

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Département : Génie Electrique

Spécialité : Electronique des Systèmes Embarqués

THÈME

**Etude et simulation AC des caractéristiques
électriques de quelques cellules solaires en
couches minces**

Préparé par :
CHEICK SID ELMOCTAR Salamata

Devant le Jury :

Nom et prénoms	Grade	Qualité
M. A. GHELLAB	MCB	Président
M. R. OTMANI	MAA	Examineur
M. Y. BELHADJI	MCB	Encadreur

Remerciement

Avant tout je remercie Allah qui m'a donné la force et le courage de mener bien ce travail à son terme.

Un grand merci s'adresse à mes parents, sans leur soutien à tous les niveaux, tout simplement cela ne serait pas possible.

J'exprime mes sincères remerciements à Monsieur M. Y. BELHADJI l'expression de ma profonde gratitude, pour l'aide précieuse, les conseils éclairés et de m'avoir dirigé durant la réalisation de ce travail.

Je remercie monsieur Abdelkader GHELLAB et Radouane Otmani d'avoir accepté de siéger dans le jury de ce mémoire.

Mes remerciements s'adressent aussi aux enseignants du département de génie électrique pour la qualité de l'enseignement et leur gentillesse

Dédicace

Je suis reconnaissant à Allah le tout puissant, l'omniscient, l'omnipotent, le tout miséricordieux de nous avoir donné la vie, la santé et de continuer à nous faire part de sa grâce.

Je dédie ce travail qui n'aura jamais pu voir le jour sans les soutiens indéfectibles et sans limite de mes chers parents qui ne cessent de me donner avec amour le nécessaire pour que je puisse arriver à ce que je suis aujourd'hui. Que dieux vous protège et que la réussite soit toujours à ma portée pour que je puisse vous combler de de bonheur.

Sommaire

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE

Chapitre 1 : Cellules solaires en couche mince

1.1. Introduction	1
1.2. L'énergie photovoltaïque	2
1.3. Les semi-conducteurs	2
1.4. Cellules solaires.....	3
1.4.1. Définition	3
1.4.2. Principe de fonctionnement de la cellule solaire.....	3
1.4.3. Paramètres électriques d'une cellule solaire	4
1.4.2.1 Courant de court-circuit	6
1.4.2.2. Tension en circuit ouvert V_{CO} :	6
1.4.2.3. Facteur de forme FF	7
1.4.2.4. Rendement de conversion η	7
1.4.2.5. Rendement quantique.....	8
1.5. Influence de la température	8
1.6. Influence de l'éclairement.....	9
1.7. Technologie des cellules solaires	10
1.7.1. La cellule en silicium monocristallin	10
1.7.2. Le Silicium amorphe et microcristallin.....	11
1.7.3. Les semi-conducteur Poly-cristallin CdTe.....	12
1.7.4. L'alliage Cuivre-Indium Gallium-sélénium	12
1.8. Les cellules en couches minces	13
1.8.1. Intérêt et caractéristiques des couches minces	13
1.8.2. Formation d'une couche mince.....	14
1.8.3. Technologie couche-mince	14
1.8.4. Méthode de dépôt des couches minces	14

Chapitre 2: Etude AC des cellules solaires

2.1. Introduction	16
2.2. Régimes de fonctionnement d'une cellule solaire.....	16
2.2.1. Cellule en régime DC (statique).....	16
2.2.2. Cellule en régime AC (dynamique)	18
2.3. Modèle électrique de la cellule pour la modélisation en régime dynamique	18
2.4. Modèle faibles signaux des cellules solaires.....	21
2.5. Caractérisation des défauts profonds dans les cellules solaires dans le régime AC	22
2.6. Principe de mesure par la spectroscopie d'admittance	22
2.7. Caractéristiques des cellules solaires dans le régime AC	23
2.7.1. Caractéristique C-f	23
2.7.2. Caractéristique Capacité-Tension	24
2.7.3. L'effet capacitif des cellules et temps de caractérisation	24

Chapitre 3: Résultats et simulations

3.1. Introduction	27
3.2. Présentation du logiciel de simulation SCAPS 3.3.07	27
3.3. Présentation des cellules simulées.....	28
3.3.1. La cellule a-Si:H.....	28
3.3.2. La cellule CIGS	29
3.3.3. La cellule CdTe.	29
3.4. Caractéristiques AC.....	31
3.4.1. Les Caractéristiques I (V)	31
3.4.2. Caractéristique capacité fréquence	34
3.4.3. Caractéristiques capacité-tension	36
3.4.4. La spectroscopie d'admittance	37
3.4.5. L'effet du dopage	40
3.4.6. Caractéristiques conductance tension.....	41
3.4.7. Capacité-fréquence C-F.....	42
3.4.8. L'effet de l'épaisseur.....	43
3.4.9. Caractéristiques-fréquence	44
3.5. La température.....	45
3.5.1. Caractéristiques capacité-tension	45
3.5.2. Caractéristiques capacité-fréquence	46
3.5.3. La spectroscopie d'admittance	47
3.5.4. L'effet du spectre lumineux	49
3.5.5. Caractéristiques Capacité-fréquence	50
Conclusion générale et perspectives	25
Références bibliographiques	

Table des figures

Figure 1- 1: Classification types de matériaux	03
Figure 1- 2: Principe de fonctionnement de cellule solaire.....	04
Figure 1-3: Caractéristique courant-Tension.....	04
Figure 1-4: Circuit équivalent d'une cellule solaire de la lumière	05
Figure 1-5: Circuit équivalent d'une cellule solaire en présence de la lumière	05
Figure 1- 6: Allure d'une courbe I-V obtenue pour une cellule photovoltaïque sous éclairage avec ses paramètres électriques	6
Figure 1-7: Les courbe $I=f(v)$	7
Figure 1- 8: Influence de la température sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire éclairée.	9
Figure 1-9: Influence de l'éclairage sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire	10
Figure 1- 10: La cellule en silicium monocristallin	11
Figure 1-11: Cellule PV à base de Silicium amorphe	12
Figure 1-12: La cellule poly-cristalline.	12
Figure 1-3 : Couche mince déposée sur un substrat.....	13
Figure 1-14: Méthodes générales de dépôt des couches minces sous vide	15
Figure 2-1: Courant en polarisation directe.....	17
Figure 2- 2: Courants d'une jonction en polarisation inverse.....	17
Figure 2-3: La capacité qui est introduit ici par un mécanisme de polarisation.....	18
Figure 2- 4: Circuit électrique en régime AC d'une cellule solaire	21
Figure 2-5 Modèle dynamique faible signaux des cellules solaires	21
Figure 2- 6: Caractéristiques C – V –F sombres et claires mesurées à l'avant polarisation 0,55 V et illumination 100 mW / cm ²	24
Figure 2-7: Impact de l'effet capacitif d'une cellule au silicium amorphe sur la courbe I-V pour des temps de mesure courts	25
Figure 3-1 : Interface de travail du logiciel SCAPS.....	27
Figure 3-2 : Structure de la cellule a-si :H	28
Figure 3-3 : Structure de la cellule CIGS	29
Figure 3-4 : Structure de la cellule CdTe	30
Figure 3-5 : Propriétés de la couche ajoutée	30
Figure 3-6 : Courant-tension des dans l'obscurité	32
Figure 3-7: Caractéristiques courant-tension des cellules sous lumière.....	33
Figure 3-8 : Capacité-fréquence des trois cellules dans l'obscurité.....	34
Figure 3-9 : Capacité-fréquence des cellules dan lumière	35
Figure 3-10 : Capacité-tension des cellules	36
Figure 3-11 : Capacité-tension des cellules.....	37
Figure 3-12 : Evolution de la concentration des défauts en fonction de leurs énergies dans l'obscurité.....	38
Figure 3-13 : Evolution de la concentration des défauts en fonction de leurs énergies dans la lumière.....	39

Figure 3-14 : L'effet du dopage sur la conductance-tension.....	42
Figure 3-15 : L'effet de dopage sur la capacité-fréquence.....	43
Figure 3-16 : Effet du dopage de l'épaisseur sur la capacité-tension.....	44
Figure 3-17: Effet du dopage de l'épaisseur sur la capacité-fréquence	45
Figure 3-18 : Effet de la température sur la capacité-tension.....	46
Figure 3-19 : Effet de la température sur la capacité-fréquence	47
Figure 3-20 : Effet de la température sur la spectroscopie d'admittance.....	48
Figure 3-21 : Effet du spectre lumineux sur la capacité-tension.....	49
Figure 3-22 : Effet de la température sur la capacité-fréquence	50

Liste des tableaux

Tableaux 3- 1: Les paramètres géométriques et physiques.....	31
Tableaux 3-2: Courant-tension des cellules dans l'obscurité.....	32
Tableaux 3-3: Les caractéristiques électriques des cellules	33

Introduction générale

Introduction Générale

La cellule solaire convertit l'énergie solaire (rayonnement électromagnétique du soleil) en électricité. Elle est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Le processus de conversion de la lumière (photons) en électricité (tension) est appelé effet photovoltaïque. Selon le type de semi-conducteur utilisé on distingue plusieurs technologies de cellules solaires. Les technologies cristallines à base de silicium (multi-cristallin et monocristallin) sont les plus utilisées, sauf que les technologies "couches minces", en particulier **CIS**, **CIGS** et **CdTe** se développent de plus en plus sur le marché photovoltaïque. D'autres technologies basées sur l'utilisation de colorants ou de matériaux organiques, encore à leur balbutiements, promettent un bel avenir à l'énergie photovoltaïque [1]. Outre le silicium amorphe, qui fait le lien entre les deux grandes catégories, les recherches dans le domaine des matériaux semi-conducteurs ont conduit à l'apparition d'une diversité de technologies utilisant des complexes de matériaux en couches minces.

Les technologies les plus courantes aujourd'hui produites industriellement sont :

- Le **Tellure de Cadmium (CdTe)** : présente une très grande stabilité dans le temps avec un coût modéré
- Le **Cuivre/Indium/Sélénium (CIS)**, le **Cuivre/Indium/Gallium/Sélénium (CIGS)** et le **Cuivre/Indium/Gallium/Diséléride/Disulphide (CIGSS)** : présentent les rendements les plus élevés parmi les couches minces mais leur coût reste plus élevé ;
- L'**Arséniure de Gallium (Ga-As)** dont le haut rendement et le coût très élevé conduisent à en réserver l'usage essentiellement au domaine spatial.
- Cuivre-Zinc-Etain-Soufre **CZTS** (Innovation 2016) [3] : Toujours en phase de développement et donc pas encore commercialisées, les cellules CZTS, fabriquées à partir de minerais non toxiques - contrairement au silicium, elles sont fines, et peuvent donc s'appliquer sur des supports souples.

Toutes confondues, ces filières représentent à peine plus de 10% du marché photovoltaïque mondial actuel, mais on a vu récemment un essor de la technologie CIGS. Cet essor pourrait être difficile à l'avenir dans le sens de trouver des ressources suffisantes de l'indium, du gallium, du tellure et du sélénium [2].

L'étude des cellules en couches minces tiré beaucoup d'attention ces dernières années concrétisée par les nombreuses études théoriques, pratiques ou par simulation disponible dans la littérature. Toutes ces études ont pour but d'optimiser les paramètres électriques de ces cellules qui sont la puissance maximale, le facteur de forme, la tension de circuit ouvert, le courant de court-circuit ainsi que le rendement électrique et quantique.

Les cellules solaires modernes en couches minces à base de chalcogénure ont une structure électronique assez compliquée, dont un exemple est celui la cellule : verre / Mo /deux couches de CIGS à différente composition de Ga/une couche de surface de tampon CuIn_3Se_5 / CdS / deux couches de fenêtre ZnO . L'alignement des bandes peut montrer des discontinuités, et donc des états d'interface (de recombinaison) peuvent être présents entre les couches ainsi que des états profonds dans les semi-conducteurs qui peuvent être porteurs de charge (défauts profonds). Ces effets peuvent donner lieu à une multitude d'effets non rencontrés dans les cellules solaires cristallines, tels que: renversement et croisement de la caractéristique I-V, une caractéristiques C-V non monotone, et une dispersion des caractéristiques C-f. De plus ces effets créent une dépendance de la réponse spectrale en fonction de la tension de polarisation. La complexité des phénomènes mentionnés ci-dessus est telle qu'une prédiction réaliste des caractéristiques va au-delà des calculs élémentaires ou de l'utilisation de "règles du pouce".

De plus, Pour optimiser le transfert de puissance, les paramètres dynamiques des cellules solaires doivent être connus. Il existe des rapports sur les méthodes de détermination des paramètres, en particulier la capacité et la résistance dynamique de la cellule (ou module) dans des conditions d'obscurité et d'illumination. Dans la plupart des techniques rapportées, la spectroscopie d'admittance, une cellule (module) est traitée comme un périphérique à un port. L'impédance est calculée à partir de la relation entre la tension variant dans le temps appliquée aux bornes de la cellule et le courant résultant sur le même port. Quand un calcul en régime permanent converge, on peut effectuer une petite analyse du signal autour du canal continu. Le point de fonctionnement, donnant l'admittance complexe, c'est-à-dire la capacité C et la conductance G. Dans le présent travail une étude des paramètres dynamique (AC) de trois types de cellules en couche minces sera présentée. Les cellules étudiées sont respectivement : a-Si :H, CIGS et CdTe.

Le plan d'organisation de ce travail est le suivant :

- Le chapitre 01 : est une présentation générale des cellules solaires et leur fonctionnement, notamment les cellules en couches minces.
- Le chapitre 02 : au court de chapitre nous discutons le modèle dynamique des cellules solaire ainsi que le fonctionnement en régime AC.
- Le chapitre 03 : nous analysons les caractéristiques $I(V)$, C-f, C-V, ainsi que les caractéristiques d'admittance enregistrés sous différentes conditions d'illumination, de dopage et de température.
- Conclusion générale.

[1] : https://www.photovoltaique.info/fr/realiser-une-installation/choix-du-materiel/caracteristiques-des-panneaux-photovoltaiques/les-technologies-de-cellules-solaires-photovoltaiques/#article_panel_35267

[2] : <https://home.uni-leipzig.de/energy/energy-fundamentals/16.htm>

[3] : https://www.ecosources.info/dossiers/Types_de_cellules_photovoltaiques

[4]:M. Burgelman*, P. Nollet, S. Degrave, "Modelling polycrystalline semiconductor solar cells", Thin Solid Films, 361-362 (2000) 527-532

Chapitre 1 :

Cellules solaires en couche mince

Chapitre 1 : Cellules solaires en couche mince

1.1. Introduction

Sur terre il existe des sources des énergies inépuisables qu'on appelle l'énergie renouvelable. Ces énergies sont : l'énergie éolien, l'énergie hydraulique, la chaleur, l'énergie thermique du soleil, l'énergie photovoltaïque, la biomasse. L'énergie est l'un des moteurs de développement des sociétés, il est aussi, le pilier de l'économie moderne. Elle est l'étincelle qui permet l'accomplissement de toute activité humaine. Ses sources se sont diversifiées au cours du temps afin de satisfaire les besoins toujours accrus de l'industrie et des consommateurs [1].

Vu la croissance de la demande industrielle de matériaux en couche mince. En plus, actuellement, on trouve de nombreuses techniques pour la réalisation des matériaux en couches minces. Cela revient à l'évolution technologique des machines ainsi que la variété des méthodes de dépôt des matériaux en couche mince. La filière du silicium en couche mince est considérée comme la filière historique, elle fut découverte dans les années soit cent dix et développée en France par un certain Lionel Solomon. Cette filière a été longtemps utilisée dans le domaine du photovoltaïque, malheureusement son rendement est de seulement 6 à 8% n'empêche qu'elle représente encore 5% de la production photovoltaïque actuelle. Elle est assez souvent utilisée dans des petites applications comme les calculatrices [2]. L'énergie photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium ou recouverts d'une mince couche métallique. Le mot "photo" vient du grec qui veut dire lumière et "voltaïque" vient du nom d'un physicien Italien Alessandro Volta qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité et d'après son nom on a aussi nommé l'unité de tension électrique le "volt". Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. C'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est apportée par les photons, (composants de la lumière) [3] qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique. Ce courant continu de micro puissance calculé en watt crête (w_c) peut être transformé en courant alternatif grâce à un onduleur.

1.2. L'énergie photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium ou recouverts d'une mince couche métallique.

Les matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. C'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est apportée par les photons, (composants de la lumière) [3] qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique. Ce courant continu de micro puissance calculé en watt crête (w_c) peut être transformé en courant alternatif grâce à un onduleur.

Au niveau mondial, l'évolution de la production d'électricité est en bonne corrélation avec la création de richesse, avec une légère tendance à la diminution. Pour la production d'électricité solaire photovoltaïque, elle a atteint 328 TWh (térawatts par heure) [4], soit 1,3 % de la production totale d'électricité. En 2017, quatre pays concentrent les deux tiers de la puissance installée photovoltaïque : la Chine (32 %), les États-Unis (13 %), le Japon (12 %) et l'Allemagne (10 %). L'Agence internationale de l'énergie prévoit que la part du solaire photovoltaïque dans la production mondiale d'électricité pourrait atteindre 16 % en 2050.

De nos jours ; le photovoltaïque poursuit sa progression dans le secteur de l'énergie avec une capacité installée au niveau mondial qui a pratiquement doublé entre 2015 et 2017 (415 GW fin 2017 contre 235 GW fin 2015) et devrait atteindre près de 500 GW fin 2018. En 2017, les nouvelles installations ont atteint près de 100 GW (Giga watt), dont 53 en Chine, et concernent de plus en plus de pays et de régions du monde, en particulier l'Inde, l'Amérique latine, l'Australie, au-delà de ses bases traditionnelles en Europe, au Japon et aux États-Unis. La barre symbolique du térawatt devrait être atteinte au début de la prochaine décennie, avec des volumes d'installations annuels qui pourraient atteindre plusieurs centaines de GW [5].

1.3. Les semi-conducteurs

Le semi-conducteur est un matériau électriquement intermédiaire entre isolant et conducteur. La conductivité électrique, des semi-conducteurs dépend de l'agencement des électrons autour du noyau. Ces électrons peuvent avoir des rôles différents : il existe les électrons de valence et ceux de conduction, souvent schématisés par des "couches" ou "bandes". [3]

Le caractère conducteur ou isolant prend sa source dans la structure même des atomes : chaque élément du tableau périodique possède un certain nombre d'électrons qui sont agencés autour d'un noyau. C'est cet agencement sous la forme de couches d'électrons, différent selon les éléments, qui est responsable de la conductivité électrique.

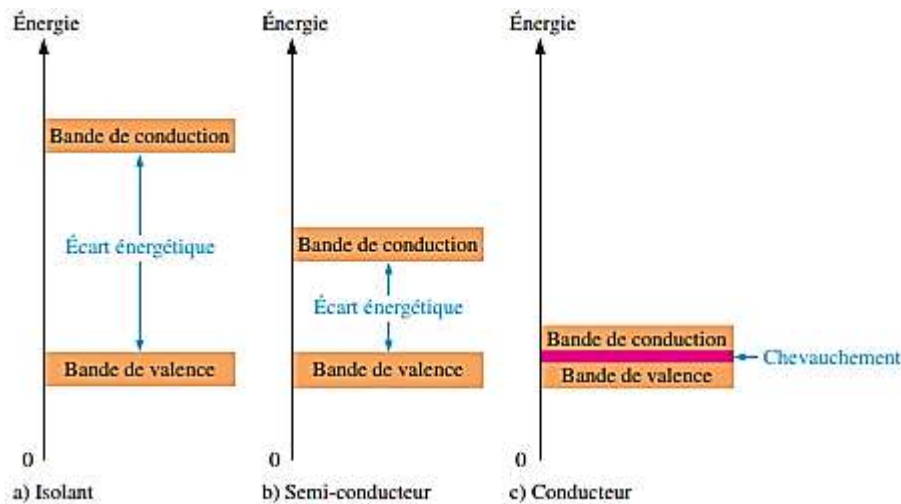


Figure 1-1: Classification types de matériaux

1.4. Cellules solaires

1.4.1. Définition

Comme son nom l'indique, la cellule solaire est la plus petite unité du système photovoltaïque, capable de transformer l'énergie solaire en énergie électrique utilisable. L'assemblage des cellules solaires (parallèle ou série) forme un module solaire appelé panneau solaire [7].

1.4.2. Principe de fonctionnement de la cellule solaire

La cellule solaire est un composant semi-conducteur qui convertit l'éclairement solaire incident en puissance électrique. Le phénomène mis en jeu, appelé **effet photoélectrique (ou photovoltaïque)**, consiste à l'apparition d'une différence de potentiel produite par la génération de porteurs de charge par excitation lumineuse au voisinage d'une jonction PN. Autrement dit, 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 [1].

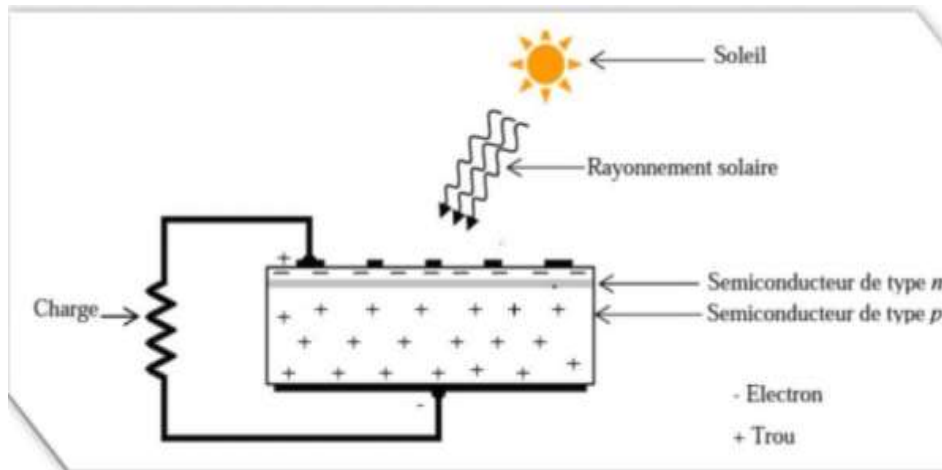


Figure 1- 2: Principe de fonctionnement de cellule solaire

1.4.3. Paramètres électriques d’une cellule solaire

Il existe de nombreux paramètres électriques permettant la caractérisation d’une cellule solaire. Ces paramètres sont déduits directement de la caractéristique courant-tension $I(V)$. La figure I-3, représente la caractéristique courant-tension $I(V)$ dans l’obscurité et dans l’éclairement. [9]

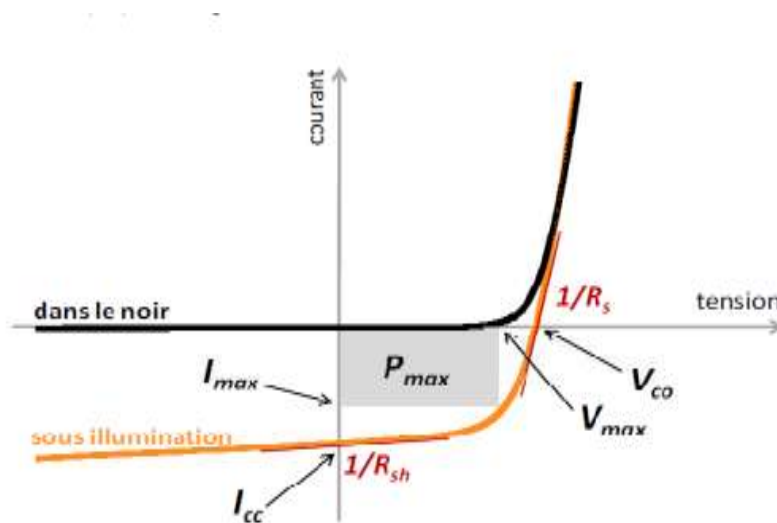


Figure 1- 3: Caractéristique courant-Tension

En absence de tout éclairage, la cellule élémentaire peut être représentée par le circuit équivalent de la figure 1.4.

