

**MINISTER DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU**

**Faculté de Génie Electrique et Informatique
Département Electronique**



**Mémoire
MASTER ACADEMIQUE
Domaine : Sciences et technologies
Filière : Génie électrique
Spécialité : Matériaux et Dispositifs Electroniques et Photovoltaïques**

Présenté par

M^{elle} DJELLOUT Thileli

M^{elle} MAKOUR Sarah

Thème :

**Etude de l'effet de la température et de l'éclairement sur
les performances des modules photovoltaïques à base de
silicium amorphe.**

Devant le jury composé de :

M^r Youcef ATTAF

MCB UMMTO

Président

M^{elle} Dalila HOCINE

MCA UMMTO

Encadreur

M^{elle} Djedjega HATEM

MCA UMMTO

Examinatrice

Mémoire soutenu publiquement le 04/07/2017



Remerciements

Nous tenons à remercier mademoiselle HOCINE Dalila maître de conférences A à l'université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou de nous avoir encadré et proposé le thème de ce mémoire ainsi que son aide précieuse pour bien mener ce travail.

Nous voudrions remercier les membres du jury de leur présence et d'avoir accepté d'évaluer leur et examiner ce travail.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous nos enseignants qui ont participé à notre formation.

Tout notre respect et notre gratitude à tous ceux qui ont contribué de prêt ou de loin à la réalisation de ce travail.



Dédicaces

*On dédie ce travail à tous ceux qui nous sont très chers plus
particulièrement à :*

Nos chers parents

Nos frères et nos sœurs

Toutes nos familles et tous nos amis (es)

MAKOUR Sarah et DJELLOUT Thileli

Sommaire

Introduction général..... 1**Chapitre I : Etude des propriétés du silicium amorphe**

Introduction	4
1. Le silicium comme matériau de base pour le photovoltaïque	4
1.1 Le silicium monocristallin.....	4
1.2 Le silicium multicristallin.....	5
1.3 Le silicium amorphe.....	6
1.4 Le silicium amorphe hydrogéné	7
1.4.1 Le rôle de l'hydrogène	7
1.4.2 Structure du silicium amorphe hydrogéné.....	8
2. Propriétés électroniques et optiques du silicium amorphe	9
2.1 Propriétés électroniques	9
2.2 Propriétés optiques	10
3. Avantages et inconvénients du silicium amorphe	12
3.1 Avantages du silicium amorphe hydrogéné	12
3.2 Inconvénients du silicium amorphe hydrogéné	13
4. Effet de la température sur le silicium amorphe.....	13
5. Performances des cellules au silicium amorphe.....	14
5.1 Absorption optique et réponse spectrale.....	14
5.2 Performance à fort éclairement	15
5.3 Performances à faible éclairement.....	16
6. L'effet Staebler-Wronski	17
7. Les méthodes d'élaboration du silicium amorphe hydrogéné.....	18
7.1 La pulvérisation cathodique	18
7.2 La pulvérisation magnétron.....	19
7.3 Technique d'évaporation sous vide.....	20
7.4 Le dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma (PECVD).....	21
Conclusion.....	22

Chapitre II : Physique des cellules solaires à base de silicium amorphe

Introduction	23
1-Energie renouvelable	23
2-Rayonnement solaire.....	23
2-1-Le rayonnement direct	23
2-2-Le rayonnement diffus	23
2-3-L'albédo	24
2-4-Le rayonnement global	24
3-Masse d'air	25
4-L'effet photovoltaïque	26
5-Structure d'une cellule PV	27
5-1-Couche d'interface avec l'extérieur	27
5-2-Couche antireflet	27
5-4-Contacts.....	29
a.Contact supérieur	29
b.Contact inférieur	30
6-Circuit électrique équivalent	30
6-1-Cas d'une cellule solaire idéale	31
6-2-Cas d'une cellule réelle.....	31
7-2- Influence de la résistance parallèle R_p	32
9-Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire	33
9-1-Le courant de court-circuit I_{cc}	34
9-2-La tension du circuit-ouvert V_{co}	34
9-3-La puissance maximale P_m	35
9-4-Le facteur de forme FF	35
9-5- Le rendement	35
9-5-1-Types et rendements des cellules photovoltaïques	36
10- Structure d'une cellule solaire en silicium amorphe hydrogéné a-Si: H	38
a.Jonction p-i-n	39
b.Modules à multiples jonctions	40
11-Principe de fonctionnement d'une cellule solaire de structure p-i-n	41
12-Fabrication d'une cellule solaire	43

Conclusion	44
------------------	----

Chapitre III : Caractérisation des modules PV à base de silicium amorphe

Introduction	45
1.Constitution des panneaux photovoltaïques.....	45
2.Assemblage des cellules solaire (série, parallèle, série-parallèle)	48
2.1 Association en série	48
2.2 Association en parallèle.....	49
2.3 Association hybride (en série/parallèle)	49
3.Caractéristiques d'un module solaire	50
a.Caractéristique courant-tension (I-V)	50
b.Tension de circuit ouvert	51
c.Courant de court-circuit	52
d.Caractéristique puissance-tension (P-V)	52
4.Description de la plateforme de caractérisation de modules PV utilisée	53
4.1 Partie extérieure	53
4.2Partie intérieure	56
Conclusion	58

Chapitre IV : Résultats et interprétation

Introduction	59
Influence de l'irradiation	59
1.1 Tracé des caractéristiques I (V) et P (V) à T=42.5°C.....	59
1.2 Tracé des caractéristiques I (V) et P(V) à T=23.8°C	61
Influence de la température	64
2.1 Tracé des caractéristiques I (V) et P(V) à E=700 W/m ²	65
2.2 Tracé des caractéristiques I (V) et P (V) à E=150 W/m ²	67
Conclusion	68

Conclusion générale	69
----------------------------------	-----------

La liste des figures

Chapitre I :

Figure 1:Méthode de Czochralski.....	5
Figure 2:Image d'un substrat de silicium multicristallin	6
Figure 3:Structure du silicium cristallin (c-Si) et amorphe (a-Si).....	7
Figure 4:La structure du silicium amorphe hydrogéné	8
Figure 5:Diagrammes de bande du	9
Figure 6:Coefficient d'absorption(cm^{-1}) en fonction de l'énergie.....	11
Figure 7: Comparaison des coefficients d'absorption du silicium amorphe, microcristallin et cristallin	11
Figure 8: Production comparée du silicium amorphe et du silicium cristallin dans divers situations climatiques	14
Figure 9:Réponses spectrales des différents types de cellules solaires1.....	5
Figure 10:Caractéristiques courant-tension comparées d'une cellule au silicium amorphe et d'une cellule au silicium cristallin (sous $1000\text{w}/\text{m}^2$ conditions STC)	15
Figure 11:Courbes I(V) d'une photopile au silicium amorphe sous faible éclairément fluorescent	17
Figure 12:Principe général de fonctionnement de la pulvérisation cathodique.....	19
Figure 13: Structure d'une cathode magnétron circulaire.....	20
Figure 14:Bâti de dépôt par évaporation thermique sous vide	21
Figure 15:Représentation schématique d'un système de dépôt par PECVD	22

Chapitre II :

Figure 1: Composantes de rayonnements solaires au sol.....	24
Figure 2:Définition de l' Air Mass	25
Figure 3: Effet photovoltaïque (PV).....	27
Figure 4:Texturation de la surface d'une cellule solaire	29
Figure 5: Schéma équivalent d'une cellule solaire idéale	31
Figure 6:Schéma équivalent d'une cellule solaire réelle.....	32
Figure 7:Caractéristique courant -tension sous obscurité et sous éclairément d'une cellule solaire	33
Figure 8:Point maximal de puissance d'une cellule élémentaire	34
Figure 9:Les images de différents types de cellules photovoltaïques	37
Figure 10:Ar-chitecture d'une jonction p-i-n	39
Figure 11: (a) la jonction p-n n'a pas de caractère redresseur dans le cas de a-Si :H, (b) la structure pin présente un effet redresseur.....	40
Figure 12:Module d'une cellule à jonction multiple.....	41

Figure 13: Principe de fonctionnement d'une cellule solaire en silicium amorphe . 42

Chapitree III :

Figure 1: Structure d'un module photovoltaïque au silicium amorphe.....	45
Figure 2 : Mise en série des cellules d'un module au silicium amorphe..	46
Figure 3: Caractéristique résultante d'un groupement en série de n_s cellules identiques	48
Figure 4: Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de n_p cellules identiques.....	49
Figure 5: Caractéristique résultante d'un groupement hybride de (n_s+n_p) cellules identiques	50
Figure 6: Caractéristique courant-tension	51
Figure 7: Test de tension en circuit ouvert.....	52
Figure 8: Test de tension en court-circuit.....	53
Figure 9: Caractéristique puissance-tension.....	54
Figure 10: Partie extérieure de la plateforme de caractérisation PV installée à l'UDES contenant les modules PV et les différents capteurs (Eclairement et Température).....	54
Figure 11: Pyranomètre Kipp&Zonen CMP11	56
Figure 12: Capteur PT 100 collé sur le dos du module PV sous test	56
Figure 13: Partie intérieure de la plateforme de caractérisation PV de l'UDES: a) armoire de multiplexage, b) unite agilent 34972A, charge électronique PVPM et PC avec EXCEL	57

Chapitre IV

Figure 1: Caractéristiques courant/tension sous différents niveaux d'irradiations, à forts éclairagements, à $T=42.5^{\circ}\text{C}$	60
Figure 2: Courbes puissance –tension sous différents niveaux d'irradiations, à forts éclairagements, à $T=42.5^{\circ}\text{C}$	61
Figure 3: Caractéristiques I-V sous différents niveaux d'irradiations, à faibles éclairagements, à $T=23.8^{\circ}\text{C}$	63
Figure 4: Courbes puissance –tension sous différents niveaux d'irradiations, à faibles éclairagements, à $T=23.8^{\circ}\text{C}$	63
Figure 5: Courbes courant –tension sous différentes températures (à hautes températures) à $E=700\text{W}/\text{m}^2$	65
Figure 6: Courbes puissance-tension sous différentes températures (à hautes températures) à $E=700\text{W}/\text{m}^2$	65
Figure 7: Courbes courant –tension sous différentes températures (à basses températures) à $E=150\text{W}/\text{m}^2$	67
Figure 8 : puissance-tension sous différentes températures (à basses températures) à $E=150\text{W}/\text{m}^2$	67

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau 1: Les différents types des cellules avec leur rendement	36
--	----

Chapitre IV

Tableau 1: Relevé des mesures effectuées avec le panneau solaire au silicium amorphe à forts éclairagements.....	60
Tableau 2: Relevé des mesures effectuées avec le panneau solaire au silicium amorphe à faibles éclairagements.	62
Tableau 3: Relevé des mesures effectuées avec le panneau solaire au silicium amorphe pour les hautes températures.....	64
Tableau 4: Relevé des mesures effectuées avec le panneau solaire au silicium amorphe pour les basses températures.....	66

Mots clés :

Photovoltaïque UDES Eclaircement Température Module
Cellule solaire Technologie Silicium Amorphe Hydrogène Structure
Défauts Caractéristique Courant Tension Puissance
Méthodes de dépôt série parallèle Rendement .

Résumé

Le travail développé dans ce mémoire concerne l'étude de l'effet de la température et de l'éclairement sur les performances des modules photovoltaïques (PV) à base de silicium amorphe.

En effet, le rendement de conversion des modules PV est différent du rendement dans les conditions standard, et dépend principalement de l'éclairement et de la température qui sont des paramètres variables au cours de l'année et de la journée. L'étude du fonctionnement de ces modules, en conditions réelles d'utilisation, est donc une nécessité.

Dans ce sens, nous avons effectué la caractérisation des panneaux photovoltaïques au silicium amorphe, dans les conditions réelles d'utilisation, en utilisant la plateforme de caractérisation de modules PV automatisée installée à l'UDES (Unité de Développement des Equipement Solaires).

Nous avons effectué plusieurs mesures, en temps réel, pendant une journée d'hiver et une autre d'été, qui nous ont permis d'obtenir les caractéristiques I (V) et P (V) et d'évaluer ainsi la production électrique du panneau PV en fonctionnement pour différentes températures (hautes et basses températures) et irradiances solaires (forts et faibles éclairement).

L'analyse des résultats de caractérisation du panneau PV au silicium amorphe montrent que :

- La puissance électrique fournie par les modules PV au silicium amorphe augmente avec l'augmentation de l'ensoleillement.
- Pour les forts éclairements, ces modules continuent à délivrer une forte puissance même pour une irradiance inférieure à 1000 W/m².
- Pour les faibles éclairements (intensité lumineuse < 200 W/m²), les modules PV au silicium amorphe continuent à produire de l'électricité avec une puissance électrique très supérieure à celle des modules au silicium cristallin.
- Les modules PV au silicium amorphe résistent aux hautes températures et continuent à délivrer une forte puissance. Les basses températures (< 25°C) ont moins d'influence sur leur production électrique.

La plateforme de caractérisation PV de l'UDES, nous a permis d'acquérir une meilleure connaissance du fonctionnement des panneaux solaires au silicium amorphe.

Mots clés : Module PV, silicium amorphe, caractérisation PV, cellule solaire, rendement.

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables la plus prometteuse. Elle consiste à convertir directement le rayonnement solaire en électricité. Elle utilise pour ce faire des convertisseurs photovoltaïques ou cellules solaires qui représentent l'élément de base dans la conversion photovoltaïque.

L'utilisation des cellules solaires comme convertisseurs d'énergie solaire a fait apparaître le besoin d'étudier ces systèmes afin de les optimiser, et par conséquent développer l'exploitation de cette nouvelle source d'énergie renouvelable propre, qui réduit l'émission de gaz à effet de serre [22].

Le silicium a souvent été qualifié de matériau du siècle. Avec ces multiples technologies (monocristallin, multicristallin et amorphe). Depuis la découverte des propriétés photovoltaïques du silicium amorphe a-Si :H en 1975, et après la réussite de son dopage en 1975 par Spear et al [14], un intérêt énorme a été déclenché pour ce matériau. Les scientifiques et les industriels du monde entier ont déployé une intense activité dans le domaine des couches minces, qui a été exploitée depuis les années 1980, et plus particulièrement celle basée sur ce matériau.

Le semi-conducteur amorphe se distingue de son homologue cristallin par sa structure désordonnée. Il présente d'excellentes propriétés optiques mais de faibles propriétés électroniques ce qui explique les faibles rendements industriels des modules PV. Ce matériau présente plusieurs avantages importants motivant son utilisation à grande échelle comme le pompage, l'éclairage des maisons etc., parmi lesquels, on peut citer :

- La production se fait par dépôt de silane gazeux dans une décharge électrique (PECVD) ;
- Il a un très haut coefficient d'absorption dans le domaine du visible [14], ce qui permet de maintenir l'épaisseur de la cellule assez mince.
- La possibilité de le déposer sur des grandes surfaces a permis d'envisager de nombreux débouchés dans le domaine de l'électronique. Cette caractéristique

additionnée à sa facilité de fabrication ont fait un matériau très intéressant pour plusieurs applications[7].

- La bande interdite d'environ 1.75 eV est bien adaptée au spectre solaire.

A ces avantages, s'ajoute un fort potentiel de réduction des coûts de production et d'économiser le matériau.

Cependant, le silicium amorphe présente aussi des inconvénients par rapport au silicium cristallin, qui consistent en la dégradation de ses propriétés électriques sous illumination (Effet Staebler-Wronski) [14] pendant les premiers temps d'exposition au soleil, à la suite de quoi, il se stabilise. Ce phénomène est lié aux défauts métastables du matériau.

Les paramètres principaux des modules PV donnés par les fabricants, sont mesurés dans les conditions standard (STC): une irradiance normale de 1000 W/m² et une température de cellule de 25°C, alors qu'il y a un véritable écart entre les conditions standard et les conditions réelle sur le site d'implantation de ces panneaux. Il est vrai que ces conditions standard sont utiles pour comparer les performances des différents panneaux mais ne sont pas représentatifs de leur fonctionnement en conditions réelles. Le rendement de conversion de la plupart des modules commerciaux n'est pas constant sur toute la gamme d'éclairement possible et change également avec la variation de la température de fonctionnement des cellules. En effet, L'influence de la température est importante puisque les cellules PV sont exposées aux rayonnements solaires susceptibles de les chauffer. De plus, une partie du rayonnement absorbé n'est pas convertie en électricité ; elle est dissipée sous forme de chaleur ; c'est pour cela que la température des cellules d'un module PV (T_c), en fonctionnement réel, est toujours plus élevée que la température en conditions standard (T_a) qui est 25°C. L'étude de l'influence de l'éclairement est également important du moment que le rendement des panneaux solaires chute à faible éclairement.

Vu la variation du rendement de conversion des modules PV par rapport au rendement dans les conditions standard, principalement sous l'effet de l'éclairement et de la température, l'étude du fonctionnement de ces modules, en conditions réelles d'utilisation, est nécessaire.

Dans ce sens, l'objectif de ce travail est la caractérisation des panneaux photovoltaïques au silicium amorphe, dans les conditions réelles d'utilisation (en extérieur), en utilisant la plateforme de caractérisation de modules PV automatisée installée à l'UDES

(Unité de Développement des Equipement Solaires) disposant de connaissances approfondies sur les conditions climatiques et atmosphériques.

Nous étudions l'influence de la température (hautes et basses températures) et de l'éclairement sur la production électrique des modules PV au silicium amorphe, en focalisant notamment notre étude sur le comportement de ces modules sous faible éclairement (c'est-à-dire pour une intensité lumineuse inférieure à 200 W/m^2).

Pour ce faire, notre manuscrit est structuré en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons les propriétés structurales et optoélectroniques du silicium amorphe, ses avantages et inconvénients ainsi que les techniques d'élaboration de ce matériau.

Dans le deuxième chapitre, nous décrivons la structure des cellules solaires au silicium amorphe et nous expliquons leur principe de fonctionnement en donnant leurs principales caractéristiques.

Le troisième chapitre explique les méthodes d'association des cellules solaires pour passer au module PV. Nous décrivons ensuite la plateforme de caractérisation PV de l'UDES que nous avons utilisée pour la caractérisation du panneau PV au silicium amorphe. Nous présentons l'instrumentation installée en extérieur et en intérieur pour récupérer les données météorologiques et atmosphériques influençant les performances du panneau solaire.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons les résultats de mesures, en temps réel, effectuées sur le panneau PV au silicium amorphe, sous différentes températures et irradiances solaires. Nous analysons ensuite les résultats obtenus pour en tirer des conclusions.

Nous terminons ce manuscrit par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I

Etude des propriétés du silicium amorphe

Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les propriétés électriques et optiques du silicium amorphe ainsi que ses principaux avantages et inconvénients. Nous présentons également les performances des cellules solaires au silicium amorphe comme composants des modules photovoltaïques au silicium amorphe objet de notre étude.

Nous décrivons ensuite les techniques les plus utilisées pour l'élaboration du silicium amorphe.

1. Le silicium comme matériau de base pour le photovoltaïque

Aujourd'hui, plus de 99% des équipements photovoltaïques utilisent le silicium comme matériau de base. Cela revient à son abondance sur terre, et au fait qu'il n'est pas toxique et chimiquement stable dans le temps. Son seul inconvénient est son gap indirect de 1.1 eV qui entraîne la diminution de son coefficient d'absorption.

