdTe a été amélioré significativement au cours de la dernière décennie. En fait, le rendement de conversion maximal est de 18.7% [35]. Comparé aux autres technologies couches minces, le CdTe est plus facile à déposer et donc, plus approprié à la production de module PV de surface importante. Toutefois, l'inconvénient majeur actuel repose sur la toxicité reconnue du Cadmium, qui empoisonne les tentatives de développement de cette filière, bien qu'il a été démontré que les risques environnementaux liés aux cellules PV en CdTe sont minimes [36].

II.5.3. Couches minces de di-séléniure de cuivre-indium (CIS/CIGS)

Malgré leur nature polycristalline, les cellules solaires en couches minces à base de Cu (In, Ga) Se2 (CIGS) ont atteint étonnamment un rendement de conversion élevé qui s'approche de 20.8 % [37] au laboratoire pour un ensoleillement AM1.5 et de 25 % par simulation [38]. Ces résultats positionnent le CIGS comme le CdTe au-dessus des cellules de silicium en termes de compromis coût-rendement. Bien que la filière chalcogénure ternaire (CIS) et quaternaire ($CuInGaSe_2$) et ses nombreuses variantes n'a pas eu la croissance explosive du CdTe, elle reste encore la plus pertinente pour se lancer aujourd'hui dans les couches minces car elle combine le

meilleur compromis de haut rendement, de bonne stabilité et de faible coût potentiel sans offenser l'environnement. Les principales améliorations sont venues de l'élargissement de la bande interdite du $CuInSe_2$ par l'utilisation d'alliages du type $CuInSe_2$ et du $CuGaSe_2$ (diséléniure de cuivre et de gallium), avec des gaps, respectivement, 1.02 eV et de 1,67 eV. En plus cette filière possède certaines caractéristiques exceptionnelles telles que : le coefficient d'absorption qui a presque le même seuil que celui du c-Si mais il est 100 à 1000 fois plus fort dans la gamme 1,1 à 2,6 eV, ce qui permet une épaisseur d'absorbeur de 1 à 2 µm, la longueur de diffusion des porteurs minoritaires particulièrement liées aux applications photovoltaïques, et surtout la tolérance aux défauts qui permet une production à très grande échelle.

En outre, il existe d'autres matériaux basés sur des alliages et qui sont extrêmement performants, mais aussi extrêmement chers (comme l'arséniure/indium de gallium InGaAs). Ils sont utilisés beaucoup plus pour les applications spatiales à l'aide de concentrateurs de lumière.

II.6. Matériaux utilisés dans notre simulation et leurs caractéristiques physiques

II.6.1. Le tellurure de cadmium (CdTe)

Il s'agit d'un composé binaire de masse molaire de 240 $g \cdot mol^{-1}$, constitué d'un élément métallique, le cadmium (Cd, Z = 48, configuration électronique : $4d^{10}\ 5s^2$), et d'un élément semi-métallique, le tellure (Te, Z = 52, Eg=0,33 eV [39], configuration électronique : $4d^{10}\ 5s^2\ 5p^6$). Ses principales caractéristiques optoélectroniques ainsi qu'un exemple de configuration de CdTe sont illustrés par la Figure II.3.

Dans la famille des semi-conducteurs II-VI, ce composé se distingue par un numéro atomique élevé, ce qui confère un coefficient d'absorption des photons élevé et une bande interdite de 1,5 eV [40], idéale pour les applications en spectroscopie solaire.

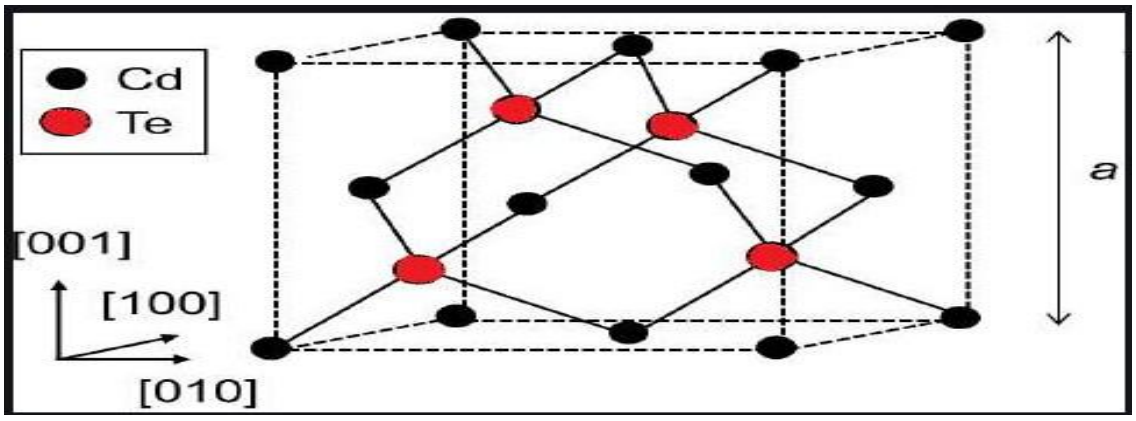


Figure II.3. Représentation du tellurure de cadmium (CdTe). Les atomes de cadmium Cd sont représentés en noir et les atomes de tellurure en rouge

II.6.2. Le sulfure de cadmium (CdS)

Le (CdS) est un semi-conducteur composé (II-VI) En raison de ses bonnes propriétés optiques, électriques et structurelles, le (CdS) a reçu une large attention ces dernières années, ce qui le rend largement utilisé comme couche dans diverses hétérojonctions. Tampons minces pour cellules solaires photovoltaïques, tels que : (CdS/CdTe), (CdS/$CuInSe_2$) [41]. D'un point de vue cristallographique, les couches minces sont connues pour leur polymorphisme, et elles peuvent avoir deux structures possibles : une structure cubique ou une structure hexagonale. Ce phénomène est favorisé par la croissance dans les solutions [42], donc il se cristallise sous structures (Wurtzite) et (Zinc-blende). Dans les conditions ambiantes, la structure la plus stable est la structure (Wurtzite). La structure Zinc-blende ne peut être stable que par la croissance sur des substrats cubiques [43].

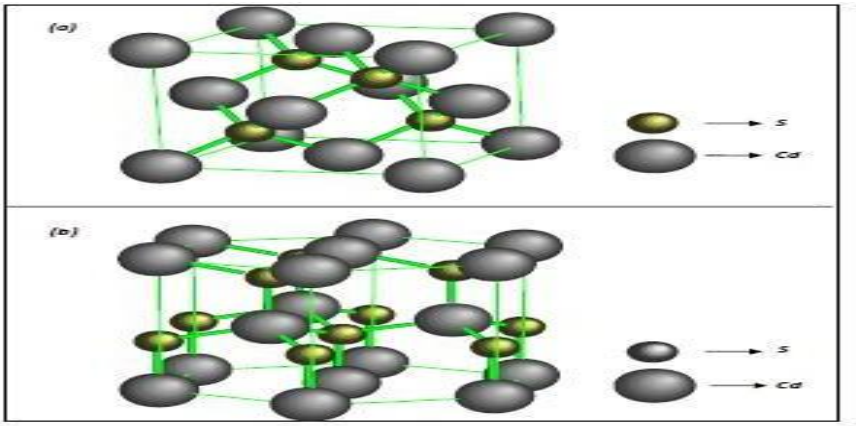


Figure II.4. Structure du composé (CdS). (a -zinc blende), (b - Wurtzite)

II.6.3. L'oxyde de zinc (ZnO)

L'oxyde de zinc est appelé (zincite) à l'état naturel et cristallisé dans une structure hexagonale compacte de type (Würtzite). Les atomes de zinc et d'oxygène sont situés dans la position spéciale (Wyckoff 2b) du groupe spatial ($P6_3mc$).

Zn : 0, 0, 0 ; 1/3, 2/3, 1/2

O : 0, 0, μ ; 1/3, 2/3, μ+1/2 avec μ= 0,375

Les atomes d'oxygène sont disposés suivant un réseau hexagonal (La maille élémentaire comprend deux côtés a=b séparés par un angle de 120° et les atomes de zinc occupent la moitié des positions interstitielles tétraédriques ayant les mêmes arrangements que les atomes d'oxygène. La structure (Würtzite) contient quatre atomes par maille dont les positions sont :

O : (0, 0,0) ;(2/3,1/3,1/2) et Zn :(0, 0,3/8) ; (2/3,1/3,7/8).

Chaque atome de zinc est entouré de 4 atomes d'oxygène situés au sommet d'un tétraèdre et vice versa (Figure II.5). La maille hexagonale de la structure Wurtzite se caractérise par trois constantes de réseau a, c et u ; a étant le côté d'un losange constituant la base, c le côté parallèle à l'axe oz et u est une coordonnée intérieure le long de cet axe. Ces constantes déterminent la position relative des sous-réseaux de l'anion O^{2-} et du cation Zn^{+2}.

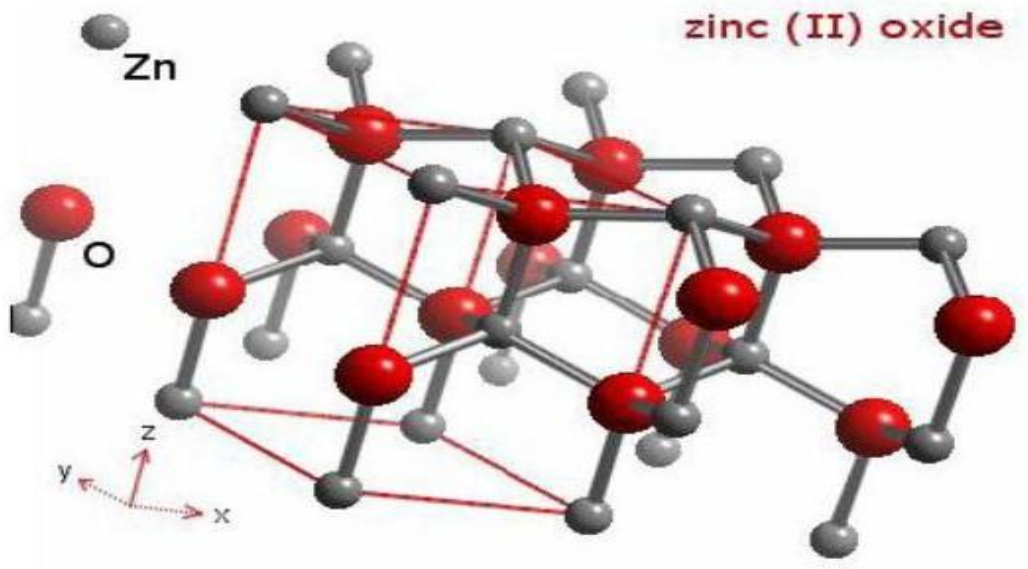


Figure II.5. Structure cristallographique du (ZnO) (Würtzite).