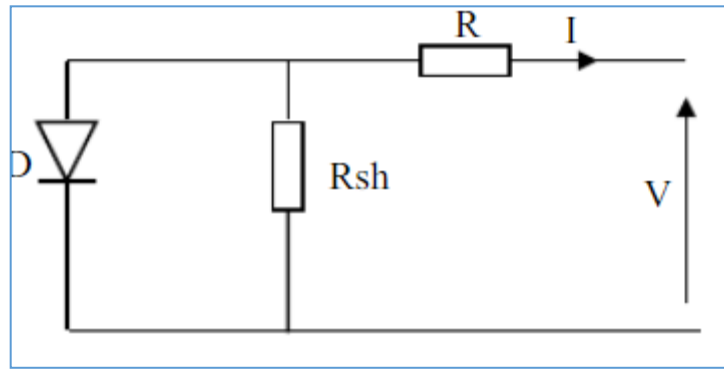


Figure 1- 4: Circuit équivalent d’une cellule solaire en absence de la lumière

Avec :

R_s : Résistance série due aux résistivités des contacts entre les différentes régions constituent de la cellule.

R_p : Résistance parallèle ou résistance du court-circuit

Le courant de saturation de la cellule dépend de la température et des caractérisations de la jonction PN (on ignore les résistances R_{sh} et R_s).

Sous éclairage on rajoute au schéma de la cellule non éclairée le courant du court-circuit (I_{cc}) dû à l’éclairement.

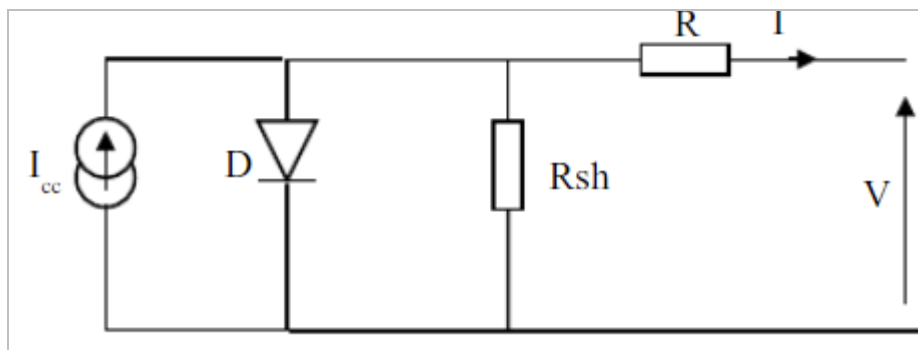


Figure 1- 5: Circuit équivalent d’une cellule solaire en présence de la lumière

L’analogie entre le fonctionnement de la cellule photovoltaïque sous éclairage et celui d’un générateur de courant, produisant un courant I_{ph} auquel se soustrait le courant de la diode en polarisation directe, n’est qu’une représentation simplifiée du fonctionnement réel de la cellule [10]. Le courant de la cellule s’exprime par la formule suivante :

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp \frac{U}{U_t} \right) - 1 \tag{1.1}$$

A partir de la caractéristique I(V) de la figure 1-6, on peut déduire les paramètres électriques suivants :

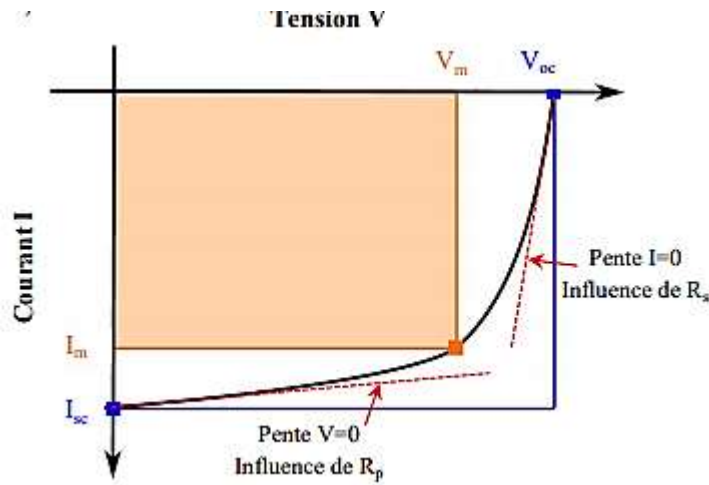


Figure 1- 6: Allure d'une courbe I-V obtenue pour une cellule photovoltaïque sous éclairement avec ses paramètres électriques

1.4.2.1 Courant de court-circuit

Le courant de court- circuit I_{cc} d'une cellule photovoltaïque est obtenu pour une tension $V=0$, [12] caractérise la quantité des paires électrons trous générées et qui traverse la jonction sans être recombinées. L'expression du courant de court-circuit est la suivante:

$$I_{cc} = q \times G(l_n + l_p) \tag{1.2}$$

Avec G : représente le taux de génération des porteurs de charges, l_n et l_p sont respectivement les longueurs de diffusion des électrons et des trous. Le courant de court-circuit dépend des paramètres électriques :

1.4.2.2. Tension en circuit ouvert V_{CO} :

Sous obscurité ($I=0$), la cellule fournit un courant égal au courant de court-circuit I_{cc} pour une certaine tension dite tension de circuit ouvert V_{oc} . [12]

$$V_{co} = \frac{K_t}{Q} q \times l_n \left(\frac{I_{cc}}{I_o} + 1 \right) \tag{1.3}$$

Le courant de saturation de la diode qui détermine le nombre des porteurs collectés à l'obscurité par effet de température. T : la température en degré Kelvin. k : la constante de Boltzmann.

1.4.2.3. Facteur de forme FF

Le facteur de forme met en évidence non seulement l'efficacité d'une cellule photovoltaïque mais aussi et surtout son vieillissement. Il est défini par le rapport de la puissance maximale PM et de la valeur du produit $I_{cc} \cdot V_{co}$: [12]

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co}} \times I_{cc} \quad (1.4)$$

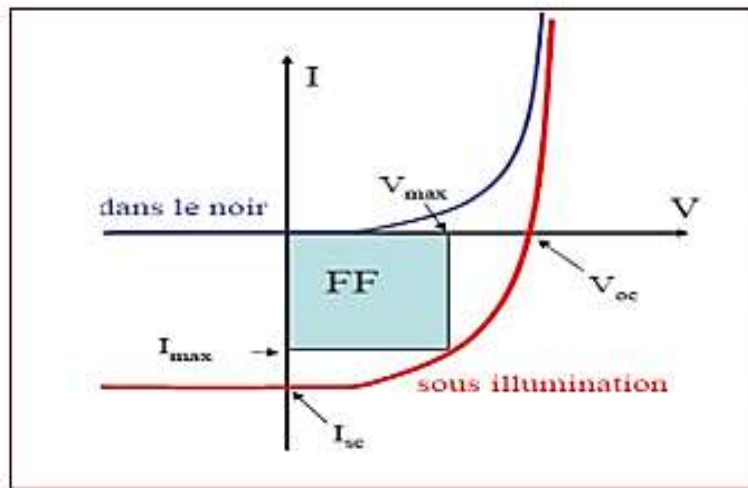


Figure 1-7: Les courbe I=f(v)

1.4.2.4. Rendement de conversion η

Le rendement de conversion d'énergie η est le rapport de la puissance maximale générée et de la puissance du rayonnement solaire incident P_0 [12].

$$\eta = FF \times I_{cc} \times \frac{V_{co}}{P_0} = I_{max} \times \frac{V_{max}}{P_0} \quad (1.5)$$

P_0 =la puissance du rayonnement solaire incident

V_{ma} =Tension correspondent à la puissance maximale fournie (V)

I_{ma} =Courant correspondent à la puissance maximale fournie (A)

On note que ces paramètres sont fortement influencés par certains phénomènes comme la température et l'intensité de l'éclairement.

1.4.2.5. Rendement quantique [14]

Le rendement quantique donne la probabilité qu'un photon incident d'énergie E fournira un électron à un circuit externe. Il est considéré comme un paramètre quantitatif et qualificatif dans la description de la cellule solaire. Il permet de mesurer le nombre des électrons en sortie de la cellule solaire par rapport au nombre de photons incidents. Il permet aussi la quantification des pertes dans de la cellule solaire (réflexion à la surface, pertes des photons de faible et forte énergie).

1.5. Influence de la température

Puisqu'elles sont exposées au rayonnement solaire, l'effet de la température est très important sur le comportement des cellules solaires. [15] La figure 10, montre l'influence du changement de la température, sur la caractéristique $I(V)$ de la cellule solaire. A partir de la courbe, on observe que l'augmentation de la température provoque une augmentation du courant du court-circuit (I_{cc}), en même temps on constate une diminution remarquable de la tension de circuit ouvert (V_{co}). Aussi, l'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension (V_m) avec un léger accroissement du courant (I_m). Donc une baisse relative de la puissance maximale (P_m).

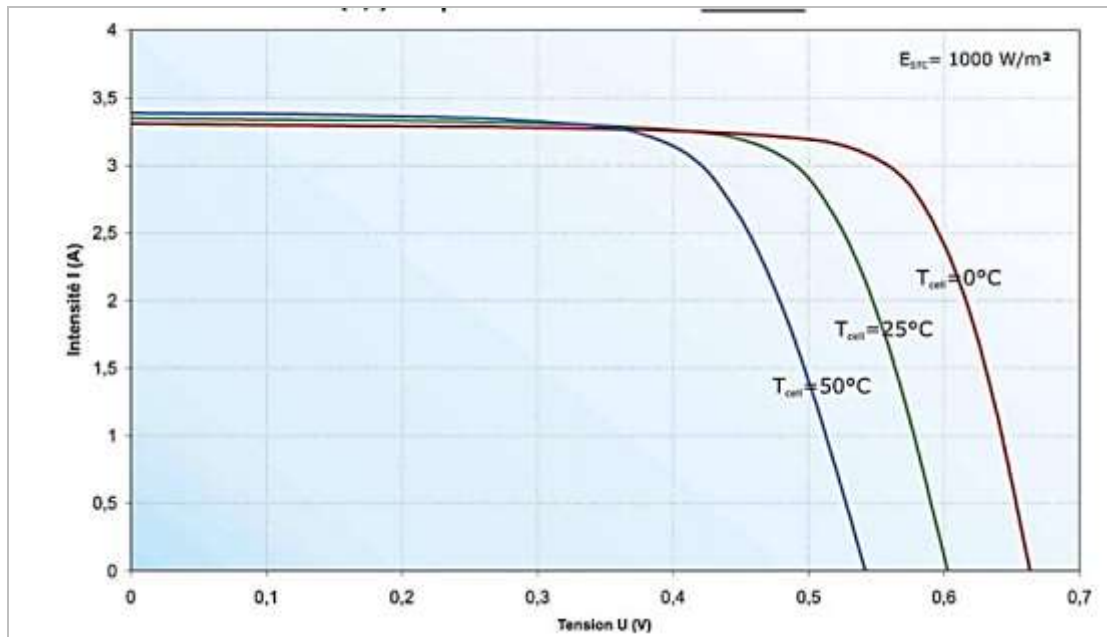


Figure 1-8: Influence de la température sur la caractéristique I-V d’une cellule solaire éclairée.

1.6. Influence de l’éclairement

Un autre facteur important dans la détermination du rendement d’une cellule, est l’intensité de l’éclairement absorbé. Leur effet sur la caractéristique I(V) est remarquable. D’après les courbes de la figure.II.2, on remarque une augmentation proportionnelle du courant de court-circuit (I_{cc}) à l’augmentation de l’intensité de l’éclairement. Pour la tension en circuit ouvert (V_{co}), elle varie légèrement [15].

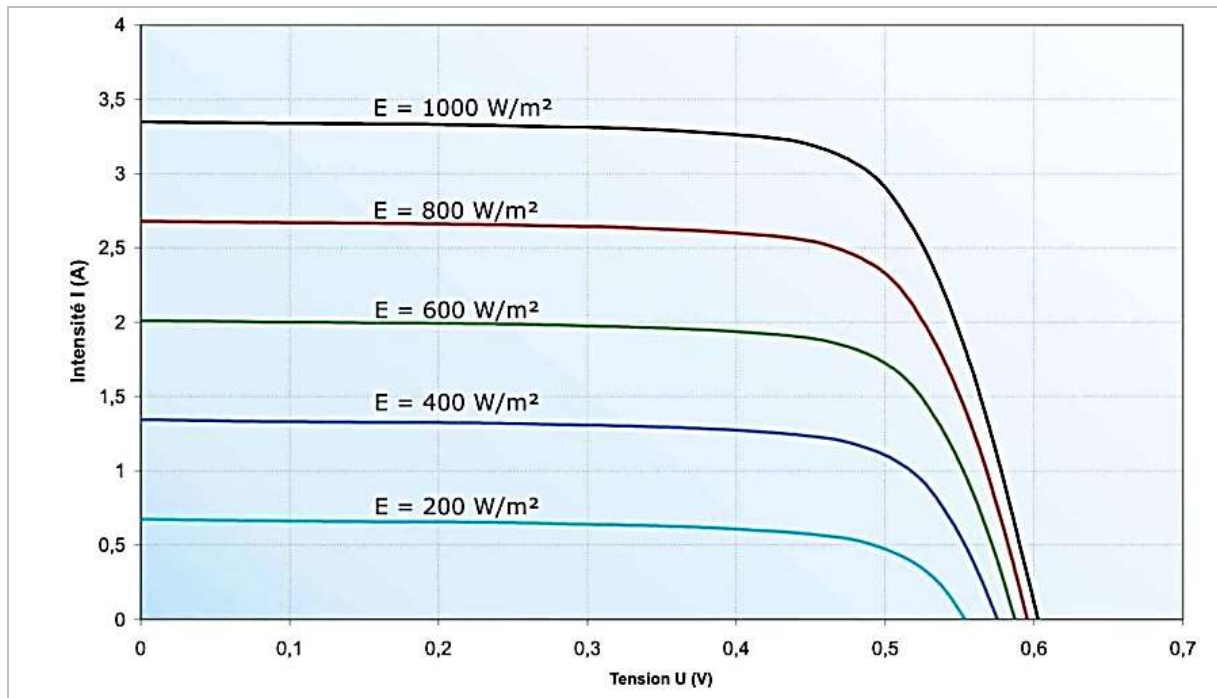


Figure 1- 9: Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire

1.7. Technologie des cellules solaires

Les technologies émergentes sont aujourd'hui :

- ❖ Le Silicium amorphe et microcristallin noté TF-Si (Thin-Film Silicon).
- ❖ Le Semi-conducteur Poly-cristallin CdTe (Tellure de Cadmium).
- ❖ L'alliage Cu (In, Ga) Se₂ (Cuivre-Indium/Gallium-Sélénium) noté CIGS.

1.7.1. La cellule en silicium monocristallin

Les cellules monocristallines sont issues d'un seul bloc de silicium fondu, elles sont donc très "pures". Elles offrent le meilleur rendement, entre 13 et 17%, mais sont aussi plus chères à la production, donc à la vente. Ces cellules sont en général octogonales et d'une couleur uniforme foncée (bleu marine ou gris). Ces cellules sont les plus performantes pour la production d'énergie et permettent donc de constituer des panneaux très performants : ceux qui produisent plus d'énergie avec le moins de surface. [17]

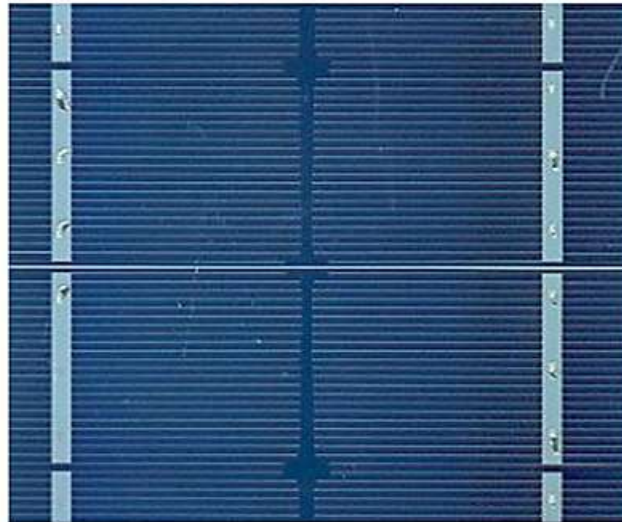


Figure 1-10: La cellule en silicium monocristallin

1.7.2. Le Silicium amorphe et microcristallin

Le silicium amorphe hydrogéné ($a\text{-Si:H}$) est aussi un matériau semi-conducteurs. Il a été découvert vers les années soixante. Les cellules amorphes sont produites à partir d'un "gaz de silicium", qui est projeté sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide. La cellule en silicium amorphe prend une couleur grise très foncée. Ce type de cellules est exploitée dans les calculatrices certaines montres dites « solaires ». Aussi, ce type de technologie est utilisable sur de nombreux supports, notamment sur des supports souples. La contrainte majeure rencontrée avec cette technologie c'est son rendement environ 2 à 3 fois plus faible que les cellules monocristallines [18].

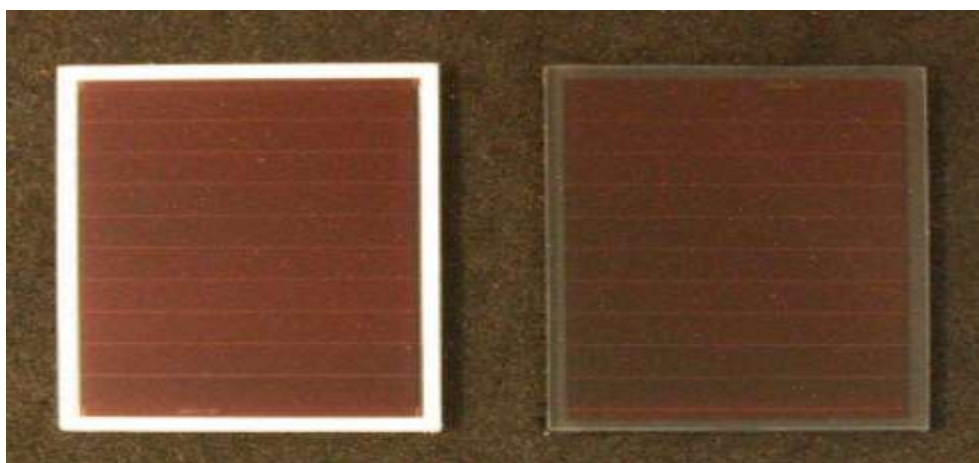


Figure 1-11: Cellule PV à base de Silicium amorphe

1.7.3. Les semi-conducteur Poly-cristallin CdTe

Les cellules poly-cristallines sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vues de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux. Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines. Elles sont en général de forme rectangulaire et sont couleur bleu nuit avec des reflets [19].



Figure 1-12: La cellule poly-cristalline.

1.7.4. L'alliage Cuivre-Indium Gallium-sélénium

Cette technologie de Cu (In, Ga) Se notée CIGS n'est que récemment apparu sur le marché commercial doté de plusieurs avantages et qualités dont les excellentes propriétés d'absorption, mais ce qui rend cette technologie de cou. Les recherches actuelles menées sur les composés Cu (In, Ga) Se₂ révèlent que le matériau Cu (In, Ga) Se₂ (CIGS)[21] est le plus émergent. En couches minces poly cristallines, il est pratiquement incontournable en raison des rendements élevés atteints en laboratoire et de la stabilité remarquable qu'il assure dans le temps. Les matériaux Cu (In, Ga) Se₂ appartiennent à la filière de matériaux chalcopyrites.

Cette nomination "chalcopyrite" a été attribuée pour la première fois en 1725 par les chercheurs d'Or au CuFeS₂. Le premier matériau étudié de cette filière est le CuInSe₂. Il a été

synthétisé pour la première fois en 1953 par Hahn. Ce n'est qu'en 1974 qu'il a été proposé pour des applications photovoltaïques.

1.8. Les cellules en couches minces

Une couche mince est une fine couche d'un matériau déposé sur un autre matériau, appelé "substrat" dont l'une des dimensions qu'on appelle l'épaisseur a été fortement réduite de telle sorte qu'elle varie de quelques "nm" à quelques " μm " (typiquement ce sont des couches de 10 à 100 nanomètres d'épaisseur) [22].

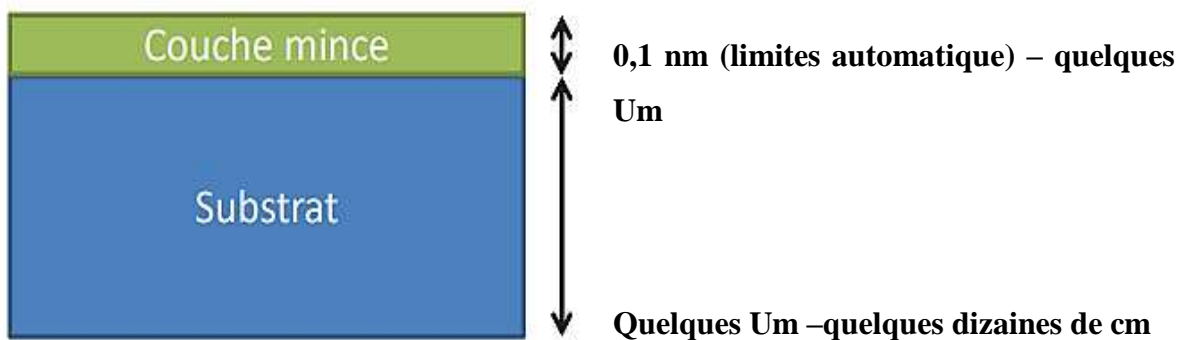


Figure 1- 13: Couche mince déposée sur un substrat

1.8.1. Intérêt et caractéristiques des couches minces

Le but d'utiliser la couche mince est de donner des propriétés nouvelles à la surface de l'élément avec l'avantage de garder des propriétés massives du substrat, cette perturbation des propriétés physiques est due à la faible distance entre les deux surfaces limites (quasi bidimensionnelle). Grâce aux couches minces la conductivité électrique peut être maîtrisée de façon précise ainsi que la réflexion optique ce qui rend l'application des couches minces dans le photovoltaïque vraiment intéressante, car ces deux propriétés sont fondamentales pour obtenir un meilleur rendement [24].