Le silicium se présente sous différentes formes, les plus répandues étant le silicium monocristallin, le silicium multicristallin, et le silicium amorphe. Le silicium utilisé pour les cellules photovoltaïques doit être d'une grande pureté quelque soit sa forme [1].

1.1 Le silicium monocristallin

Le silicium monocristallin comporte des grains parfaitement ordonnés de taille supérieure à 10 cm [2], il permet d'obtenir de meilleurs rendements en cellules solaires. La monocristallisation est obtenue par la méthode Czochralski. Dans cette dernière le silicium est fondu dans un creuset de quartz chauffé par induction. Dans un gradient de température convenable, un germe monocristallin correctement orienté est déposé à la surface du silicium liquide qui se solidifie sur ce germe en continuant à l'identique le réseau cristallin du germe et selon la même orientation cristallographique. Le dopage s'obtient évidemment en introduisant dans le bain liquide le dopant en concentration prédéfini. Le diamètre ainsi obtenu est lié aux paramètres physiques au cours du tirage (figure I.1) [1].

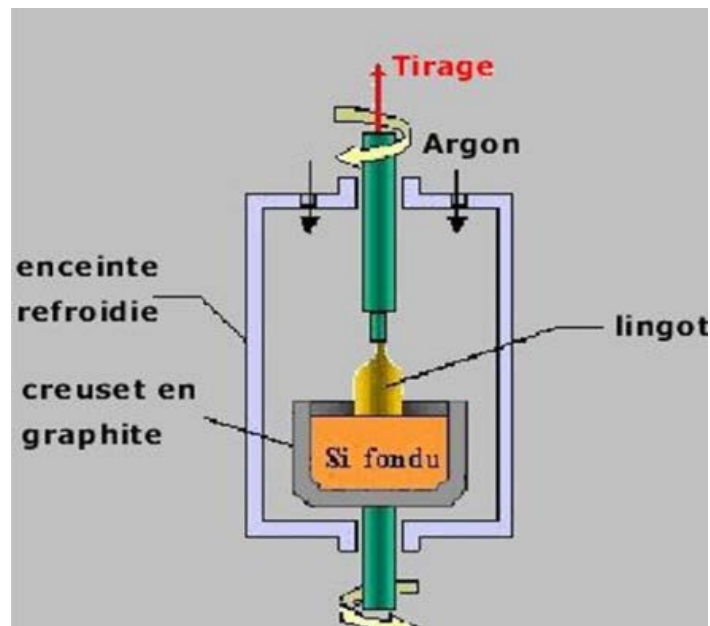


Figure I.1 : Méthode de Czochralski [1].

1.2 Le silicium multicristallin

Pour le silicium multicristallin, les techniques d'élaboration sont moins onéreuses mais sa qualité photovoltaïque est moins bonne à cause de la présence des joints de grains qui introduisent des zones fortement recombinantes. Ces joints sont constitués par les surfaces adjacentes de grains d'orientations cristallographiques différentes, et contiennent beaucoup de liaisons pendantes. Ceci a pour effet de réduire la durée de vie des porteurs minoritaires, et ils sont à l'origine des courants de fuites dans la cellule solaire. La figure I.2 ci-dessous présente une image du silicium multicristallin [1].



Figure I.2 : Image d'un substrat de silicium multicristallin [1].

1.3 Le silicium amorphe

Le silicium amorphe a une structure désordonnée (figure I.3), non cristallisée, vitreuse, mais il possède un coefficient d'absorption de la lumière environ 1000 fois supérieure au silicium cristallin. Une fine couche de $0.3 \mu\text{m}$ est donc suffisante pour absorber l'essentiel du spectre visible[4][5]. Elle est obtenue de façon simple par le dépôt en phase vapeur sur des substrats économiques tels que du verre, le quartz, la céramique, l'aluminium. La décomposition en phase vapeur du silane SiH_4 à basse température ($200, 400^\circ\text{C}$) permet de déposer le silicium amorphe hydrogéné avec une vitesse voisinant la dizaine de nanomètre par minute[6].

Cependant, la grande densité de défauts du silicium amorphe (liaisons pendantes, état d'interphase, structure) limite son rendement de conversion, entre 5 et 6% et des problèmes de stabilité apparaissent rapidement quand on l'expose au soleil et aux intempéries (quelques centaines d'heures).

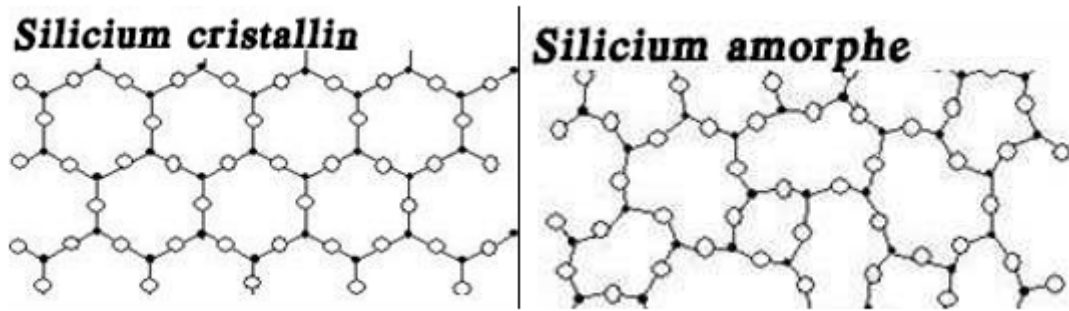


Figure I.3 : Structure du silicium cristallin (c-Si) et amorphe (a-Si) [7].

1.4 Le silicium amorphe hydrogéné

Le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) est un matériau issu de la famille des semi-conducteurs; cette famille a été découverte vers le début des années soixante; dans un premier temps elle n'était pas utilisable car elle avait beaucoup trop de défauts, mais vers la fin des années soixante, on a observé qu'en déposant le silicium amorphe par un plasma de silane (SiH_4), plus de 99.9 % des défauts étaient saturés par l'hydrogène, ce qui rendait ce matériau utilisable comme semi-conducteur. Dès cette découverte, il était devenu l'objet de recherches intensifiées. La recherche de nouvelles applications en font un matériau actuellement encore en pleine évolution [8].

1.4.1 Le rôle de l'hydrogène

C'est l'hydrogène qui, en saturant les liaisons pendantes, rend le silicium amorphe utilisable (figure I.4). Sans l'hydrogène, la densité des liaisons pendantes serait de l'ordre de 10^{19} cm^{-3} , le gap optique de 1.77eV environ et il est impossible de le doper. L'hydrogène permet de réduire les liaisons pendantes, ce qui permet de réduire la densité de défauts à 10^{15} - 10^{16} cm^{-3} [17]. Il n'y a donc presque plus d'états profonds qui agissent comme des centres de recombinaisons. De plus, en se liant aux atomes de silicium (liaisons covalentes), il entraîne la disparition d'une partie des états localisés. Mais une incorporation excessive de l'hydrogène peut entraîner la rupture des liaisons faibles et l'introduction de nouvelles liaisons pendantes. La concentration de l'hydrogène doit varier entre 6% et 35 % [1], ce qui dépasse largement la densité nécessaire à la passivation des liaisons pendantes.



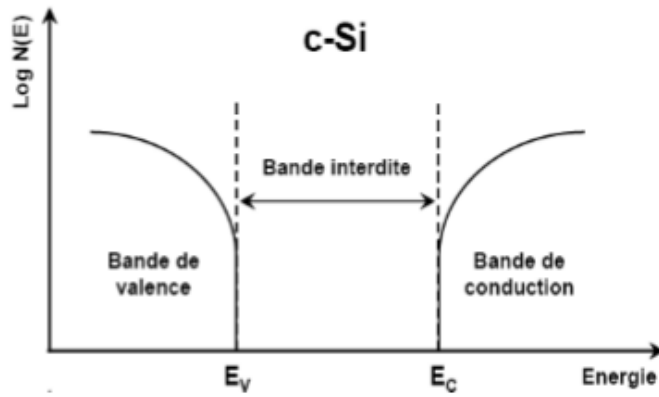
Figure I.4: La structure du silicium amorphe hydrogéné [13].

1.4.2 Structure du silicium amorphe hydrogéné

La densité d'états électroniques en fonction de l'énergie N étant partout non nulle, il n'y a pas de vraie bande interdite au sens du c-Si. On distingue deux zones d'états étendus non localisés similaires au cas cristallin ($E < E_V$) et ($E > E_C$), mais avec une mobilité réduite en fonction de l'énergie $E(\mu(E))$. Entre ces deux zones se trouve une pseudo bande interdite qui permet de définir un gap de mobilité (figure I.5), c'est à dire une zone avec une mobilité nulle ou les états sont localisés. Ces derniers, se situent de chaque côté de la bande de valence et de conduction, et qui s'appellent les queues de bande (Figure I.5). Elles forment une zone de piégeage des porteurs libres, où ils sont immobilisés ($\mu = 0$) puis relâchés sous l'effet de la température, de la lumière ou de l'application d'un champ électrique. A cause du piégeage dans les queues de bandes, les mobilités des électrons et des trous libres se trouvent réduites d'un facteur de 10^4 environ par rapport à celles du c-Si[7].

Il existe aussi un état supplémentaire situé au milieu de la pseudo-bande interdite. Celui-ci est dû à la présence de défauts ou de liaisons pendantes non saturées par l'hydrogène, dans le matériau (figure I.5).

(a)



(b)

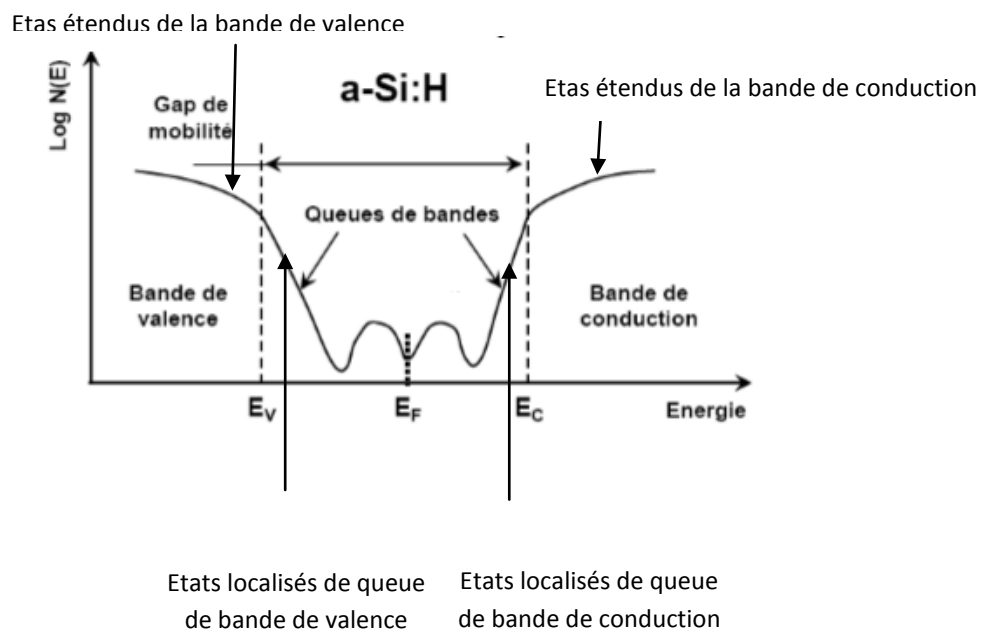


Figure I.5: Diagrammes de bande du :
 (a) silicium cristallin ; (b) silicium amorphe hydrogéné [7].

2. Propriétés électroniques et optiques du silicium amorphe

2.1 Propriétés électroniques

Dans les semi-conducteurs amorphes, trois principaux mécanismes de transport de charges interviennent dans la conduction électrique, à cause de l'existence d'états localisés à l'extrémité des bandes de valence et de conduction ainsi que vers le centre du gap (niveau de fermi), selon le domaine de température dans lequel se trouve le matériau :

- la conduction dans les états étendus à température ambiante, dont le transport se fait dans les états délocalisés de la bande de conduction.
- la conduction dans les états localisés en queue de bande aux températures intermédiaires, dont les porteurs excités se déplacent par saut d'un état localisé à un proche voisin en échangeant une énergie avec un phonon.
- la conduction dans les états voisins du niveau de Fermi aux températures basses, dont les porteurs se déplacent par sauts à longue distance entre les états localisés de la bande interdite situés au voisinage du niveau de Fermi[9][10].

La conductivité électrique (σ) est exprimée par la relation suivante [9]:

$$\sigma = e \int_{-\infty}^{+\infty} \mu(E) n(E) F(E) (1 - F(E)) dE \quad (1)$$

Où e est la charge de l'électron, $\mu(E)$ et $n(E)$ sont, respectivement, la mobilité et la densité des porteurs de charges au niveau d'énergie E et $F(E)$ est la fonction de distribution des états.

2.2 Propriétés optiques

Dans un semi-conducteur amorphe, l'absorption de la lumière peut se traduire par des transitions électroniques entre les états étendus (bande de valence et conduction) et les états localisés dans la bande interdite (gap). Le a-Si:H est un semi-conducteur à gap direct ce qui lui donne un coefficient d'absorption dans le visible plus élevé que le c-Si.

Le coefficient d'absorption (α) du silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H), représenté en fonction de l'énergie de photon ($h\nu$), montre trois régions bien distinctes (Figure I.6) [9]:

- Une région A de forte absorption ($\alpha \geq 10^4 \text{ cm}^{-1}$).

- Une région intermédiaire B où l'absorption varie exponentiellement avec l'énergie.
- Une région C de faible absorption ($\alpha < 10^2 \text{ cm}^{-1}$), dans cette zone on peut déterminer le gap optique (E_g) par la relation de Tauc [18]:

$$\alpha(h\nu) = B \left(\frac{h\nu - E_g}{h\nu} \right)^2 \quad (2)$$

Où B est une constante liée au matériau et E_g le gap optique.

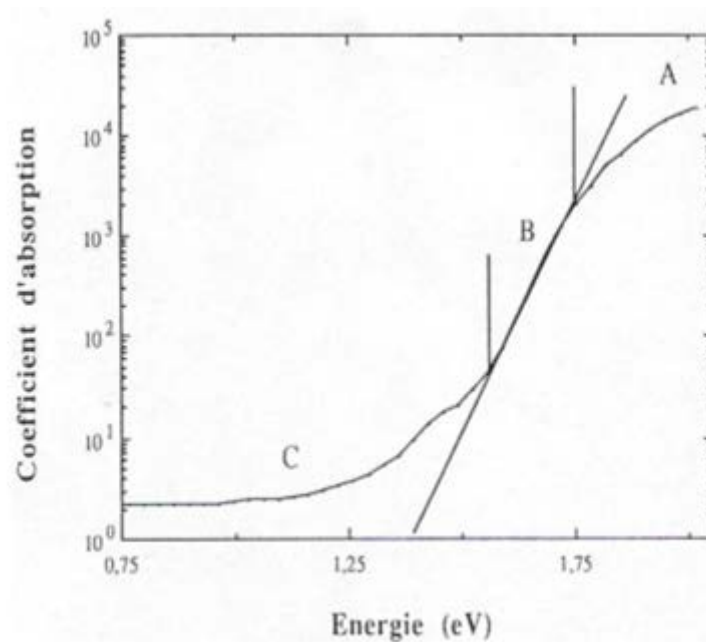


Figure I.6 : Coefficient d'absorption(cm^{-1}) en fonction de l'énergie[9].

La figure I.7 fait une comparaison du coefficient d'absorption du silicium amorphe microcristallin et cristallin représenté en fonction de l'énergie du photon incident et de leurs longueurs d'ondes considérées dans l'air.

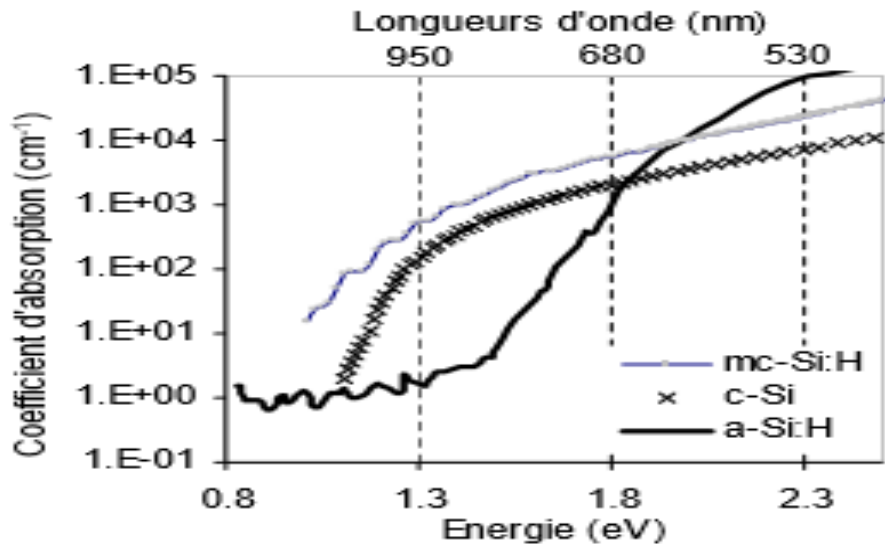


Figure I.7 : Comparaison des coefficients d'absorption du silicium amorphe, microcristallin et cristallin [11].

Le silicium amorphe possède aussi un coefficient de transmission et un coefficient de réflexion traduits par les relations suivantes:

$$T(\lambda) = \frac{I_T(\lambda)}{I_0(\lambda)} \quad (3)$$

$T(\lambda)$ étant le coefficient de transmission en fonction de la longueur d'onde des photons, I_T étant l'intensité de la lumière transmise et I_0 étant l'intensité lumineuse incidente.

$$R(\lambda) = \frac{I_R(\lambda)}{I_0(\lambda)} \quad (4)$$

$R(\lambda)$ étant le coefficient de réflexion pour une longueur d'onde donnée, I_R étant l'intensité de la lumière réfléchie et I_0 étant l'intensité de la lumière incidente [11].

3. Avantages et inconvénients du silicium amorphe

3.1 Avantages du silicium amorphe hydrogéné

- Possibilité de le déposer sur des grandes surfaces.
- Possibilité de le déposer sur des surfaces non planes ou souples : intéressant pour la

déposition sur cylindres ou sphères (axes de symétrie).

- Facilité de fabrication.
- Fort coefficient d'absorption de la lumière visible.
- Peu de dégradation par les rayons X.
- Bande interdite plus élevée (1,75 eV pour le silicium amorphe; 1,12 eV pour le silicium cristallin), qui permet d'obtenir des courants inverses dans l'obscurité plus faible.
- Peu sensible à l'échauffement autour de 60°C.
- Fonctionne à un très faible niveau de luminosité (à partir de 20 lux);
- Fabrication en principe moins onéreuse .

3.2 Inconvénients du silicium amorphe hydrogéné

- Beaucoup de défauts, dans la structure.
- Faible mobilité des porteurs libres, il souffre d'un problème de dégradation des performances causée par l'exposition à la lumière: c'est l'effet Staebler –Wronski.
- Rendement bien inférieur à celui du silicium cristallin (entre 5% et 7% dans le commerce).
- Industrialisation encore peu développée par rapport aux technologies cristallines.

4. Effet de la température sur le silicium amorphe

Le silicium cristallin perd en puissance environ 0.4%/°C, soit -16% pour un écart de température de 40°C, entre 25°C et 65°C par exemple.