II.6.4. Le sulfure de cadmium et de zinc ($Cd_{1-x}Zn_xS$)

Est un matériau semi-conducteur de type II-VI, formé par l'alliage de CdS (sulfure de cadmium) et de ZnS (sulfure de zinc). Il est principalement utilisé comme couche tampon dans les cellules solaires à couches minces, notamment celles à base de CIGS (Cu (In, Ga) Se_2) et de CZTS (Cu_2 ZnSn (S, Se) $_4$) et CdTe.

II.7. Techniques de dépôts de couches minces

Le dépôt est formé à partir d'espèces constituantes (atomes, molécules, particules solides, particules liquides...). Ces espèces viennent d'une source et sont par la suite transportées vers un substrat au travers divers milieu du type :

Milieu passif	Milieu actif
Vide Basse pression Air pression atmosphériques Atmosphère inerte	Plasma Gaz réactif Liquide

Tableau II.1. Différents milieux de dépôt de couches minces

Un dépôt élaboré par PVD (dépôt physique) ou CVD (dépôt chimique) est un revêtement mince (de quelques nanomètres à environ 10 micromètres d'épaisseur), réalisé à basse pression dans une enceinte sous vide partiel (< 10-1 mbar). D'une façon générale, cette technologie fait appel à trois composantes [44] :

1/ Une source : Il s'agit de l'endroit où le matériau est déposé (ou l'un de ses composants) est concentré : creuset, plaque métallique, bouteille de gaz. C'est le siège du phénomène physique de base : la dispersion de cet élément sous forme d'atomes, d'ions, et plus généralement de vapeur.

2/ Un substrat : Il s'agit de la pièce à revêtir. C'est ici qu'intervient le phénomène de condensation : la matière issue de la source, pure ou recombinée, vient s'y fixer pour former des germes qui vont se développer jusqu'à conduire à la formation de la couche.

3/ Un milieu : Il s'agit de tout ce qui est compris entre la source et le substrat. C'est le siège du phénomène de transfert de matière. Cela peut être aussi le siège de réactions chimiques intervenantes entre les atomes du matériau à déposer et un gaz (dépôts réactifs).

On différencie les Dépôts Chimiques en Phase Vapeur (CVD) des Dépôts Physiques en Phase Vapeur (PVD) par le moyen utilisé pour produire la vapeur ; CVD : elle résulte d'une réaction chimique ou de la décomposition d'une molécule ; PVD : elle est produite par un phénomène purement physique (évaporation thermique, pulvérisation, ...), nous citerons quelques méthodes :

II.7.1. Méthodes physiques

- L'évaporation sous vide ;
- L'ablation Laser ;
- La pulvérisation cathodique ;
- Les procédés par arcs ;
- La pulvérisation par faisceau d'ion …

II.7.2. Méthodes chimiques

- Dépôt chimique en phase vapeur ;
- L'épitaxie en phase vapeur ;
- MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition);
- Epitaxie en phase liquide ;
- Dépôt électrolytique ou électrodéposition ;
- CBD (Chemical Bath Déposition) …

Les méthodes résumées dans la Figure II.6, sont souvent capables de produire des films minces, soit 1 pm ou moins et films définis films épaisses, c'est à dire 1 µm ou plus. Cependant, il existe des techniques qui sont seulement capables de produire des films épais [45].

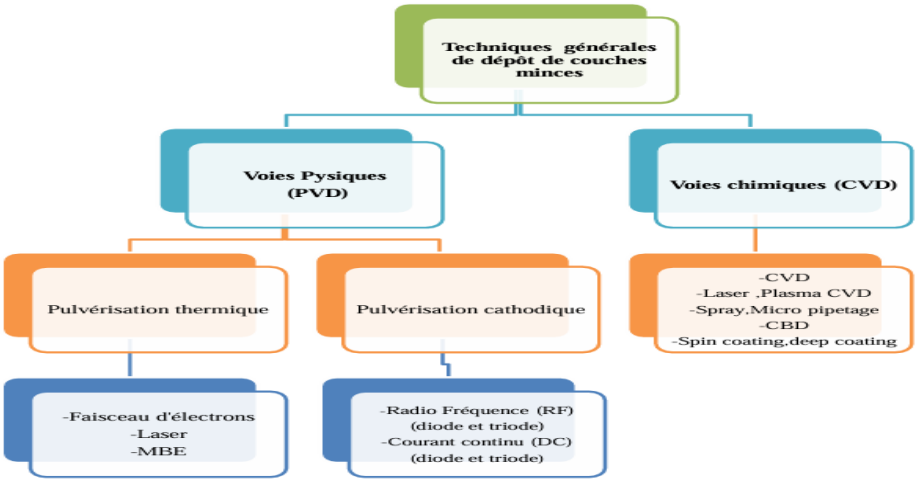


Figure II.6. Différentes techniques de dépôt des couches minces [46]

II.8. Les avantages et les inconvénients de la technologie de type mince

II.8.1. Les avantages

• Des coûts bas car moins d'énergie pour le traitement et des coûts relativement faibles pour les matériaux sont nécessaire et une production a grande échelle devient possible.

• La flexibilité dans les techniques de disposition qui permet de développer et d'utiliser des semi-conducteurs qui sont difficile à produire.

• Elle utilise souvent des matériaux semiconducteurs qui ont une band interdit direct donc le coefficient d'absorption est très élève.

II.8.2. Les inconvénients

- La difficulté d'obtenir des couches différentes qui adhérents les une aux autres ;
- La difficulté de parvenir à l'uniformité de l'épaisseur, La composition et la qualité à traverse un substrat grand ;
- Le problème des interfaces défectueuses résultant de l'inadéquation entre les mailles des matériaux.

II.9. Conclusion

Les cellules solaires à couches minces représentent une alternative prometteuse aux technologies photovoltaïques traditionnelles, grâce à leur légèreté, leur flexibilité, et leur potentiel de réduction des coûts de production. Parmi ces technologies, la cellule au tellurure de cadmium (CdTe) se distingue particulièrement par ses bonnes performances et sa compatibilité avec les procédés de fabrication à grande échelle.

Dans cette perspective, le chapitre suivant sera consacré à la simulation de la structure de la cellule CdTe à l'aide du logiciel AMPS-1D. Cette approche numérique permettra de modéliser le comportement de la cellule sous diverses conditions de fonctionnement, d'identifier les paramètres clés influençant son rendement, et de proposer des pistes d'optimisation en vue d'une amélioration de son efficacité énergétique.

Chapitre III

Résultats et discussion

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de la simulation numérique réalisée à l'aide du logiciel AMPS-1D, visant à analyser les performances des cellules solaires de structure ZnO/CdS/CdTe/Mo, avec un accent particulier sur les améliorations potentielles apportées par le remplacement de la couche tampon CdS par le matériau $Cd_{1-x}Zn_xS$. Le chapitre aborde les caractéristiques du logiciel utilisé, les étapes de la simulation, ainsi que les facteurs influençant les performances de la cellule tels que l'épaisseur, la température et le type de matériau employé. Une comparaison approfondie entre la structure de référence et la structure proposée est également présentée. Enfin, les résultats graphiques de la simulation ont été analysés afin d'évaluer l'impact des modifications structurelles sur les principaux paramètres de performance, tels que la tension en circuit ouvert, le courant de court-circuit, le facteur de forme et le rendement global.

III.2. Définition du logiciel de simulation AMPS-1D

AMPS-1D signifie l'analyse des structures photoniques et microélectroniques à une seule dimension. Il a été conçu pour être un outil très général et polyvalent de simulation par ordinateur pour l'analyse physique de l'appareil et la conception du dispositif. C'est un code unidimensionnel (1-D) qui est applicable à un dispositif à deux bornes. Il peut être utilisé pour la diode, le capteur photodiode, et l'analyse de dispositif photovoltaïque qui le but de notre travail.

AMPS-1D est la création du professeur Stephen Fonash et son équipe d'étudiants John Arch, Joe Cuiffi, Jingya Hou, William Howland, Peter et des chercheurs invités : McElheny, Anthony Moquin, Michael Rogosky, Francisco Rubinelli, Tran Thi Hong Zhu 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 développé 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 développé [47].

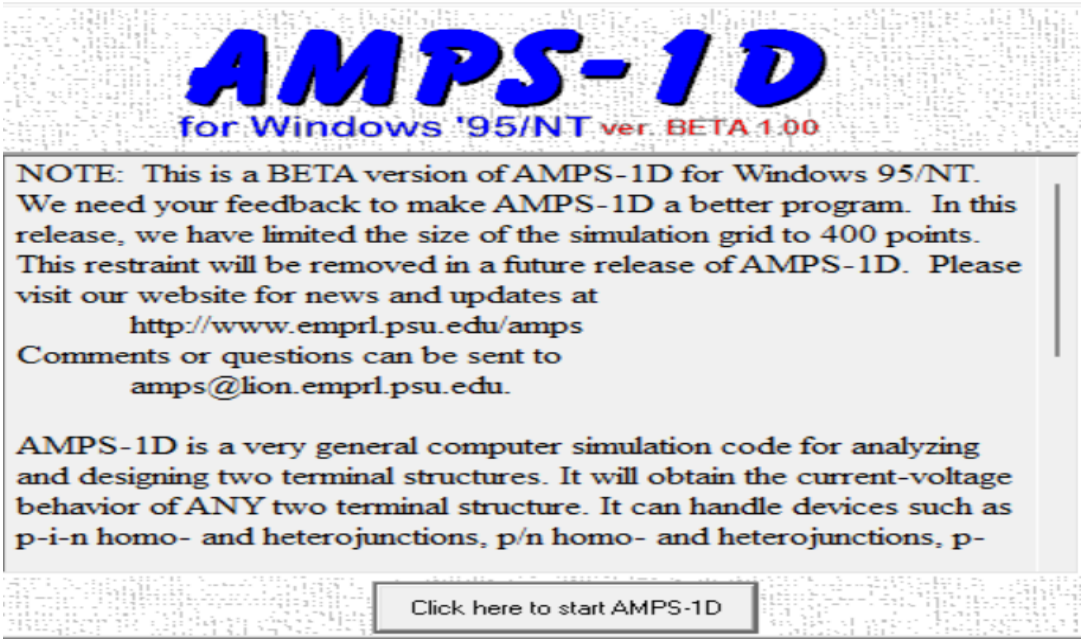


Figure III.1. La fenêtre principale d'AMPS-1D [45]

III.3. Aperçu sur le fonctionnement de l'AMPS

Le logiciel AMPS modélise les dispositifs microélectroniques et optoélectroniques en résolvant simultanément trois équations fondamentales : l'équation de Poisson et les équations de continuité pour les électrons et les trous. Ces équations, accompagnées de conditions aux limites, sont résolues à l'aide de la méthode des différences finies et de l'algorithme de Newton-Raphson. Le dispositif est divisé en segments selon une grille définie par l'utilisateur, et les principales variables d'état (potentiel électrostatique, quasi-niveau de Fermi, etc.) sont déterminées à chaque point. Cela permet de calculer divers paramètres de transport comme les champs électriques, les courants ou les recombinaisons [48].