Ainsi ; L'intérêt accordé aux couches minces provient essentiellement de l'utilisation économique des matériaux en rapport avec les propriétés physiques et de la simplicité des technologies mise en œuvre pour leur réalisation (élaboration facile et peu coûteuse). [1] Une grande variété de matériaux est utilisée pour produire ces couches minces. Citons les métaux, alliages (possibilité de faire plusieurs alliages : binaires, ternaires, quaternaires), composés réfractaires (oxydes, nitrures, carbures), les composés intermétalliques et les polymères de matériau photosensible efficace pour absorber l'essentiel du rayonnement solaire (quelques

Chapitre I.....Cellules solaires en couches minces
microns d'épaisseurs suffisent). Par ailleurs, on utilise des méthodes de fabrication moins coûteuses des cellules qui permettent une intégration totale.

1.8.2. Formation d'une couche mince

Généralement, il y a trois étapes dans la formation d'un dépôt en couche mince :

- Etape n°1 : Création de l'espace à déposer, il y a trois façons de mettre un matériau en phase vapeur : l'évaporation, la pulvérisation et les gaz de vapeurs chimiques.
- Etape n°2 : Transfert de l'espace à déposer, le transport de l'espèce en phase vapeur de la source vers le substrat peut se dérouler sous collisions entre atomes et molécules [2].
- Etape n°3 : Croissance de la couche sur le substrat, cette étape prend en compte le dépôt de la couche avec les processus de nucléation et de croissance.

1.8.3. Technologie couche-mince

Les cellules PV dites couche mince (Thin-film) constituent ce que certains appellent les cellules de seconde génération car elles viennent historiquement juste après les cellules en silicium cristallin relativement épaisses. L'intérêt de la technologie couche mince vient de la faible quantité de matériaux nécessaire à la fabrication d'une cellule comparativement aux cellules classiques. Contrairement aux cellules silicium cristallin de première génération, on ne dépose que la quantité [25].

1.8.4. Méthode de dépôt des couches minces

Les dépôts de couches minces sur des substrats dépendent du type d'application désiré. On peut les réaliser selon des procédés chimiques ou physiques au moyen des techniques résumées dans la figure 1.14 [7]. Dans ces revêtements déposés industriellement peuvent se décomposer en 2 familles distinctes: les revêtements déposés par voie physique (Physical Vapor Déposition PVD) et les revêtements déposés par voie chimique (Chemical Vapor Déposition CVD).

Pour les dépôts chimiques en phase vapeur ou CVD (Chemical Vapor Déposition) sont des méthodes qui permettent de former des couches minces solides non volatiles sur un substrat, par des réactions chimiques avec des gaz. Les gaz sont introduits dans un réacteur, ils se décomposent et réagissent à une température pour former le film voulu.

Dans le cas des dépôts physiques en phase vapeur ou PVD (Physical Vapor Déposition) peuvent être obtenus par des méthodes de pulvérisation ou par des méthodes d'évaporation.

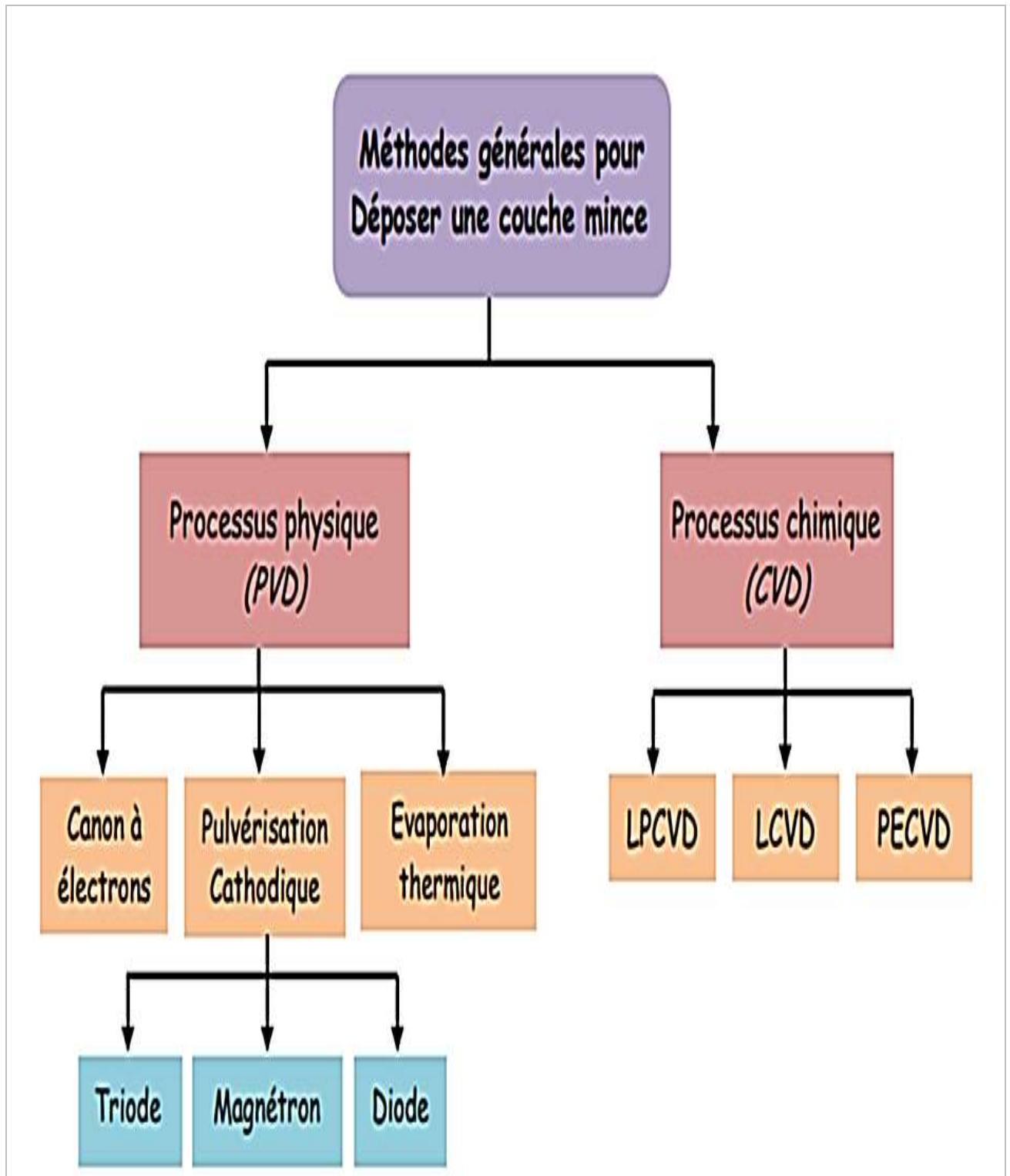


Figure 1- 14: Méthodes générales de dépôt des couches minces sous vide

Chapitre 2 :

Etude AC des cellules solaires

Chapitre 2: Etude AC des cellules solaires

2.1. Introduction

Pour caractériser une cellule solaire plusieurs techniques sont utilisées. Ces techniques sont liées aux régimes de fonctionnement de la cellule : dynamique (AC) et statique (DC). A partir de ces techniques on peut extraire les différentes caractéristiques électriques de la cellule solaire comme la caractéristique courant-tension, capacité-fréquence et capacité-tension.

En général, un modèle DC ou un circuit équivalent en DC d'une cellule solaire est adéquat pour décrire le comportement du module des cellules solaires. Un modèle de circuit DC consiste en une résistance série (R_s), une résistance parallèle (R_{sh}) et une diode ayant un facteur de non- idéalité (voir chapitre 1). Dans certaines applications bien spécifiques des cellules solaires telles que celles de la mission « Mars Pathfinder » et d'autres applications satellitaires, la compréhension des impédances AC est nécessaire à la conception de systèmes efficaces et fiables [27]. Dans ce chapitre, un aperçu sur les régimes de fonctionnement DC et en spécificité le régime AC, ainsi que sur les différentes caractéristiques (et leurs intérêts) sera donné.

2.2. Régimes de fonctionnement d'une cellule solaire

2.2.1. Cellule en régime DC (statique)

Dans le cas de la polarisation DC deux cas polarisation sont possibles : directe et indirect. En reliant la jonction à une polarisation directe (V_{direct}), la hauteur de la barrière de tension est réduite pour devenir égale à $V_0 - V_{direct}$ (V_0 *barrière de potentiel*). A cause de cette diminution de barrière, de nombreux électrons et trous peuvent la franchir pour se recombiner avec les trous de la région P proches de la zone e charge d'espace Z.C.E. Afin de rétablir l'équilibre thermodynamique, les trous de la région neutre se déplacent pour compenser ce déficit.

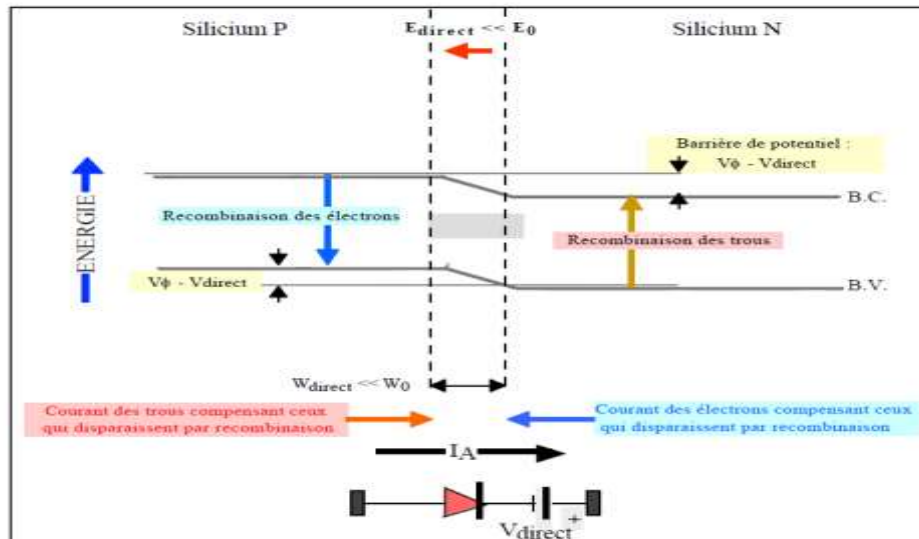


Figure 2- 1: Courant en polarisation directe.

Dans le cas de polarisation inverse, la cathode est reliée à la masse et l’anode est reliée au générateur délivrant une tension négative (V_{inv}). L’application de la tension inverse aux bornes de la jonction va renforcer la hauteur de la barrière de tension entre les régions P et N pour devenir égale à $V_{\phi} + V_{inv}$. [28].

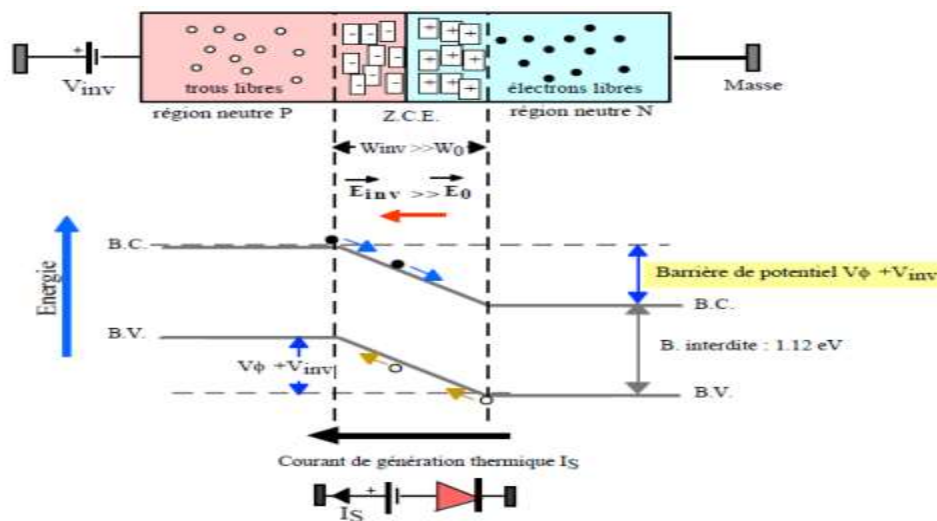


Figure 2-2: Courants d'une jonction en polarisation inverse.

On note qu’à partir de ces deux régimes de polarisation on peut extraire la caractéristique $I(V)$ de la cellule solaire et donc déduire ses différents paramètres électriques (voir chapitre 1).

2.2.2. Cellule en régime AC (dynamique)

Les modules photovoltaïques fonctionnent comme des dispositifs à courant continu. Mais ils présentent une impédance complexe due à la conception des cellules solaires. Les circuits électroniques ultérieurs pour le conditionnement de l'énergie électrique sont conçus pour correspondre à l'entrée dans des conditions de fonctionnement standard.

Durant leur fonctionnement, la partie réelle ainsi que la partie imaginaire de l'impédance des modules photovoltaïques changent en fonction des conditions ambiantes telles que l'éclairement et la température. Une inadéquation (mis match) due à des modifications de l'impédance complexe peut entraîner une réduction des performances de l'ensemble du système de production d'énergie [29]. Par conséquent, pour concevoir de tels systèmes photovoltaïques à haute puissance efficaces, une étude détaillée sur les paramètres AC des cellules solaires est importante.

2.3. Modèle électrique de la cellule pour la modélisation en régime dynamique

Un circuit équivalent d'une cellule solaire en régime AC est représenté sur la figure 2-3. Une cellule solaire peut être donc modélisée comme un réseau RC parallèle avec une résistance en série.

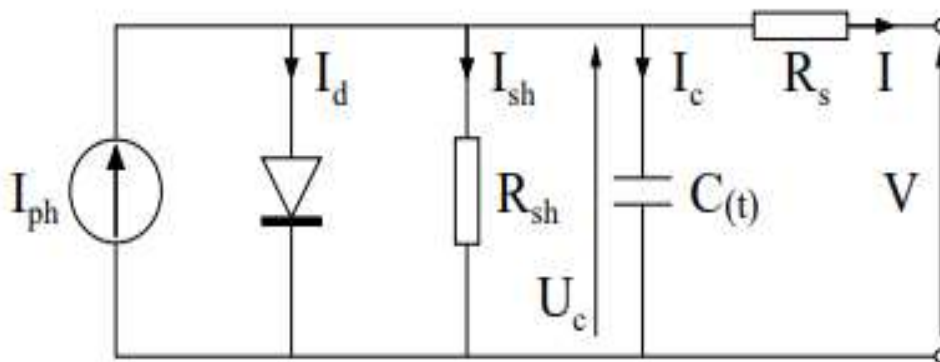


Figure 2-3: La capacité qui est introduit ici par un mécanisme de polarisation

Le photo-courant I_{ph} , défini par le nombre des paires électron-trou générées par unité de temps; la diode, avec le facteur d'idéalité n ; la résistance de shunt R_{sh} , qui compte pour les

processus de recombinaison; la résistance en série R_s , représentant la résistance des couches actives et des contacts, la capacité est liée au mécanisme de polarisation.

En raison de la présence de la capacité dans la cellule solaire, la haute tension du module solaire (ou sur la capacité) est déchargée via un commutateur shunt, présent dans le système photovoltaïque en tant que partie du contrôleur de charge, entraînant une perte de puissance significative P , donnée par [29] :

$$P = \frac{1}{2} C V^2 f \quad (2.1)$$

Avec C est la capacité du module solaire, V : la tension du bus et f : la fréquence du contrôleur de charge. Par conséquent, les paramètres AC, en particulier la capacité de la cellule solaire, constituent un paramètre important dans la conception de contrôleurs de charge rapides et fiables. La capacité de la cellule solaire $C(t)$ est égale à la connexion de la capacité de transition C_T et la capacité de diffusion C_d en parallèle donc $C(t)=C_d+C_T$.

La capacité de transition ou capacité de déplétion pour une jonction abrupte, polarisée en directe, est décrit par l'expression donnée par :

$$C_T = \frac{\epsilon S}{W_{ZCE}} \quad (2.2)$$

Avec S la surface de la cellule, ϵ la permittivité du matériau et

$$W_{ZCE} = \sqrt{\frac{2\epsilon(V_D - V)(N_A + N_D)}{q(N_A N_D)}} \quad \text{représente la largeur de la zone de charge d'espace (zone de$$

déplétion)

$$\text{Donc :} \quad C_T = S \sqrt{\frac{q\epsilon}{2(V_{bi} - V)(N_A + N_D)} \frac{N_A N_D}{(N_A N_D)}} \quad (2.3)$$

Où q : la charge élémentaire de l'électron, N_A, N_D : sont respectivement les concentrations des atomes accepteurs et donneurs, V : tension de polarisation et V_{bi} tension de built-in.

La capacité de transition peut être aussi exprimée par la formule donnée par Millman et Halkias :

$$C_T = S \sqrt{\frac{q \epsilon N_B}{2(V_{bi} - V)}} \quad (2.4)$$

Où N_B représente la concentration dans la région de base (zone P).

Supposons que le courant de la diode est régi par la diffusion, la capacité de diffusion prend l'expression (par Size. S.M):

$$C_T = \frac{\tau G}{2} = \frac{\tau}{2} \cdot \frac{\partial I}{\partial V} \quad (2.5)$$

Où G est la conductance de la diode et τ la durée de vie effective des porteurs minoritaires (les électrons) dans la région de base de la jonction PN. G peut être obtenu à partir de la première dérivation de la courbe I-V statique ou à partir de la mesure en régime AC (faible fréquence $\omega\tau \ll 1$)

$$\tau = \frac{nkT}{q} = \frac{nV_T}{\frac{\partial V_{CO}}{\partial t}} \quad (2.6)$$

Avec n : facteur d'idéalité de la diode, V_T : tension thermique, $\frac{\partial V_{CO}}{\partial t}$: est le taux de chute de tension linéaire.

On note que la capacité de transition C_T caractérise la capacité de jonction ou de la zone de charge d'espace (ZCE). La capacité de diffusion C_D est due à l'oscillation de porteurs minoritaire en réponse au signal alternatif (AC). Les valeurs de C_D et de C_T dépendent de l'intensité de d'éclairement, de la température de la cellule, de la tension de fonctionnement, ainsi que des propriétés des matériaux et de la géométrie de la cellule.

Un autre modèle similaire à celui du premier circuit est donné dans la figure 2-4. Avec la résistance R_d modélise la caractéristique de la diode non-idéale. La résistance R_L représente la résistance de charge quand la cellule est connectée à un circuit externe.

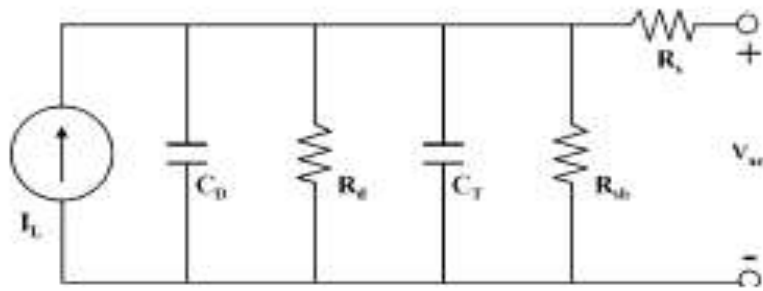


Figure2- 4: Circuit électrique en régime AC d'une cellule solaire

2.4. Modèle faibles signaux des cellules solaires

Dans le cas du régime faible signaux, le comportement de la cellule solaire peut être étudié en se basant sur le modèle ci-dessous : [30].

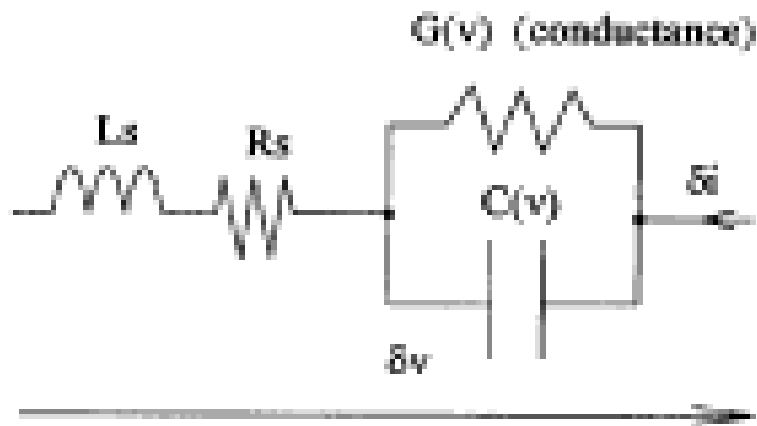


Figure 2-5 Modèle dynamique faible signaux des cellules solaires.

$$G(v) = G_0 + G_1 \times V^2 + Sd + G \tag{2.7}$$

$$Gd = G_2 * \exp\left(\frac{V}{V_0}\right) \tag{2.8}$$

$$Gt = G_3 * \exp\left(\frac{V}{2 \times V_0}\right) \tag{2.9}$$

$$C(V) = \frac{C_0}{\sqrt{1 - \frac{V}{\phi}}} + C_1 * \exp\left(\frac{V}{V_0}\right) \tag{2.10}$$

Avec :

V : tension de la jonction de polarisation

$$V_0 = \frac{k.T}{q}$$

$$K=1.38.10^{-23}\text{J/k}$$

$$Q=1.602.10^{-19}\text{C}$$

T=température en kelvin, ϕ = potentiel de barriere de la la température

2.5. Caractérisation des défauts profonds dans les cellules solaires dans le régime AC

Les défauts font, sans aucun doute, partie des problèmes physiques les plus critiques à résoudre pour l'industrie photovoltaïque (PV). Aussi, les caractéristiques des matériaux semi-conducteurs sont fortement influencées par les impuretés ou les défauts. Ces derniers sont ajoutés pour pouvoir augmenter la conductivité électrique ou le contrôle de la durée de vie, mais souvent ces impuretés ou ces imperfections dans le réseau agissent comme facteurs de perte, par conséquent une concentration élevée de défauts diminue la possibilité de transport des porteurs, réduisant ainsi le rendement de conversion. Les défauts et les impuretés sont créés à l'intérieur du gap, ils peuvent être profonds ou superficiels [31].

En général, un défaut est dit peu profond si son niveau d'énergie est proche du minimum de la bande de conduction E_c (défauts donneurs) ou le maximum de la bande de valence E_v (défauts accepteurs). Autrement (loin d' E_c et E_v), le défaut est considéré comme défaut à niveau profond. L'étude des caractéristiques des centres de défauts peut être obtenue à partir de la mesure de capacité en utilisant différentes méthodes spectroscopiques telles que la spectroscopie d'admittance (AS) ou deep level transient spectroscopy (DLTS)]. La spectroscopie d'admittance et la DLTS sont étroitement liées. Dans l'AS, un faible signal alternatif est utilisé, tandis qu'une impulsion de tension est utilisée lors de mesures transitoires (DLTS). En conséquence, les mesures par l'AS restent faciles à interpréter car l'admittance est mesurée alors que la structure reste proche d'une condition d'équilibre.