Dans le cas du silicium amorphe, cet effet est moindre : du fait du gap optique plus élevé de 1.77eV, l'effet de température n'est que de -0.2%/°C sur la puissance maximale.

Cet effet a un impact très important sur la production d'énergie : il explique que même dans des climats très ensoleillés, le silicium amorphe produit plus de KWh par Wc installé que le silicium cristallin : car celui-ci est pénalisé par la décroissance supérieure de sa puissance avec la température (-0.4%/°C). De nombreuses études récentes le démontrent, comme cette comparaison a-Si/c-Si, en figure I.8, qui montre que même en climat désertique et très ensoleillé, du fait de la température élevée, le silicium amorphe produit plus annuellement, pour une puissance installé identique[14].

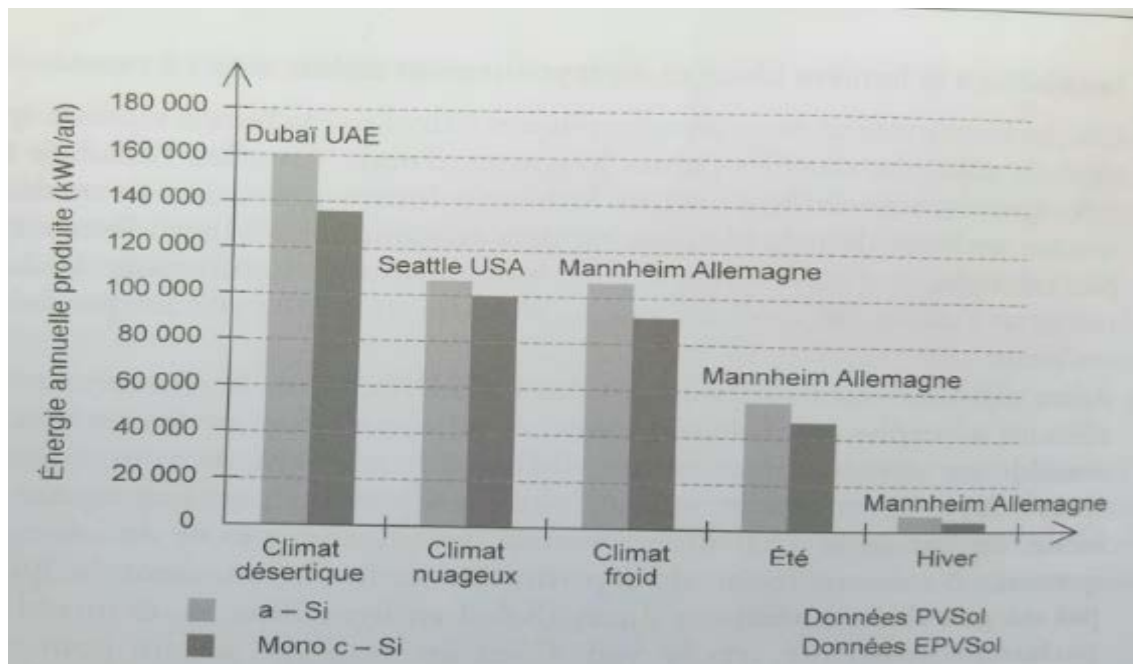


Figure I.8 : Production comparée du silicium amorphe et du silicium cristallin dans diverses situations climatiques [14].

5. Performances des cellules au silicium amorphe

5.1 Absorption optique et réponse spectrale

Ce qui différencie le silicium amorphe du silicium cristallin d'un point de vue optique, c'est surtout :

- Son gap optique plus élevé, de 1.77 eV ;
- Son absorption plus forte de la lumière visible.

En conséquence les cellules solaires sont beaucoup plus fines (0.2 à 0.5 μm d'épaisseur). Cette technologie consomme donc moins de matériaux ; et la réponse spectrale d'une simple jonction, représentée par la figure I.9, présente des valeurs élevées dans la partie bleu-verte et jaune du spectre visible jusqu'à 600nm, mais coupe plus tôt que le silicium cristallin dans le rouge : vers 1.77eV. Donc une fraction de la lumière rouge n'est pas correctement absorbée dans le silicium amorphe mais réfléchi par l'électrode arrière. C'est pourquoi les cellules au silicium amorphe ont souvent un aspect rouge foncé. L'amélioration de cette réponse se fait de différentes manières : l'amélioration de la réflexion optique du contact arrière (pour

générer un deuxième passage de la lumière dans le silicium), et surtout des structures multijonctions [14].

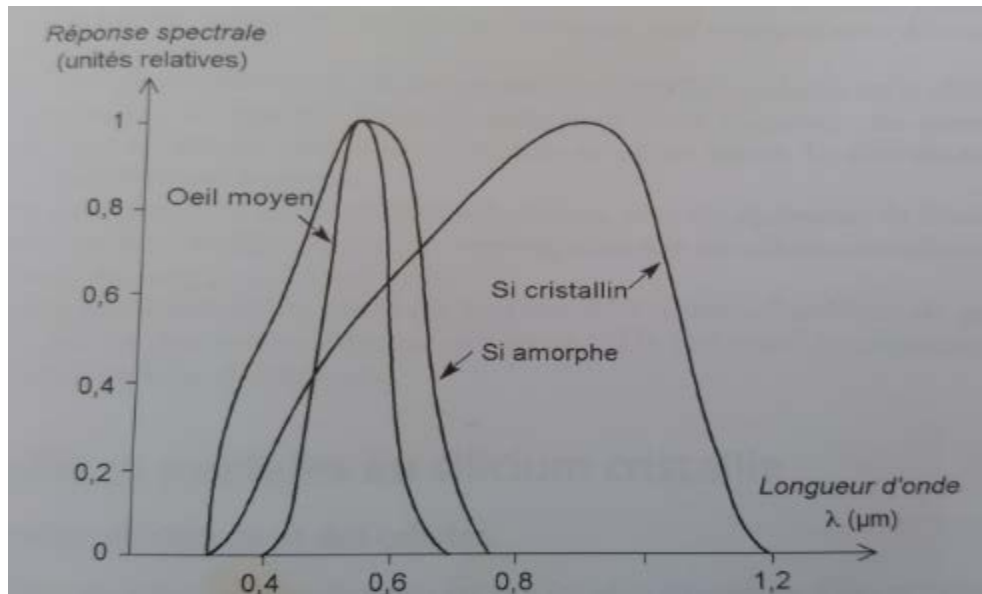


Figure I.9 : Réponses spectrales des différents types de cellules solaires [14].

5.2 Performance à fort éclairement

En condition normalisée STC (1000 W/m^2 $25 \text{ }^\circ\text{C}$, spectre solaire AM 1.5), on a comparé sur la figure I.10 les performances typiques d'une cellule au silicium cristallin et d'une cellule au silicium amorphe simple jonction.

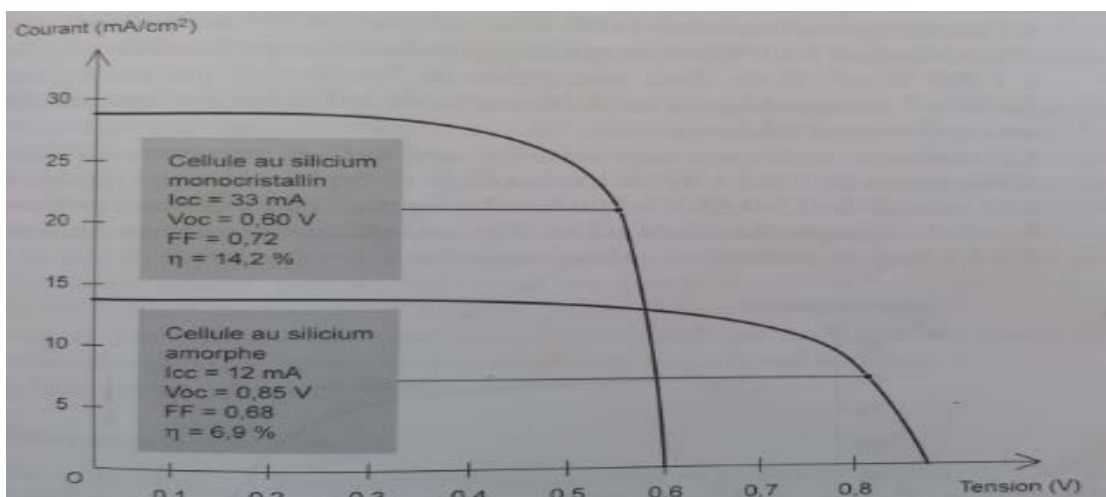


Figure I.10: Caractéristiques courant-tension comparées d'une cellule au silicium amorphe et d'une cellule au silicium cristallin (sous 1000 W/m^2 conditions STC) [14].

La cellule amorphe, grâce à son gap plus élevé (1,77 eV) que le silicium cristallin (1.1 eV), a une tension plus élevée, en circuit ouvert : 0.8 V comparée à 0.6 V pour la cellule au silicium cristallin. Mais son courant est nettement plus faible en raison d'une collecte des charges moins bonne: 13mA/cm² au maximum contre 30-35 mA/cm² pour le cristallin. Il en résulte qu'en fabrication industrielle, les panneaux amorphes ont un rendement STC de 6% à 7% en simple jonction, ce qui est moins performant que le silicium cristallin. C'est certes un handicap : à puissance crête identique (puissance mesurée dans des conditions STC), un panneau au silicium amorphe est typiquement deux fois plus grand qu'un panneau au silicium cristallin. Mais le silicium amorphe a d'autres atouts, dans des conditions qui ne sont pas normalisées, notamment :

- Sa tension baisse nettement moins que le silicium cristallin lorsque l'éclairement baisse.
- Sa tension baisse en général moins que le silicium cristallin lorsque la température s'élève.
- Il est plus sensible à la lumière bleue.
- Il est plus sensible aux rayonnements diffus [14].

5.3 Performances à faible éclairement

La baisse de la tension avec l'éclairement est beaucoup moins prononcée avec le silicium amorphe, qui peut fonctionner même à très faible éclairement. Sa tension de circuit ouvert chute seulement de 100mV par décade d'éclairement [14].S'il fournit 850 mV /cellule à 1000 W/m², il fournira 750mV /cellule à 100 W/m², et 650mV /cellule à 10 W/m², ce qui est équivalent à ce que la cellule cristalline donne à 1000W/m². Il est donc susceptible de fonctionner par temps très couvert à 10 W/m² correspondant à un éclairement de 1000 lux environ, très faible pour un rayonnement extérieur.

En ambiance intérieure, sous éclairage artificiel, on rencontre typiquement des éclairements de 100 à 1000 lux et la cellule amorphe est encore capable de fournir une tension de 0.5-0.55 V à 100 lux. La figure I.11 montre ces performances de la cellule amorphe à très faible flux, en intérieur comme en extérieur, jusqu'à 0.1 à 1% du rayonnement solaire normalisé[14].

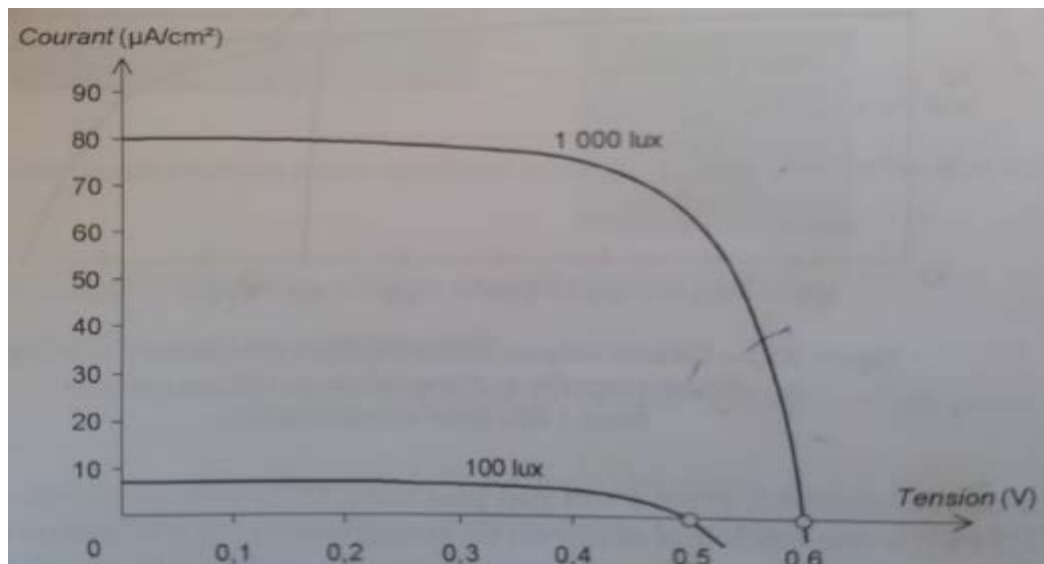


Figure I.11 : Courbes I(V) d'une photopile au silicium amorphe sous faible éclairage fluorescent [14].

6. L'effet Staebler-Wronski

Cet effet cause beaucoup de problèmes pendant le développement des cellules solaires à base de silicium amorphe. Il a été découvert en 1977 par Staebler et Wronski. Le phénomène suivant a été décrit par cet effet: Si l'on éclaire le silicium amorphe avec de la lumière blanche de $100 \text{ mW}/\text{cm}^2$, la photoconductivité et la conductivité à l'obscurité du matériau décroissent considérablement [15].

A l'état initial, c'est-à-dire avant toute exposition du a-Si :H à la lumière, les liaisons pendantes sont passivées ou saturées par les atomes d'hydrogène: elles n'agissent alors pas comme centres de recombinaisons. Sous l'effet de la lumière, le a-Si :H se dégrade lentement (effet Staebler-Wronski): des liaisons saturées par l'hydrogène sont alors brisées et simultanément de nouvelles liaisons pendantes sont créées. De nouveaux centres de recombinaisons apparaissent et la collection des porteurs photogénérés diminue [11].

Cette stabilisation est un phénomène spécifique aux matériaux amorphes: les performances de ces cellules baissent dans les premiers temps d'exposition. Connue chez les scientifiques sous le nom d'effet Staebler-Wronski, il est souvent appelé à tort « vieillissement ». En effet, il ne s'agit pas d'une dégradation permanente, mais d'un simple phénomène de « rodage »: le matériau, qui comme on le sait, comporte un certain nombre de défauts à l'échelle atomique, se dégrade pendant les premiers temps d'exposition

au soleil, elle chute de 20-25% pour une simple jonction et de 10-15% pour une multi-jonction[14], mais ensuite, les performances sont stables. Cette dégradation provient de certains défauts métastables, des défauts potentiels en quelque sorte, qui apparaissent sous illumination : des liaisons atomiques notamment.

Mais comme leur proportion est limitée, c'est un phénomène qui s'arrête assez rapidement (après quelque mois en extérieur). Les fabricants luttent contre ce phénomène en améliorant la qualité du matériau, mais il n'est pas possible de l'éliminer totalement. Cependant, comme l'ampleur de cette stabilisation dépend de l'épaisseur des jonctions, l'emploi des multi-jonctions est un moyen de lutter contre ce phénomène, et on arrive ainsi à faire baisser cette dégradation à 10-15% [14].

7. Les méthodes d'élaboration du silicium amorphe hydrogéné

La source qui constitue le matériau de base du film mince à élaborer peut être un solide, un liquide, une vapeur ou un gaz. Lorsque le matériau est solide, son transport vers le substrat s'effectue par vaporisation, ce qui peut être réalisé par: évaporation thermique, ou par pulvérisation ect. L'ensemble de ces méthodes est classé sous le nom de dépôt physique en phase vapeur PVD (Physical Vapor Deposition). La source solide est occasionnellement transformée en vapeur. Dans d'autre cas, le matériau de base est sous forme d'un gaz ayant une pression, cette vapeur est suffisante pour qu'il soit transporté à des températures modérées. Les procédés qui utilisent comme matériau de base les gaz, les liquides évaporés ou les solides évaporés par voie chimique sont connus sous le nom de dépôts chimiques en phase vapeur, CVD (Chemical Vapor Deposition)[16].

7.1 La pulvérisation cathodique

Le matériau à déposer appelé matériau cible est introduit dans l'enceinte à vide, sous forme d'une plaque de quelques millimètres d'épaisseur et de dimension sensiblement égale à celle de la pièce à recouvrir.

Cette cible est fixée sur une électrode (la cathode) qu'on porte à une tension négative. Une deuxième électrode (l'anode) est disposée parallèlement à la cible, à une distance de

quelques millimètres (figure I.12). Dans de nombreux cas l'anode sert de porte substrat, elle est généralement maintenue à la masse, le champ électrique créé entre les deux électrodes provoque l'ionisation du gaz. Un courant électrique s'établit entre les deux électrodes : le gaz est devenu conducteur, il contient alors :

- Des électrons, qui sont attirés par l'anode.
- Des ions positifs, qui sont attirés par la cible [7].

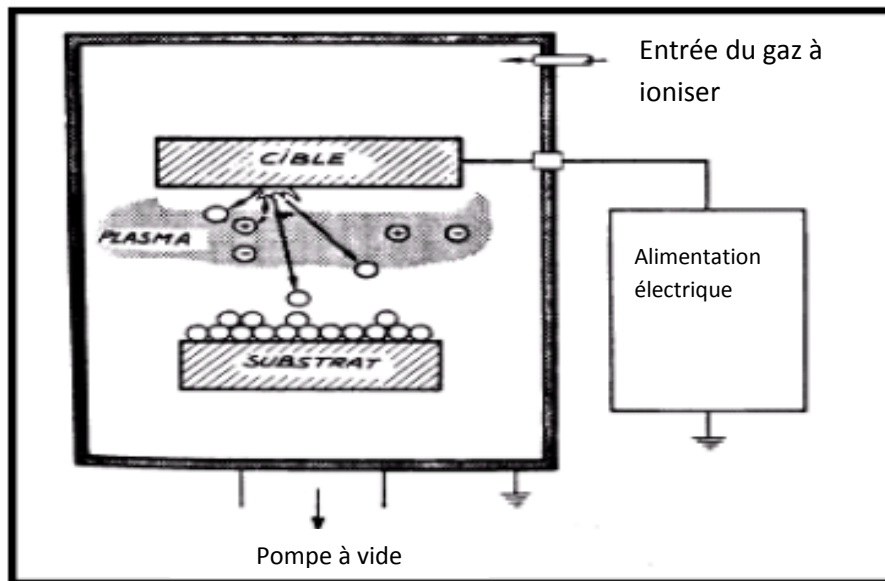


Figure I.12: Principe général de fonctionnement de la pulvérisation cathodique [16].

Les ions positifs bombardent et arrachent les atomes de la cible, qui vont se déposer sur l'anode. Le substrat placé devant la cible se recouvre progressivement d'une couche du même matériau que celui de la plaque constituant la cible [7].

7.2 La pulvérisation magnétron

Afin d'augmenter le taux d'ionisation, on utilise la pulvérisation magnétron qui consiste à placer un aimant sous la cible, dont le champ magnétique fait tourbillonner les électrons, ce qui augmente le taux d'ionisation du plasma. Par conséquent, les vitesses de dépôt sont élevées, tout en minimisant l'échauffement du substrat (figure I.13)[16].