III.4. Utilisation de l'AMPS

Le logiciel AMPS-1D se divise en quatre parties. Les trois premières sont pour la programmation où il faut introduire les paramètres du dispositif, des régions et de l'excitation. La quatrième partie concerne les résultats de la simulation où le logiciel du calcul, les bandes interdites, les caractéristiques J-V, les courant de recombinaison, la génération…

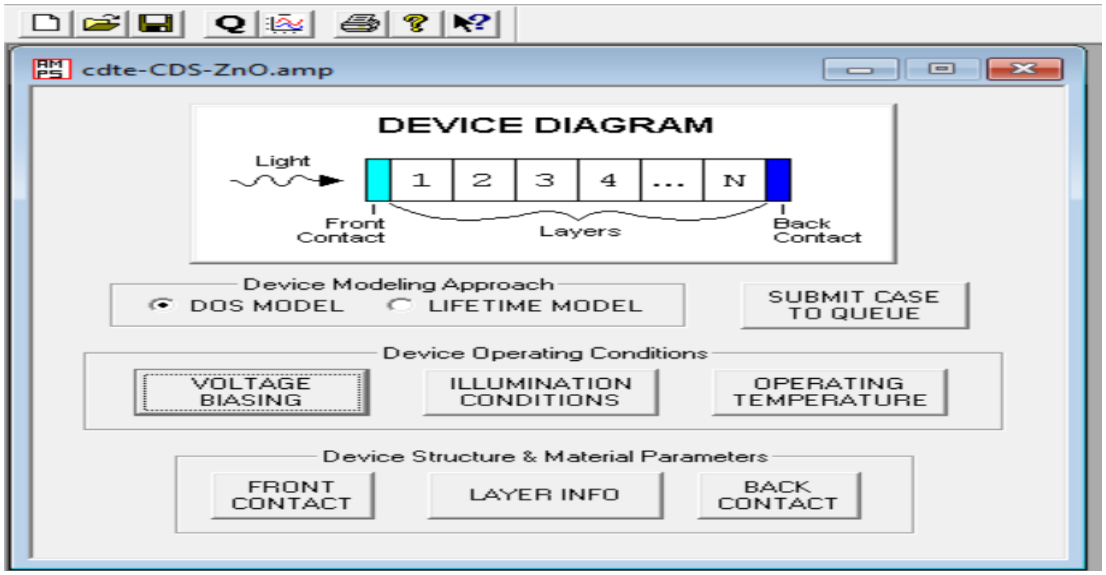


Figure III.2. La fenêtre principale d'AMPS-1

L'interface d'AMPS (Figure III.2) est constituée de deux boîtes de dialogue. Chacune donne les paramètres nécessaires avant le lancement de la simulation par AMPS. Les trois boîtes de dialogues donnent :

- Propriétés générales du dispositif et du matériau**.**
- Paramètres de modélisation.

III.5. Propriétés générales du dispositif et du matériau

III.5.1. Propriétés du matériau

Dans la fenêtre informations de couche ''Layer Info'', (Figure III.3), l'utilisateur peut spécifier les domaines suivants : L'énergie de gap (Eg), la concentration de dopage de trou (NA), la concentration de dopage d'électrons (ND), la mobilité d'électrons (MUN), la mobilité des trous (MUP), l'affinité électronique (CHI), la permittivité relative (EPS), la densité d'états dans la bande de conduction (NC) et de la densité d'états dans la bande de valence (NV). Sur le côté droit de la fenêtre, l'utilisateur peut spécifier l'épaisseur des matériaux ainsi que le nombre de points de maillage. Si plus d'un matériau doit être simulé, chaque matériau peut être caractérisé de façon indépendante. Une fois la caractérisation des matériaux est complète, la gamme de longueurs d'onde, le flux de photons et les coefficients d'absorption pour chaque longueur d'onde peuvent être assignés en cliquant sur le bouton Afficher les paramètres spectraux [49].

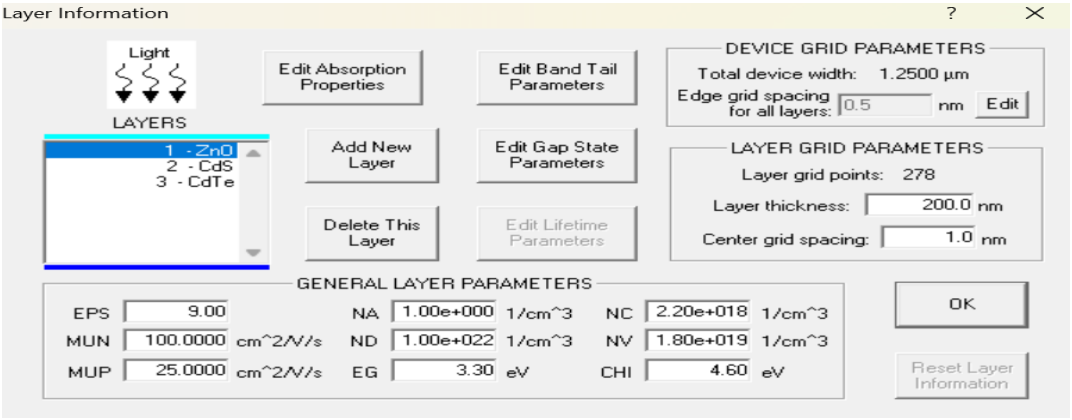
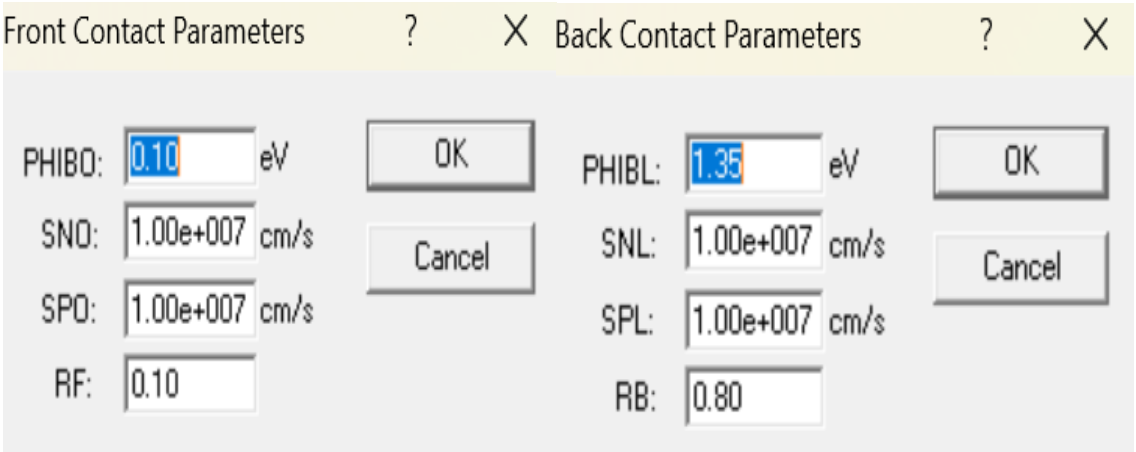


Figure III.3. Fenêtre d'informations des couches « layer info »

III.5.2. Propriétés générales du dispositif

- **Contacts avant et arrière**

Les contacts avant et arrière (figure III.4) sont définis par leur fonction de travail et par la réflectivité de l'interface du contact/semi-conducteurs. Le PHIBO et le PHIBL qui représentent la différence entre la bande de conduction (E_c) et le niveau de Fermi (E_F), respectivement à la surface avant et arrière doivent être choisis de façon à obtenir un contact ohmique à la surface avant et une négligeable barrière de Schottky à la surface arrière [49].



(a) (b)

Figure III.4. Fenêtre d'informations du dispositif : (a) Contact avant, (b) Contact arrière

III.6. Paramètres de modélisation

Les paramètres de modélisation sont : le type de mode de fonctionnement, le maillage (grid spacing) pour les calculs numériques, la tension de polarisation pour laquelle JV et QE devraient être générés.

Le logiciel AMPS peut fonctionner en deux modes distincts : le mode de la densité d'état ou DOS (Density Of States) ou le mode de la durée de vie (Life time). Une description des deux modes peut être trouvée dans le manuel d'AMPS [50].

Le mode de la durée de vie : ce mode accepte les entrées sous forme de durée de vie des porteurs, qui sont supposés constants, indépendants de la lumière et de la tension de polarisation, et le processus de recombinaison sera modélisé par un modèle linéaire donné par

la relation :

Type p : $R_n = \frac{\Delta_n}{\tau_n}$ **(1)**

Type n : $R_p = \frac{\Delta_p}{\tau_p}$ **(2)**

(Δn), (Δp) : Le changement de la population des électrons (trous) dans la bande de conduction (valence) par rapport à la concentration à l'équilibre thermique n_0 (p_0).

$\tau_n \; et \; \tau_p$: Les durées de vie des électrons et des trous, respectivement.

Dans ce travail, le mode DOS a été utilisé. Le maillage a été choisi pour être plus dense dans les couches minces où des changements plus rapides se produisent dans la structure de la bande afin d'obtenir une bonne résolution.

III.7. Description de notre étude

Dans cette étude, nous avons cherché à améliorer les performances d'une cellule solaire à base de CdTe à l'aide de simulations numériques réalisées avec le logiciel AMPS-1D. Dans un premier temps, la structure classique ZnO/CdS/CdTe/Mo a été analysée en faisant varier l'épaisseur des couches, la concentration de dopage et la température de fonctionnement. Par la suite, nous avons proposé de remplacer la couche tampon CdS par une couche de $Cd_{1-x}Zn_xS$ avec (x=0,2). Ce matériau présente une bande interdite plus large que le CdS, ce qui lui confère une meilleure transparence optique en tant que couche tampon. Cette propriété permet à une plus grande partie du spectre solaire d'atteindre la couche absorbante CdTe, réduisant ainsi les pertes optiques. En outre, l'amélioration de l'alignement des bandes entre $Cd_{1-x}Zn_xS$ et CdTe permet de

diminuer les recombinaisons de porteurs à l'interface. Les simulations ont montré que la structure ZnO/$Cd_{1-x}Zn_xS$ /CdTe/Mo améliore significativement les performances de la cellule, notamment en termes de tension en circuit ouvert, de courant de court-circuit et de facteur de remplissage, ce qui confirme le fort potentiel du $Cd_{1-x}Zn_xS$ comme alternative au CdS.

III.8. La structure de référence ZnO/CdS/CdTe/Mo

Dans cette première phase de l'étude, l'analyse a porté sur la cellule solaire de référence, en conservant sa configuration conventionnelle basée sur le CdS comme couche tampon. La figure III.5 illustre cette structure traditionnelle, largement utilisée dans les cellules à base de CdTe. Celle-ci se compose de plusieurs couches fonctionnelles : une couche d'oxyde de zinc (ZnO) servant de fenêtre optique, permettant l'entrée de la lumière tout en assurant la conduction électronique ; une couche de CdS (sulfure de cadmium) jouant le rôle de couche tampon, facilitant la jonction avec la couche absorbante ; le tellurure de cadmium (CdTe), qui constitue la couche absorbante principale, responsable de la génération des paires électron-trou ; et enfin, une couche de molybdène (Mo) assurant le contact arrière. Cette configuration constitue le point de départ de notre étude comparative, visant à évaluer l'impact de modifications structurelles sur les performances de la cellule.