2.6. Principe de mesure par la spectroscopie d'admittance

La spectroscopie d'admittance est couramment utilisée pour caractériser les défauts de piégeage des porteurs majoritaires. Dans les dispositifs photovoltaïques actuels, d'autres

mécanismes physiques peuvent contribuer à la mesure d'admittance et interférer avec l'interprétation des données. La spectroscopie d'admittance, parmi d'autres techniques basées sur la capacitance, telles que la spectroscopie capacitive-tension et les niveaux profonds et transitoires, est couramment utilisée pour caractériser les défauts de piégeage de la porteuse majoritaire dans les matériaux et les dispositifs PV. La spectroscopie d'admittance inspecte la réponse actuelle d'un dispositif à une faible modulation de tension de polarisation alternative et sa dépendance à la fréquence et à la température, probablement en raison de la capture et de l'émission des défauts électriquement actifs. Dans un simple dispositif à simple jonction, il est possible d'extraire des paramètres de défaut tels que l'énergie d'activation, la section transversale de capture et la densité d'état. L'AS permet aussi de vérifier la réponse actuelle d'un dispositif à une faible modulation de tension de polarisation alternative et sa dépendance à la fréquence et à la tension [32].

Certains difficultés, dans l'AS, se présente suite à la violation des hypothèses de base de la spectroscopie d'admittance conventionnelle telles que la jonction simple, le contact ohmique, les absorbeurs hautement conducteurs et la mesure en polarisation inverse. Nous exploitons ces violations pour mettre au point des méthodes fondées sur l'AS pour étudier les origines respectives de « l'interférence»: mobilité des porteurs majoritaires, contact non-ohmique, la barrière de potentielle, phénomène d'inversion des porteurs minoritaires au niveau de l'hétéro-interface ainsi que la durée de vie de porteurs minoritaires. Ces méthodes sont appliquées à diverses technologies photovoltaïques: cellules CdTe, Cu (In, Ga) Se₂, Si-H ainsi qu'aux cellules à base de matériaux photovoltaïques organiques.

2.7. Caractéristiques des cellules solaires dans le régime AC

2.7.1. Caractéristique C-f

La mesure de la caractéristique capacité-fréquence (C-f) est utile pour comprendre le comportement dynamique des cellules solaires. Les résultats d'une mesure C-f sont souvent tracés sous forme de nombres complexes dans le plan d'impédance où cette information est connue sous de nombreux complexe, caractéristique C-f sous éclairément et dans l'ombre présente dans la figure 2-6 [33].

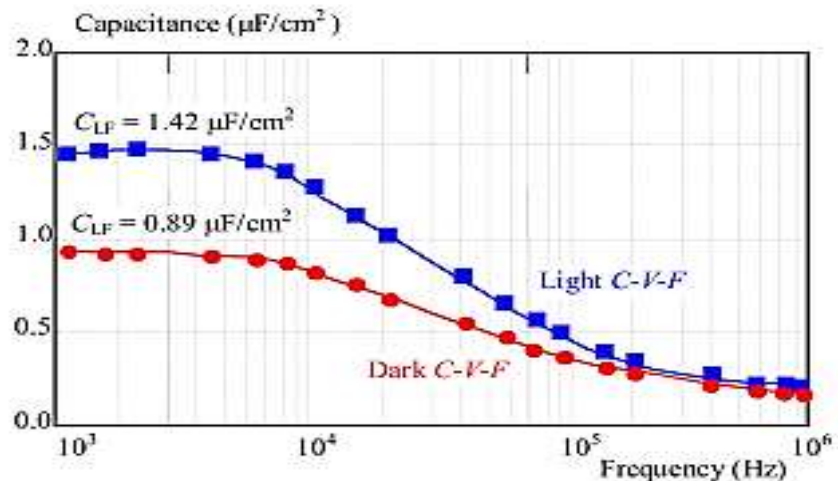


Figure 2-6: Caractéristiques C – V –F sombres et claires mesurées à l'avant polarisation 0,55 V et illumination 100 mW / cm²

2.7.2. Caractéristique Capacité-Tension

Les techniques de mesure de capacité surveillent le mouvement de la charge électronique dans un dispositif à semi-conducteur et fournissent une mesure des propriétés d'état de défauts électriquement actifs. La capacité est la capacité de stockage de charge et elle est mesurée sur une jonction de redressement. Pour la caractéristique capacité –tension, elle détermine la concentration de porteurs majoritaires dans le dispositif, les niveaux d'énergie des états d'interface (ou les deux) qui existent souvent entre les surfaces de matériaux dissemblables.

Le traitement des données de CV pour extraire les profils de densité des porteurs de charge a suivi la méthode classique de Mott-Schottky.

Courbes C - V mesurées en polarisation directe: la capacité C n'augmente pas monotonement avec la tension de polarisation V, mais montre des extrema, par ex. deux maximum et un minimum Cette fonctionnalité a été utilisée pour mesurer la densité de dopage dans CdTe à la fois à des positions proches de la jonction avec CdS et à des positions proches du contact arrière [33].

2.7.3. L'effet capacitif des cellules et temps de caractérisation

Un effet à ne pas négliger lorsque l'on caractérise les cellules ou modules photovoltaïque sur une échelle de temps courte (quelques ms), ce qui est le cas pour de nombreux simulateurs solaires à impulsions lumineuses, est le comportement capacitif de

certaines cellules. Cela peut fausser les mesures I-V si l'on n'attend pas que le signal soit stabilisé. L'allure de la courbe I-V peut parfois sembler correcte mais les valeurs de I_{sc} et P_{max} sont soit surévaluées, soit sous-évaluées [34]. On observe ce phénomène sur la Fig2-7.

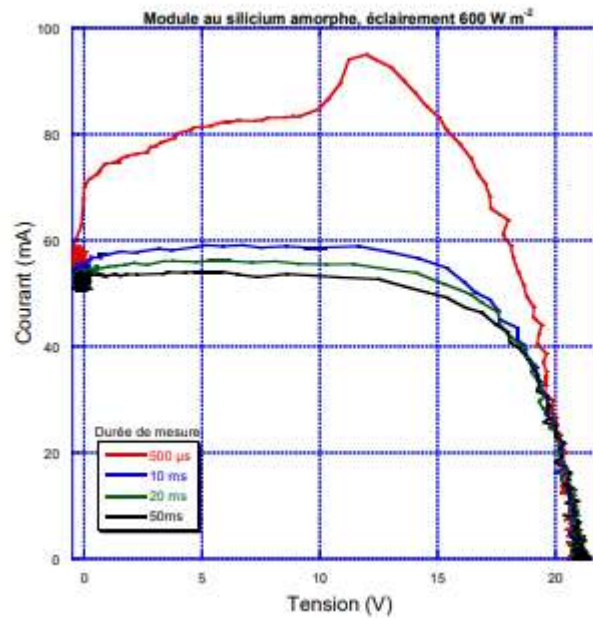


Figure 2- 7: Impact de l'effet capacitif d'une cellule au silicium amorphe sur la courbe I-V pour des temps de mesure courts

Chapitre 3 :
Résultats de simulation

3.1. Introduction

Après avoir discuté, dans les chapitres précédents, les bases théoriques liées aux caractéristiques des cellules solaires et leurs fonctionnement dans le régime AC, nous allons maintenant présenter les différents résultats de simulation.

3.2. Présentation du logiciel de simulation SCAPS 3.3.07

Le logiciel SCAPS-1D « Solar Cell Capacitance Simulator one Dimension » est un logiciel de simulation des cellules solaires unidimensionnelles développé à l'Université de Gent en Belgique par Marc Burgelman et al. Pour simuler les caractéristiques électriques des dispositifs photoniques tels que les cellules solaires à couches minces. Le SCAPS a été développé à l'origine pour des structures des cellules de CuInSe2 et de CdTe. A l'aide du logiciel SCAPS, il est possible de simuler des structures constituées d'un nombre définis de couches (jusqu'à 7 couches intermédiaires ainsi que les contacts avant et arrière), avec des profils de dopage différents, et avec des distributions énergétiques des niveaux donneurs ou accepteurs donnés, dans le volume et aux interfaces pour un spectre de lumière arbitraire [35].

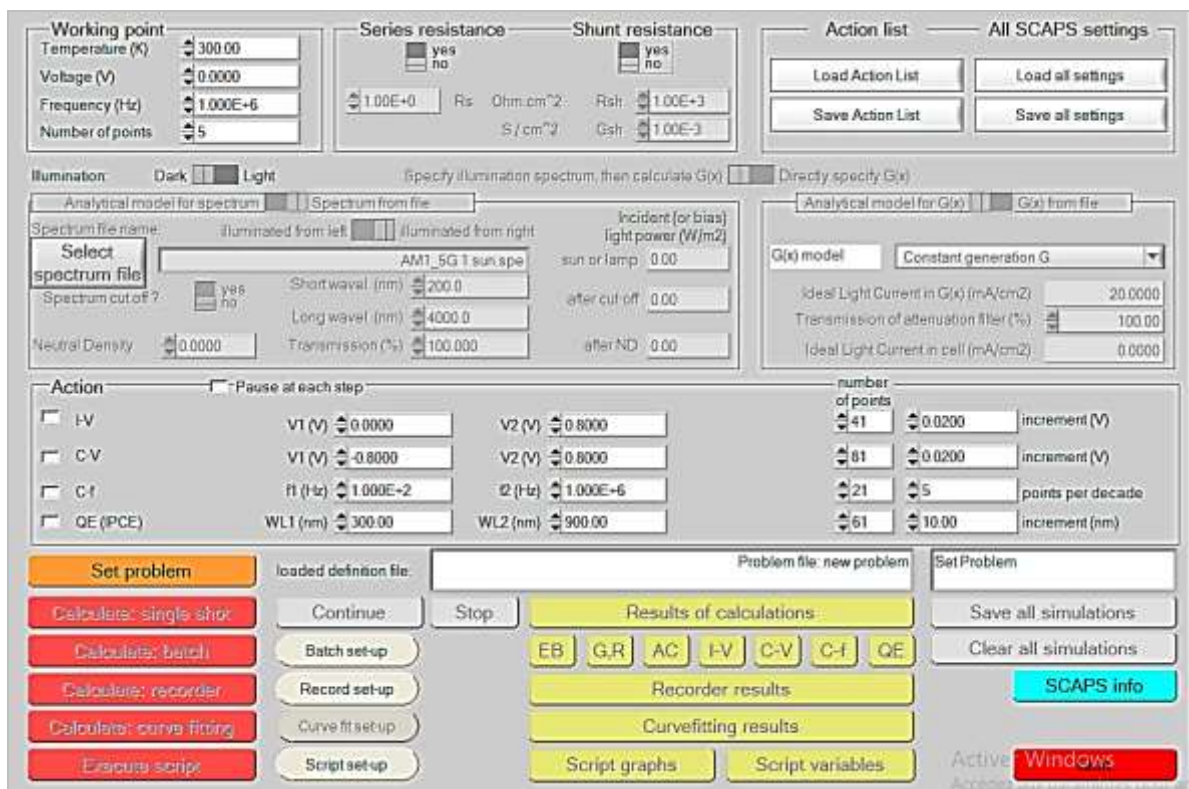


Figure 3-1: Interface de travail du logiciel SCAPS.

3.3. Présentation des cellules simulées

Dans cette partie nous allons exposer les résultats de simulation des cellules suivantes d'a-Si:H, CdTe et de CIGS. La comparaison entre les caractéristiques mesurées et simulées peut permettre de mieux comprendre l'intégrité physique interne. Fonctionnement d'une cellule solaire, comme illustré dans les exemples donnés ci-dessous.

3.3.1. La cellule a-Si:H

La cellule tandem a-Si:H / μ c-Si:H est aussi appelée cellule hybride ou micro morphé. En général, les performances des dispositifs photovoltaïques sont liées à leur surface ; plus elle est grande et plus les contraintes (problèmes d'homogénéité notamment) sont importantes. Sous le logiciel SCAPS la structure d'une cellule a-Si:H [36], avec ses différentes couches est représentée dans la figure 3-2. En plus des contacts avant et arrière ; la cellule est formée par l'empilement de trois couches : couche fenêtre (type N), couche tampon (couche intrinsèque i) ainsi que la couche absorbante (type P).

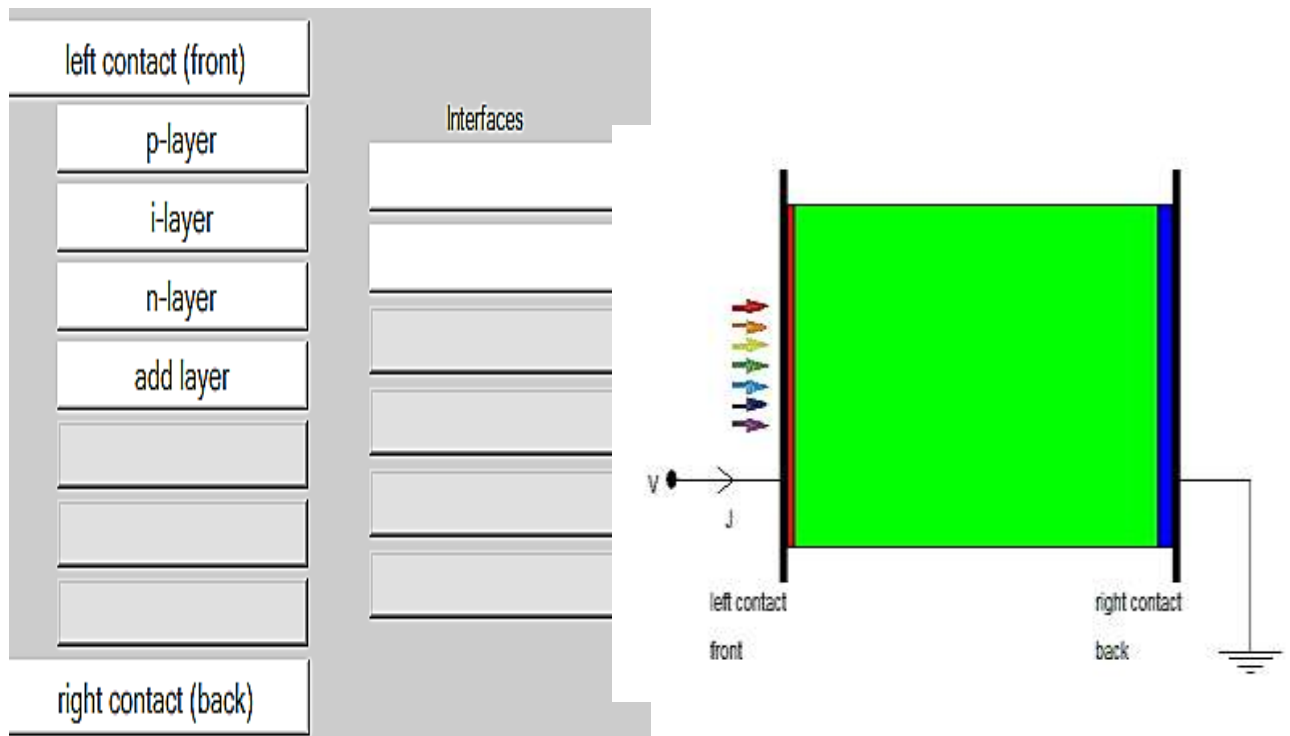


Figure 3-2 : Structure de la cellule a-Si: H.

3.3.2. La cellule CIGS

Dans sa structure la plus répandue, une cellule CIGS est formée d'un empilement de plusieurs matériaux en couches minces déposés successivement sur un substrat. la figure ci-dessous présente la structure de la cellule CIGS. La couche CdS est considérée comme une couche morte vu que le CdS dopé n'a presque pas de zone de charge d'espace ainsi que la durée de vie des porteurs est très limitée. L'oxyde ZnO assure la liaison électrique et l'OVC (Ordered Vacancy Compound) qui présente des épaisseurs différentes en fonction du temps dépôt. A partir de contact back (contact arrière) on a la couche CIGS après la couche OVC ensuite CdS et i-ZnO [37].

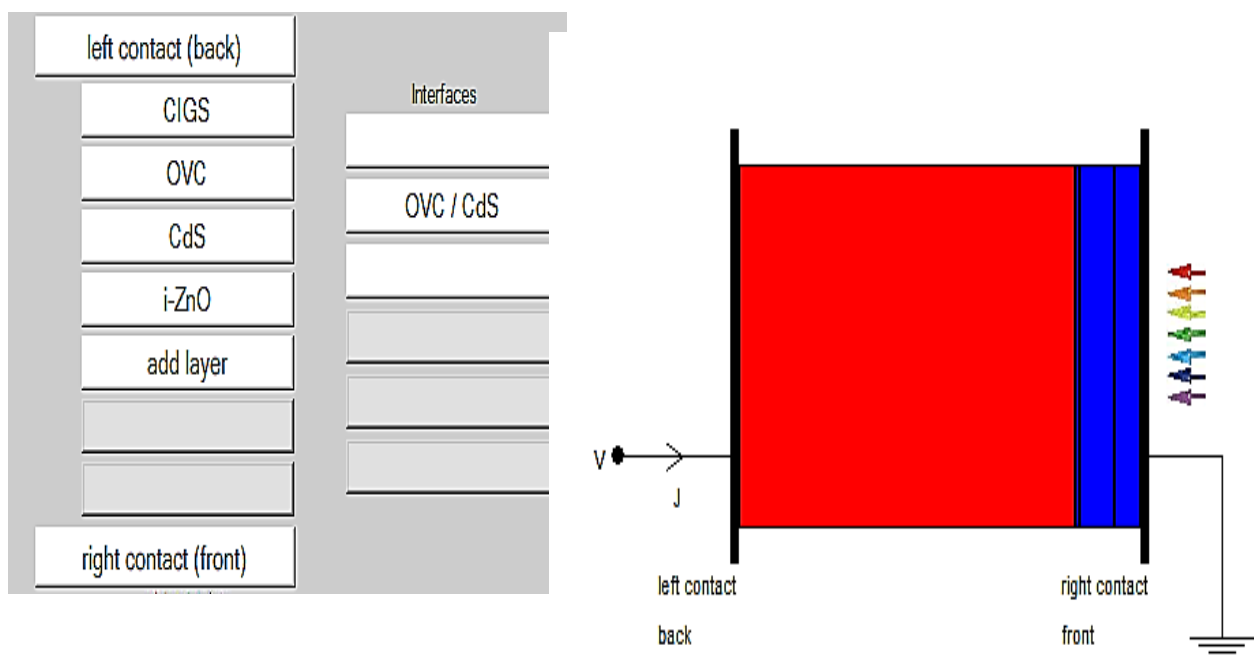


Figure 3-3: Structure de la cellule CIGS

3.3.3. La cellule CdTe.

Les cellules solaires au tellure de cadmium (CdTe) présente liés à la technologie en couches minces, elles sont légères et robustes. la tellure de cadmium est employé en tant qu'un semi-conducteur dopé p. un autre matériau est donc requis pour réaliser la jonction p-n, à savoir le sulfure de cadmium dopé n (C_{ds}) [38]. La couche de CdTe se comporte comme un contact de Schottky rectifiant, qui est polarisé en inverse lorsque la cellule solaire $C_{dS} / CdTe$ est biais direct. A partir du contact arrière on a la couche CdTe et ensuite la couche C_{ds} .

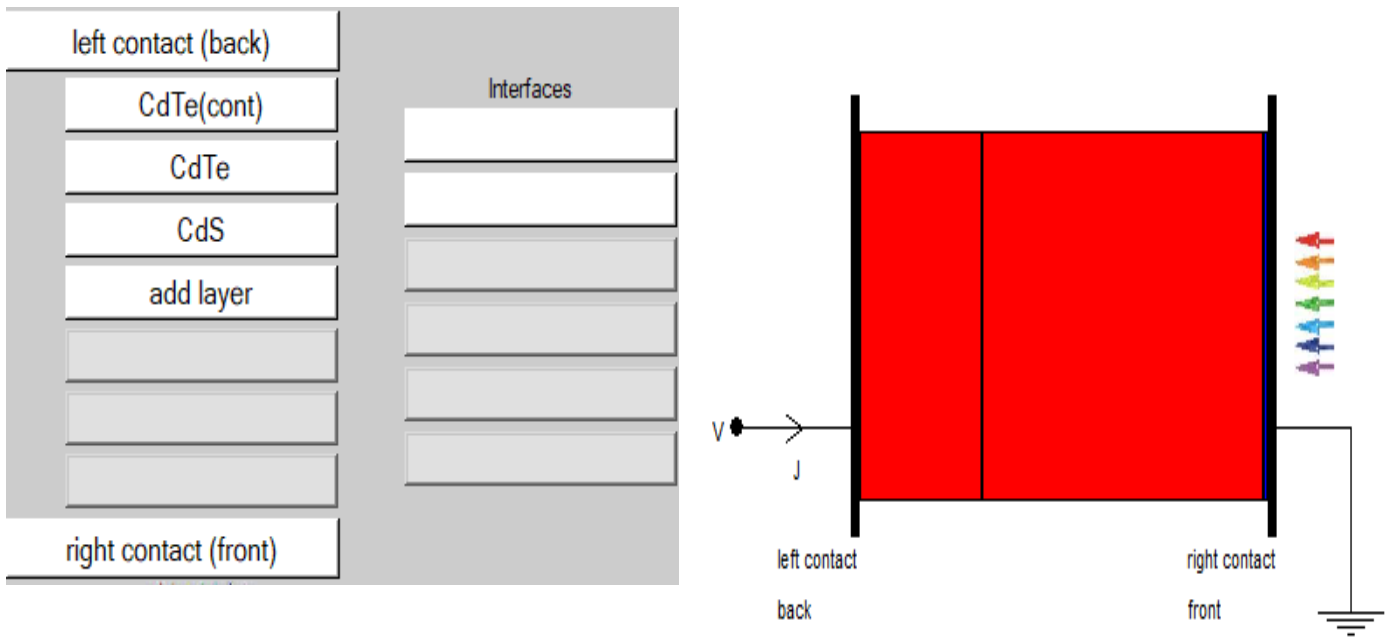


Figure 3- 4: Structure de la cellule CdTe

En cliquant sur le bouton « add layer », une fenêtre s’ouvre qui contient les différents paramètres du matériau à introduire. Ces paramètres peuvent avoir des distributions uniformes ou non uniformes, selon la physique du matériau.

LAYER 4		layer 4
thickness (µm)		2.000
The layer is pure A: y = 0, uniform		uniform pure A (y=0)
Semiconductor Property P of the pure material		pure A (y = 0)
bandgap (eV)		1.200
electron affinity (eV)		4.500
dielectric permittivity (relative)		10.000
CB effective density of states (1/cm ³)		1.000E+19
VB effective density of states (1/cm ³)		1.000E+19
electron thermal velocity (cm/s)		1.000E+7
hole thermal velocity (cm/s)		1.000E+7
electron mobility (cm ² /Vs)		5.000E+1
hole mobility (cm ² /Vs)		5.000E+1
<input type="checkbox"/> Allow Tunneling	effective mass of electrons	1.000E+0
	effective mass of holes	1.000E+0

Figure 3-5: Propriétés de la couche ajoutée.