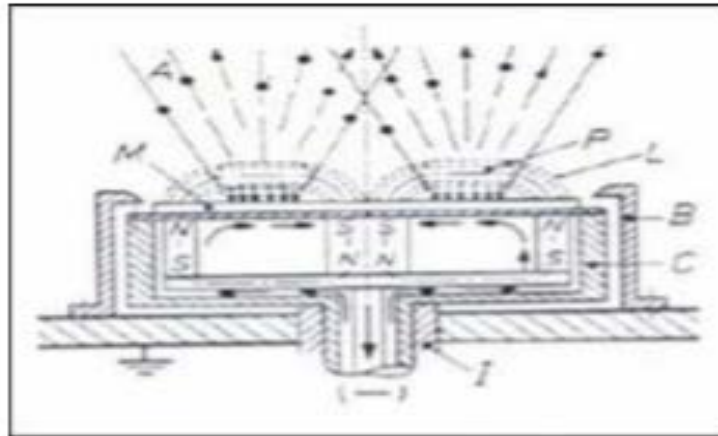


Figure I.13 : Structure d'une cathode magnétron circulaire[7].

7.3 Technique d'évaporation sous vide

L'évaporation est une technique d'obtention des films qui consiste à évaporer ou sublimer un matériau déposé dans un creuset sous vide en le chauffant à haute température. Les procédés de chauffage jusqu'à évaporation sont multiples, on trouve le chauffage électrique par l'intermédiaire d'une résistance (effet joule), par induction d'un champ magnétique, par bombardement électronique et par laser (figure I.14)[8].

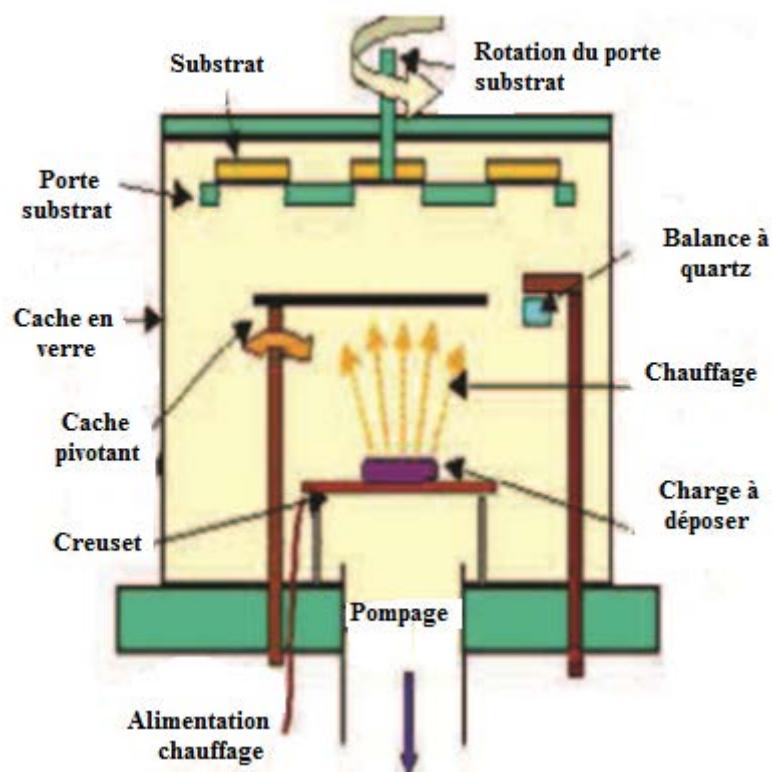
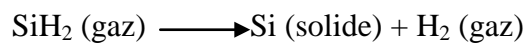


Figure I.14 : Bâti de dépôt par évaporation thermique sous vide [8].

7.4 Le dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma (PECVD)

Cette technique consiste à réaliser un dépôt chimique en phase vapeur à basse pression (figure I.15). Ce dépôt s'effectue normalement dans un four à mur chaud à des températures de l'ordre de 600°C[16]. Le gaz réactif est ionisé par formation d'un plasma généré par un champ électrique alternatif d'une fréquence de 13.56 MHz (cas général).

Turban a étudié en détail les mécanismes de dissociation du silane dans un tel plasma :



Les produits de cette réaction sont des ions d'hydrures de silicium qui vont venir réagir à la surface d'un substrat porté à une température d'environ 250 °C pour éviter de briser les liaisons Si-H. Du fait de la faible température de la surface de dépôt, l'hydrogène n'exo-diffuse pas et par conséquent le matériau obtenu est hydrogéné. D'autre part, toujours à cause de la relative basse température du substrat, les conditions généralement utilisées aboutissent à un dépôt amorphe[7].

Le rôle du plasma est de mettre en jeu des espèces chimiquement plus actives ce qui permet d'abaisser la température du substrat nécessaire pour induire la réaction chimique. Ces espèces sont produites :

- Soit par des collisions entre les molécules de gaz et les électrons énergétiques présents dans le plasma.
- Soit à la surface du solide lors de l'impact ions-électrons ou de photons issus du plasma (Figure I.15)[16].

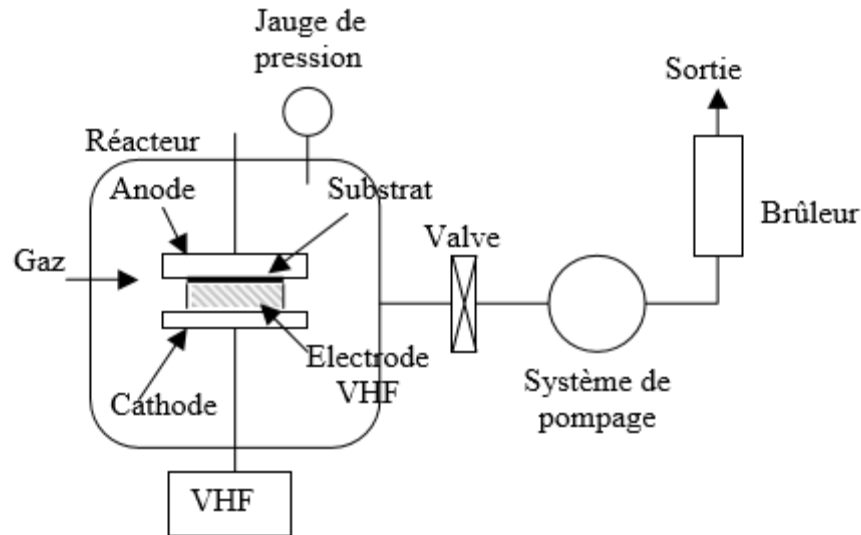


Figure I.15: Représentation schématique d'un système de dépôt par PECVD[11].

Conclusion

Dans ce chapitre, il était question d'aborder le matériau de base de la cellule solaire qui est le silicium dans ses différentes technologies (cristallin, multicristallin et amorphe). Un intérêt particulier a été porté au silicium amorphe et au rôle de l'hydrogène dans ce dernier, à savoir, la passivation des liaisons pendantes présentes dans ce type de silicium. Les propriétés électroniques et optiques de ce matériau, ses avantages et ses inconvénients ont été présentés. L'effet Staebler-wronski (sous illumination) a été, également, expliqué.

Nous avons aussi détaillé les principales méthodes utilisées pour l'élaboration de ce matériau (méthode physique : pulvérisation cathodique, évaporation thermique sous vide et la méthode chimique : PECVD).

Nous en concluons que le silicium amorphe présente de bonnes propriétés optoélectroniques en permettant un bon fonctionnement en cellules et modules photovoltaïques même aux faibles éclaircissements et aux températures élevées.

Chapitre II

Physique des cellules solaires à base de silicium amorphe

Introduction

Dans ce chapitre nous présentons des généralités sur la source de l'énergie solaire (le soleil) et des notions fondamentales sur l'élément clé dans la conversion photovoltaïque (la cellule solaire).

1-Energie renouvelable

L'énergie qui nous vient du Soleil représente la quasi-totalité de l'énergie disponible sur terre. Outre l'apport direct sous forme de lumière et chaleur, elle est à l'origine de la biomasse, du cycle de l'eau, des vents, des courants océaniques, et, sous forme stockée durant des millions d'années de nos réserves de gaz, pétrole et charbon.

Les seules ressources énergétiques non solaires sont la chaleur de la terre (géothermie), les marées et l'énergie nucléaire.

L'énergie du soleil est produite par les réactions de fusion thermonucléaire : les noyaux d'hydrogène (protons) s'assemblent en noyaux d'hélium (deux protons+deux neutrons). Cette énergie est émise dans l'espace par la surface du Soleil, notamment sous forme d'ondes électromagnétiques dans le domaine visible, ultra-violet et infrarouge, donc beaucoup de lumière.

2-Rayonnement solaire

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est partiellement absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs composantes :

2-1-Le rayonnement direct : est reçu du soleil en ligne droite, sans diffusion par l'atmosphère. Ces rayons sont parallèles entre eux ; le rayonnement direct forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs.

2-2-Le rayonnement diffus : est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent cet « éclatement » des rayons du soleil. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques. Par temps couvert, on admet que le rayonnement diffus est isotrope, c'est –

à-dire qu'on reçoit un rayonnement identique de toutes les directions de la voûte céleste. Par temps clair ou voilé, outre le ciel bleu relativement isotrope (diffusion sur l'air), on a une couronne plus brillante autour du soleil (composante appelée circumpolaire) et souvent un renforcement sur l'horizon, la bande horizon [20].

2-3-L'albédo : est la partie réfléchie par le sol. Il dépend de l'environnement du site. La neige, par exemple, revois énormément de rayons lumineux alors qu'un asphalte n'en revoie pratiquement aucun. Il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés[14].

2-4-Le rayonnement global : est tout simplement la somme de ses diverses contributions, comme le montre la figure II.1 ci-dessous.

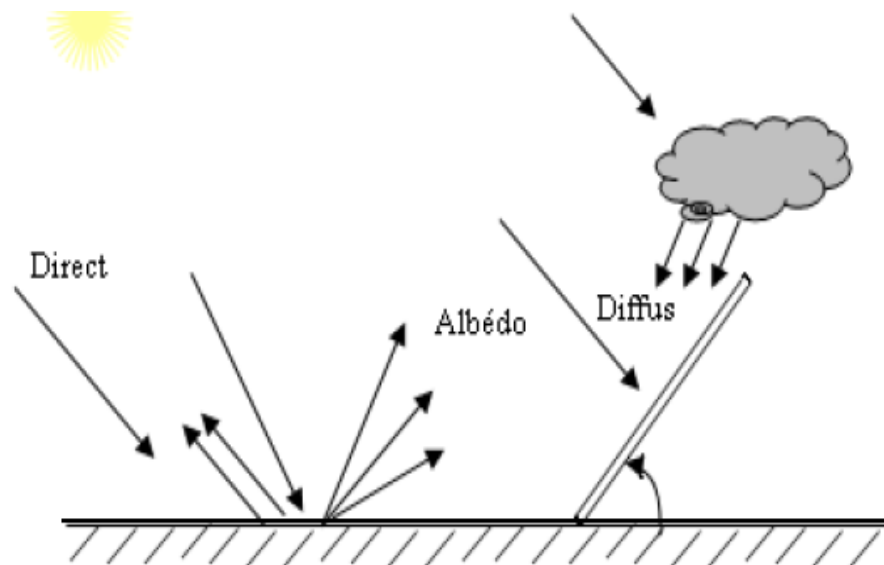


Figure II.1 : Composantes de rayonnements solaires au sol [21].

On appelle rayonnement direct normal, le rayonnement direct mesuré perpendiculairement aux rayons du soleil. Mesuré selon un plan non perpendiculaire, le même rayonnement irradie une plus grande surface, il est donc moins intense, c'est ce que l'on appelle « l'effet cosinus ».

C'est ce qui fait notamment que le rayonnement direct sur un plan horizontal est toujours inférieur au rayonnement dans le plan perpendiculaire au soleil. En revanche, le rayonnement diffus peut être supérieur vu que le plan horizontal voit une plus grande part de

la voûte céleste. Cela mène les concepteurs d'alimentation solaire à installer à l'horizontale des panneaux solaires performants sous rayonnements diffus, spécialement sur des sites géographiques qui sont très souvent à ciel couvert [21].

3-Masse d'air :

Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur d'atmosphère et plus elle va subir de transformations.

On appelle masse d'air, ou Air Mass en anglais, le rapport entre l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu (figure II.2).

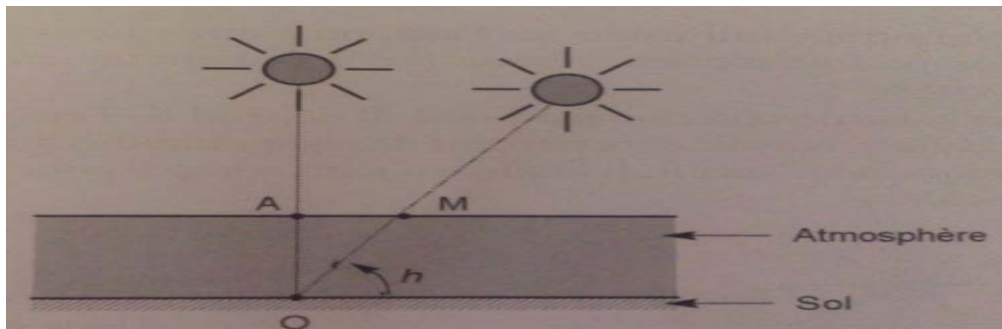


Figure II.2 : Définition de l'Air Mass [22].

Cela dépend surtout de la hauteur angulaire h du Soleil. A l'aide des points O, A et M et cet angle h représenté à la figure II.2, on écrit la longueur du trajet du Soleil à travers l'atmosphère [22]:

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

donc l'Air Mass $\frac{OM}{OA} = \frac{1}{\sin h}$

Dans l'expression AM_x , x désigne ce rapport OM/OA .

AM 1.5 : soleil à 41.8° –choisi comme référence pour le photovoltaïque.

On appelle STC (Standard Test Conditions), des conditions normalisées de test de panneaux solaires. Celles-ci sont caractérisées par un rayonnement de 1000 W/m^2 , un spectre solaire AM1.5 et 25°C .

4-L'effet photovoltaïque :

Découvert par Becquerel en 1839, l'effet photovoltaïque (figure II.3), provoque sur certains matériaux, l'émission d'une petite quantité d'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Pour cela il faut d'abord que l'énergie des photons incidents soit transmise à des porteurs de charge (électrons ou trous) dans le matériau.

Dans un atome isolé, les électrons ne peuvent pas prendre n'importe quelle énergie. Les règles de distribution des niveaux énergétiques ont été énoncées par Niels Bohr en 1913. Lorsque les atomes sont rassemblés pour former un solide, les niveaux discrets de chaque atome se différencient pour former des bandes continues d'énergie. C'est ce qu'on appelle la structure de bande des solides. Dans un semi-conducteur, ces bandes sont appelées la bande de valence (BV) et la bande de conduction (BC) et sont séparées par un gap d'énergie interdite (E_G).

A l'équilibre les électrons possèdent une énergie correspondant à des états situés dans la BV et sont dits « liés ». Lorsqu'un photon interagit avec un électron, il transfère intégralement son énergie à ce dernier, à la condition que le niveau énergétique final de l'électron soit autorisé et libre. Ainsi, un photon incident dont l'énergie est supérieure à E_G du matériau permettra le passage d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction. Il y a alors création d'une paire électron/trou (e/h) constituée de l'électron « excité » de la BC et de la lacune créée dans la BV par la transition électronique. Leur déplacement dans le matériau est alors possible [23].



Figure II.3 : Effet photovoltaïque (PV).

5-Structure d'une cellule PV :

Une cellule photovoltaïque peut être schématiquement représentée par une couche supérieure d'interface avec l'extérieur, le plus souvent du verre, d'une couche antireflet, d'un contact électrique avant, d'une jonction, d'un contact arrière et d'un substrat.

5-1-Couche d'interface avec l'extérieur :

Cette couche doit protéger la cellule photovoltaïque des conditions extérieures tout en laissant passer la lumière. Elle doit notamment être étanche et résistante à des expositions longues aux radiations ultraviolettes et à des cycles de température importants. Les verres trempés à très faible teneur en fer sont les matériaux de choix pour ces couches d'interface avec l'extérieur en raison de leur faible coût, de leur résistance ainsi que de leur capacité à se nettoyer facilement [28].

5-2-Couche antireflet :

L'utilisation de couches anti-réfléchissantes permet de réduire la réflectivité de la cellule au niveau de la face avant [28]. Cette couche vise à éviter qu'une partie de l'énergie potentiellement disponible ne soit réfléchi par le matériau utilisé dans la jonction. Dans le cas du silicium massif par exemple un cinquième de la puissance lumineuse à 600 nm est

réfléchi par l'interface entre le silicium et l'air. Toutefois, comme on vient de le voir, les matériaux constituant la jonction ne sont pas directement en contact avec l'extérieur. Les verres trempés ont un indice optique de l'ordre de 1,5 et assurent ainsi une partie de l'adaptation d'indice nécessaire à une minimisation de la réflexion. Dans le cas des dispositifs en couches minces, l'électrode supérieure transparente peut jouer seule ou en multicouches le rôle d'adaptation d'indice.

Afin de maximiser l'effet antireflet, l'épaisseur de la couche ou des couches doit être de l'ordre du quart de la longueur d'onde correspondant au gap du matériau composant la jonction. Pour des cellules fonctionnant dans le visible, ces épaisseurs varient de 100 à 200 nm. Ainsi des transmissions de plus de 90 % sont réalisées [29].

5-3-Texturisation de surface :

En supplément aux couches antireflet, des cônes et des pyramides sont ainsi créés et réfléchissent vers la cellule et dans des directions non normales au plan de la cellule les rayons lumineux qui seraient sinon ressortis et qui ont ainsi une nouvelle chance d'être absorbés (figure II.4). Cette solution présente toutefois un inconvénient majeur, des surfaces présentant ce type de traitement tendent à devenir sales plus rapidement étant moins lavées par la pluie.

Plusieurs types de texturisations sont possibles (alcaline, acide, plasma, mécanique). La texturisation par plasma utilise des réactifs à base de chlore (BCl_3 , Cl_2) ou de fluor (SF_6 , CF_4)[28]. Cette technique présente actuellement un intérêt de plus en plus important car elle limite la consommation de produits chimiques. Elle peut prétendre à des qualités de texturisation excellentes, à une diminution du taux de casse (contraintes mécaniques réduites) et à une plus grande flexibilité du procédé de fabrication. Néanmoins, une utilisation massive de cette technique requiert des précautions adaptées car les gaz résidus sont des gaz à effet de serre (nécessité de retraiter des gaz, amélioration des réacteurs...)[24].