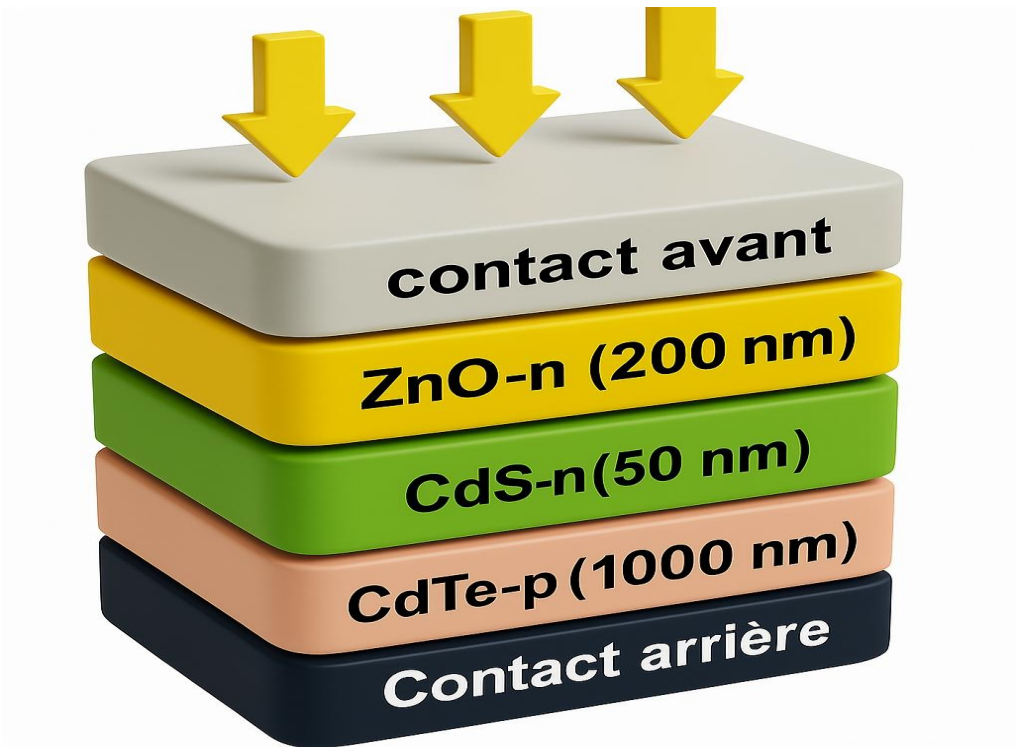


Figure III.5. La structure de référence

III.8.1. Paramètres de la modélisation

Paramètre	ZnO-n [51]	CdS-n [51]	CdTe-p [51]
Epaisseur (nm)	200	50	50-3000
Énergie de gap (eV)	3.3	2.4	1.5
Affinité électronique (eV)	4.6	4.4	4.28
Permittivité diélectrique	9	10	9.4
Densité efficace des états CB (cm^{-3})	2.2×10^{18}	2.2×10^{18}	7.5×10^{17}
Densité efficace des états VB (cm^{-3})	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}	1.8×10^{18}
Vitesse des électrons (cm/s)	1×10^{7}	1×10^{7}	1×10^{7}
Vitesse des trous (cm/s)	1×10^{7}	1×10^{7}	1×10^{7}
Mobilité électronique (cm^2/Vs)	25	25	60
Mobilité des trous (cm^2/Vs)	100	100	500
Densité de donneurs ND (cm^{-3})	1×10^{19}	1×10^{18}	1
Densité d'accepteurs NA (cm^{-3})	1	1	1×10^{13}

Tableau III.1. Paramètres de chaque couche de la cellule utilisés dans la simulation

III.8.2. Analyse des performances de la structure

- **Rendement électrique ou efficacité η**

Une amélioration progressive des performances a été observée. L'efficacité initiale est de 5,66 % pour une épaisseur de 50 nm, puis augmente jusqu'à 16,48 % lorsque l'épaisseur atteint 1000 nm. Au-delà de cette valeur, le rendement se stabilise approximativement à ce niveau d'efficacité. Cette augmentation s'explique par le fait que l'accroissement de l'épaisseur de la couche absorbante favorise l'absorption d'une plus grande quantité de lumière, ce qui se traduit par la génération d'un nombre plus important d'électrons photo-générés (Figure III.6).

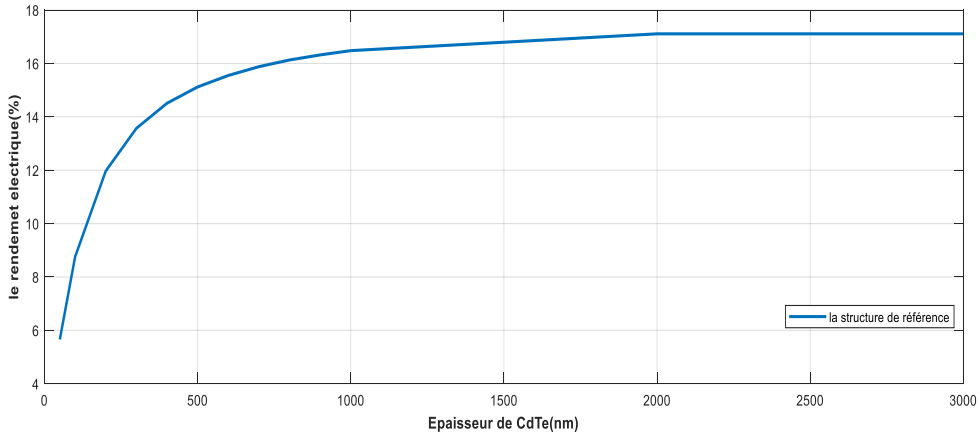


Figure III.6. Variation du rendement électrique en fonction de l'épaisseur de la couche de CdTe

- **Tension de circuit ouvert (V_{CO})**

La tension de circuit ouvert (VCO) augmente de 0,78 V à 0,88 V lorsque l'épaisseur de la couche de CdTe passe de 50 nm à 3000 nm, grâce à une meilleure absorption de la lumière, une réduction des pertes par recombinaison et une collecte plus efficace des porteurs (Figure III.7).

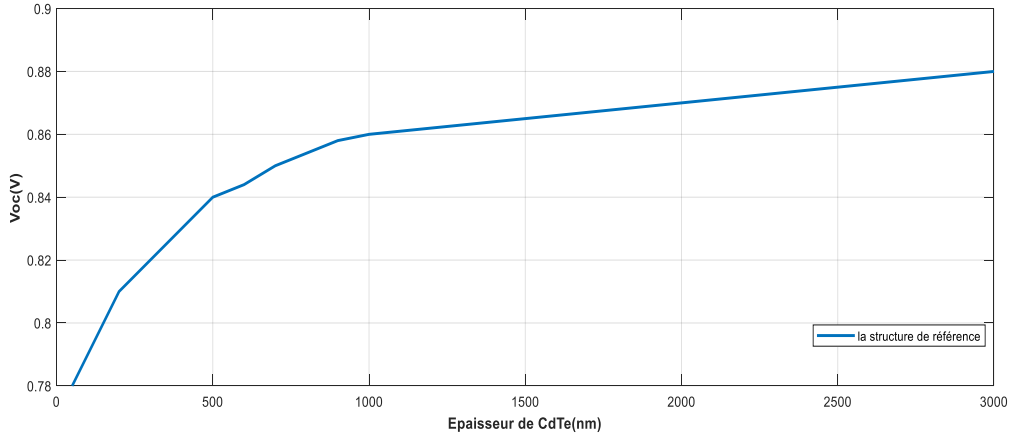


Figure III.7. Variation du Tension de circuit ouvert (V_{CO}) en fonction de l'épaisseur de la couche de CdTe

➢ Courant de court-circuit (Jsc)

La densité de courant de court-circuit (JSC) augmente avec l'épaisseur du CdTe jusqu'à 1000 nm (atteignant 25,15 mA/cm²), puis se stabilise, indiquant un seuil optimal d'absorption. Cette évolution traduit une génération accrue de porteurs et une conversion photoélectrique plus efficace, sans gain supplémentaire au-delà de cette épaisseur. (Figure III.8).

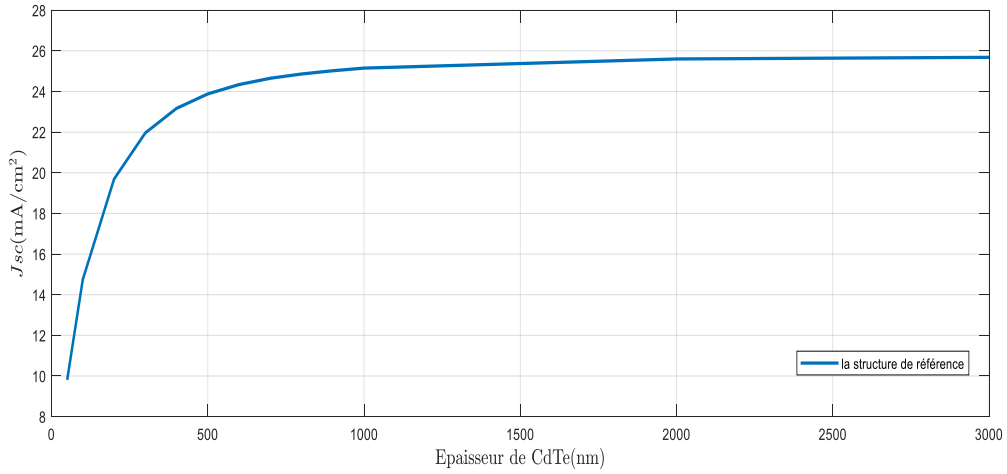


Figure III.8. Variation du courant de court-circuit (J_{SC}) en fonction de l'épaisseur de la couche de CdTe

➢ Facteur de forme FF

La valeur du facteur de forme (FF) dans cette structure varie de 0,81 pour une épaisseur de 50 nm à 0,83 pour une épaisseur de 1000 nm. Cette légère augmentation reflète une amélioration des propriétés de conduction au sein de la cellule voir (Figure III.9).