3.4. Caractéristiques AC

Dans cette partie on va présenter les caractéristiques AC, des trois cellules étudiées, sous lumière et obscurité. Les principaux paramètres physiques et géométriques des cellules simulées sont regroupés dans le tableau 3-1.

Cellule	Epaisseur de la couche absorbante (nm)		Gap (eV)	Dopage	
	P	N		Na (cm ⁻³)	Nd (cm ⁻³)
a-si : H	9.00	0.20	1.8	1.000E+17	1.000E+6
CIGS	9.00	0.20	1.2	5.500E+16	1.000E+15
CdTe	9.00	0.20	1.45	2.000E+14	1.000E+6

Tableaux 3- 1: les paramètres géométriques et physiques.

3.4.1. Les Caractéristiques I (V)

Avant de présenter les caractéristiques C-V et C-f. on doit analyser les caractéristiques I(V), qui reste indispensable dans toute étude du fonctionnement des cellules solaires. Les caractéristiques obtenues sont donnés ci-dessous.

a. Sous obscurité

Les caractéristiques courant-tension enregistrées sous obscurité pour une tension de polarisation allant de -0.8 à 0.8V, sont similaires à la caractéristique d'une diode simple. La différence entre eux se trouve au niveau de la tension de seuil et le courant maximal débité par chaque cellule. Aussi, le rendement des trois cellules est nul.

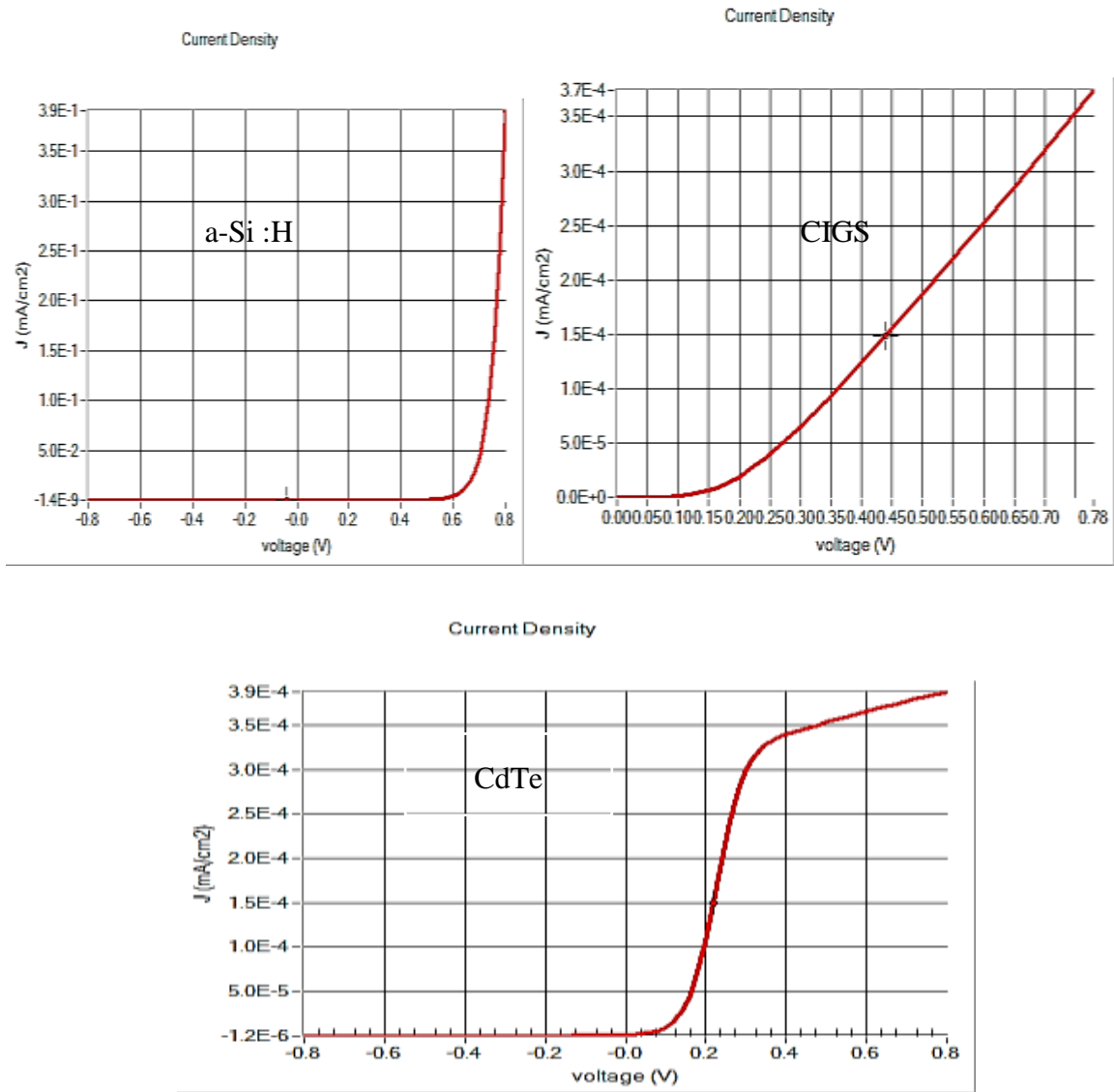


Figure 3- 6: Courant-tension des cellules dans l'obscurité.

a. Sous lumière

Sous l'effet d'un flux lumineux de AM1.5G ; la variation de la densité de courant en fonction de la tension de polarisation, pour les trois cellules étudiées, est présentée dans les figures ci-dessous. Les paramètres électriques tirés des courbes enregistrées, sont regroupés dans le tableau 3-2. D'après ce tableau le meilleur rendement est obtenu pour la cellule CIGS.

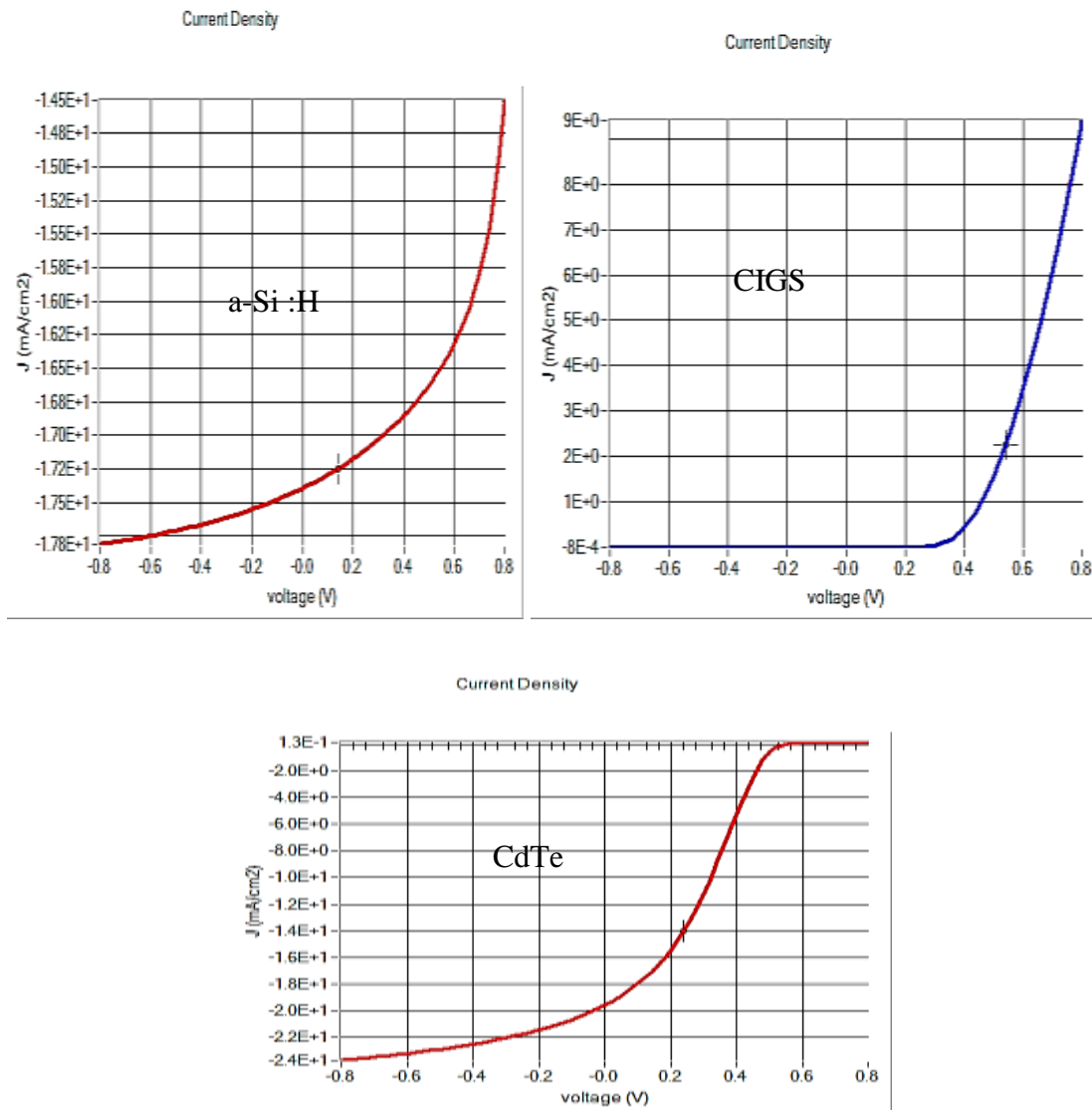


Figure 3-7: Caractéristiques courant-tension des cellules sous lumière.

Cellule	Vco(V)	Jsc(ma/cm)	FF (°/°)	η (°/°)
a-si : H	1.5515	17.394	43.05	11.62
CIGS	0.0492	311.054	9.73	0
CdTe	0.5557	19.611	31.56	3.44

Tableaux 3-2: Les caractéristiques électriques des cellules.

3.4.2. Caractéristique capacité fréquence

a. Sous obscurité

La mesure C-f nous renseigne sur la densité des défauts, peut-profonds et même profonds, dans une plage d'énergie particulière de la région d'interface. D'après la courbe de la figure 3-8. On constate une dispersion en fonction de la fréquence. Cette dispersion est forte dans le cas de cellule CdTe et elle est dû à la forte concentration des accepteurs. On voit que les courbes sont différents dans chaque, pour la cellule a-si :H la courbe est dispersée et CIGS est encore plus dispersée par contre pour la cellule CdTe la courbe se présente sous forme d'oscillation.

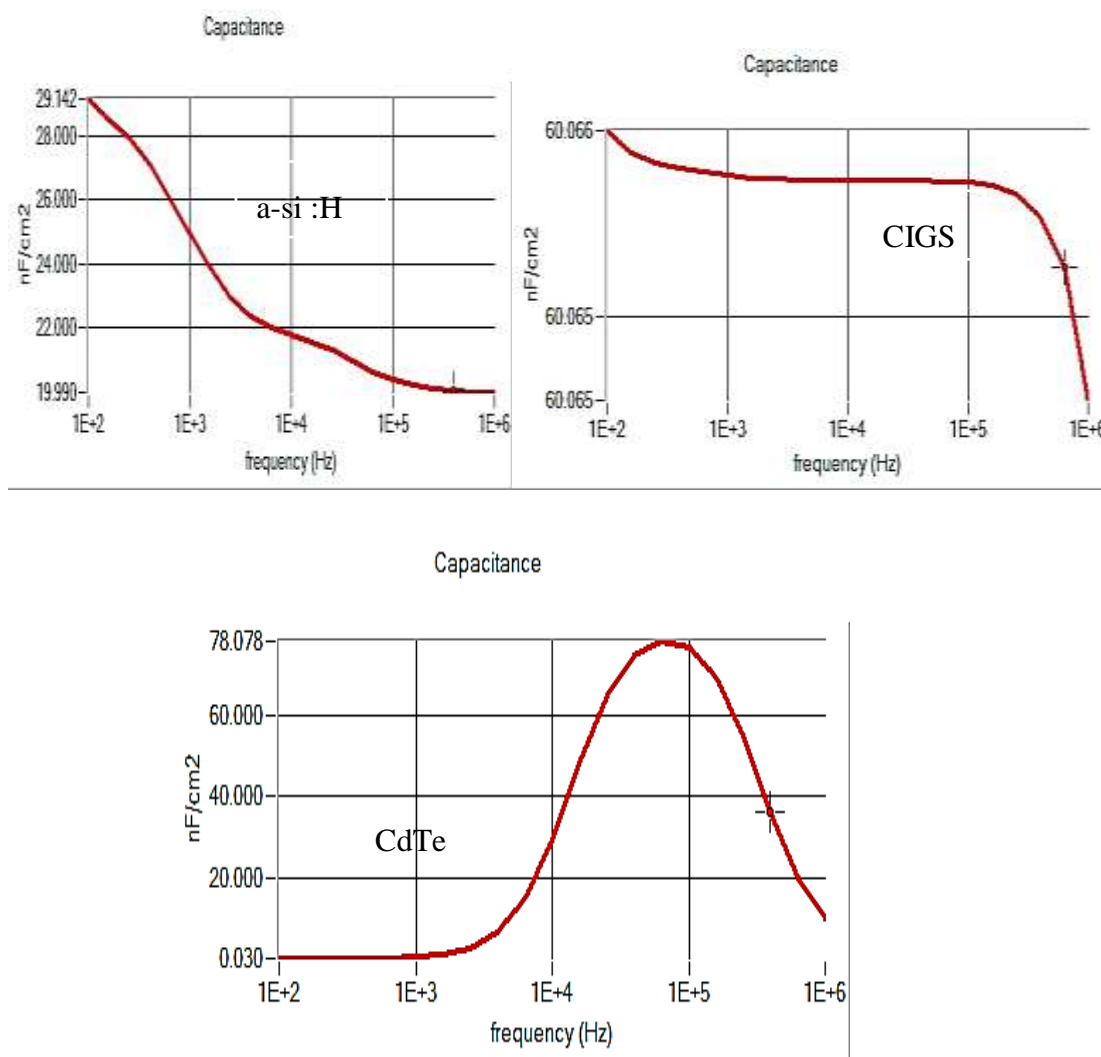


Figure 3- 8: Capacité-fréquence des trois cellules dans l'obscurité.

b. Sous lumière

Sous l'effet de la lumière, et pour les trois types de cellules, la caractéristique capacité-fréquence, la dispersion devient plus importante que sous obscurité. Ceci est expliqué par l'activation de plus des centres de défauts au niveau de l'interface. La plus grande valeur de la capacité est obtenue pour la cellule a-si : H par contre dans la cellule CIGS on obtient une

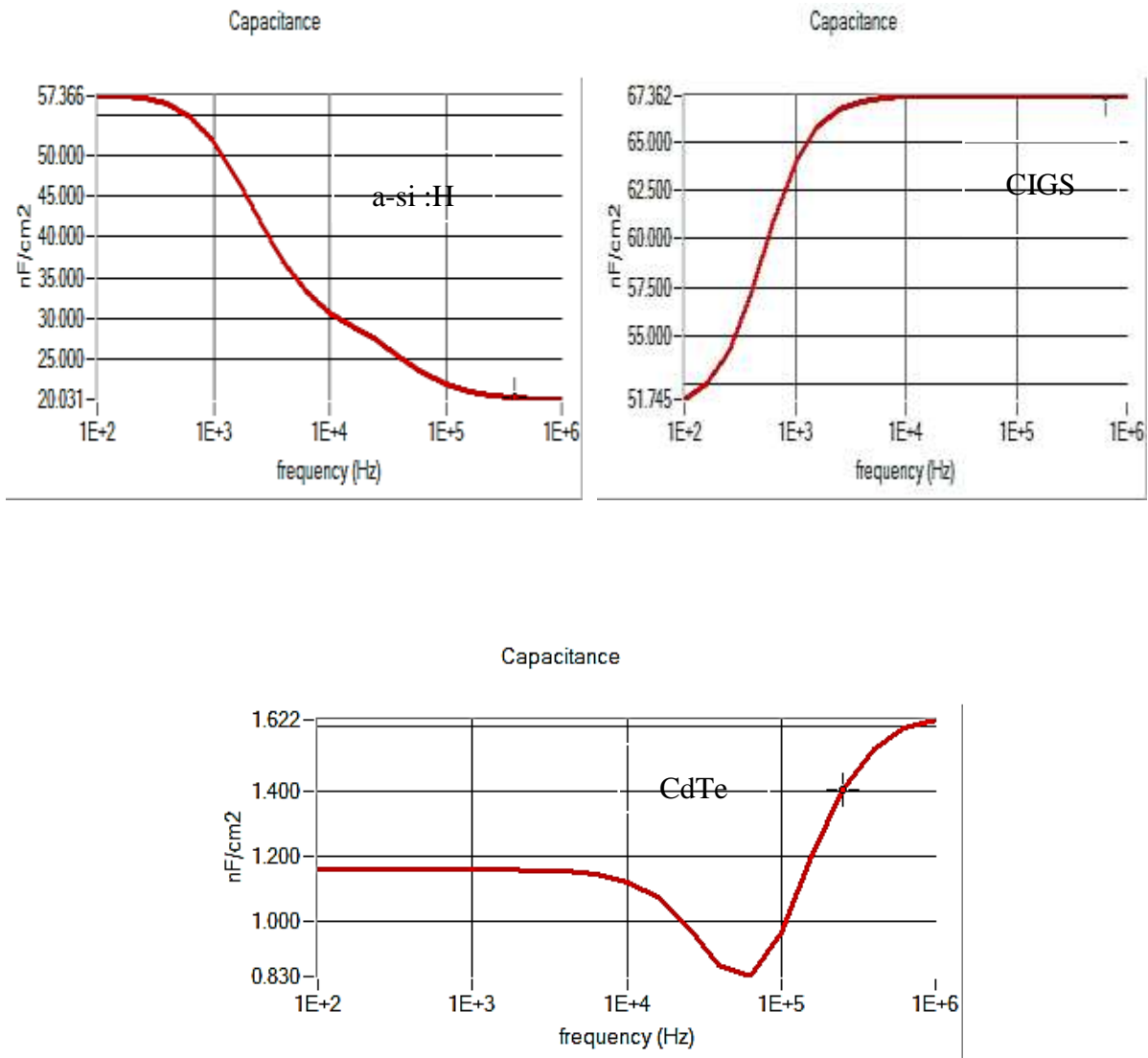


Figure 3-9: Capacité-fréquence dans la lumière.

3.4.3. Caractéristiques capacité-tension

a. Sous obscurité

Ces courbes sont obtenues en fonction de la capacité et de la tension en variant entre -0.8 et 0.8v pour la cellule a-si :H on obtient une courbe semblable à celle d'une normal mais dans le cas de la cellule CIGS on obtient une droite linéaire pour la cellule CdTe une courbe décroissant et qui croit à partir de 0.20v. Ces trois courbes sont obtenues dans les mêmes caractéristiques. La capacité est plus grande dans cellule CIGS par rapport aux deux autres cellules.

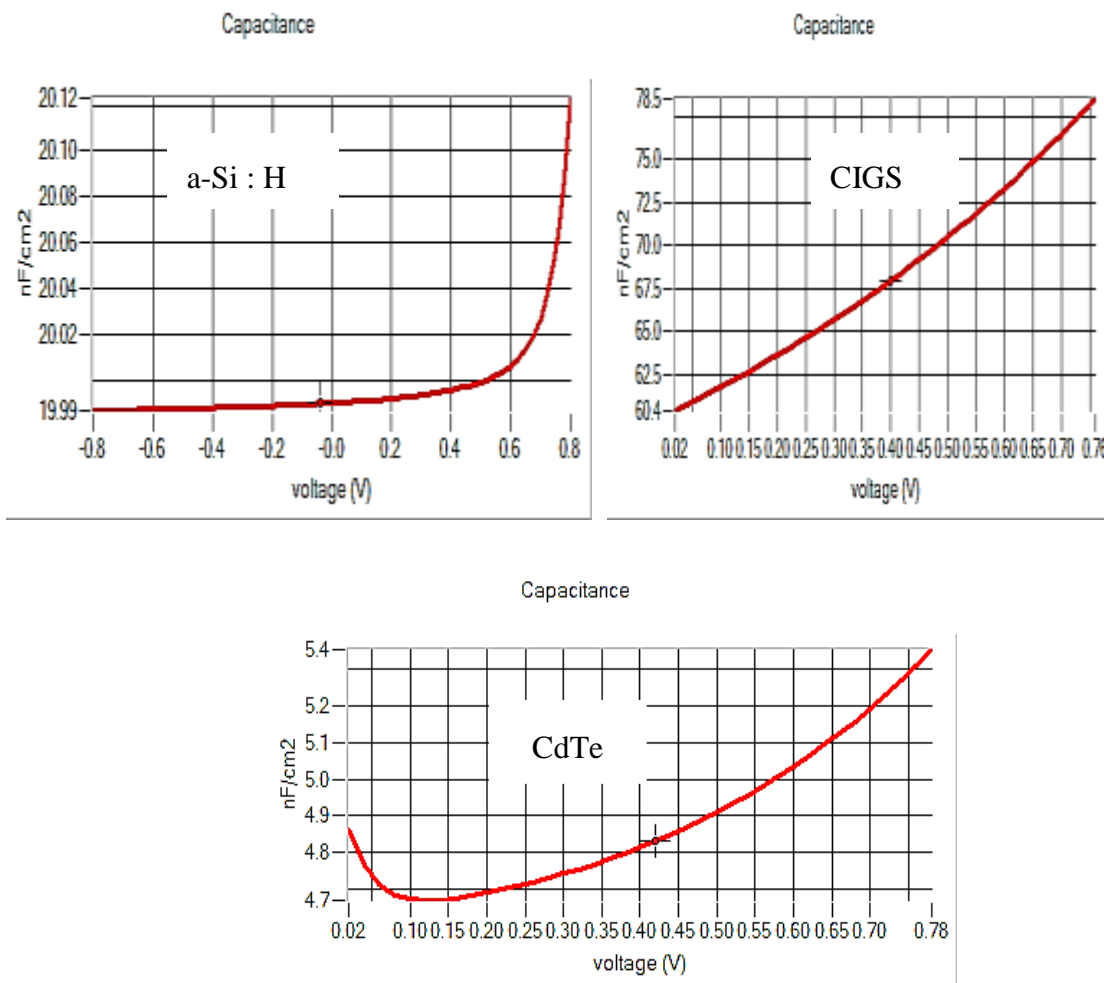


Figure 3-10: Capacité-tension des cellules.

b. Sous lumière

Sous lumière on a constaté que l'évolution des caractéristiques C-V sont presque pareils que celles obtenues dans l'obscurité avec une augmentation de la valeur de la capacité. Cette augmentation du aux charges piégées dans la zone de charge d'espace.