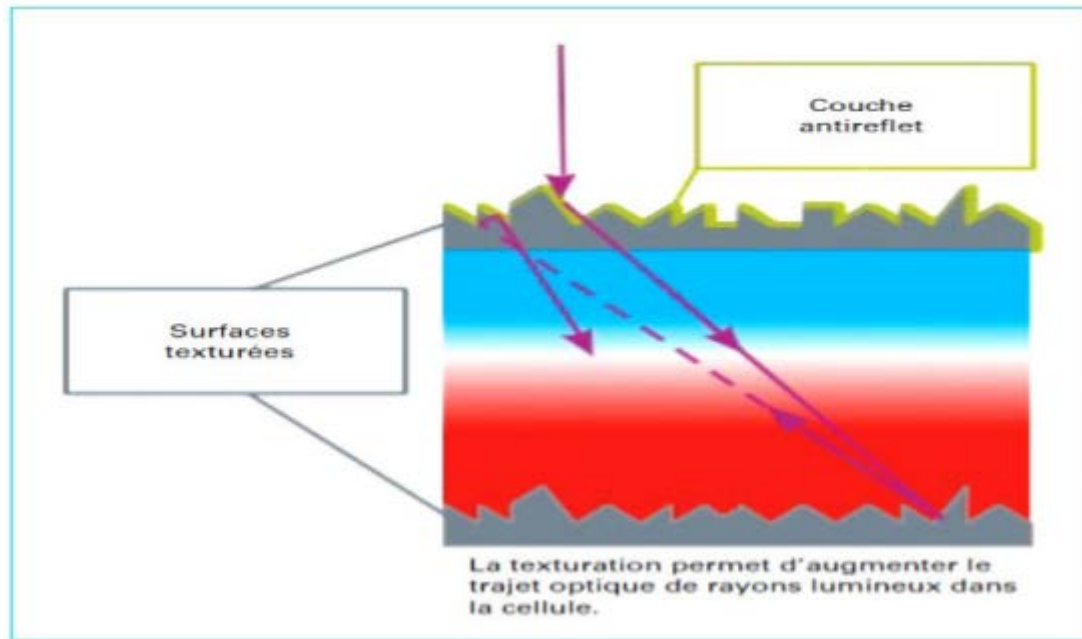


Figure II.4: Texturation de la surface d'une cellule solaire[29].

5-4-Contacts :

Les matériaux utilisés pour les contacts servent tout d'abord à collecter les porteurs de charge. Néanmoins, ils peuvent également assurer d'autres fonctions.

a. Contact supérieur :

Le contact supérieur doit être transparent afin de laisser passer la lumière et bien sûr conducteur. Son épaisseur doit donc être contrôlée précisément afin de maximiser le flux de photons incidents ayant une longueur d'onde adéquate. Des oxydes conducteurs tels que ZnO ou SnO₂ sont par exemple communément employés. Si ses propriétés (notamment mécaniques) lui permettent, il peut éventuellement également servir de couche d'interface avec l'extérieur. Si des contacts non transparents sont utilisés, Il faut donc choisir un métal ayant une faible résistance de contact ohmique et trouver le bon compromis entre des contacts épais permettant une bonne conduction et des contacts fins permettant de minimiser l'écrantage du rayonnement solaire[29] .

b. Contact inférieur :

Les contraintes technologiques sur les contacts inférieurs ou arrière sont moindres. En effet, le matériau utilisé n'a pas besoin d'être transparent et la tolérance vis-à-vis de la diffusion dans le semi-conducteur est plus grande. Néanmoins, ce matériau doit avoir une faible résistance thermique afin de minimiser les contraintes mécaniques dues aux cycles thermiques que va subir la cellule. De plus, il doit, bien sûr, être étanche. Ce contact inférieur ou arrière est souvent réalisé en aluminium ou en molybdène recouvert à l'extérieur d'un film polymère fait en Tedlar. Dans ce cas, la diffusion du métal dans le semi-conducteur permet d'assurer une forte cohésion de l'ensemble. Par ailleurs, en réfléchissant les photons incidents qui auraient traversé la jonction, cette couche métallique permet d'augmenter l'efficacité de la cellule [29].

6-Circuit électrique équivalent :

Une cellule photovoltaïque, non éclairée et polarisée par une tension V , est soumise à une réponse exponentielle se rapprochant de celle d'une diode. La densité de courant I , suit l'équation de Shockley[1]:

$$I_{obs} = I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

où :

I_s : est la densité de courant de saturation sous polarisation inverse.

q : la charge élémentaire.

kT : l'énergie thermique.

n : le facteur d'idéalité de la diode.

6-1-Cas d'une cellule solaire idéale :

Cette même cellule photovoltaïque polarisée sous une tension V et soumise à un rayonnement est alors le siège d'un courant supplémentaire I_{ph} et se comporte comme un générateur de courant (cellule solaire idéale, figure II.5). Le courant photogénéré I_{ph} circule dans le sens inverse de la diode. Si bien que l'équation (2) s'en trouve modifiée[13] :

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right] \quad (3)$$

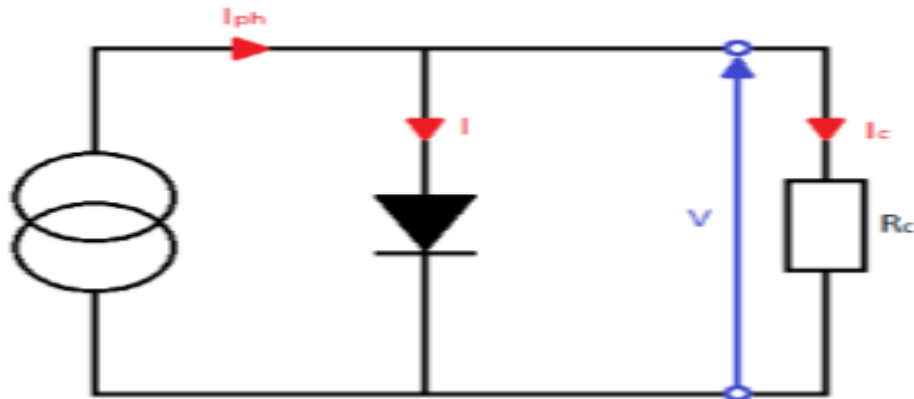


Figure II.5: Schéma équivalent d'une cellule solaire idéale[13].

Cependant, les équations précédentes ne sont valables que pour des dispositifs idéaux.

6-2-Cas d'une cellule réelle :

Afin de modéliser le fonctionnement réel d'une cellule photovoltaïque inorganique, il est nécessaire de modifier le circuit équivalent en introduisant deux résistances R_s (résistance série) et R_p (résistance parallèle) que nous allons définir par la suite (Figure II.6).

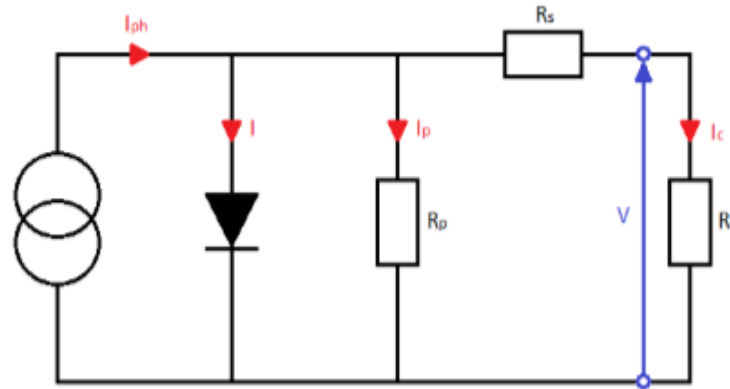


Figure II.6: Schéma équivalent d'une cellule solaire réelle [13].

L'équation (4) représente celle de la cellule réelle [22] :

$$I(V) = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{q(V + I.R_s)}{nKT}\right) - 1 \right] - \frac{V - I.R_s}{R_p} \quad (4)$$

7-Influence des résistances série R_s et parallèles R_p :

7-1 -Influence de la résistance série R_s :

La résistance série caractérise les pertes par effets Joule de la résistance propre du semiconducteur et les pertes à travers les grilles de collectes et les mauvais contacts ohmiques de la cellule. Les contacts semiconducteur-électrodes à résistance élevée abaissent appréciablement la tension et le courant de sortie ce qui va limiter le rendement de conversion.

7-2- Influence de la résistance parallèle R_p :

La résistance parallèle (ou shunt) caractérise les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structuraux du matériau, épaisseurs des régions N et P et de la zone de charge et d'espace. L'existence de fissures et de défauts de structures complexes devient le siège de phénomène physique assimilable aussi à une résistance parallèle R_p .

L'ordre de grandeur de la résistance parallèle pour une cellule au silicium (Si) : $R_{sh} = 10^2$ à $10^4 \Omega$ [25]. R_{sh} augmente avec le groupement série de cellules solaires et diminue avec une connexion parallèle.

8- Caractéristique I-V d'une cellule solaire :

La caractéristique I-V d'une cellule solaire est la superposition de celle de la diode sous obscurité et du courant photogénéré (figure II.7) :

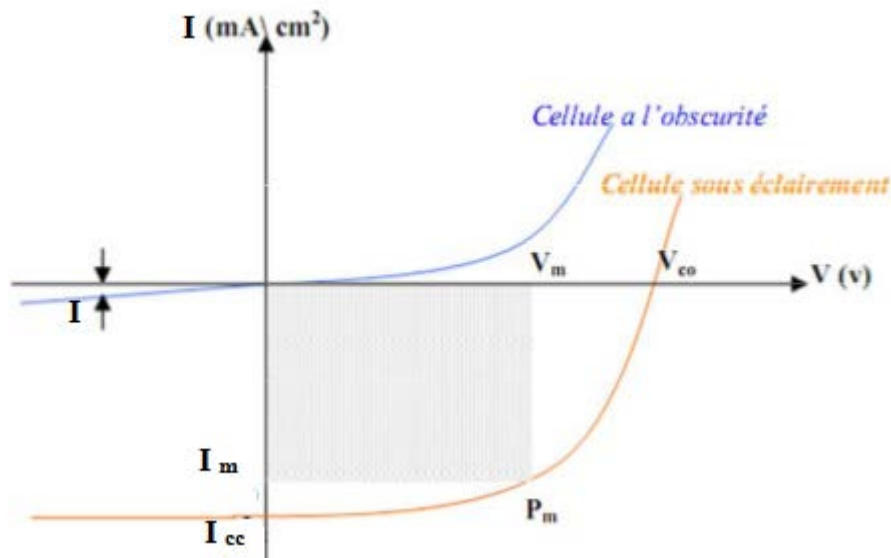


Figure II.7: Caractéristique courant -tension sous obscurité et sous éclairement d'une cellule solaire [22].

Pour la jonction à l'obscurité la caractéristique I-V passe par l'origine. Le produit $V.I > 0$ donc elle absorbe tout le temps de l'énergie.

Pour la cellule solaire sous éclairement, la caractéristique I-V ne passe pas par l'origine. Dans la région hachurée le produit $V.I < 0$ donc la cellule fournit de l'énergie [22].

9- Paramètres photovoltaïques de la cellule solaire :

La caractéristique $I(V)$ (figure II.8) de la cellule solaire permet de déduire les paramètres photovoltaïques propres à la cellule :

- Le courant de court circuit (obtenu pour $V=0$).
- La tension du circuit- ouvert (obtenu pour $I=0$).
- Le facteur de forme FF .
- Le rendement de conversion

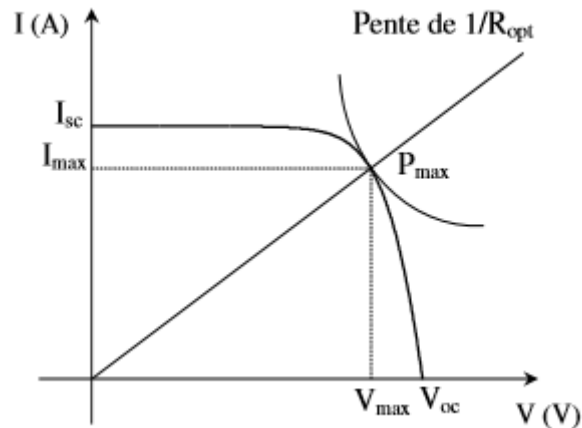


Figure II.8 : Point maximal de puissance d'une cellule élémentaire[23].

9-1-Le courant de court- circuit I_{cc} :

Le courant de court-circuit est celui qui circule dans une cellule soumise à un flux de photons sans application de tension ($V=0$). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température. On le mesure en branchant les bornes de la cellule directement à un ampèremètre[23].

9-2-La tension du circuit-ouvert V_{co} :

Si on place une photopile sous une source lumineuse constante, sans aucun récepteur on obtient à ses bornes une tension continue, dite tension circuit-ouvert (obtenu pour $I=0$).

Cette tension est généralement de l'ordre de 0.5 à 0.7 V pour les cellules élémentaires (elle dépend du matériau, de la technologie et de l'éclairement). Elle exprime le nombre de porteurs créés par chaque photon incident.

V_{co} est donnée par la relation[26] :

$$V_{co} = nV_{th} \log\left(1 + \frac{I_{ph}}{I_s}\right) \quad (5)$$

9-3-La puissance maximale P_m :

La puissance maximale d'une cellule photovoltaïque éclairée est la grandeur essentielle pour évaluer sa performance; elle est donnée par la relation :

$$P_m = I_m \cdot V_m \quad (6)$$

Elle traduit sur la caractéristique I-V le point du fonctionnement $P_m (V_m, I_m)$ qui est situé au coude de la caractéristique I-V, il est dit point de puissance maximale où les valeurs de tension V_m et du courant I_m appelées également tension et courant maximums respectivement[23].

9-4-Le facteur de forme FF :

Le facteur de forme est un paramètre qui caractérise la qualité de la cellule ; il est défini par le rapport de la puissance maximale générée à la puissance optimisée[26].

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} \cdot V_{co}} = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (7)$$

9-5- Le rendement :

C'est le rendement énergétique externe de conversion de puissance. Il est défini par la relation suivante:

$$\eta = \frac{I_m \cdot V_m}{P_{incidente}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{oc}}{P_{incidente}} \quad (8)$$

Ce rendement peut être optimisé en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. C'est un paramètre essentiel, car la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule[23].

9-5-1-Types et rendements des cellules photovoltaïques :

Il existe différents types de cellules solaires (ou cellules photovoltaïques), et chaque type de cellules a un rendement et un coût qui lui est propre (figure II.9). Cependant, quel que soit leur type, leur rendement reste assez faible: de 8 à 23% de l'énergie qu'elles reçoivent. Il existe trois principaux types de cellules à base de silicium à l'heure actuelle (silicium amorphe, silicium polycristallin, silicium monocristallin).

Le tableau suivant (1-1) présente les différents types des cellules avec leurs rendements.

Tableau 1-1. Les différents types des cellules avec leur rendement[27].

Technologie de cellules	Rendement en laboratoire	Rendement production
Silicium amorphe (a-Si)	13%	5-9%
Silicium polycristallin (p-Si)	19,8%	11 à 15 %
Silicium monocristallin (m-Si)	24,7%	13 à 17%

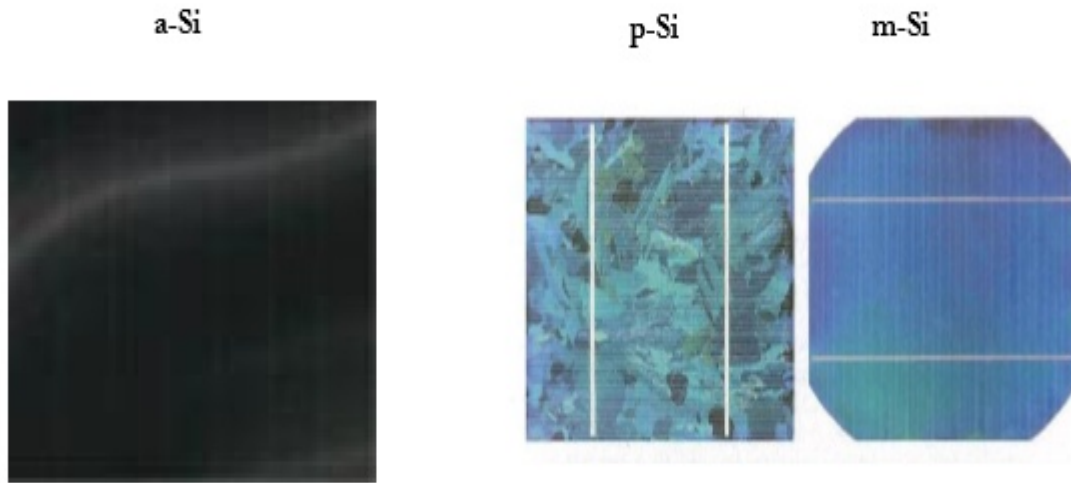


Figure II.9: Les images de différents types de cellules photovoltaïques.

Le rendement de la cellule PV est donné par la relation :

$$\eta_{STC} = \frac{P_m}{E_{STC} \times S_{cellule}} \quad (9)$$

η_{STC} : Le rendement de la cellule photovoltaïque.

P_m : La puissance produite par le générateur PV.

E_{STC} : L'éclairement absorbé par la cellule.

$S_{cellule}$: La surface de la cellule [m²].

Ce rendement dépend de plusieurs facteurs :

- Réflexion à la surface.
- Température de jonction des cellules.
- Type de matériau utilisé et technique de fabrication.
- La résistance série et parallèle responsables des pertes par effet Joule.
- Absorption incomplète et excès d'énergie des photons absorbés.

10- Structure d'une cellule solaire en silicium amorphe hydrogéné a-Si: H :

Le seul matériau communément utilisé sous forme massive pour réaliser des jonctions p/n dans les cellules photovoltaïques est le silicium. Il est également utilisé sous forme de couches minces sous différentes formes (amorphe, microcristallin, etc.). La cellule amorphe a une structure de type p-i-n qui se diffère de la structure p-n trouvée dans les cellules cristallines par la couche intrinsèque i. Dans le cas des couches minces, les électrodes sont toujours des oxydes conducteurs transparents (TCO). Les matériaux les plus couramment utilisés sont ZnO, SnO₂, Cd₂SnO₄; ce dernier présentant la meilleure conductivité et la meilleure transparence, mais la présence de cadmium constitue un handicap majeur. On a mentionné précédemment que les couches minces de silicium amorphe sont soumises à l'effet Staebler-Wronski qui entraîne une diminution des performances de la cellule lorsqu'elle est illuminée pendant un temps donné avant que ses performances ne se stabilisent. Une façon de limiter cet effet est de tirer partie du fort taux d'absorption du silicium amorphe pour réaliser des multicouches. On parle alors de cellule p-i-n (figure II.10) où la couche supérieure est une couche de moins de 10 nm d'épaisseur dopée p. Cette épaisseur réduite permet à la lumière de la traverser pour générer des porteurs dans la couche intermédiaire qui est une couche intrinsèque plus épaisse [30].

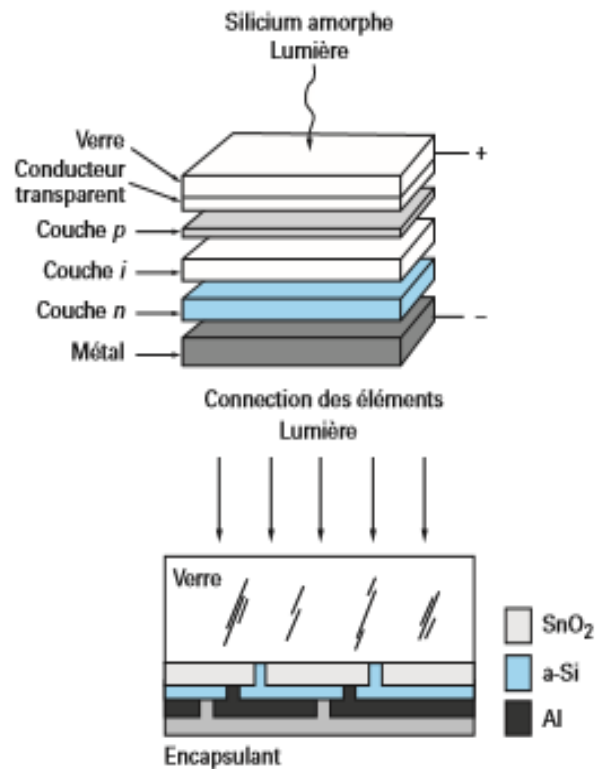


Figure II.10 : Architecture d'une jonction p-i-n[31].