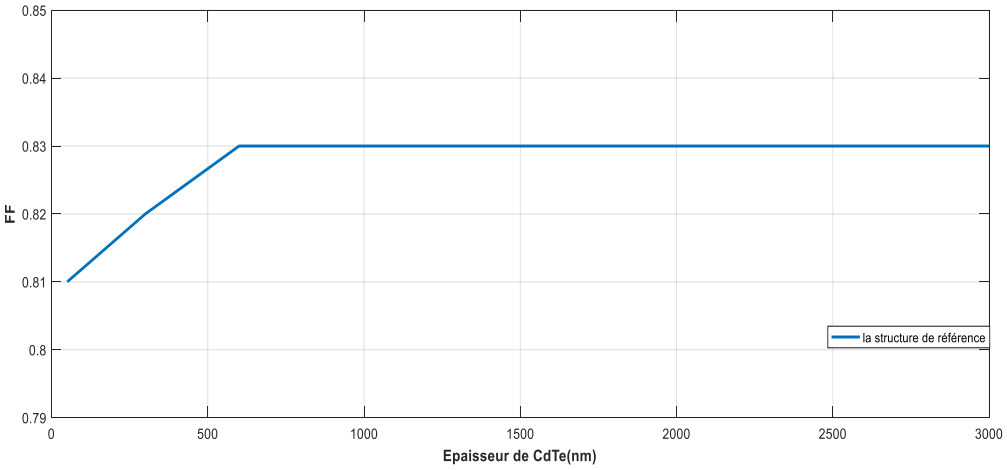


Figure III.9. Variation du facteur de forme (FF) en fonction de l'épaisseur de la couche de CdTe

III .9. La structure propose ZnO/$Cd_{1-x}Zn_xS$/CdTe/Mo

Dans cette étude, la couche tampon classique en CdS de la structure de référence ZnO/CdS/CdTe/Mo a été remplacée par une couche de $Cd_{1-x}Zn_xS$ (sulfure de cadmium et zinc), conduisant à une nouvelle configuration ZnO/$Cd_{1-x}Zn_xS$/CdTe/Mo. Ce changement vise à tirer parti des propriétés supérieures du $Cd_{1-x}Zn_xS$, notamment sa bande interdite plus large et sa meilleure transparence, afin de réduire les pertes optiques et les recombinaisons non souhaitées au niveau de la jonction. Cette modification structurelle permet ainsi d'améliorer l'efficacité globale de la cellule solaire.

La figure suivante présente un schéma descriptif de la nouvelle structure proposée ZnO/$Cd_{1-x}Zn_xS$/CdTe/Mo.

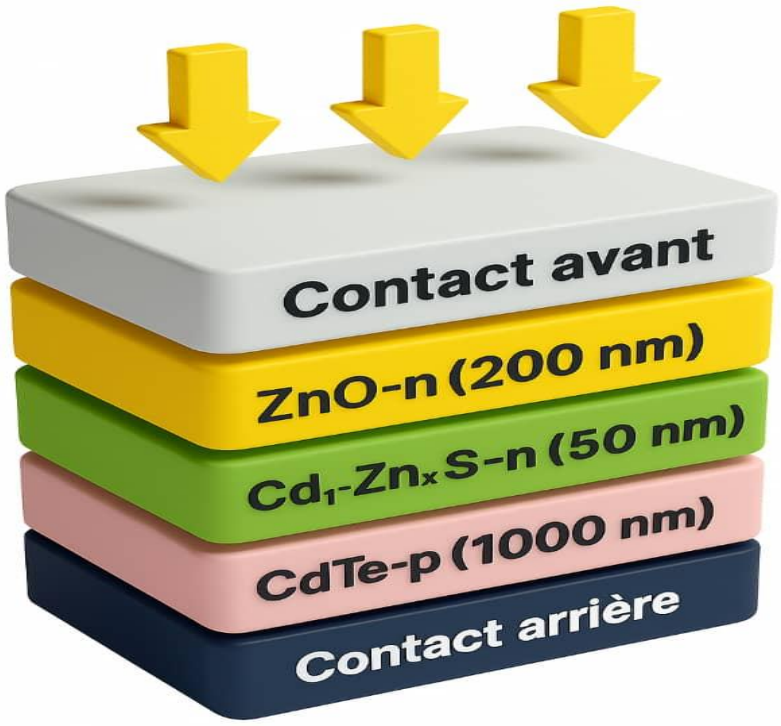


Figure III.10. La structure proposée

III.9.1. Paramètres de la modélisation

Le tableau suivant présente les différents paramètres physiques utilisés dans notre simulation.

Paramètre	ZnO-n [51]	$Cd_{1-x}Zn_xS$-n [51]	CdTe-p [51]
Epaisseur (nm)	50	200	50-3000
Énergie de gap (eV)	3.3	2.4	1.5
Affinité électronique (eV)	4.6	4.4	4.28
Permittivité diélectrique	9	10	9.4
Densité efficace des états CB (cm^{-3})	2.2×10^{18}	2.2×10^{18}	7.5×10^{17}
Densité efficace des états VB (cm^{-3})	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}	1.8×10^{18}
Vitesse des électrons (cm/s)	1×10^{7}	1×10^{7}	1×10^{7}
Vitesse des trous (cm/s)	1×10^{7}	1×10^{7}	1×10^{7}
Mobilité électronique (cm^2/Vs)	25	25	60
Mobilité des trous (cm^2/Vs)	100	100	500
Densité de donneurs ND (cm^{-3})	1×10^{19}	1×10^{18}	1
Densité d'accepteurs NA (cm^{-3})	1	1	1×10^{13}

Tableaux III.2. Paramètres de chaque couche de la cellule utilisés dans la simulation

III.9.2. Analyse des performances de la structure proposée

- **Rendement électrique ou efficacité η**

L'efficacité de conversion de la cellule solaire atteint initialement 7,18 % pour une épaisseur de la couche de CdTe de 50 nm, puis augmente rapidement jusqu'à un maximum de 19,44 % à 1 000 nm. Au-delà de cette épaisseur, le rendement se stabilise. Cette évolution met en évidence l'amélioration significative des performances de la cellule grâce à l'utilisation de $Cd_{1-x}Zn_xS$ comme couche tampon, en remplacement du CdS. Le $Cd_{1-x}Zn_xS$ offre en effet une meilleure compatibilité optoélectronique avec la couche absorbante, réduit les pertes par recombinaison et accroît la transmission de la lumière, ce qui se traduit par une augmentation du rendement de la cellule (Figure III.11).

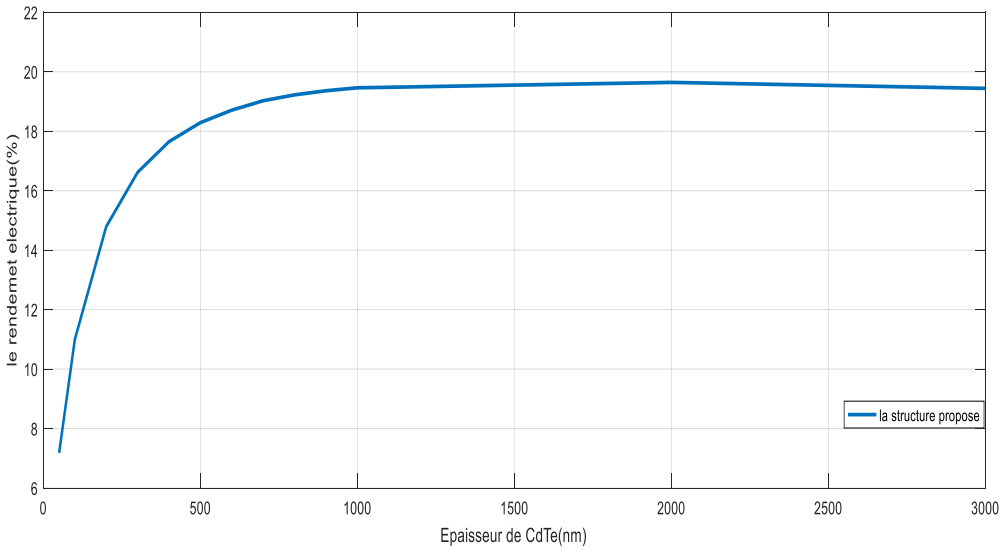


Figure III.11. Variation du Rendement électrique en fonction de l'épaisseur de la couche de CdTe

➢ **Tension de circuit ouvert (tension à vide)**

Cette structure a enregistré une tension ouverte plus élevée par rapport à la première structure, avec une Voc atteignant 0,88 V à 50 nm et augmentant à 0,93 V à partir de 500 nm d'épaisseur et plus, reflétant une recombinaison réduite à la jonction (Figure III.12).

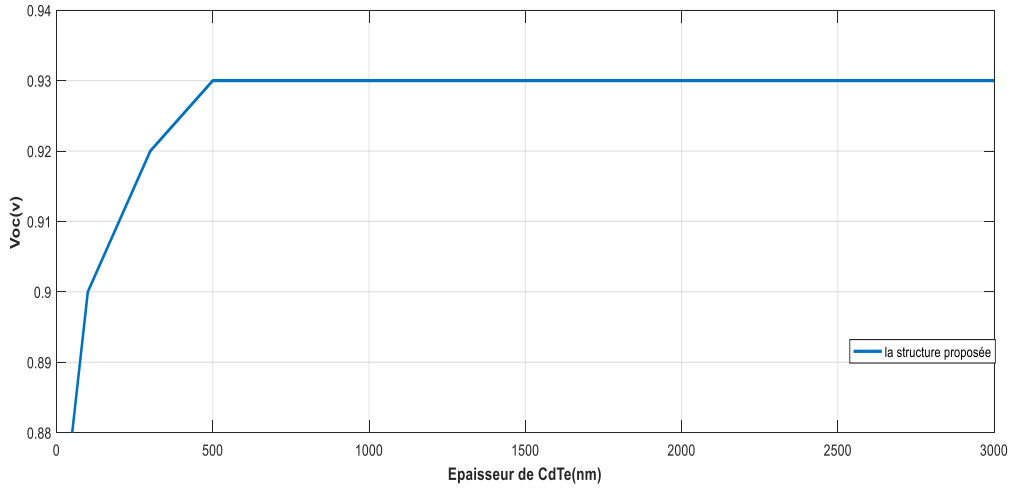


Figure III.12. Variation du Tension de circuit ouvert (Voc) en fonction de l'épaisseur de la couche de CdTe

➢ **Courant de court-circuit (Jsc)**

Le courant de court-circuit a augmenté de manière significative avec l'épaisseur de la couche de tampon, passant de 10,78 mA/cm² à 50 nm à 26,88 mA/cm² pour une épaisseur de 1000 nm. Ces valeurs, nettement supérieures à celles de la structure conventionnelle, confirment une absorption lumineuse améliorée et une meilleure génération de porteurs de charge, rendues possibles par l'utilisation du $Cd_{1-x}Zn_xS$ (Figure III.13).