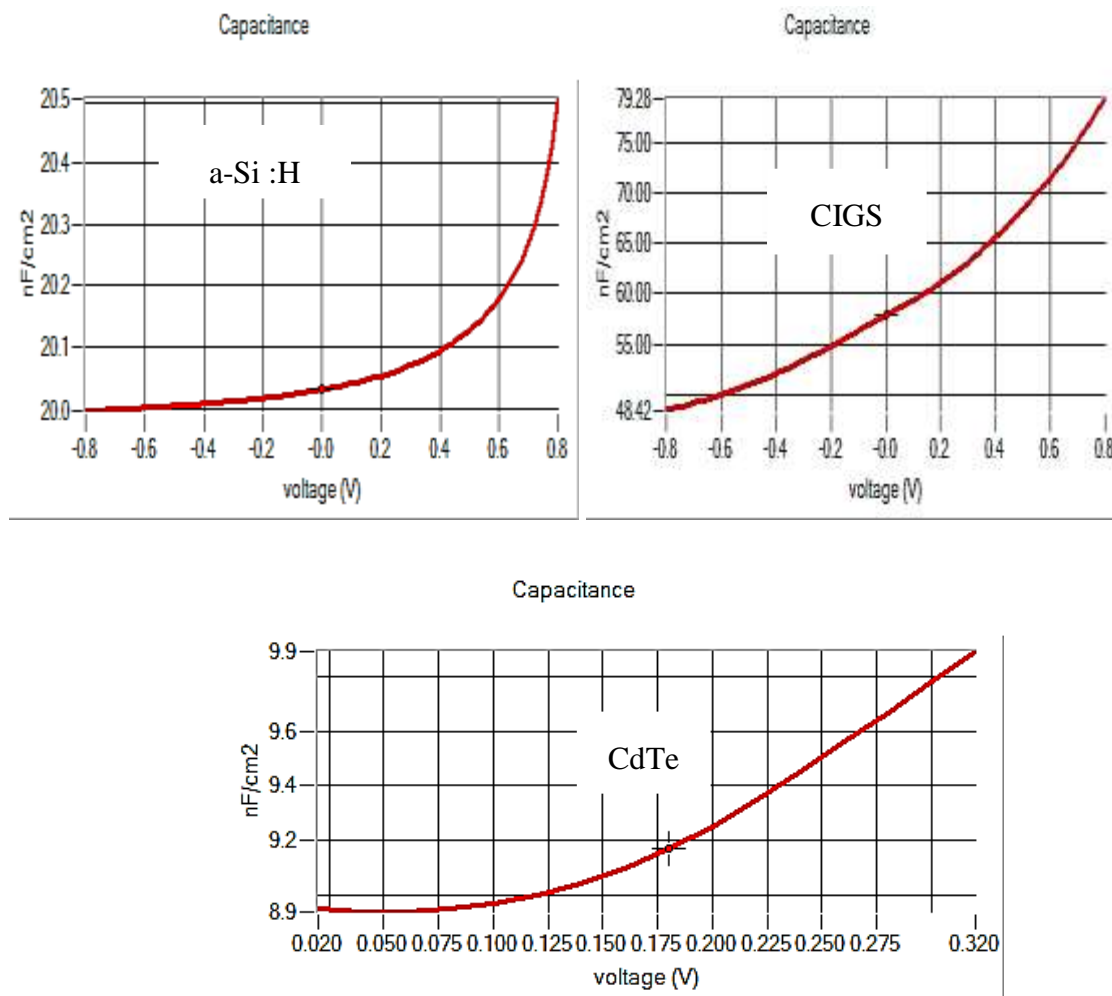


Figure 3-11: Capacité-tension des cellules.

3.4.4. La spectroscopie d'admittance

La spectroscopie d'admittance permet de déterminer le taux d'émission thermique des porteurs de charge pour les états de défauts. Les mesures de capacité –tension (C-V) sont utiles pour l'obtention d'une concentration de défaut. Les états de défauts peuvent être étudiés en mesurant la fréquence de l'admittance complexe de la jonction. La tension alternative avec la fréquence $f = \omega/2\pi$ est appliquée à l'hétérojonction ou au contact Schottky [39].

Les défauts prisent en considérations sont : amphoétriques, donneur et accepteurs

a. Sous obscurité

D’après la figure3-12, dans le cas des cellules a-Si: H et CdTe ; on remarque que les concentrations des défauts ayant des énergies entre 0.1 à 0.3 (eV) sont plus majoritaires que les défauts avec une énergie plus grande. Pour la cellule CIGS on obtient une courbe décroissant dans l’obscurité et la concentration des défauts est faible que les autres cellules.

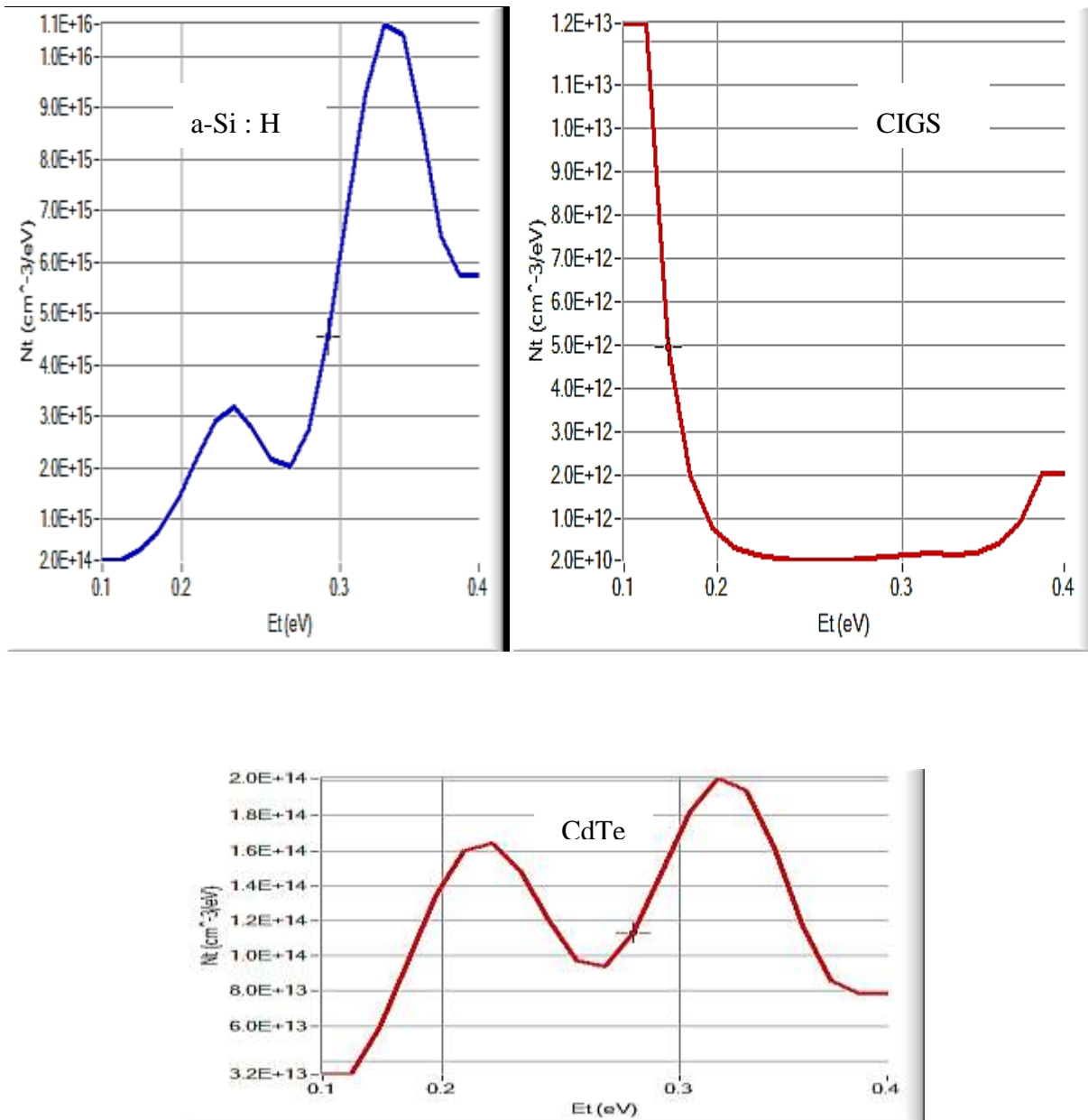


Figure 3-12 : Evolution de la concentration des défauts en fonction de leurs énergies dans l’obscurité.

b. Sous lumière

Avec la spectroscopie d'admittance on peut suivre la concentration des défauts en fonction de leurs niveaux d'énergies dans chaque cellule. **Les courbes** ci-dessous donnent l'évolution de la concentration des défauts en fonction de leurs énergies variant entre 0.1 et 0.4 (eV), sous un flux lumineux AM1.5G à la température ambiante. Par rapport à l'obscurité l'activation des défauts augmentent et par la suite leurs concentrations augmentent pour les trois cellules.

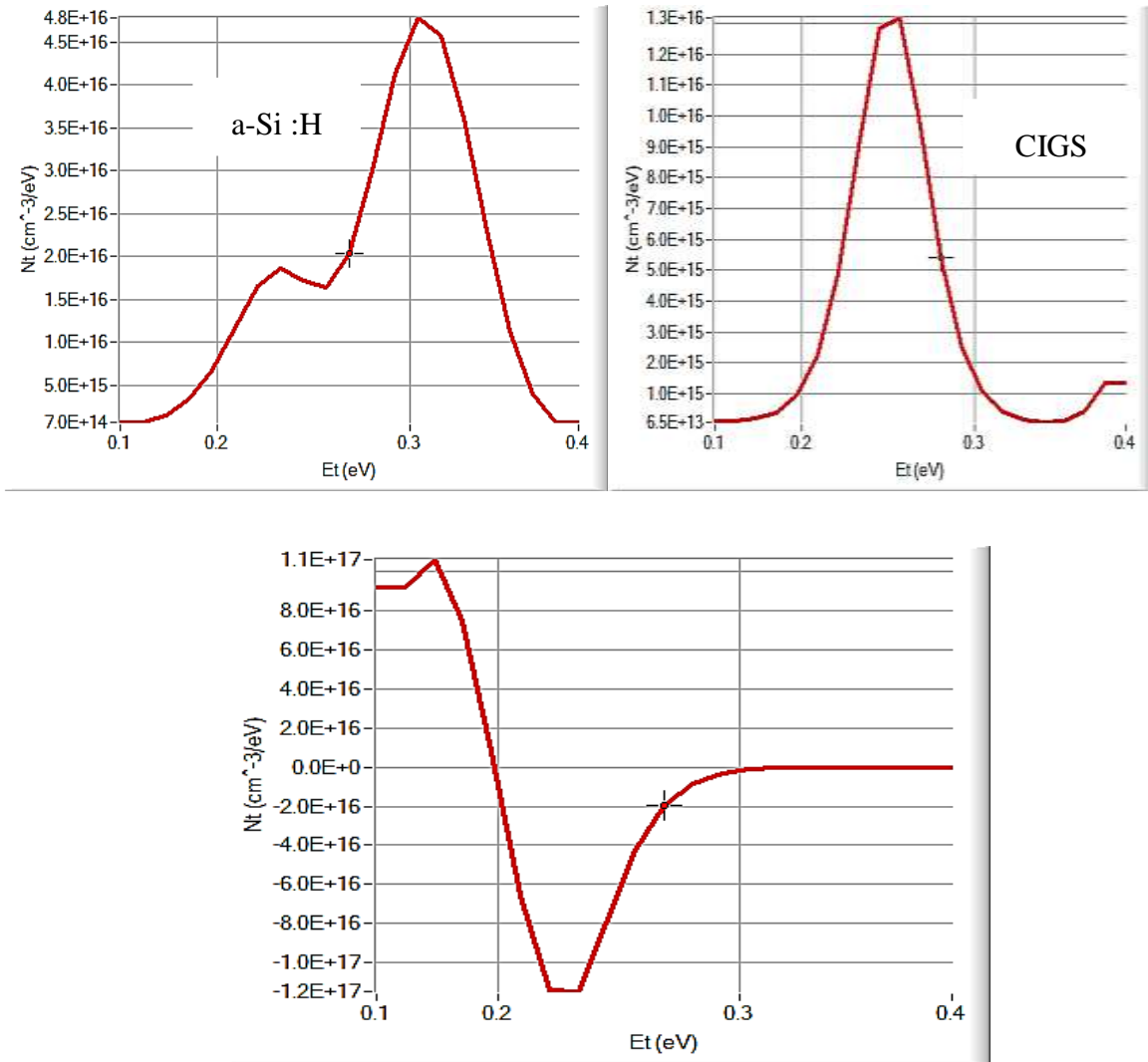


Figure 3-1: Evolution de la concentration des défauts en fonction de leurs énergies sous lumière.

3.4.5. L'effet du dopage

Les cellules solaires comme tous composants électroniques sont basées sur la jonction PN. Il est donc important d'avoir de bons dopages (type N et P) afin d'obtenir des dispositifs efficaces [40]. L'effet du dopage de la couche absorbante est considéré dans cette partie, tout en comparant les caractéristiques électriques obtenues. Le tableau 3-3 rassemble les valeurs obtenues pour V_{co} , J_{sc} , FF, η lors de la variation du dopage de la couche absorbante.

D'après les caractéristiques on constate une amélioration du rendement dans la cellule a-si :H et CIGS mais pour la cellule CdTe on remarque une chute du rendement, courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert, facteur de forme dans tous les trois cellules

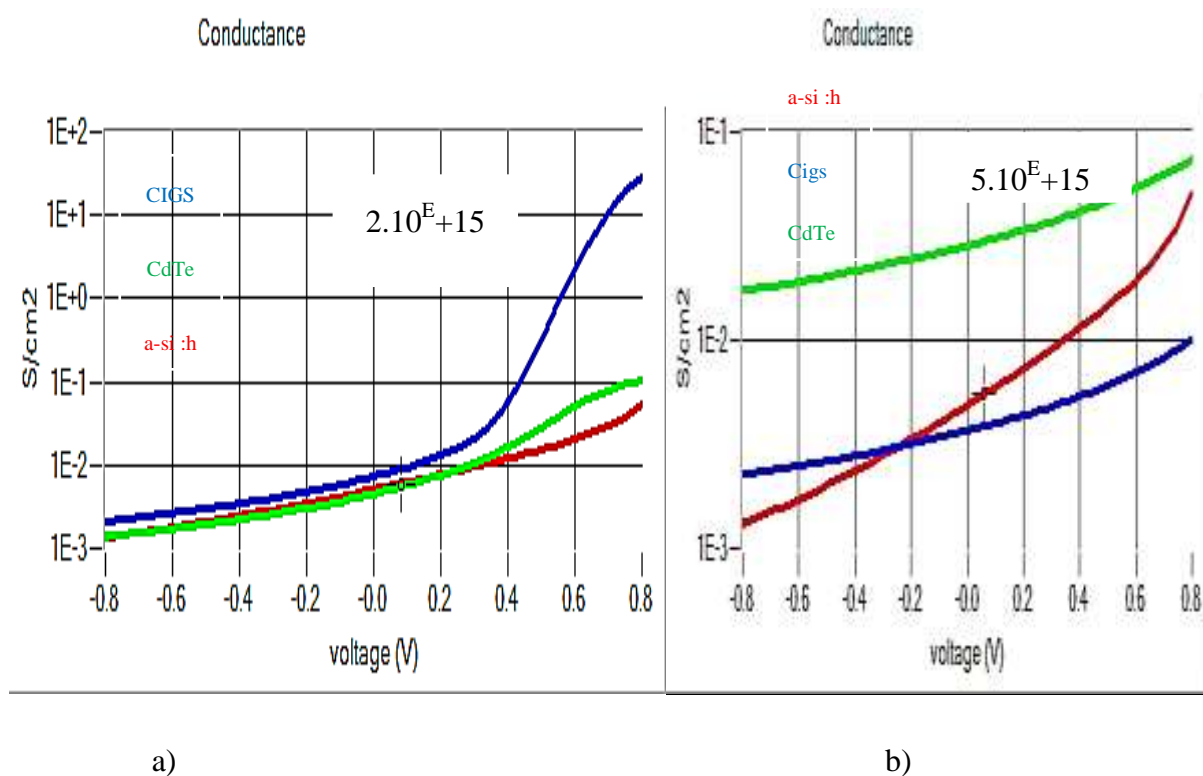
Types	Dopage		$V_{co}(v)$	$J_{sc} (ma/cm)$	FF(°/°)	$\eta (°/°)$
	Na (cm^{-3})	Nd (cm^{-3})				
a-si :H	$2.000E+^{17}$	$1.000E+^{16}$	1.4897	17.309963	44.02	11.35
	$2.000E+^{15}$	$1.000E+^{16}$	1.5137	17.33507	43.60	11.44
	$5.00E+^{15}$	$1.000E+^{16}$	1.539	17.373	43.22	11.56
	$3.000E+^{16}$	$1.000E+^{16}$	1.558	17.402	49.95	11.65
CIGS	$2.000E+^{17}$	$1.000E+^{16}$	0.5250	31.081034	60.88	9.93
	$5.000E+^{15}$	$1.000E+^{16}$	0.554	31.718	61.78	10.86
	$3.000E+^{15}$	$1.000E+^{16}$	0.6923	28.948	54.55	10.93
	$2.00E+^{17}$	$1.000E+^{16}$	0.762	23.05	69.82	11.06
CdTe	$2.000E+^{17}$	$1.000E+^{16}$	0.7539	21.89909	47.87	7.90
	$5.000E+^{15}$	$1.000E+^{16}$	0.754	21.92	47.88	7.95
	$3.000E+^{15}$	$1.000E+^{16}$	0.753	21.950	48.97	8.12
	$2.000E+^{16}$	$1.000E+^{16}$	0.754	22	49.20	8.17

Tableaux 3- 3 : Effet du dopage sur les caractéristiques électriques des cellules.

3.4.6. Caractéristiques conductance tension

Un paramètre important qui peut affecter les caractéristiques d'une cellule est la concentration des dopants. Pour cela on va évaluer l'effet du dopage en faisant varier la concentration des accepteurs au niveau de la couche absorbante. L'influence du dopage sur la caractéristique C-V, pour les différentes cellules étudiées, sont exposées dans les figures ci-dessous.

Le minimum de ces courbes est typiquement interprété comme la concentration de dopage superficielle, et la tendance croissante à de plus grandes profondeurs est due à la présence d'une concentration de défauts profonds beaucoup plus élevée que la concentration de dopage peu profonde. D'après les analyses de dopage sur la couche absorbante et en utilisant les mêmes caractéristiques dans les trois cellules sur un intervalle -0.8 à 0.8 V dans la figure a, b, on constate que la caractéristique de CIGS a une courbe croissante, et celle de a-si :H et CdTe un peu croissant ensuite une grande amélioration dans les caractéristiques CdTe et le a-si :H par contre celle de CIGS chute dans la figure b, Pour les figures c, d, la caractéristique de CdTe reste constante et une légère amélioration de celle de CIGS et le a-si :H. Suite aux résultats obtenus on remarque que le dopage de la conductance en fonction de la tension entraîne une chute de cette dernière.



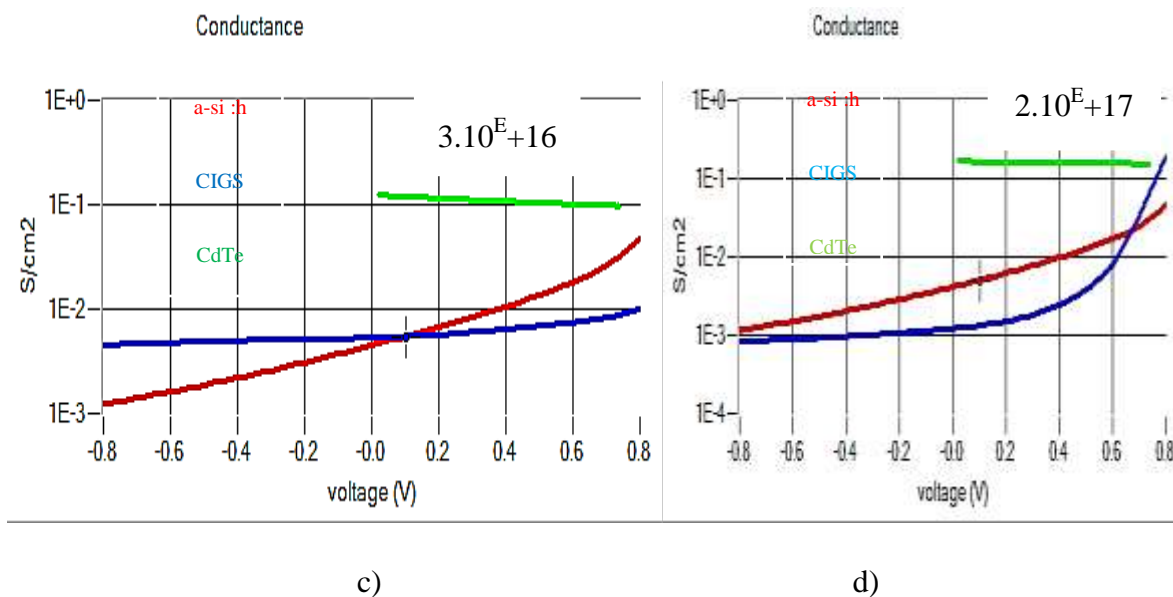
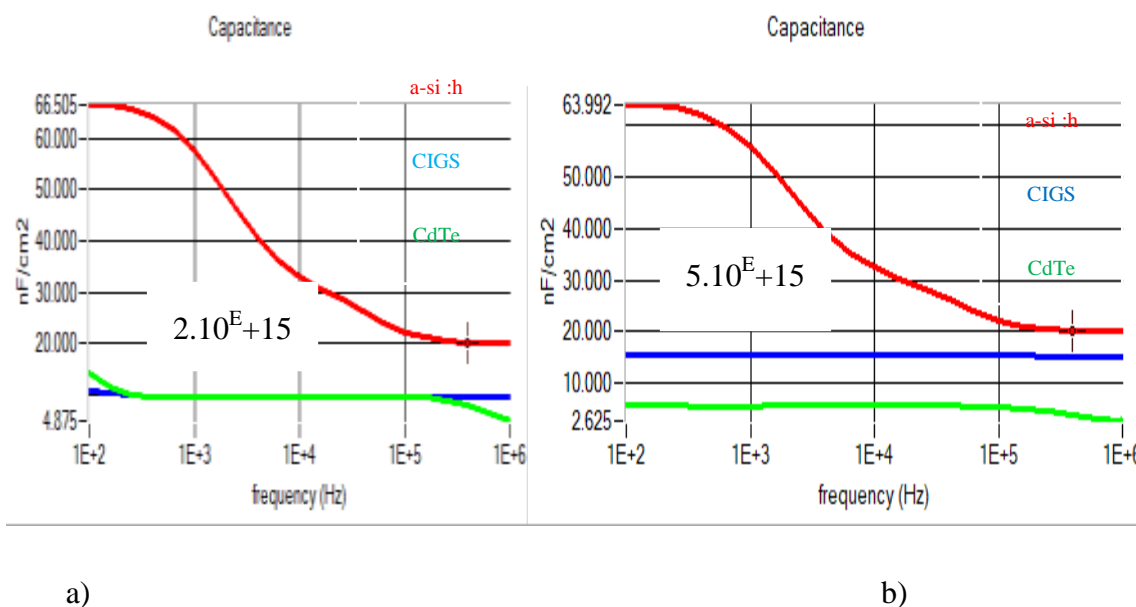


Figure 3- 2 : L'effet du dopage sur la conductance –tension.