Enfin, une couche dopée n de 20 nm est déposée dessous. Ces couches n et p vont générer des charges et donc un champ électrique dans la couche intrinsèque, entraînant de ce fait les porteurs générés dans la couche intrinsèque vers les électrodes. Des architectures plus évoluées à base d'empilement de jonctions p-i-n permettent de réduire l'épaisseur de la couche intrinsèque qui est responsable des dégradations de performances liées à l'effet Staebler-Wronski. Ces empilements nécessitent l'introduction de jonctions tunnels entre les jonctions p-i-n adjacentes afin d'éviter l'effet bloquant de la jonction p-n inverse qui se crée entre la partie inférieure n d'une jonction p-i-n et la partie supérieure p de la jonction p-i-n [30].

a. Jonction p-i-n :

La structure type d'une cellule photovoltaïque au silicium amorphe ne peut pas être basée sur une simple jonction p-n . En effet, de telles jonctions ne présentent pas l'effet redresseur habituel ; à cause de la densité d'états importante dans le gap, elles ont plutôt un comportement de contact ohmique auquel s'additionne un fort courant tunnel comme cela est

indiqué sur la figure II.11. Mise à part les structures MIS pas très performantes, la seule structure qui ait les propriétés d'une diode est la jonction p-i-n[29].

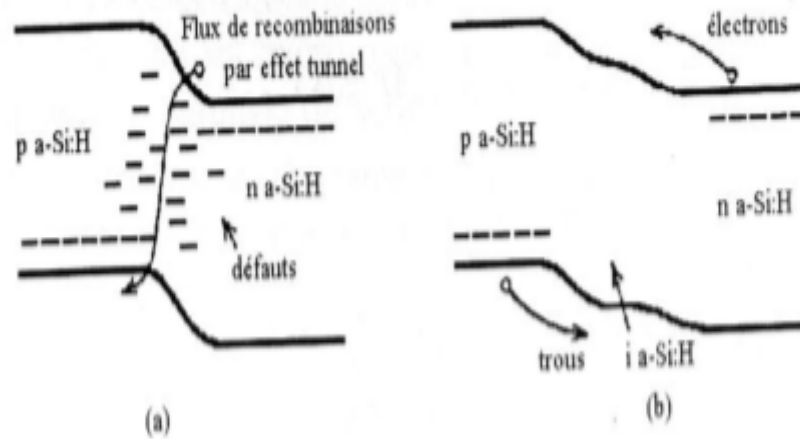


Figure II.11 : (a) la jonction p-n n'a pas de caractère redresseur dans le cas de a-Si :H, (b) la structure pin présente un effet redresseur[29].

b. Modules à multiples jonctions :

Les recherches menées dans le but de minimiser la dégradation des cellules sous la lumière ont fini par aboutir en donnant une nouvelle architecture au dispositif, il s'agit des cellules à jonction multiples; en effet on double ou on triple le nombre des jonctions en utilisant des matériaux à gap différents pour mieux absorber les différentes longueurs d'ondes du spectre visible.

Non seulement cette architecture a permis de trouver la solution à un inconvénient majeur, mais en plus elle a la particularité d'avoir un rendement quantique étendu dans le rouge.

Cependant, on trouve des complications lors de réalisation de ce dispositif comme avoir de fortes recombinaisons entre les mailles des matériaux afin d'éviter des interfaces défectueuses et aussi un bon appariement des courants vu que les cellules sont empilées en séries[30].

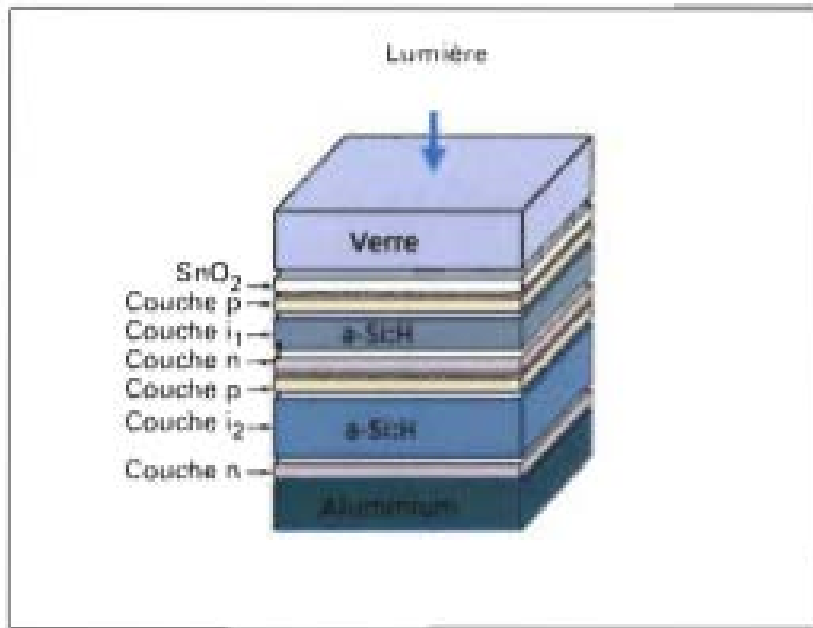


Figure II.12:Module d'une cellule à jonction multiple[31].

Le rendement le plus élevé dans la technologie du silicium amorphe a été réalisé en laboratoire par United Solar qui a été de 13%[30], obtenu par une cellule à triple jonction de petite surface, mais malgré le faible rendement obtenu on donne toujours beaucoup d'importance à cette filière de silicium amorphe dû à son faible coût de fabrication.

L'amélioration de ces performances ainsi que la réduction du coût de silicium ont fait qu'actuellement cette technologie domine l'industrie du photovoltaïque en couches minces.

11-Principe de fonctionnement d'une cellule solaire de structure p-i-n :

Le principe de base d'une cellule solaire faite avec un matériau semi-conducteur comme le silicium amorphe ou microcristallin consiste en une jonction p-i-n, c'est-à-dire, une zone de silicium dopée p - une zone de silicium non dopée (intrinsèque) - une zone de silicium dopée n . La Figure II.13 schématise le fonctionnement d'une cellule solaire de ce type.

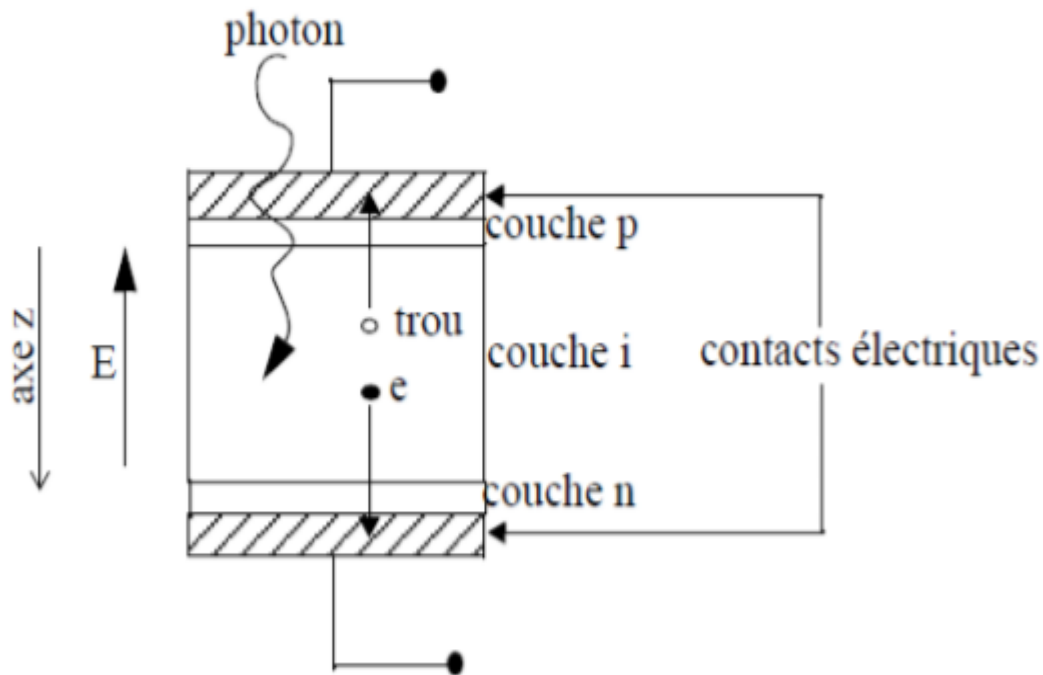


Figure II.13: Principe de fonctionnement d'une cellule solaire en silicium amorphe[29].

Lorsqu'un photon d'énergie supérieure au gap du silicium atteint la zone intrinsèque, il est absorbé pour créer une paire "électron-trou". Un courant électrique est alors généré par la séparation de cette paire "électron-trou", en direction des deux bornes opposées de la cellule. Cette séparation se fait sous l'action du champ électrique présent dans la zone de silicium intrinsèque. Le trou et l'électron créés dans la couche "i" doivent traverser les couches de silicium dopées ("p" et "n") avant d'atteindre les bornes de la cellule solaire. Malheureusement, ces couches dopées de silicium amorphe possèdent énormément de "défauts" divers qui provoquent la recombinaison des électrons et trous dans ces couches avant que ceux-ci aient pu atteindre les bornes de la cellule. C'est pourquoi on donne à ces couches dopées le moins d'épaisseur possible. Deux couches conductrices de courant placées aux bornes de la cellule vont récupérer les électrons et les trous qui n'auront alors plus beaucoup de risques de se recombinaison[29].

12-Fabrication d'une cellule solaire :

Le silicium produit en couches minces est à la base de nature amorphe car de structure désordonnée, de type vitreuse. L'organisation des atomes n'est plus régulière comme dans un cristal, elle est déformée, et l'ordre cristallin n'est maintenu qu'à courte distance (deux à trois liaisons atomiques). Le matériau comporte alors des distorsions, des petites cavités, et lorsque les atomes ne sont liés qu'à trois autres atomes au lieu de quatre, cela crée des liaisons non satisfaites ou liaisons pendantes.

Le silicium amorphe pur n'est donc quasiment pas semi-conducteur, il contient trop de défauts, et on ne peut pas le doper. Mais dès lorsqu'il est produit à partir du gaz silane (SiH_4), ce qui est le cas général, il contient une proportion importante d'hydrogène (5 à 10%) qui va se lier à ces liaisons pendantes, réduisant considérablement la densité de défauts et permettant la collecte des charges et le dopage du matériau. Ce matériau est donc une sorte d'alliage amorphe de silicium et d'hydrogène que les scientifiques écrivent a-Si:H (silicium amorphe hydrogéné). Cet alliage présente un gap plus élevé que le silicium cristallin: 1.77eV, et absorbe la lumière beaucoup plus fortement : une couche de $1\mu\text{m}$ d'épaisseur suffit à capter le rayonnement reçu sur terre. En pratique l'épaisseur des jonctions peut descendre jusqu'à 0.2-0.3 μm [14].

La technique la plus courante pour fabriquer les cellules au silicium amorphe est le dépôt par plasma. Les couches sont produites directement à partir du gaz silane (SiH_4) dans une enceinte préalablement descendue en vide secondaire. Les supports de verre sont introduits dans la machine, puis chauffés à 150-200 °C. Le silane introduit dans l'enceinte est décomposé par une décharge radiofréquence.

Dans le plasma ainsi formé, le silicium et l'hydrogène ainsi libérés reforment un matériau solide, mais désordonné donc, sur les plaques supports.

Le principal avantage de cette technique est que l'on peut empiler toutes sortes de couches différentes, juste en modifiant la composition gazeuse en cours de dépôt, et même sans arrêter le plasma. Que ce soit pour former des simples ou des multiples jonctions. Ainsi le dopage est effectué en ajoutant au mélange gazeux les éléments sous forme d'Hydrures gazeux : du diborane $-\text{B}_2\text{H}_6-$ pour le bore (dopage p) et de la phosphine $-\text{PH}_3-$ pour le phosphore (dopage n).

Pour que la cellule soit complète, il faut deux électrodes de part et d'autre du silicium. Quand la cellule est déposée sur le verre, ce qui est encore le plus fréquent, l'électrode (+) est une couche transparente et conductrice déposée sur le verre avant le silicium. Cet oxyde métallique est tel que le SnO_2 : oxyde d'étain dopé au fluor, ou le ZnO , oxyde de zinc dopé à l'aluminium. La qualité de cette électrode avant est importante, et si elle est rugueuse, elle contribue à créer de la diffusion dans le dispositif pour une meilleure absorption de la lumière.

À l'arrière, l'électrode (-) est le plus souvent constituée d'aluminium ou d'argent, également en couche mince, puis parfois de nickel pour permettre la soudure des conducteurs de sortie. L'aluminium est un bon réflecteur de la lumière : ainsi, les photons qui traversent la jonction ont une deuxième chance d'absorption. Une autre technique pour disposer de diffusion peut être de réaliser le conducteur arrière en ZnO transparent et non plus en métal, et de placer un revêtement diffusif ensuite au dos de cette couche pour favoriser le piégeage de la lumière[14].

Conclusion :

Dans ce chapitre, il était question d'aborder le rayonnement solaire dans ses différents composants (direct, diffus, albédo et global). ainsi, que l'émission d'une petite quantité d'électricité que l'exposition à la lumière peut provoquer sur certains matériaux. Ensuite, la description de la cellule amorphe qui a une structure de type p-i-n qui se différencie de la structure p-n trouvée dans les cellules cristallines par la couche intrinsèque i. le fonctionnement, les caractéristiques et les paramètres des cellules solaires à base de silicium amorphe ont été, également, expliqués. Enfin, les étapes à suivre pour la fabrication de ces cellules ont été présentées.

Chapitre III

Caractérisation des modules PV à base de silicium amorphe

Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons, en première partie, la constitution des modules PV nécessitant d'associer des cellules solaires, et leurs principales caractéristiques électriques.

Dans la deuxième partie, nous décrivons la plateforme de caractérisation PV installée à l'UDES (Unité de Développement des Equipements Solaires) que nous avons utilisée pour la caractérisation du panneau solaire au silicium amorphe. Nous présenterons également l'instrumentation utilisée pour le relevé des données météorologiques et atmosphériques influençant les performances des modules PV.

1. Constitution des panneaux photovoltaïques

La fabrication d'un module photovoltaïque en silicium amorphe et des autres technologies en couches minces diffère quelque peu de celle d'un module au silicium cristallin, surtout en raison de la mise en série des cellules qui est totalement différente au moins sur support verre.

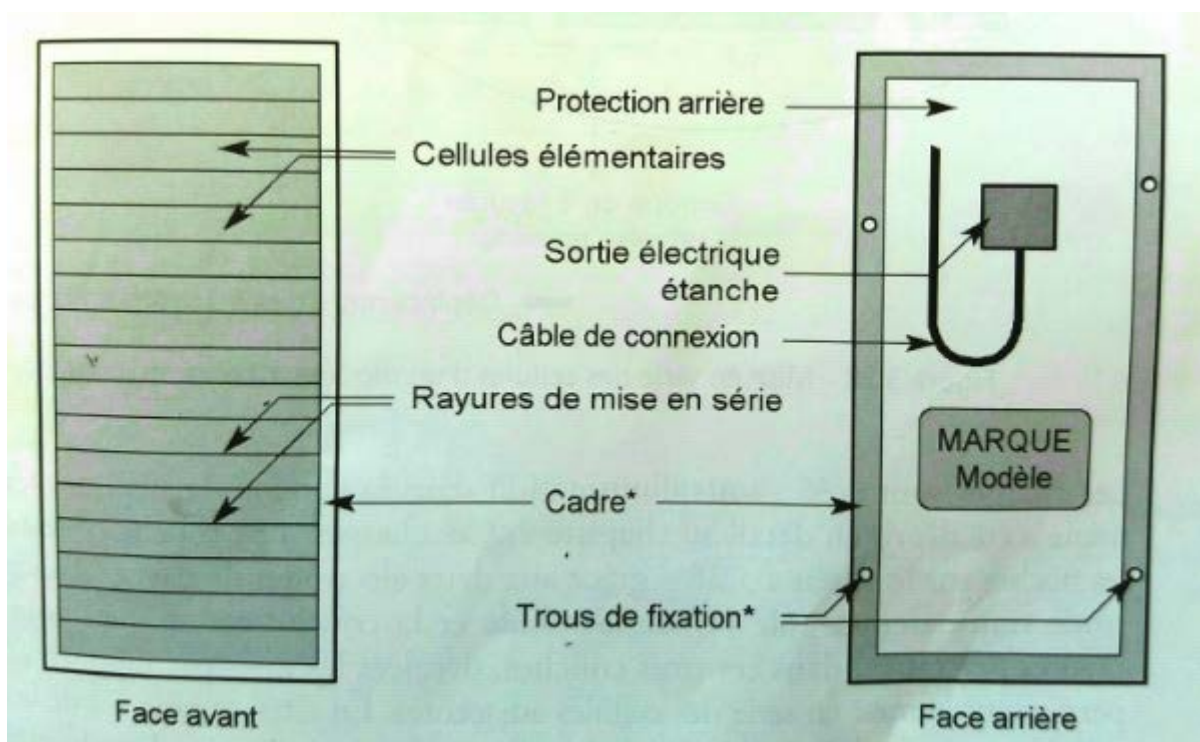


Figure III.1 : Structure d'un module photovoltaïque au silicium amorphe [14].

Dans la structure d'un module au silicium amorphe sur substrat verre (figure III.2) : les cellules ne sont pas physiquement séparées comme les cellules cristallines. Le module apparaît comme une surface uniforme avec juste des fines rayures de séparation. C'est là, au niveau de ces rayures, que se fait la mise en série: chaque « bande » rectangulaire est une cellule, et ces bandes sont mises en série grâce à trois rayures.