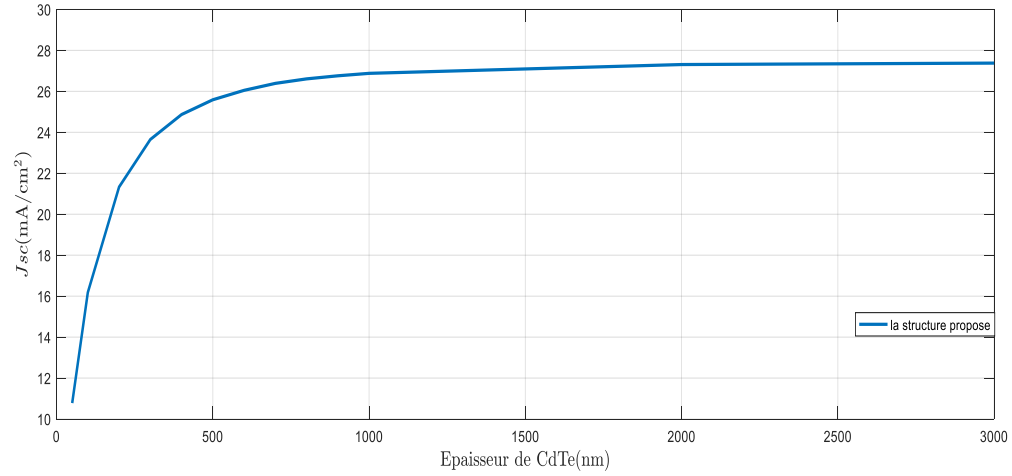


Figure III.13. Variation du courant de court-circuit (J_{SC}) en fonction de l'épaisseur de la couche de CdTe

➢ **Facteur de forme FF**

Le facteur de forme (FF) a présenté des valeurs comprises entre 0,83 à 50 nm et 0,85 à 1000 nm, traduisant une amélioration de la qualité des couches déposées. Cette évolution indique également une réduction des pertes liées à la résistance interne, ce qui contribue à de meilleures performances globales de la cellule (Figure III.14).

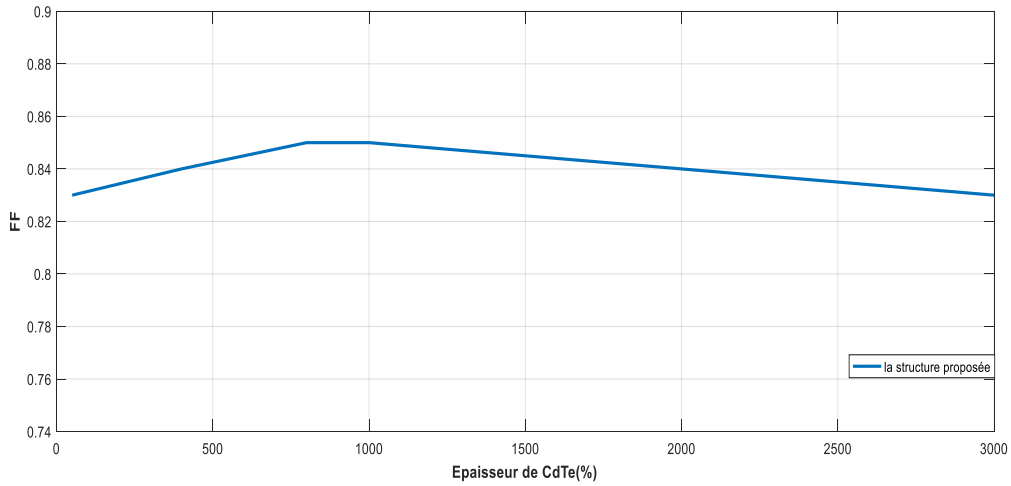


Figure III.14. Variation du facteur de forme (FF) en fonction de l'épaisseur de la couche de CdTe

III.10. Comparaison des deux structures

➢ **Rendement électrique ou efficacité η**

La structure ZnO/$Cd_{1-x}Zn_xS$/CdTe/Mo affiche un rendement supérieur, atteignant 19,44 % pour une épaisseur de 1000 nm de CdTe, contre 16.48 % pour la structure de référence. Cela représente une amélioration notable d'environ 15 %, confirmant l'efficacité du $Cd_{1-x}Zn_xS$ comme couche de tampon dans l'optimisation des performances photovoltaïques (Figure III.15).

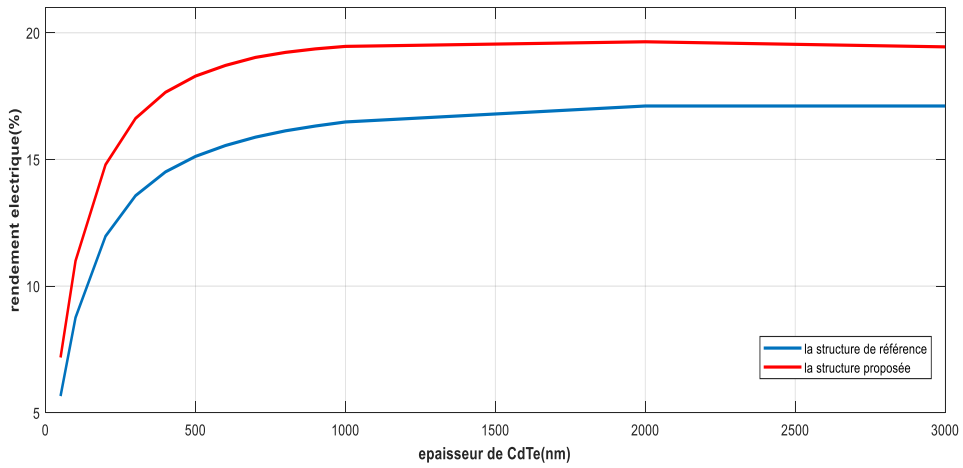


Figure III.15. Variation du Rendement électrique en fonction de l'épaisseur de la couche de CdTe

➢ Tension de circuit ouvert (tension à vide)

L'introduction du $Cd_{1-x}Zn_xS$ comme couche de tampon permet d'obtenir une tension de circuit ouvert plus élevée. Cette amélioration s'explique par une réduction des recombinaisons interfaciales, rendue possible grâce à un meilleur alignement des bandes d'énergie entre le $Cd_{1-x}Zn_xS$ et le CdTe. De plus, le gap énergétique plus large du $Cd_{1-x}Zn_xS$ limite l'absorption parasite de la lumière, ce qui améliore le transport des porteurs de charge vers les électrodes et contribue ainsi à l'augmentation du rendement global de la cellule solaire (Figure III.16).

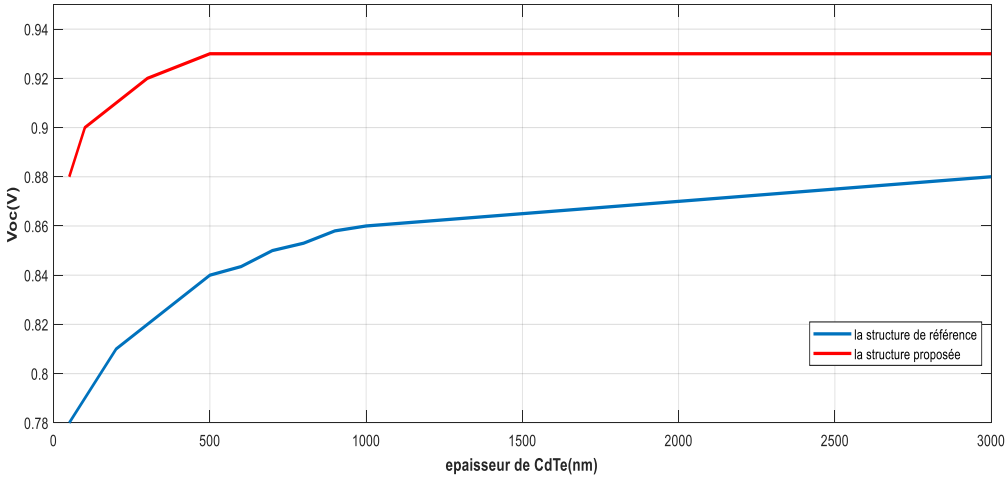


Figure III.16. Variation du Tension de circuit ouvert (Voc) en fonction de l'épaisseur de la couche de CdTe

➢ Courant de court-circuit (Jsc)

Le courant de court-circuit (Js_c) est systématiquement supérieur dans la structure intégrant du $Cd_{1-x}Zn_xS$. Cette amélioration résulte de la meilleure transparence optique du $Cd_{1-x}Zn_xS$ par rapport au CdS, permettant à une plus grande partie du spectre solaire de pénétrer efficacement jusqu'à la couche absorbante en CdTe (Figure III.17).

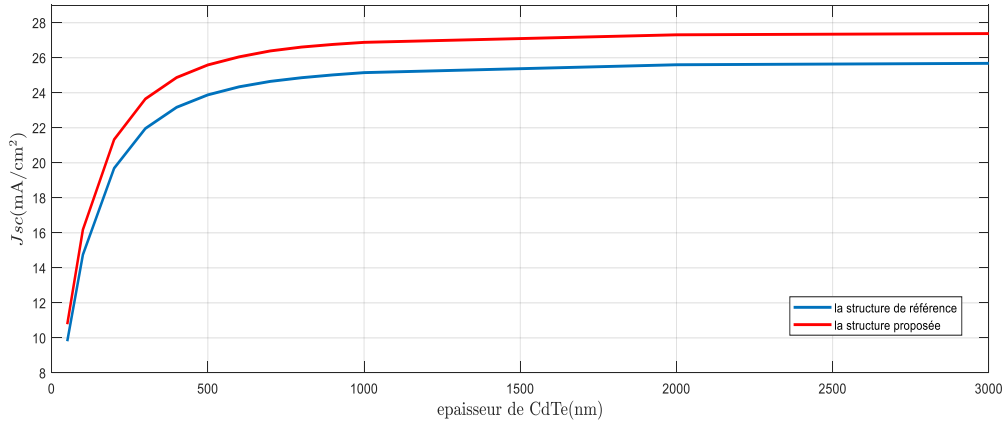


Figure III.17 Variation du courant de court-circuit (JSC) en fonction de l'épaisseur de la couche de CdTe

➢ **Facteur de forme FF**

Bien que l'amélioration du facteur de forme (FF) soit modeste, elle reflète une réduction des pertes ohmiques ainsi qu'une meilleure qualité des interfaces, notamment grâce à la bonne compatibilité entre le ZnO et le $Cd_{1-x}Zn_xS$ (Figure III.18).