3.4.7. Capacité-fréquence C-F

L'effet du dopage de la couche absorbante (Na) des trois cellules sur la caractéristique capacité-fréquence est illustré dans les figures ci-dessous. Après simulation on note que dans la figure a, b la cellule a-si:H a une courbe dispersée, Pour les caractéristiques de CIGS et CdTe reste constantes et s'améliore dans la figure b, pour la figure c, d on remarque une grande amélioration dans les caractéristiques de CIGS et de CdTe qui obtient une courbe croissante et celle d' a-si :H qui diminue toujours, avec l'augmentation du dopage. Donc la plus grande valeur de la capacité est égale 81.90 (nF/cm²) d'après ces résultats obtenus dans les différents dopages on peut dire que la caractéristique capacité-fréquence entraîne l'augmentation de cette dernière.



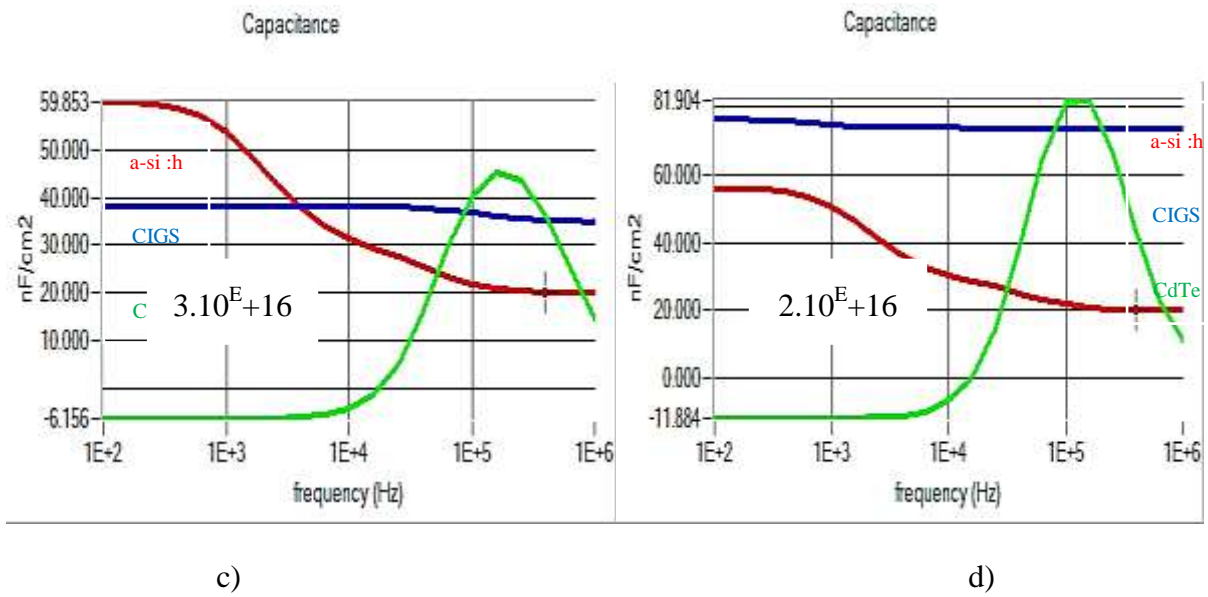
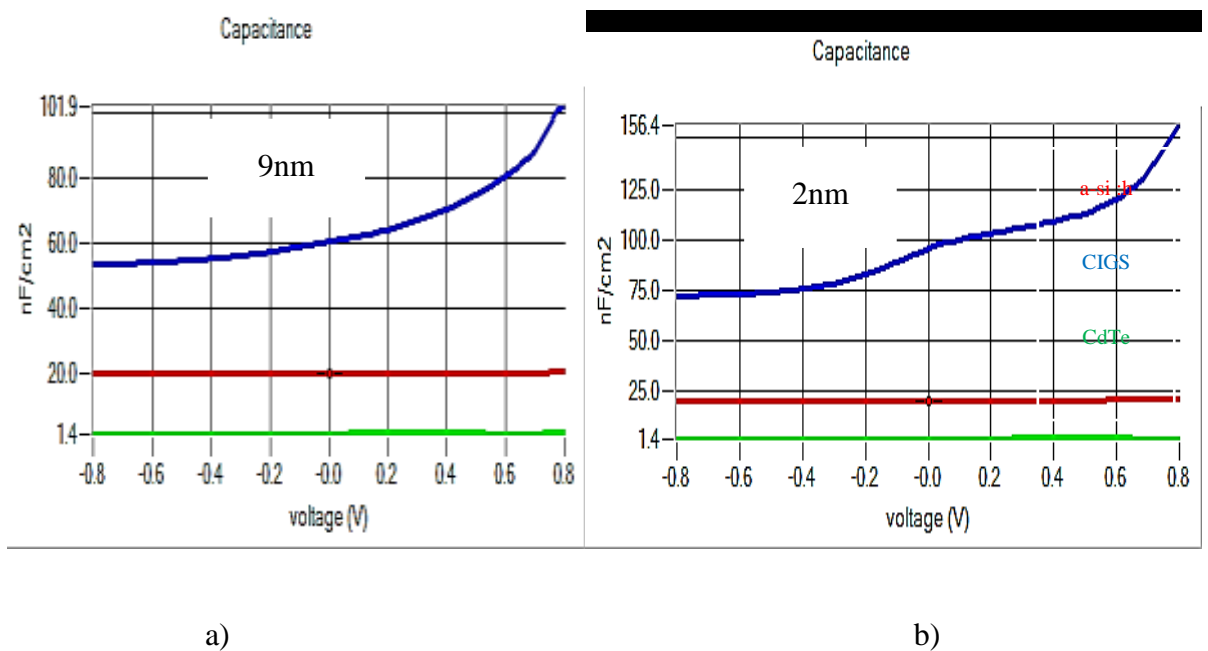
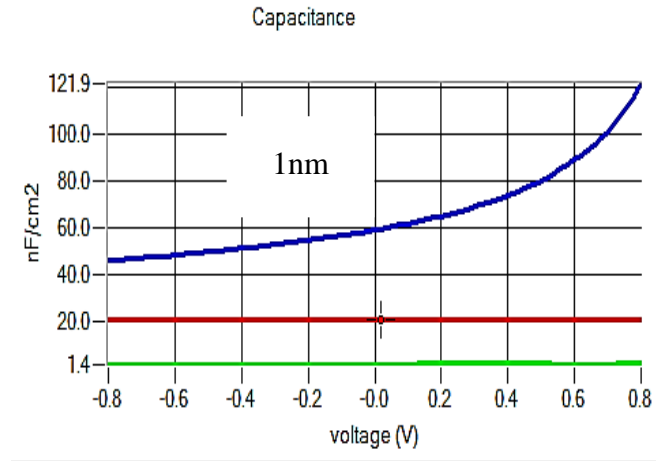


Figure 3-15 : Effet de dopage sur la capacité-fréquence.

3.4.8. L'effet de l'épaisseur

Dans cette partie nous allons présenter les résultats de simulation de l'effet de variation de l'épaisseur de la couche absorbante. On constate que dans la figure a, b obtenu sur les caractéristiques des cellules CdTe et a-si :H reste constante alors que le CIGS subit une légère amélioration, pour la figure c, d on remarque une augmentation des cellules a-si :H , CIGS et le CdTe reste constante et même pour la figure c, cette fois ci même le CIGS et le a-si :H ont diminué. Donc plus l'épaisseur est grand et plus il y a moins d'effet sur les cellules.



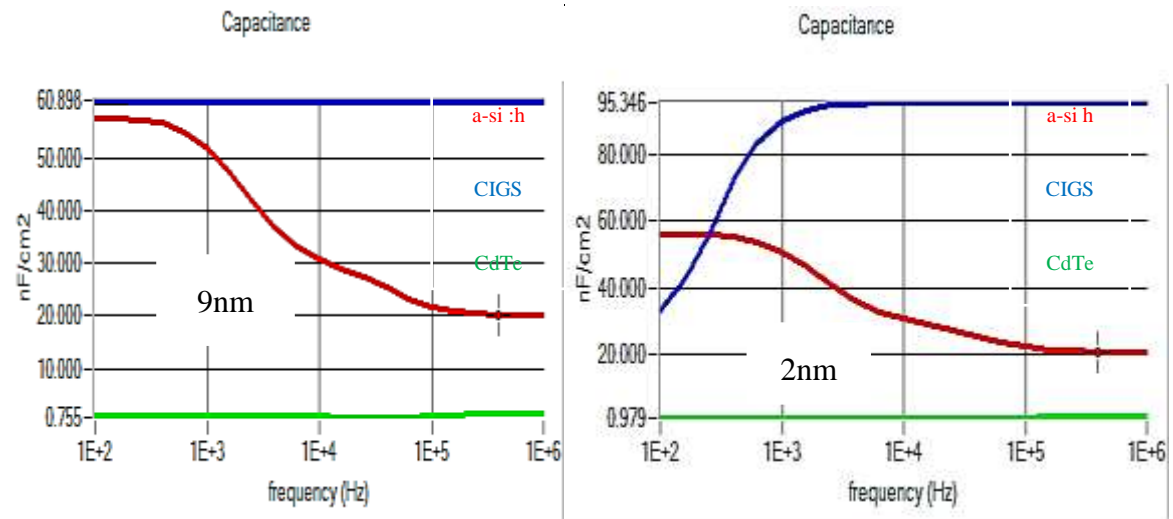


c)

Figure 3- 16: Effet de l'épaisseur sur capacité-tension.

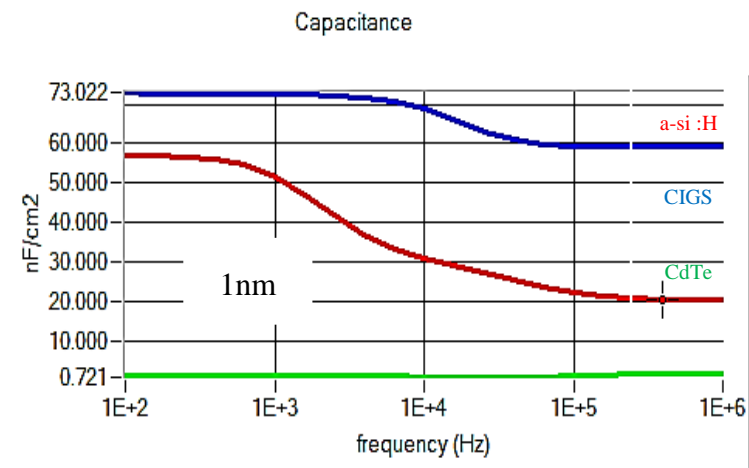
3.4.9. Caractéristiques-fréquence

L'effet de l'épaisseur sur ces cellules on note dans la cellule a-si : H une courbe dispersée et le CIGS constante et CdTe mais pour la figure a, b, le a-si :H une courbe légèrement dispersée avec une capacité plus grande de 95.346 (nF/cm²) et le CIGS une décroissant et une chute de CdTe mais dans la figures c, le a-si :H et le CIGS ont une légèrement dispersée et le CdTe continu de chuter.



a)

b)



c)

Figure 3- 17: Effet de l'épaisseur sur la Capacité-fréquence

3.5. La température

Dans les applications terrestres, la cellule solaire est exposée à des températures variant de 25°C à 300 °K. Par conséquent, pour étudier l'effet potentiel de la température sur les performances des cellules solaires, les paramètres AC (capacité et conductance de la cellule), [41] des cellules a-Si:H, CIGS et CdTe, sont déterminés à différentes températures. Les essais sont effectués sous un flux lumineux de 1.5G et à des températures variantes.

Lorsque la cellule solaire fonctionne dans des conditions extérieures, la variation de la température pour une tension de fonctionnement donnée modifie les conditions de fonctionnement de la cellule (tension et courant) et par conséquent ses paramètres.

3.5.1. Caractéristiques capacité-tension

Un des intérêts potentiels de la capacité effective est sa capacité à générer un modèle de cellule dynamique. Ce modèle montre l'effet de la température effectué sous éclairage avec différentes températures. On note que dans figure a, b le CIGS a une courbe décroissant et la caractéristique a-si:H et CdTe reste constante ; mais pour la figure b, une légère diminution de la caractéristique de CIGS. Par contre dans la figure c, la caractéristique CdTe augmente de 1.4 à 1.5 (nF/cm²). Suites aux résultats obtenus on note que l'augmentation de la température entraîne la chute de la capacité.

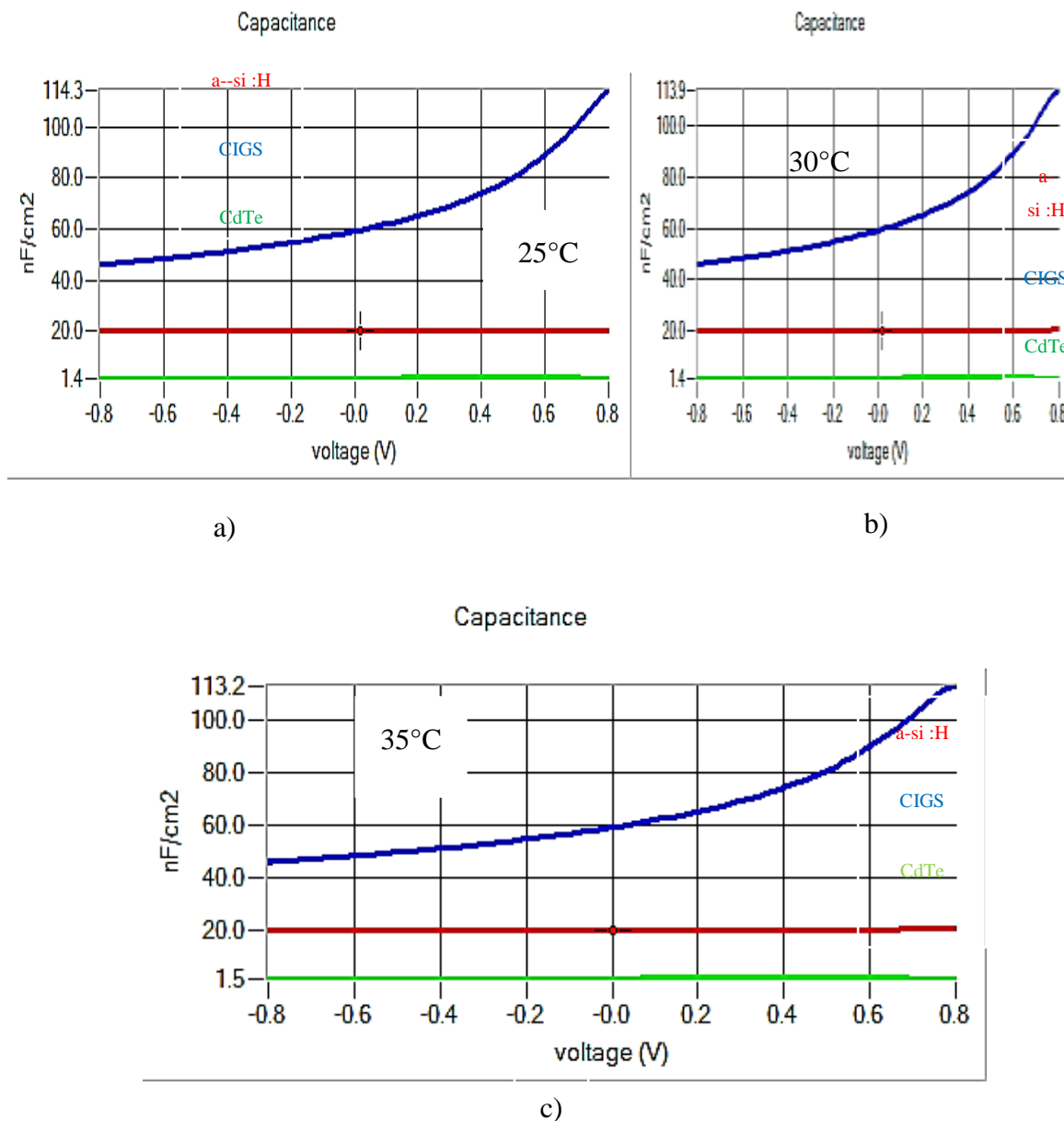
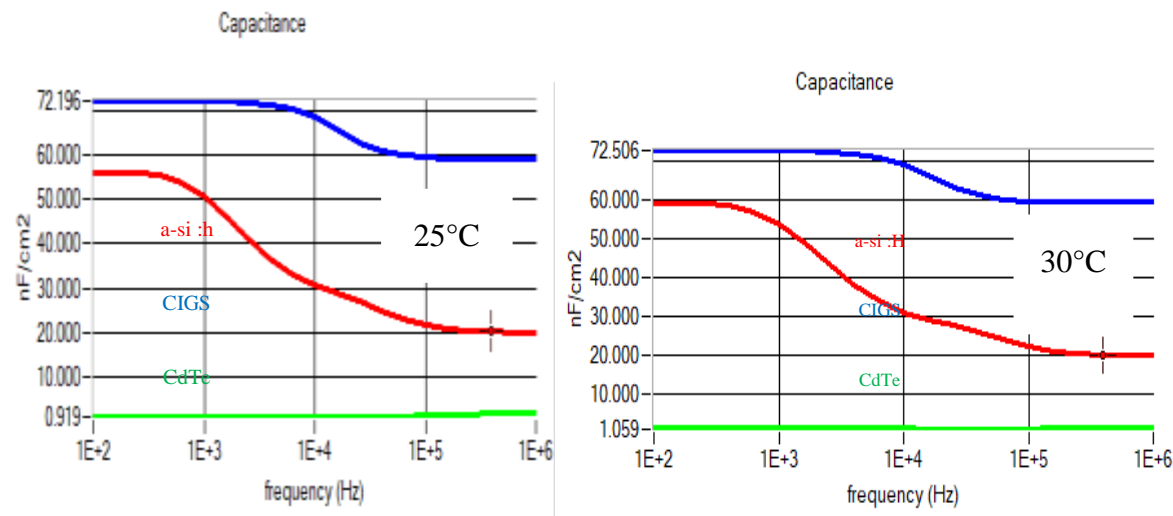


Figure 3-18 : Effet de la température sur la capacité-tension.

3.5.2. Caractéristiques capacité-fréquence

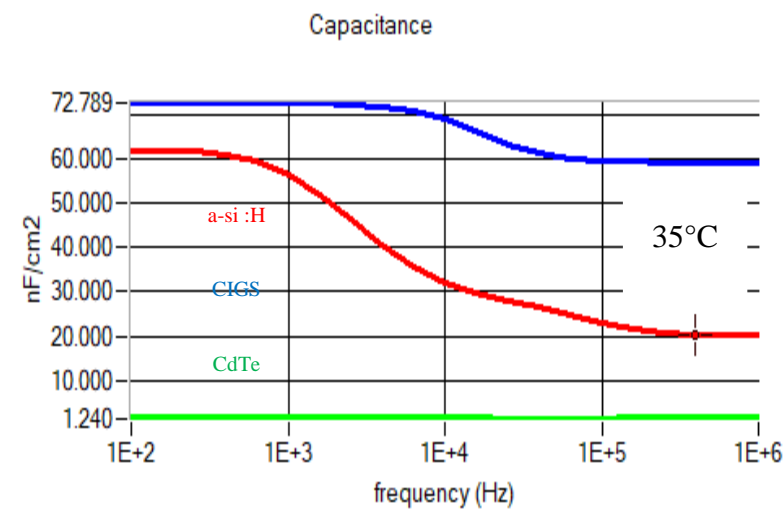
Mesure de la capacité des cellules en fonction de fréquence (courbes C - f) montrent des dispersions de fréquence, qui augmente avec l'augmentation de degré de traitement des cellules variant sur un intervalle de 1^e2 MHz à un 1^E6 MHz. D'après ces résultats obtenus sur l'effet de variation des différentes températures dans les figures a, b et c on remarque dans les caractéristiques d'a-si : H et de CIGS une courbe dispersée qui s'améliore quand la température augmentation et le CdTe reste constante tout en augmentant aussi. Suites aux résultats on remarque une amélioration des caractéristiques de ses cellules donc on peut dire

que pour la capacité en fonction de la fréquence on constate une augmentation de cette dernière.



a)

b)



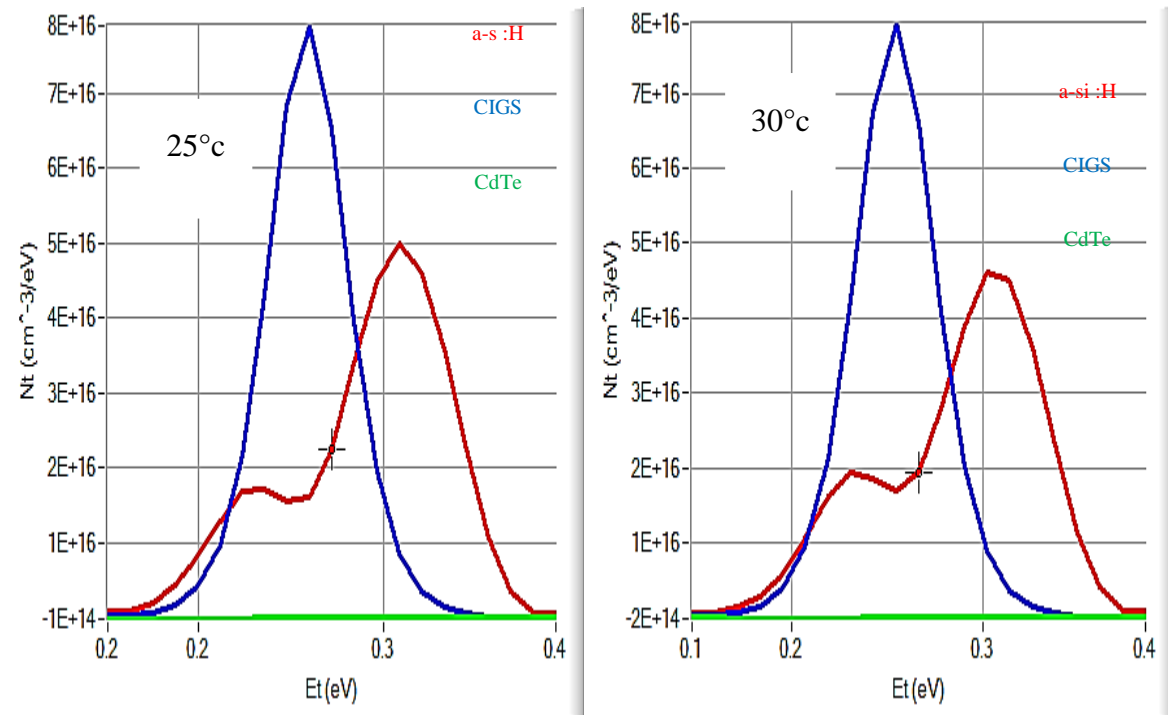
c)

Figure 3-19 : Effet de la température sur capacité-fréquence

3.5.3. La spectroscopie d'admittance

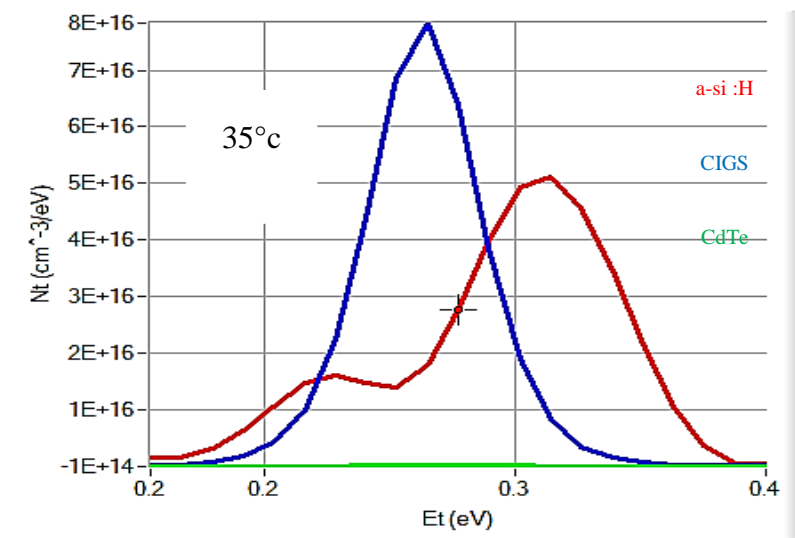
L'effet de la température sur la spectroscopie d'admittance nous permet d'obtenir les résultats ci-dessous. Ces courbes montrent la variation de la température sur la spectroscopie d'admittance dans les figures a, b, c on obtient les mêmes caractéristiques juste au niveau de caractéristique de a-si :H. on remarque une légère diminution et aussi au niveau de 2^E+16 au

lié de -10^{16} (cm⁻³/eV) d'après ces résultats on remarque une légère amélioration juste dans la cellule a-si : H donc on peut dire que la Température n'a pas de grande effet sur la spectroscopie d'admittance.



b)

b)



c)

Figure 3-20 : Effet de la température sur la spectroscopie d'admittance

3.5.4. L'effet du spectre lumineux

La lumière solaire est composée de toutes sortes de rayonnements, de couleurs différentes, caractérisées par différentes longueurs d'onde. Des photons; grains de lumière composent ce rayonnement. La fréquence de la lumière détermine sa couleur. [42].