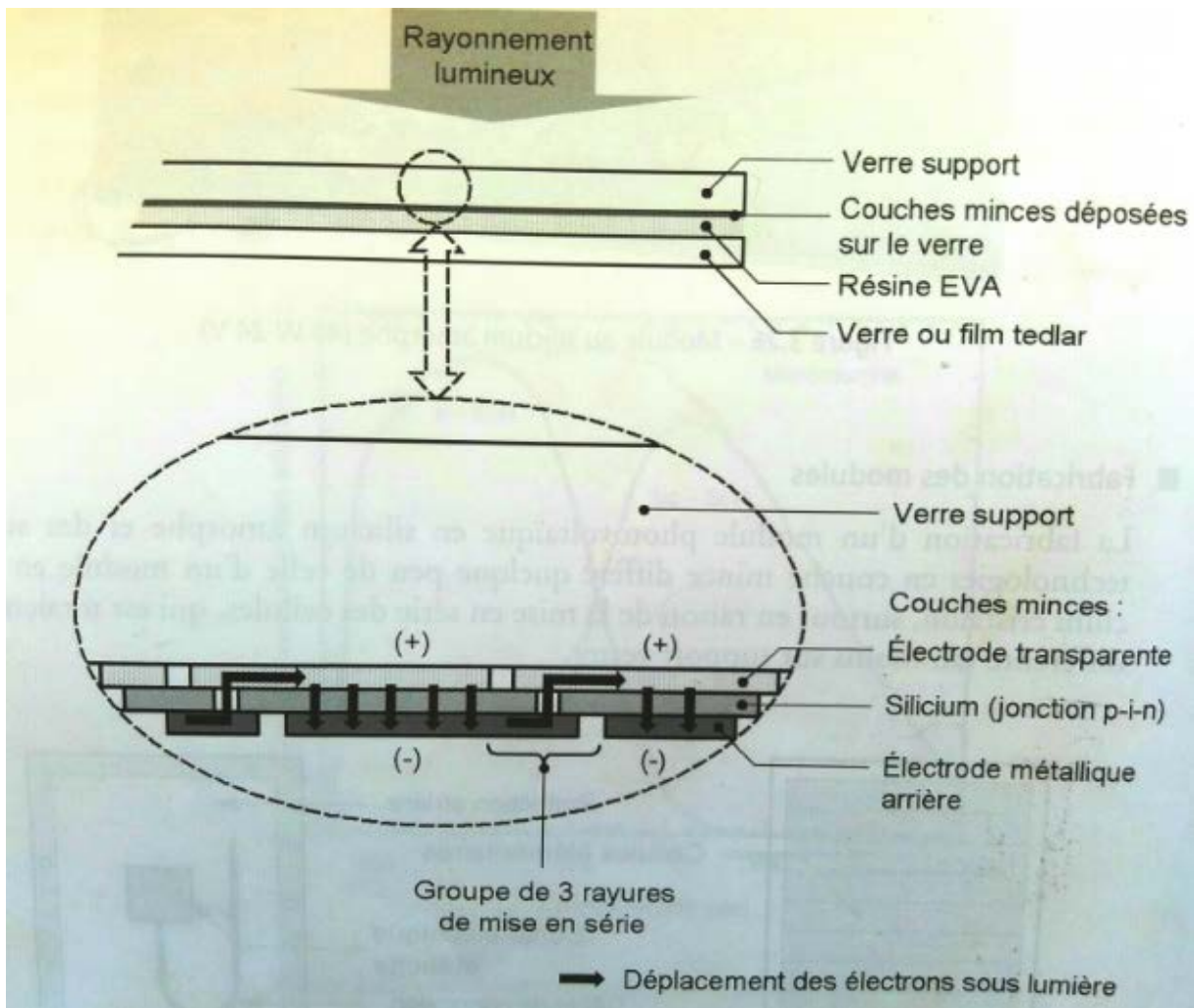


Figure III.2: Mise en série des cellules d'un module au silicium amorphe[14].

Les charges sont créées sous illumination dans la couche de silicium. Ces charges sont ensuite collectées (les flèches sur le schéma 2) grâce aux deux électrodes de part et d'autre : l'électrode transparente, pôle(+) de la cellule et la couche métallique, pôle(-). Les rayures pratiquées dans ces trois couches, décalées les unes par rapport aux autres, permettent la mise en série des cellules adjacentes. En effet, le pôle (-) de la première cellule est ainsi reliée au pôle (+) de la suivante, et ainsi de suite.

Cette technique est très commode, car elle dispense de découper les cellules physiquement pour les assembler ensuite. Il suffit d'amener l'outil adéquat, en l'occurrence un laser (ou plutôt une fibre optique amenant la puissance laser), aux emplacements choisis, pour en quelque sorte « dessiner » le format voulu pour le module avec le nombre adéquat de cellules en série. Il est donc plus simple de réaliser toutes sortes de tensions de fonctionnement avec des cellules en couches minces qu'avec le silicium cristallin.

Cette mise en série est particulièrement bien adaptée aux cellules amorphes dites « à usage intérieur » type cellules de calculette, dont les tensions de sorties doivent s'adapter aux circuits qu'elles doivent alimenter. On peut en effet les réaliser quasiment sous n'importe quelle tension en adaptant leur nombre de bandes[14][15].

L'encapsulant d'un module au silicium amorphe diffère peu de celui d'un module cristallin. L'empilement est un peu différent puisque la cellule amorphe est déjà sur verre (figure III.2). Mais il est important de bien protéger les bords contre la corrosion : le plus efficace est de dégager toutes les couches à la périphérie du module : quelques millimètres suffisent pour le silicium amorphe pour éloigner une partie active du monde extérieur (c'est la bordure blanche que l'on voit à la figure (III.1) entre le cadre et les cellules). On utilise pour l'encapsulant le même EVA (Ethylène vinyle d'acétate), que le silicium cristallin, pour le durcissement du panneau, et un revêtement arrière qui peut être opaque : un film plastique Tedlar ou une plaque de verre pour plus de résistance mécanique sur les grands modules (car le verre avant n'est pas trempé).

En ce qui concerne l'encadrement, il sera adapté à l'application. Parfois les modules amorphes de petite taille n'ont pas de cadre du tout, de même que des « laminas » de grandes dimensions destinés au bâtiment : cela facilite leur intégration à un produit ou une façade. Si non, pour d'autres usages, on emploie des cadres métalliques ou plastiques comme pour le silicium cristallin.

De même, pour tout module photovoltaïque, la sortie électrique (point de jonction entre le module et son câble d'alimentation) doit être soignée car cela peut constituer un risque d'infiltration d'humidité. En générale, cette partie est directement noyée dans une résine adéquate par le fabricant et non accessible à l'utilisateur pour plus de sûreté [14].

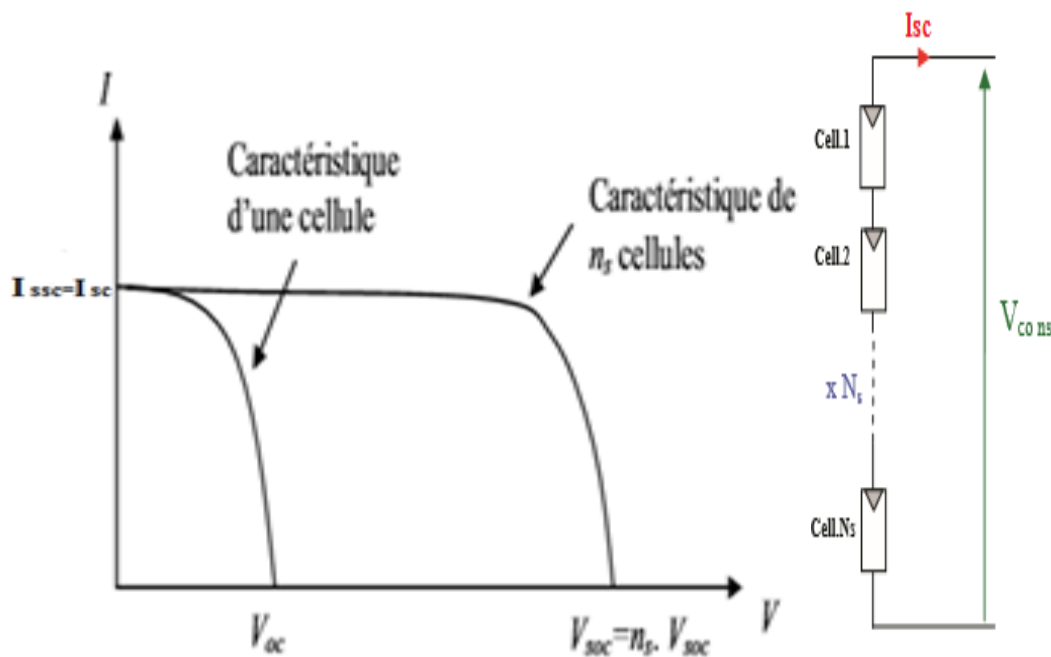
Deux types de protection sont généralement indispensables au bon fonctionnement d'un module photovoltaïque[32] :

- La protection par diodes parallèles (ou by-pass) a pour but de protéger une série de cellules dans le cas d'un déséquilibre lié à la défectuosité d'une ou plusieurs des cellules de cette série ou d'un ombrage sur certaines cellules.
- La diode série placée entre le module et la batterie empêche pendant l'obscurité le retour du courant vers le module. Elle est dans ce cas appelée encore diode anti-retour.

2. Assemblage des cellules solaire (série, parallèle, série-parallèle) :

2.1 Association en série :

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. La figure III.3 montre la caractéristique résultante obtenue en associant en série n_s cellules identiques [25].



Figures III.3: Caractéristique résultante d'un groupement en série de n_s cellules identiques[33].

2.2 Association en parallèle :

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée. La figure III.4 montre la caractéristique résultante obtenue en associant en parallèles n_p cellules identiques[25] .

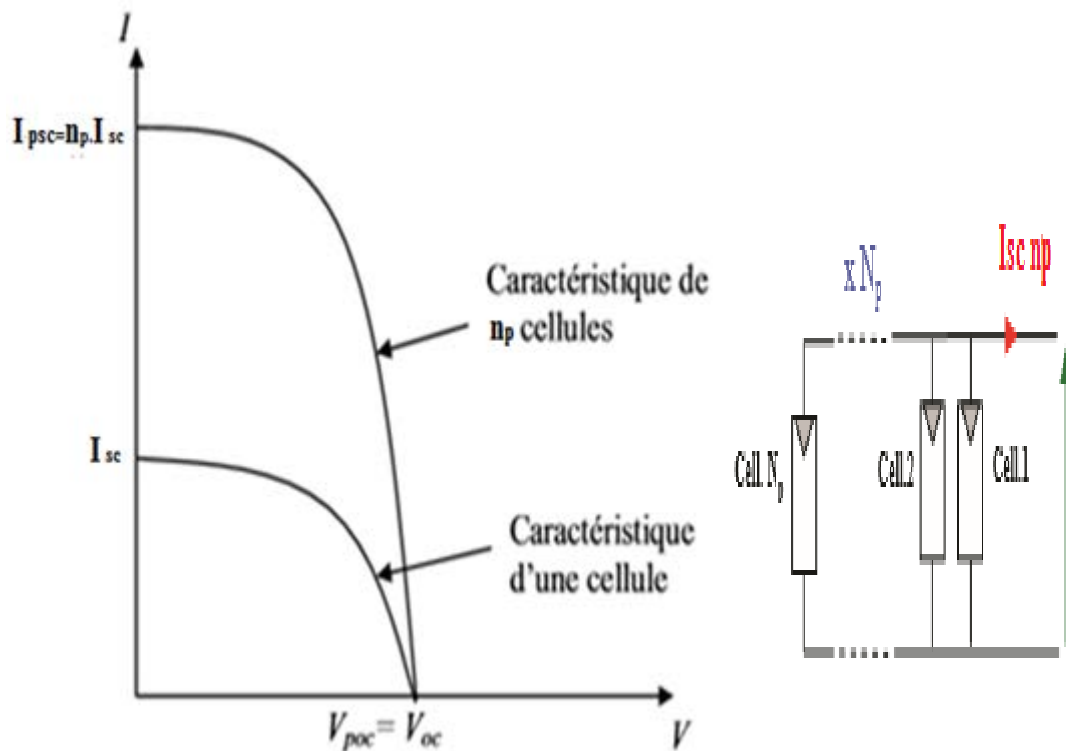


Figure III.4: Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de n_p cellules identiques [33].

2.3 Association hybride (en série/parallèle)

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules (figure III.5), les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à vide totale sont données par les relations [25]:

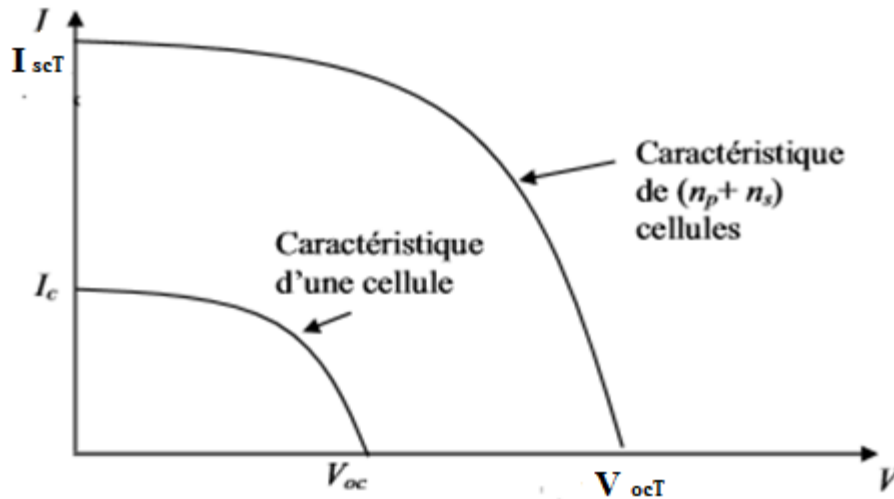


Figure III.5: Caractéristique résultante d'un groupement hybride de (n_p+n_s) cellules identiques [25].

$$I_{ccT} = n_p \cdot I_{cc} \quad (10)$$

$$V_{coT} = n_s \cdot V_{co} \quad (11)$$

I_{cc} : Courant de court-circuit.

V_{oc} : Tension du circuit ouvert.

I_{ccT} : Courant de court-circuit total.

V_{coT} : Tension du circuit ouvert totale.

3. Caractéristiques d'un module solaire :

a. Caractéristique courant-tension (I-V)

C'est une caractéristique fondamentale du module solaire définissant cet élément comme générateur (figure III.6). Elle se trace sous un éclairement fixe et une température constante[34].

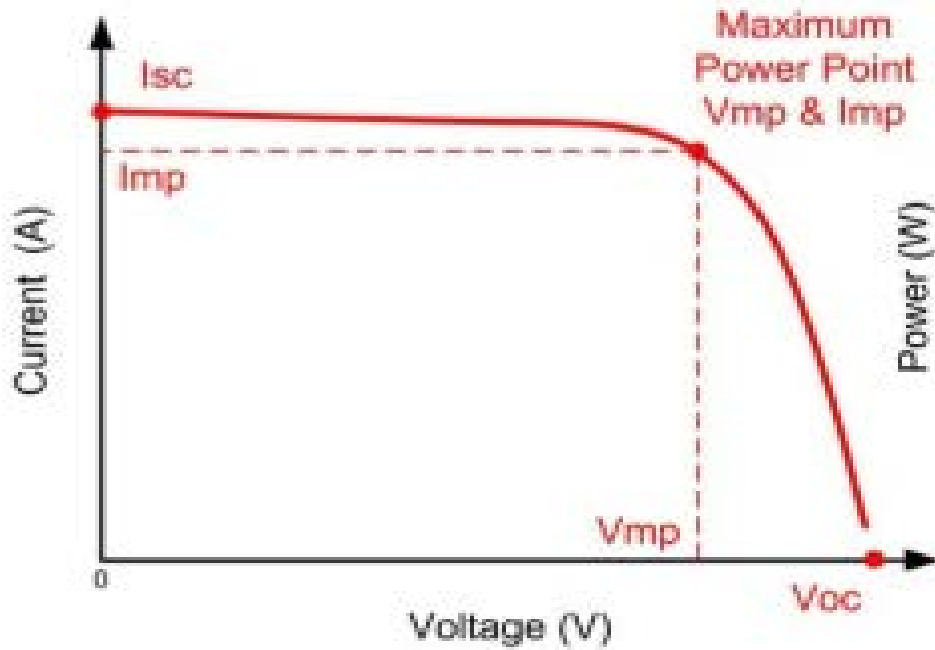


Figure III.6: Caractéristique courant-tension[34].

b. Tension de circuit ouvert

Si on place un panneau sous une source lumineuse constante sans aucune circulation de courant (Figure III.7), on obtient à ses bornes une tension continue, dite tension à circuit ouvert V_{oc} [35].

$$V_{oc} = n \cdot 0.6 \text{ V} \quad (12)$$

0.6 V: Tension pour une cellule élémentaire (elle varie suivant la technologie et l'éclairement).

n : est le nombre de cellules solaires.

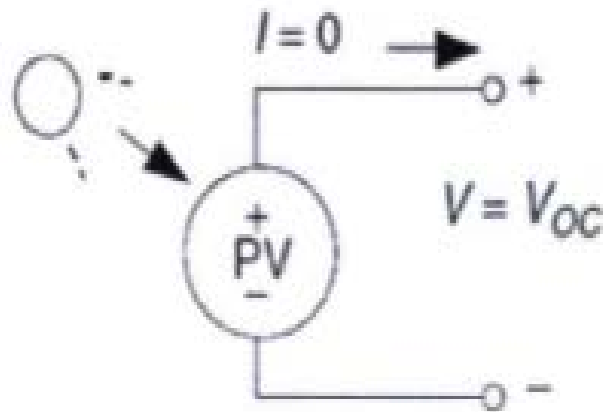


Figure III.7 : Test de tension en circuit ouvert [35].

c. Courant de court-circuit

Lorsqu'on place le photogénérateur en court-circuit (Figure III.8), il débite son courant maximal à tension nulle[35].

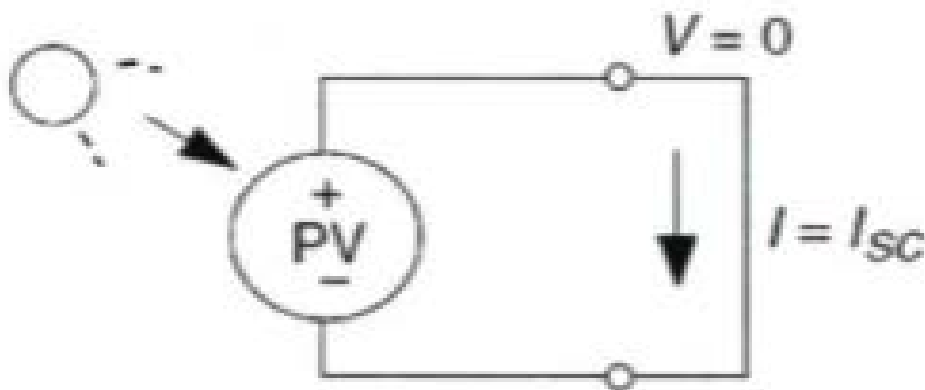


Figure III.8 : Test de tension en court-circuit [35].

d. Caractéristique puissance-tension (P-V)

La puissance débitée par le module dépend de son point de fonctionnement. Le point M représente la puissance maximale débitée par le module (figure III.9) qui est donnée par [34] :

$$P_{max} = I_{op} \cdot V_{op} \quad (13)$$

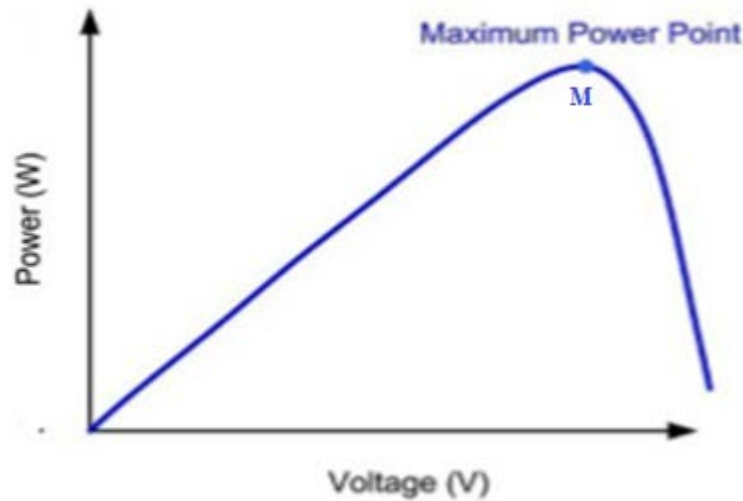


Figure III.9: Caractéristique puissance-tension [34].