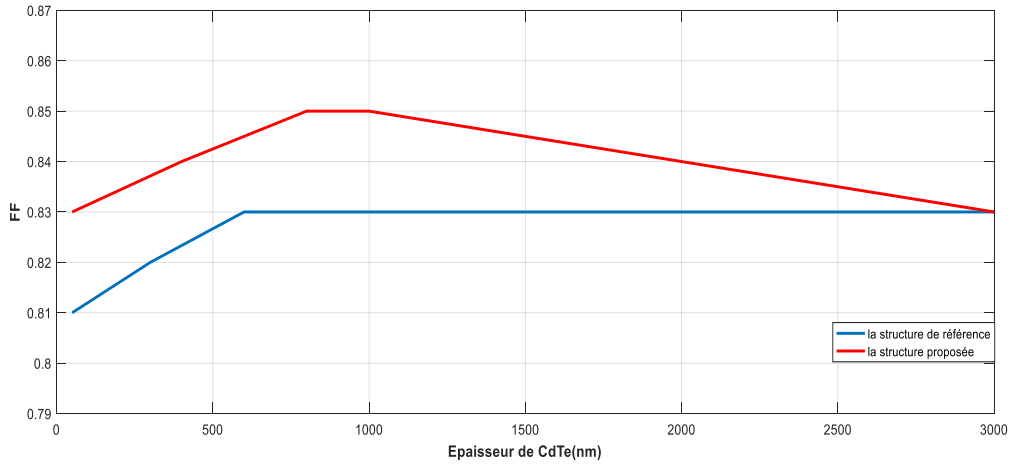


Figure III.18. Variation du facteur de forme (FF) en fonction de l'épaisseur de la couche de CdTe

Paramètre	**La structure ZnO/CdS/CdTe/Mo**	**La structure ZnO / $Cd_{1-x}Zn_xS$/CdTe/Mo**	**Amélioration**
Voc (V)	0.86	0.93	+7.5%
Jsc (mA/cm^2)	25.15	26.88	+6.4%
FF	0.83	0.85	+2.3%
η (%)	16.48	19.44	+15.22%

Tableaux III.3. Effet du remplacement de $Cd_{1-x}Zn_xS$ par CdS sur la performance de la cellule solaire à base de CdTe (1000 nm)

La structure ZnO/$Cd_{1-x}Zn_xS$/CdTe/Mo proposée montre de meilleures performances que la structure de référence dans tous les critères étudiés, ce qui confirme que l'utilisation d'une couche de $Cd_{1-x}Zn_xS$ à la place de CdS contribue à améliorer l'efficacité photovoltaïque globale de la cellule solaire, que ce soit en termes d'absorption lumineuse, de réduction des pertes d'énergie ou d'amélioration des propriétés électriques.

III.11. Effet de la température sur les performances des deux structures

L'effet de la température sur le rendement de deux cellules photovoltaïques, utilisant respectivement une couche tampon de CdS et de $Cd_{1-x}Zn_xS$, a été étudié pour une épaisseur de 1000 nm de la couche de CdTe. Les résultats montrent une diminution du rendement avec l'augmentation de la température pour les deux structures. Cette baisse s'explique par l'élévation de la température, qui accroît la collision des électrons et favorise leur recombinaison, ce qui réduit la génération de paires électrons-trous et, par conséquent, diminue le rendement de la cellule. Cependant, la cellule utilisant le $Cd_{1-x}Zn_xS$ conserve un rendement supérieur sur l'ensemble de la plage de températures étudiée (de 300 K° à 380 K°). Ainsi, le $Cd_{1-x}Zn_xS$ apparaît comme une alternative prometteuse afin d'améliorer les performances des cellules solaires soumises à des variations thermiques. À 300 K°, les deux structures (de référence et proposée) présentent leurs meilleurs rendements, respectivement 16,48 % et 19.44% (Figure III.19).

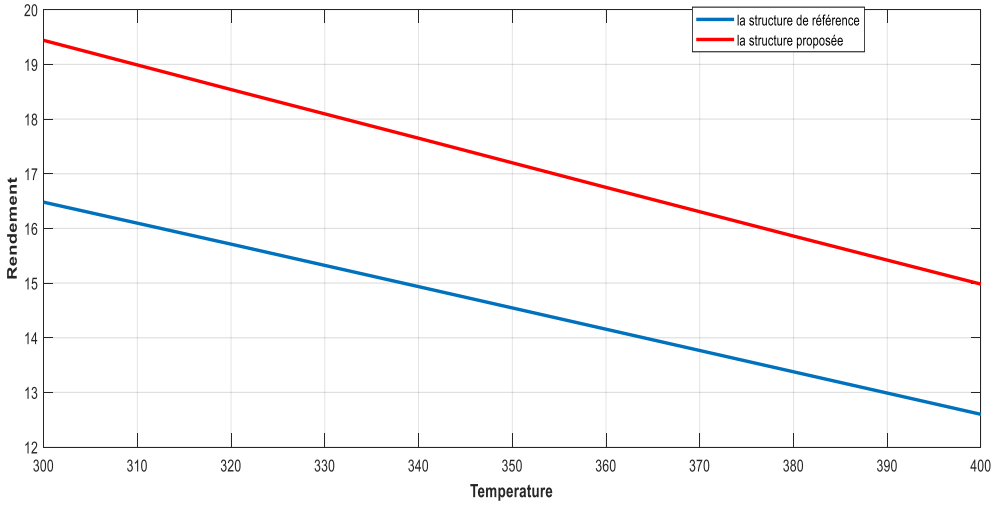


Figure III.19. Effet de la température de fonctionnement sur les performances des cellules

III.12. Les caractéristiques J-V

La figure III.20 illustre les caractéristiques courant-tension (J-V) de deux cellules solaires à base de CdTe, utilisant respectivement une couche tampon de CdS et de $Cd_{1-x}Zn_xS$ pour une épaisseur de 1000 nm de CdTe. On constate que la cellule CdTe/$Cd_{1-x}Zn_xS$ présente des performances supérieures, avec un courant de court-circuit (Jsc) de 26,88 mA/cm² et une tension en circuit ouvert (Voc) de 0,93 V. En comparaison, la cellule CdTe/CdS montre un Jsc plus faible, de 25,15 mA/cm², ainsi qu'une Voc inférieure, de 0,86 V.

Ces améliorations du courant et de la tension se traduisent par un meilleur rendement de la cellule utilisant $Cd_{1-x}Zn_xS$ comme couche tampon, ce qui confirme l'intérêt de ce matériau pour améliorer l'efficacité des cellules solaires à base de CdTe (Figure III.20).

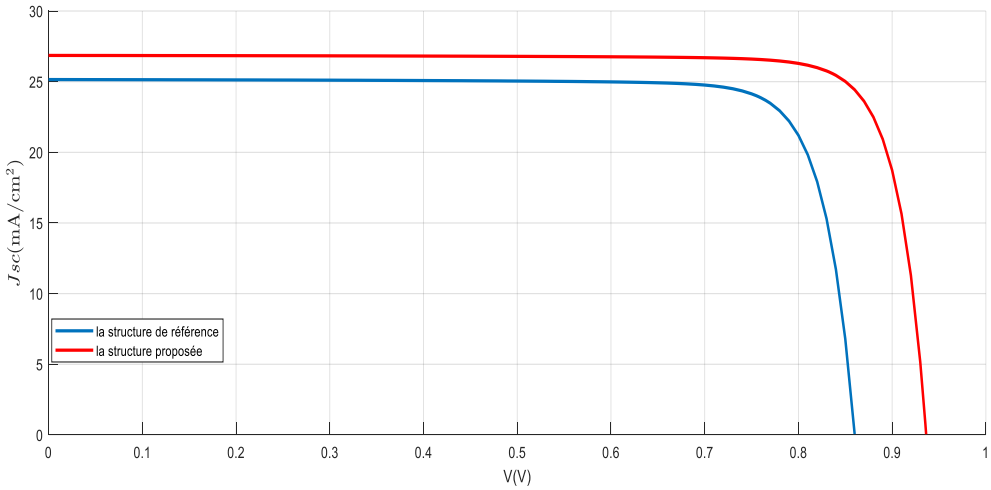


Figure III.20. La caractéristique J-V

III.13. Le rendement quantique

La figure III.21 montre que, pour une épaisseur de CdTe de 1000 nm, la cellule avec une couche tampon $Cd_{1-x}Zn_xS$ présente une efficacité quantique (QE) supérieure à celle avec CdS, notamment entre 400 nm et 520 nm. Au-delà de cette plage, les deux cellules offrent des performances équivalentes. Cela démontre que $Cd_{1-x}Zn_xS$ améliore l'absorption et la collecte des photons dans la région spectrale courte, ce qui renforce la réponse optique de la cellule (Figure III.21).

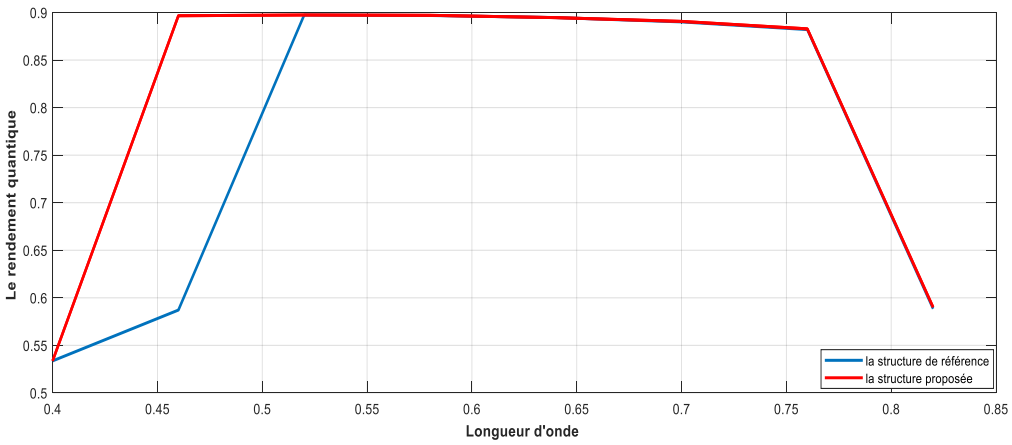


Figure III.21. Le rendement quantique de CdS/CdTe et $Cd_{1-x}Zn_xS$/CdTe

III.14. Conclusion

Les résultats de la simulation effectuée à l'aide du logiciel AMPS-1D ont démontré l'efficacité de l'utilisation du $Cd_{1-x}Zn_xS$ comme alternative au CdS dans la structure conventionnelle des cellules solaires à base de CdTe. L'introduction de ce matériau a permis d'améliorer de manière significative plusieurs paramètres de performance : la tension, le courant, le facteur de forme et le rendement global. L'étude a également révélé que cette modification structurelle confère à la cellule une meilleure résistance aux températures élevées par rapport à la structure traditionnelle. Ainsi, le $Cd_{1-x}Zn_xS$ apparaît comme une option prometteuse pour améliorer les performances et la stabilité des cellules solaires commerciales à base de CdTe.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Face aux défis énergétiques mondiaux et à la nécessité de promouvoir des sources d'énergie propres et renouvelables, les cellules solaires en couches minces à base de tellurure de cadmium (CdTe) représentent une technologie prometteuse grâce à leur efficacité élevée et leur coût de fabrication relativement faible. Néanmoins, l'optimisation de leurs performances électriques reste un axe de recherche essentiel.

Dans le cadre de ce travail, nous avons réalisé une étude approfondie des cellules solaires photovoltaïques, en nous focalisant sur les structures à couches minces, et plus spécifiquement sur celles intégrant le tellurure de cadmium (CdTe) comme matériau absorbant.

Le premier chapitre nous a permis de rappeler les fondements théoriques de l'effet photovoltaïque, les caractéristiques du rayonnement solaire, ainsi que les paramètres électriques essentiels qui régissent le fonctionnement d'une cellule solaire. Nous avons également détaillé les générations de cellules photovoltaïques, mettant en évidence les perspectives d'évolution technologique.