La courbe de réponse spectrale indique une photo courant plus important vers les courtes longueurs d'onde que les diodes p- n+ classiques. , dans la figure a, la caractéristique de a-si : H et le CdTe reste constante mais la caractéristique de CIGS augmente par contre la figure b, on constate que la caractéristique de la cellule CIGS diminue à 150.1 (nF /cm²) mais celle de a-si : H et de CIGS reste toujours constantes, Mais dans la figure c, la caractéristique de a-si :H augmente de 20.0 à 20.38(nF/cm²) et celle de CdTe chute de 1.4 à 0.98(nF/cm²), et pour la CIGS reste constante.

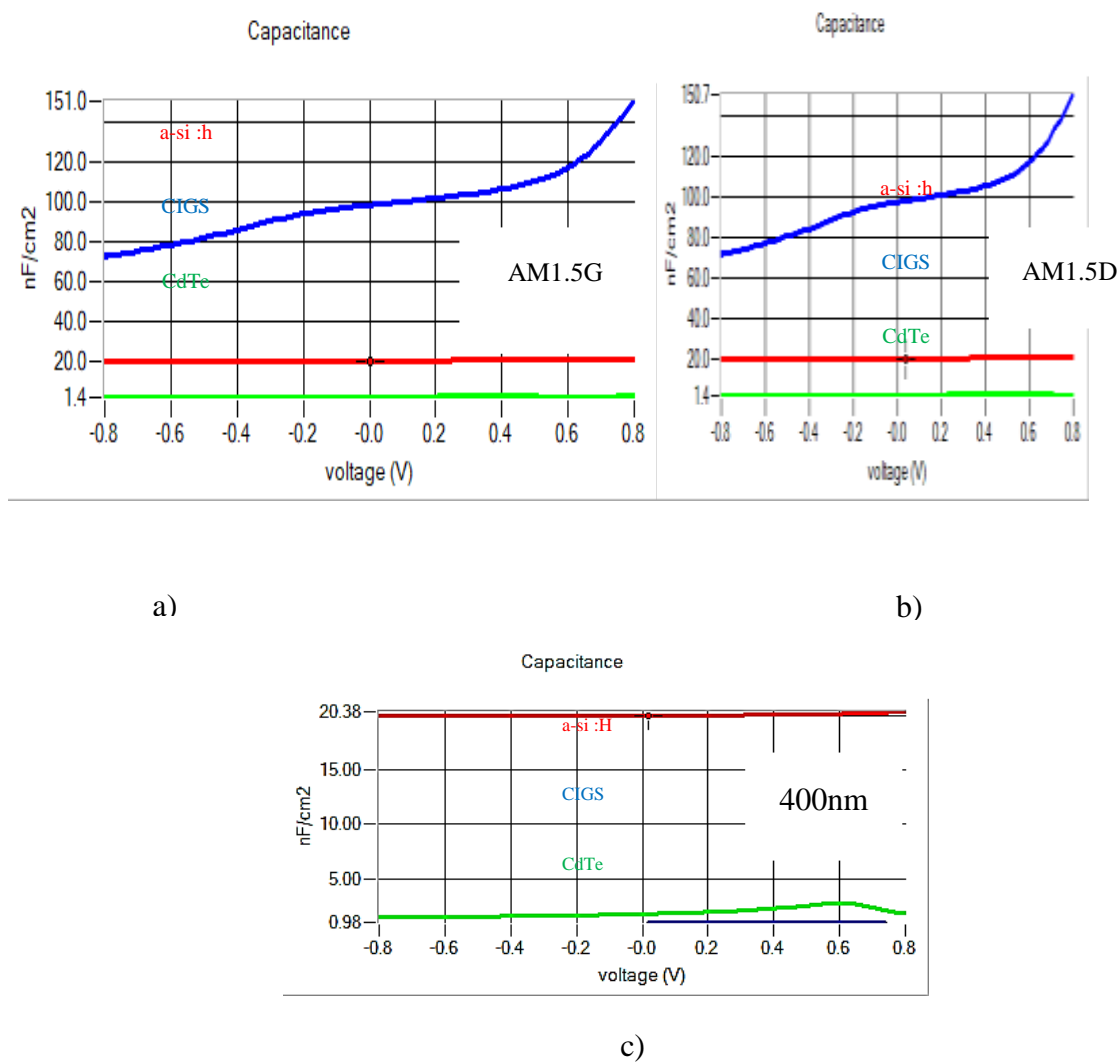


Figure 3-21: Effet du spectre lumineux sur la capacité-tension.

3.5.5. Caractéristiques Capacité-fréquence

Après la simulation faite sur scaps on obtient une courbe dispersée dans chaque cas dû à la diminution progressive de la capacité ou bien en supposant une bande d'états accepteurs profonds dans les cellules. Ces résultats obtenus montrent la variation de la capacité en fonction de la fréquence sous différents flux lumineux. Pour la figure a, b on note que dans le CIGS on obtient une courbe dispersée avec une grande valeur de capacité de 250.78 (nF/cm²) et pour la caractéristique a-si :H une légèrement dispersion mais la caractéristique de CdTe et l'a-si :H s'améliore, mais dans la figure c, la caractéristique d'a-si :H à une courbe largement dispersée par rapport au deux autres caractéristiques des cellules CIGS et le CdTe reste constante de 0.97(nF/cm²) sur une fréquence de 1^E2 à 1^E+6 Mhz.

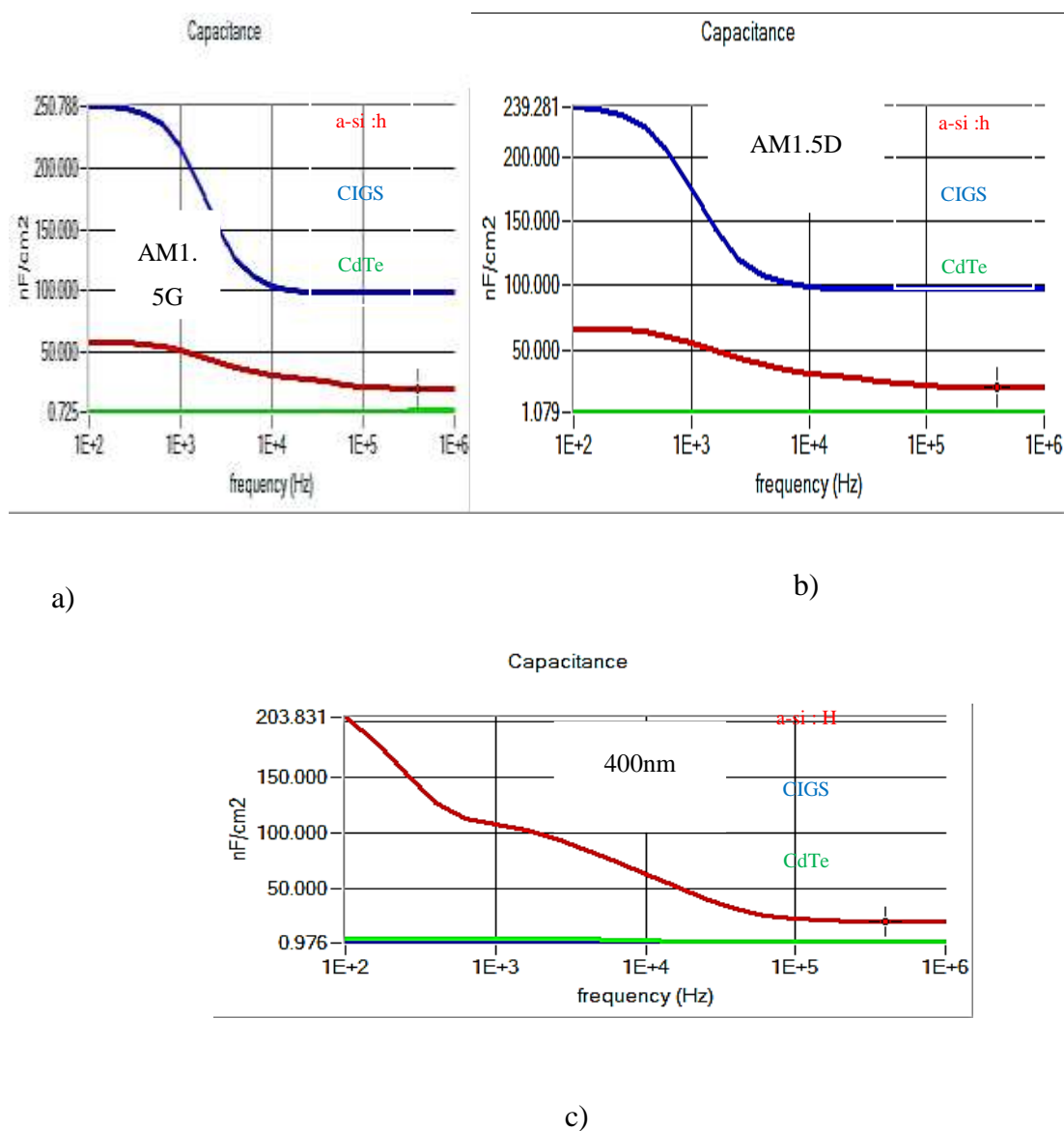


Figure 3-22: Effet du spectre lumineux sur la capacité-fréquence.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale et perspectives

Mon étude à portée sur l'étude et la simulation AC des caractéristiques électriques de quelques cellules solaires en couches minces. L'objectif était de tirer les performances des cellules étudier notamment le rendement ainsi que les caractéristiques capacité-tension C-V et capacité-fréquence C-f sous différentes conditions de lumière, de température et d'autres.

Dans le premier chapitre on a donné un aperçu sur l'énergie solaire ainsi que le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque ainsi que ses caractéristiques.

Dans le deuxième chapitre on a présenté la modélisation du comportement dynamique (régime AC) des cellules solaires y compris leurs modèles électriques dans ce régime ainsi que les principales caractéristiques quand on peut les extraire. De même nous avons discuté l'effet capacitif et les paramètres AC nécessaires à la caractérisation des défauts peu profonds et profonds dans les cellules.

Dans le troisième chapitre on présente les résultats de simulation obtenus à partir du logiciel SCAPS. Les cellules en couches minces simulées sont : a-si:H, CdTe et CIGS. On note que les résultats sont obtenus sous différentes conditions de fonctionnement. En premier lieu nous avons présenté les caractéristiques courant-tension $I(V)$, capacité-tension C-V et capacité-fréquence (C-f) sous obscurité et sous lumière dont on a constaté que ses caractéristiques sont fortement dépendantes de l'énergie lumineuse absorbée. Par la suite nous avons analysé l'influence de la température, du dopage, l'épaisseur et l'effet du spectre lumineux. Concernant le dopage on a remarqué que leur effet, sur C-V, C-f et la caractéristique d'admittance (AS) n'est important que si la concentration des dopants (accepteur ou donneur) est plus grande. En plus l'augmentation de température affecte la caractéristique C-V par augmentation de la valeur maximale de la capacité et provoque une chute de la valeur de cette dernière en fonction de la fréquence. Dans le cas de la caractéristique AS l'effet de la température était limité. Pour l'épaisseur son effet était important pour les couches à épaisseur réduite. De plus l'effet de changement de l'énergie lumineuse était remarquable sur la caractéristique C-f provoquant une large dispersion en fonction de la fréquence tandis qu'il est limité dans le cas de la caractéristique C-V.

En fin cette étude était bénéfique dans le sens de la compréhension du fonctionnement des cellules solaires et leurs caractéristiques dans le régime dynamique.

Comme perspective pour cette étude, une étude comparative des résultats obtenus sur d'autres logiciels de simulation de cellules solaires est toujours intéressante.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1]: MOSTEFA KARA Selma (ETUDE ET SIMULATION DE CELLULES PHOTOVOLTAIQUES A COUCHES MINCES A BASE DE CIS et CIGS) Université Abou-BakrBlekaid Tlemcen juin 2012
- [2]: MIMOUNE MOHAMED (ÉTUDE DES CAPTEURS PHOTOVOLTAÏQUES BASÉS SUR LES NANOTECHNOLOGIES) À L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES mars 2016
- [3]: Zerguine Bilal (MODELISATION D'UN SYSTEME DE PRODUCTION ELECTRIQUE PAR LA CELLULE PHOTOVOLTAIQUE) UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA 2010.
- [5]: <http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/html/inventaire/pdf/15e-inventaire-Chap01-Fr.pdf>
- [5]: bouteldja Asma (technologies optoélectroniques & dispositif ou en est la conversion) 2015
- [6]: http://www.goulet.ca/media/other/349829Extrait_Composants_Floyd.pdf
- [7]: Diallo Mohammed (diagnostic d'une cellule solaire inconnue via la caractéristique électrique) Université USTO (Oran) 2018
- [8]: MEKELLECHE SIDI MOHAMMED (Modélisation et Simulation de Nouveaux Matériaux Destinés à la Production d'Energie Photovoltaïque)
- [9]: HELALI KAMELIA (Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative) de l'UMMTO (Tizi-Ouzou) 2012
- [10]: <https://fr.scribd.com/doc/223389067/Modelisation-Electrique-de-La-Cellule-Photovoltaique>
- [11]: Romain CHAMPORY (Cellules solaires silicium ultra-minces nanostructures : conception électro-optique et développement technologique) DE L'UNIVERSITE DE LYON en 2016
- [12]: <http://dSPACE.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/1014/6/ChapitreI.pdf>
- [13]: BAKHTI SAFIA et MELOUAH MILOUD (Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base de $Cu_2ZnSn(S,Se)_4$) UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA 2016
- [14]: Mr. Abderrezek Mahfoud (Modélisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement) Université SETIF 2015
- [15]: SALAHEDDINE BENSALAM (Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires 2011) UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF
- [16]: https://energypedia.info/images/d/df/Cellules_et_Technologies_Photovoltaiques.pdf
- [17]: CH. RICHTER et O. HECKMANN (étude comparative entre différentes filières de cellules solaires) Université de Cergy-Pontoise.
- [18]: Mr. Belfar Abbas (Modélisation et optimisation de deux cellules solaires n-i-p et n-i-p'p à base de silicium amorphe (a-Si:H) et silicium nanocristallin (nc-Si:H) UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE D'ORAN Mohamed Boudiaf 2013.
- [19]: https://www.ecosources.info/dossiers/Types_de_cellules_photovoltaiques
- [20]: Guerboub Mohammed (Matériaux pour l'énergie photovoltaïque) UNIVERSITE SIDI MOHAMED BEN ABDELLAH
- [21]: Beghdadi souaad (Etude des performances d'une cellule solaire de type Cu (In,Ga)Se₂ (CIGS)) Université Abou Baker Belkaid Tlemcen

Références bibliographiques

- [22] : Conférence IMCL2006 Thomas Zimmer, Université de Bordeaux, France (A remote laboratory for electrical engineering education) en 2006.
- [23] : Mr. CHAOUA Makhoulf (Effet des couches conductrices et transparentes sur les performances des cellules solaires Cu (In, Ga)Se₂) en 2014
- [24] :HARIECH SANA (Elaboration et caractérisation des couches minces de sulfure de cadmium (CdS) préparées par bain chimique (CBD) UNIVERSITE MENTOURI-CONSTANTINE FACULTE DES SCIENCES EXACTES 2009.
- [25] : Mostefa Kara (étude et simulation de cellules photovoltaïque à couches mince à base de cis et CIGS) en 2012
- [26] : KAMLI KENZA (Elaboration et caractérisations physicochimique des couches minces de sulfure d'étain par spray ultrasonique : Effet des sources d'étain 2013 Université Mohamed Khider-Biskra
- [27]: D. Chenvidhya*, K. Kirtikara, C. Jivacate lean Energy Systems Group (CES), A new characterization method for solar cell dynamic impedance King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT), Thailand 2003
- [28] : KESSERWANI Joseph (Développement et implantation d'un modèle de diode par VHDL-AMS. Discrétisation selon la méthode Scharfetter-Gummel.)
- [29] : Viktor Schlosser¹ and Ahmed Ghitas² **Measurement of silicon solar cells ac parameters** Faculty of Physics, Vienna University, Strudlhofgasse 4, A-1090 Vienna, Austria, E.mail: Viktor.Schlosser@univie.ac.at
- [30]: Dynamics electrical behavior of halide perovskite based solar cells G. A. Nemnesă,b,* , Cristina Besleagă , A. G. Tomulescu , Ioana Pintilie , L. Pintilie , K. Torfason , A. Manolescu
- [31]: D. Schawnder, " Dynamic solar cell measurement techniques: new small signal measurement technique", European Space Agency, SP-502, 2002., p.603
- [32] : Le Rôle Du Mécanisme de Recombinaison sur Les Performances Photovoltaïques des Cellules Solaires de Type Cu (In, Ga)(S,Se₂) Laboratoire de Théorie de la Matière Condensée, Institut de Physique et d'Electronique – 1, Boulevard Arago, 57078 Metz, Cedex 3, France
- [33]: Admittance spectroscopy of thin film solar cells M. Burgelman*, P. Nollet University of Gent, Department Electronics and Information Systems (ELIS), Pietersnieuwstraat 41, B-9000 Gent, Belgium
- [34]: Modelling polycrystalline semiconductor solar cells M. Burgelman*, P. Nollet, S. Degraeve University of Gent, Electronics and Information Systems (ELIS) Pietersnieuwstraat 41, B-9000 Gent, Belgium
- [35]=: University of Bucharest, Faculty of Physics, Materials and Devices for Electronics and Optoelectronics Research Center, 077125 Magurele-Ilfov, Romania
- [36] : TOUAFEK Naïma (Contribution à l'étude d'une cellule solaire en couches minces à base de CuIn_{1-x}Ga_xSe₂)2015
- [37] : MEKELLECHE SIDI MOHAMMED (Modélisation et Simulation de Nouveaux Matériaux Destinés à la Production d'Energie Photovoltaïque)
- [38] : Beghdadi souaad (Etude des performances d'une cellule solaire de type Cu (In,Ga)Se₂ (CIGS)) Université Abou Baker Belkaid Tlemcen

Références bibliographiques

- [39] : Kalache salim (Etude par simulation numérique d'une cellule solaire en CIGS) 2016 /2017
- [40] : (SALVATOR NSENGIYUMVA PROPRIETES Photovoltaïques ET ELECTRIQUES DE CELLULES A BASE DE FILMS LANGMUIR-BLODGETT DE CHLOROPHYLLE 1.. ET DE MELANGE) L'UNIVERSITE DU QUEBEC A TROIS-RIVIERES 1996
- [41] : (Le Rôle Du Mécanisme de Recombinaison sur Les Performances Photovoltaïques des Cellules Solaires de Type Cu (In, Ga)(S,Se₂) M.Benosman) DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE 2006.
- [42] :Abdoulwahab ADAINE (les Optimisation numérique de cellules solaires à très haut rendement à base d'InGaN) Université de Lorraine et Centrale Supélec

ملخص

في هذا العمل، تم اقتراح دراسة للخصائص الكهربائية في النظام الديناميكي (AC) لبعض الخلايا الشمسية ذات الطبقات الرقيقة، سيتم إجراء هذه الدراسة من خلال عمليات المحاكاة بواسطة برنامج SCAPS-1D. الغرض من هذه الدراسة هو استخراج أفضل أداء للخلايا التي تم دراستها مثل المميزة (I-V)، (C-V)، السعة بدلالة التردد (C-f) إضافة إلى المردود الكهربائي والكمي.

Résumé

Dans ce travail une étude des caractéristiques électriques dans le régime dynamique (AC), de quelques cellules solaires en couches minces est proposée. Cette étude sera performer par des simulations sous le logiciel SCAPS-1D. Le but de cette étude est d'extraire les meilleures performances des cellules étudiées telles que les caractéristiques courant-tension (I-V), capacité-tension (C-V), capacité-fréquence (C-f) ainsi que le rendement électrique et quantique.

Abstract

In this work a study of the electrical characteristics in the dynamic regime (AC), of some thin film solar cells is proposed. This study will be performed by simulations under the Scaps-1D software. The purpose of this study is to extract the best performances of the studied cells such as the current-voltage (I-V), capacitance-voltage (C-V), capacitance-frequency (C-f) characteristics as well as the electrical and quantum efficiency.