Le second chapitre s'est focalisé sur la technologie des couches minces, soulignant les avantages notables de cette approche, tels que la réduction de la consommation de matériaux, l'adaptabilité sur surfaces flexibles et le potentiel de réduction des coûts de production. La structure des cellules à couches minces a été décrite en détail, en insistant sur le rôle crucial de chaque couche, notamment la couche tampon, dont la nature et les propriétés influencent fortement le rendement global de la cellule.

Le troisième chapitre a été consacré à une étude comparative, menée par simulation numérique à l'aide du logiciel AMPS-1D, entre deux structures de cellules solaires à base de CdTe : la cellule de référence ZnO/CdS/CdTe/Mo et la cellule proposée ZnO/$Cd_{1-x}Zn_xS$/CdTe/Mo, dans laquelle la couche tampon CdS a été remplacée par un alliage $Cd_{1-x}Zn_xS$ (avec x = 0,2). Les résultats obtenus ont démontré que cette substitution permet une nette amélioration des performances électriques de la cellule. En effet, la structure CdTe/$Cd_{1-x}Zn_xS$ a atteint une tension à vide (Voc) de 0,93 V, contre 0,86 V pour la structure CdTe/CdS. Le courant de court-circuit (Jsc) a également augmenté, passant de 25,15 mA/cm² à 26,88 mA/cm². Le facteur de forme (FF) est passé de 0,83 à 0,85, et le rendement global (η) a connu une amélioration significative, passant de 16,48 % pour la structure de référence à 19,44 % pour la structure proposée pour un épaisseur de 1000 nm de CdTe.

Ces résultats confirment que le remplacement du CdS par le $Cd_{1-x}Zn_xS$ constitue une solution efficace pour optimiser les cellules solaires à base de CdTe, en améliorant à la fois le rendement énergétique et la stabilité thermique.

Bibliographie

Bibliographie

[1] Zhao, Y., et al. Inorganic perovskite solar cells: Recent advances and future prospects. Journal of Materials Chemistry A, vol. 9, no. 10, 2021, pp. 5776–5796.

[2] A. C. Lazaroiu, M. G. Osman, C.V. Strejoiu and G. Lazaroiu,"A Comprehensive Overview of Photovoltaic Technologies and Their Efficiency for Climate Neutrality." MDPI Sustainability, 2023.

[3] A. RICAUD. Photopiles solaires - de la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés. Edition ISBN, 1997.

[4] Alan L. FahrenbruchH.bube (Fundamentals of Solar cells photovoltaic solar energy Conversion) ACADEMIC PRESS A Subsidiary of Harcourt Brace Jovanovich, Publishers New York London Paris San Diego San Francisco São Paulo Sydney Tokyo Toronto. page 9 (1983)

[5] "Transition énergétique en Algérie : Leçons, état des lieux et perspectives pour un développement accéléré des énergies renouvelables : édition 2020, commissariat aux énergies renouvelables et à l'efficacité énergétique, premier ministre, Alger."

[6] REHOUMA. Youssef. '' Etude, Développement et Expérimentation d'un Système Autonome Photovoltaïque pour Applications Agricoles '', Thèse de doctorat, Université Kasdi Merbah–OUARGLA, 2024.

[7] François X. ABOMO ABEGA. '' Optimisation numérique, par SCAPS-1D, des paramètres électriques d'une cellule solaire à base du silicium amorphe hydrogéné (a-Si : H) '', Thèse de doctorat, Université DE YAOUNDE I, 2022.

[8] Angel Cid Pastor « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques ». Thèse de Doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006.

[9] Rafiaa. KIHAL. '' Préparation par électrodéposition de semi-conducteurs en couche minces à base d'étain pour des cellules photovoltaïques '', Thèse de doctorat, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2018.

[10] MERAD BOUDIA. Mustapha Réda. '' Modélisation électro-optique et optimisation des cellules solaires organiques '', Thèse de doctorat, UNIVERSITE ABOU BAKR BELKAID–TLEMCEN, 2016.

[11] BENNAOUM Menouer '' Etude Théorique des Cellules Solaires à base de Pérovskites '', Thèse de doctorat, UNIVERSITE DJILLALI LIABES SIDI BEL ABBES, 2021

[12] Mekemeche Abdelkader'' Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n. Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes'' Thèse de doctorat, L'Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem, 2017.

[13] CHALABI Nadia Faliha '' Etude et simulation d'une cellule photovoltaïque organique à base du matériau organique OC1C10-PPV : PCBM '', Thèse de doctorat, Université Abou-bekr Belkaid – Tlemcen, 2020

[14] N. Benhmed Benabdllah, " Propriétés physiques des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et Simulation des cellules solaires à base de Si et SiGe", mémoire Magister, Université Abou bekr Belkaid -Tlemcen, 2006.

[15] Hélène Perrin, Farouk Vallette, Gabriel Vasilescu, " Comportement des porteurs de charge dans les matériaux semi-conducteurs : visualisation à l'aide d'une application Java", CETSIS'2005, Nancy, 25-27 octobre 2005.

[16] A. Ricaud, "Convertisseurs photovoltaïques", © Nov-07 - Compresse.doc.

[17] O. Bonnaud, "Physique des Solides, des Semiconducteurs et Dispositifs", Université de Rennes 1, 2003.

[18] A. Allaoui, "Simulation des caractéristiques électrique des cellules solaires en GaAs", mémoire Magister, Université de Becher ,2008/2009.

[19] Le pompage photovoltaïque, manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens.

[20] Kecili Idir'' Étude des performances d'un panneau solaire photovoltaïque orienté et refroidi par air '', Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou , 2023.

[21] Sze, S. M., and Kwok K. Ng. Physics of Semiconductor Devices. 3rd ed., Wiley, 2007.

[22] Naïma TOUAFEK '' Contribution à l'étude d'une cellule solaire en couches minces à base de CuIn1-xGaxSe2 '', Thèse de doctorat, Université Des Frères Mentouri - Constantine, 2015

[23] G. Masson, M. Latour, M. Rekinger, I.T. Theologitis and M. Papoutsi. Global Market Outlook for photovoltaics. Technical report, EPIA, 2013.

[24] R.J. CAVA «Dielectric materials for applications in microwave communications», Materials Chemistry 11 (2001), 54-62n

[25] K. L. Chopra, Thin film solar cells, Plenum press, New York, 1983.

[26] F. Kessler, D. Herrmann, and M. Powalla, 5Approaches to flexible CIGS thin-film solar cells,6 vol. 481, pp. 4913-498, 2005.

[27] D. Rudmann, D. Brémaud, A.F. da Cunha, G. Bilger, A. Strohm, M. Kaelin, H. Zogg and A.N. Tiwari, 5Sodium incorporation strategies for CIGS growth at different temperatures,6 Thin Solid Films, vol. 481, pp. 55360, 2005.

[28] A. Duchatelet, 5Synthèse de couches minces de Cu (In,Ga)Se2 pour cellules solaires par électro-dépôt d8oxydes mixtes de cuivre-indium-gallium,6, Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 2012.

[29] R. H. Bube, 5Photovoltaic Materials, Series on Properties of Semiconductor Materials6, Vol. 1 Imperial College Press, London, 1998.

[30] M. Mathew, 5Engineering the Properties of Indium Sulfide for Thin film Solar Cells by doping6, Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Cochin, 2009.

[31] H. L. Hartnagel, A. L. Dawar, A. K. Jain, C. Jagadish, Semiconducting Transparent Thin Films, IOP Publishing, Philadelphia, 1995.

[32] Bouchra Benabdelkrim, ‘’ Etude et simulation de l'effet de paramètre climatique sur les modules solaires en couche mince en région saharien ‘’, Thèse de doctorat, Université Africane Ahmed Draia Adrar,2021.

[33] U. Stephan, J. Kuske, W. Frammelsberger, P. Lechner, W. Psyk and H. Schade, « Large area deposition technique for PECVD of amorphous silicon [solar cells] », Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the Twenty-Sixth IEEE 29 Sept.-3 Oct., 1997, pp. 647.

[34] Y.B. He, W. Kriegseis, B.K. Meyer and A. Polity, « Heteropitaxial grouth of CuInS2 thin films on sapphire by radio frequency reactive sputtering », App. Phys. Lett. Vol. 83, 2003, pp. 1743.

[35] http://www.futurasciences.com/magazines/environnement/infos/dossiers/d/developpement durable-cellules-photovoltaiques-coeur-panneaux-solaires-1688/page/10/.(consulté le 12/3/2015).

[36] M. V. Fthenakis, « Life cycle impact analysis of cadmium in CdTe PV production », Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 8, 2004, pp. 303.

[37] P. Jackson, D. Hariskos, R. Wuerz, W. Wischmann and M. Powalla, « Compositional investigation of potassium doped Cu (In,Ga)Se2 solar cells with efficiencies up to 20.8% », Phys. Status Solidi RRL, Vol. 8, 2014, pp. 219.

[38] H. Ullah, B. Marí and H. N. Cui, « Investigation on the Effect of Gallium on the Efficiency of CIGS Solar Cells through Dedicated Software », Applied Mechanics and Materials, Vol. 448, 2014, pp. 1497.

[39] P.Baranski, V. Klotchkov, I. Potykevich, "Electronique des semi-conducteurs", Moscou, (1978).

[40] K. Mitchell, A. Fahrenbruch, R. Bube," Photovoltaic determination of optical-absorption coefficient in CdTe", J. Appl. Phys, 48, 829, (1977).

[41] S. Hariech,"élaboration et caractérisation des films minces chalcogenures a base de Cadmium et de cuivre pour des applications photovoltaïques ", Thèse doctorat (2013).

[42] M. A. Martinez, C. Guillen, J. Herrero," Morphological and structural studies of CBD-CdS thin films by microscopy and diffraction tecniques», Applied Surface Science 136, 8- 16, (1998).

[43] A. Mosbah, "Elaboration et Caractérisation de Couches Minces d'Oxyde de Zinc ", Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine, (2009).

[44] Solarbuzz, « Annual World PV Market Review, » Solarbuzz, NY, (2011).

[45] Photovoltaik, « Photovoltaik Magazin, Alfons W. Gentner Verlag GmbH & Co. KG / Solarpraxis AG, » Solarpraxis AG, Stuttgart, (2012).

[46] BENGHABRIT Siham, '' Elaboration et caractérisation de couches minces CdS par bain chimique CBD pour application photovoltaïque '', Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran « Mohamed BOUDIAF »,2021

[47] S.J. Fonash et al, Amanual 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.

[48] TCHOUAR. '' Etude, Modélisation, Simulation de cellule solaire organique. '', Thèse de doctorat, Université Abou-bekr Belkaid – Tlemcen.

[49] Boukais Meriem '' Utilisation des couches minces à base des matériaux IV-IV dans les applications photovoltaïques '', Thèse de doctorat, Université Abou-bekr Belkaid – Tlemcen, 2022

[50] N. Toufek « Contribution à l'étude d'une cellule solaire en couches minces à base de

CuIi-xGaxSe2 ». Thèse Doctorat en Sciences Electronique. Université des Frères Mentouri

Constantine .2015.

[51] AMPS 1D site web, université de Pennsylvanie : http://www.emprl.psu.edu/amps.