4. Description de la plateforme de caractérisation de modules PV utilisée

4.1 Partie extérieure

La figure III.10 présente la partie extérieure de la plateforme PV installée à l'UDES, sur laquelle sont installés les modules PV à tester et les différents capteurs utilisés. Elle est orientée plein sud avec une inclinaison de 36° . Une cellule de référence montée sur le même plan et selon la même orientation que les modules permet la mesure de l'éclairement solaire global reçu par ces derniers. Un capteur de température de type PT100 est collé sur le dos de

chaque module PV pour la mesure de leurs températures (voir figure III.11).



Figure III.10: Partie extérieure de la plateforme de caractérisation PV installée à l'UDES contenant les modules PV et les différents capteurs (Eclairage et Température).

a. Modules photovoltaïques

Quatre modules PV de différentes technologies sont placés dans cette plateforme. Ces technologies sont :

Le silicium Micro-morphe (μ -Si).

Le silicium Monocristallin (M-Si).

Le silicium Amorphe(a-Si).

Le silicium Polycristallin (Poly-Si).

b. Les capteurs

❖ Capteur d'éclairage solaire

Le capteur d'éclairage solaire utilisé dans cette application est un pantomètre du type CMP11 de KIPP & Zonen[36]. C'est un radiomètre, qui mesure le rayonnement solaire à partir d'un corps noir à thermopile de haute qualité protégé par deux dômes de verre. Sa sensibilité spectrale de 285 à 2800nm, lui permet d'être utilisé en lumière naturelle, de

mesurer le rayonnement global et le rayonnement diffus. Sa sensibilité est de $8.44\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$. L'enregistrement des données se fait via la centrale d'acquisition à laquelle il est connecté. Une vue grand format du pyranomètre est présentée sur la figure III.11.



Figure III.11 : Pyranomètre Kipp&Zonen CMP11.

❖ Capteur de température

Le capteur de température que nous avons utilisé dans cette application est de type PT100. C'est un type (RTD) (Resistance Temperature Detector), fabriqué à partir de platine.

Le capteur PT100 a une résistance de 100ohms à 0°C . Le capteur PT100 que nous avons utilisé a été spécialement conçu pour la mesure de température sur une surface plane. Il est donc bien adapté pour les modules PV et est facile à installer, à base de silicone avec dos adhésif et il a quatre fils [37]. Une vue du capteur ainsi collé sur le dos du module PV est montrée sur la figure III.12.



Figure III.12: Capteur PT 100 collé sur le dos du module PV sous test.

4.2 Partie intérieure

Sur la plateforme de caractérisation PV de l'UDES, la partie intérieure (figure III.13) est constituée de la charge électronique PVPM, d'une unité d'acquisition de donnée Switch de type Agilent 34972A et d'une armoire de multiplexage. Un ordinateur complète le système pour assurer le contrôle et permettre le traitement des données.

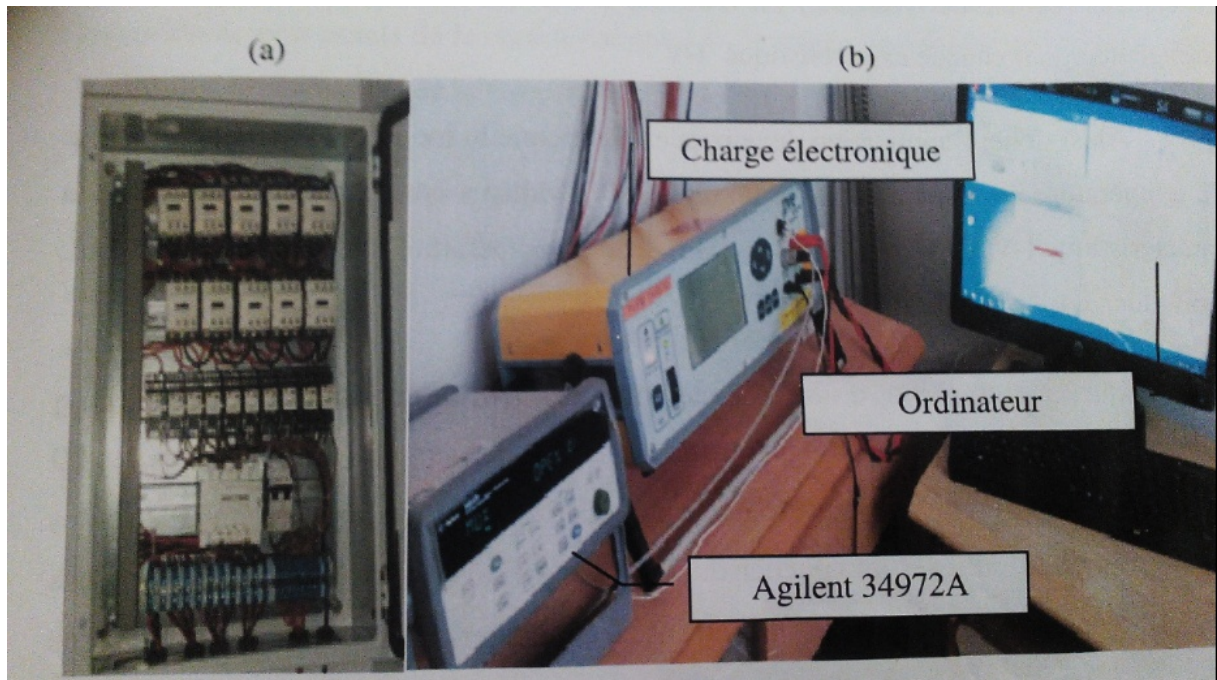


Figure III.13 :Partie intérieure de la plateforme de caractérisation PV de l'UDES:a) armoire de multiplexage, b) unite agilent 34972A, charge électronique PVPM et PC avec EXCEL.

Les sortie des modules PV sont bronchés à une armoire de multiplexage spécialement conçue et les capteurs de température aux modules « Mtrix Switch Unit (34904A) » de la centrale « Agilent 34972A ». Cette dernière est aussi utilisée pour commander de multiplexage via le module « Actuator (34903A) » [38]. La charge électronique PVPM est connectée à la cellule solaire de référence, à l'unité Agilent 34972A (via le module 34904A) et à l'armoire de multiplexage des sorties des module PV (figure III.13a).

En pratique l'acquisition d'une caractéristique $I - V$ d'un module PV prend cinq secondes et avec le choix d'enregistrer, en série, une caractéristique $I - V$ de quatre modules PV toute les deux minutes du lever au coucher du soleil. Ainsi avec seulement un module PV, considéré dans cette étude.

Les mesures sont stockées dans la mémoire de l'ordinateur dans des fichiers sous format EXCEL. Ces données comportent les valeurs expérimentales du courant et de la tension de cent points de la caractéristique $I - V$, la valeur de l'éclairement solaire dans le plan des modules PV, de la température au dos du module PV et de la température de référence.

Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les éléments constituant la plateforme de caractérisation PV en extérieur et en intérieur installée à l'UDES. Cette plateforme comporte une bonne instrumentation permettant de récupérer et d'exploiter les données météorologiques influençant les performances des modules PV.

Les résultats de mesures en temps réel donnant la production du panneau solaire au silicium amorphe en fonctionnement seront présentés dans le chapitre suivant.

Chapitre IV

Résultats et interprétation

Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats des mesures effectuées sur le module PV au silicium amorphe installé sur la plateforme de caractérisation PV de l'UDES qui sera suivie d'une interprétation.

Le panneau photovoltaïque au silicium amorphe hydrogéné (a-Si :H), se compose de 72 cellules (3 x 24) à double jonction. Les mesures sur ce panneau solaire ont été prises pendant une journée d'hiver et une autre d'été environ toutes les deux minutes pendant toute la durée du jour. Les données expérimentales en temps réel sur la production du module PV nous ont permis d'obtenir les courbes I (V) et P (V) des figures et tableaux ci-dessous. Nous observons le comportement du module PV en fonctionnement sous l'effet de différentes températures et irradiances solaires.

1. Influence de l'irradiation :

1.1 Tracé des caractéristiques I (V) et P (V) à T=42.5°C :

A fort éclairement, en fixant la température à 42.5°C, quand l'ensoleillement augmente, l'intensité du courant photovoltaïque croît, les courbes I -V se décalent vers les valeurs croissantes (figure 1) permettant au module de produire une puissance électrique plus importante, la tension quant à elle croît légèrement par rapport au courant. Cette augmentation du courant est due à la l'augmentation de l'absorption du rayonnement dans le matériau grâce à la forte irradiation induisant ainsi une augmentation du nombre des paires électrons trous photogénérés.

La figure (2) montre la caractéristique puissance-tension du module qui fait apparaître des points de puissance maximal. Le photo-courant est donc directement proportionnel au flux lumineux comme le montre l'équation suivante :

$$I_{cc}(E_g) = q \int_{E_g}^{\infty} d\Phi_S(h\nu) \cdot d(h\nu) \quad (14)$$

E=620 W/m ²			E=721 W/m ²			E=891 W/m ²			E=1111 W/m ²		
V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)
0	2,4851	0	0	2,8857	0	0	3,539	0	0	4,5593	0
3,738	2,4851	9,2893	3,8818	2,8857	11,202	4,0736	3,539	14,416	4,3612	4,5593	19,884
5,9514	2,4643	14,663	6,2241	2,8596	17,798	6,7035	3,5054	23,499	7,5254	4,5078	33,922
11,395	2,4255	27,638	11,532	2,8172	32,488	12,251	3,4419	42,167	13,004	4,4231	57,519
17,764	2,3514	41,77	17,73	2,7325	48,448	18,655	3,3325	62,166	19,408	4,2642	82,76
26,599	2,0373	54,189	26,325	2,3761	62,55	26,496	2,8984	76,797	26,154	3,7525	98,142
29,715	1,6702	49,63	29,407	1,9737	58,041	30,366	2,2349	67,864	30,708	2,7643	84,887
32,044	1,2008	38,478	31,77	1,462	46,447	32,523	1,6137	52,484	32,763	2,0337	66,631
34,03	0,6255	21,287	33,893	0,8055	27,302	34,544	0,8867	30,63	34,715	1,1867	41,196
35,708	0,0118	0,6601	35,845	0,022	0,7891	36,393	0,0255	0,9296	36,941	0,0361	1,3347
35,72	0	0	35,9	0	0	36,407	0	0	36,996	0	0

Tableau 1 : Relevé des mesures effectuées avec le panneau solaire au silicium amorphe à forts éclairnements.

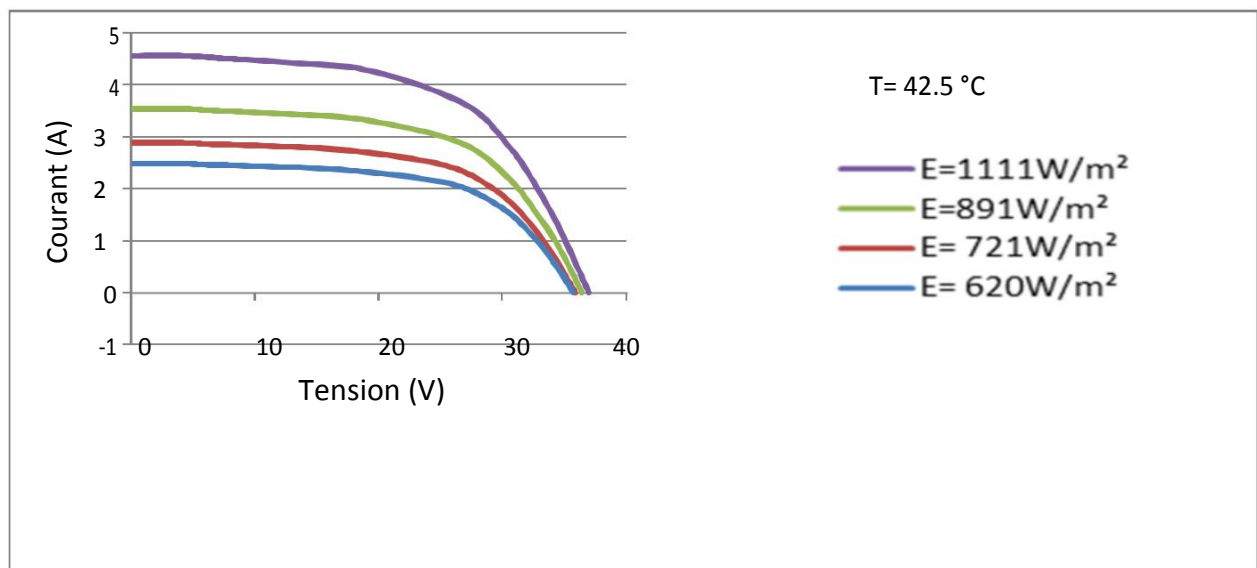


Figure 1: Caractéristiques courant/tension sous différents niveaux d'irradiations, à forts éclairnements, à T=42.5°C.

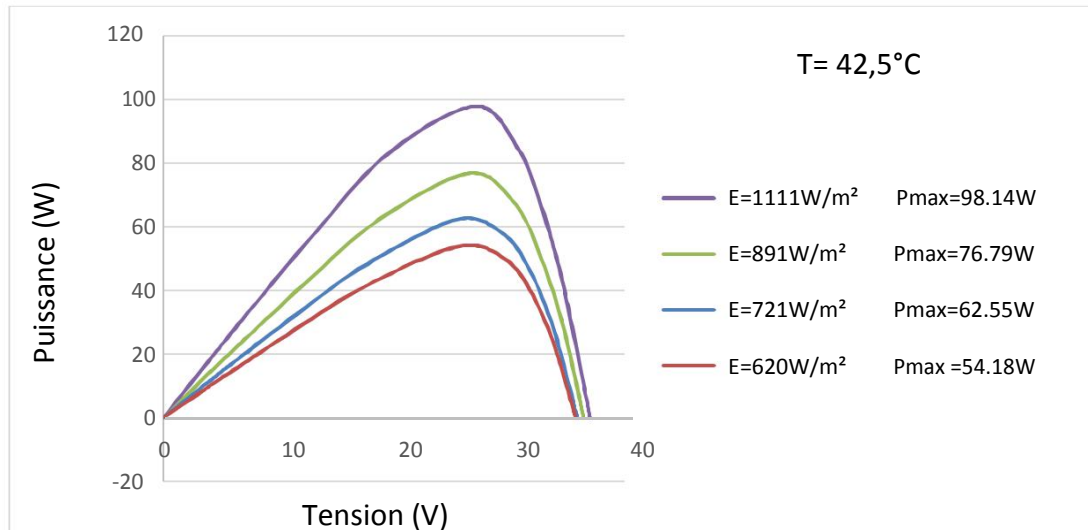


Figure 2: Courbes puissance –tension sous différents niveaux d'irradiations, à forts éclairements, à T=42.5°C.

1.2 Tracé des caractéristiques I (V) et P(V) à T=23.8°C :

A faible éclairement, en fixant la température à 23.8°C, quand l'ensoleillement diminue, l'intensité du courant photovoltaïque décroît, les courbes I -V se décalent vers les valeurs décroissantes (figure 3), ce qui produit une puissance électrique moins importante (figure 4), la tension par contre décroît mais elle n'est pas trop dégradée lorsque la lumière baisse.

E=147 W/m ²			E=174 W/m ²			E=203 W/m ²			E=296 W/m ²		
V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)
0	0,5946	0	0	0,7318	0	0	0,8469	0	0	1,2414	0
2,8888	0,5946	1,7176	3,0052	0,7318	2,1991	3,1011	0,8469	2,6262	3,3682	1,2414	4,1812
5,4022	0,5904	3,1893	5,6077	0,7261	4,0717	5,7447	0,8401	4,826	6,1556	1,2296	7,5688
9,7854	0,5809	5,6841	10,094	0,7152	7,2192	10,196	0,8279	8,4412	10,71	1,2133	12,994
17,148	0,5605	9,6116	17,696	0,6881	12,176	17,799	0,7967	14,179	18,415	1,1685	21,518
22,25	0,5347	11,898	22,832	0,6542	14,936	22,969	0,7587	17,426	23,62	1,1088	26,19
26,839	0,4804	12,895	26,702	0,6012	16,054	27,661	0,6772	18,733	27,455	1,0165	27,908
31,941	0,3135	10,014	32,523	0,3651	11,874	32,729	0,4262	13,948	33,277	0,6134	20,413
33,893	0,1683	5,7043	34,407	0,1941	6,6779	34,578	0,2307	7,9782	35,229	0,3474	12,24
35,434	0,0055	0,193	35,879	0,0055	0,1954	36,187	0,0055	0,1971	37,009	0,0068	0,2518
35,434	0	0	35,886	0	0	36,194	0	0	37,043	0	0

Tableau 2 : Relevé des mesures effectuées avec le panneau solaire au silicium amorphe à faibles éclairnements.

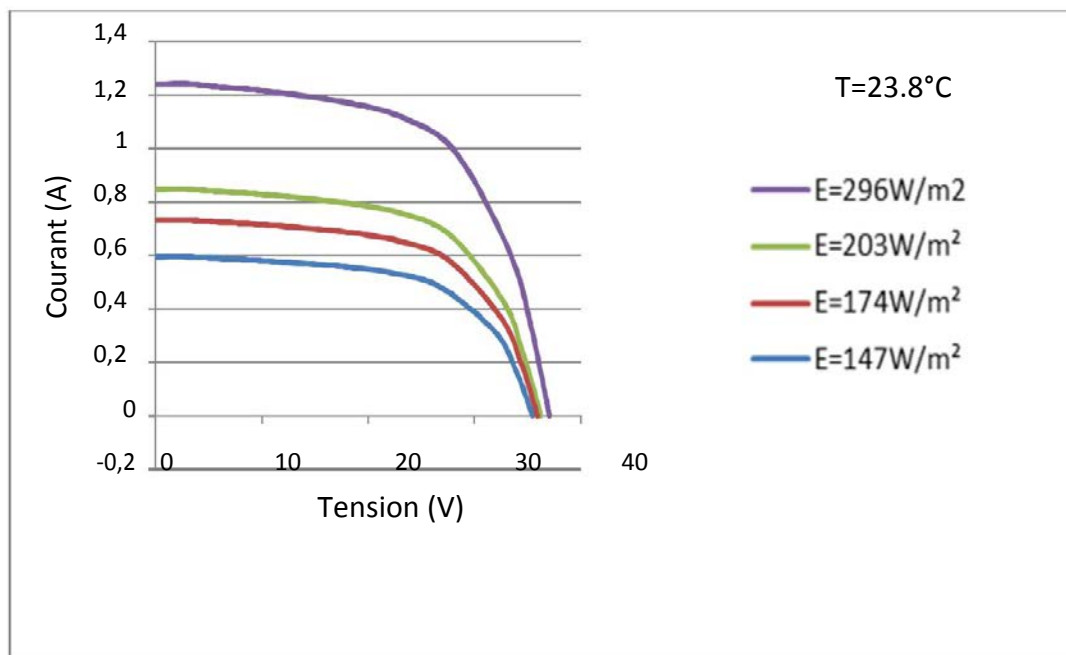


Figure 3: Caractéristiques I-V sous différents niveaux d'irradiations, à faibles éclairagements, à $T=23.8^{\circ}\text{C}$.

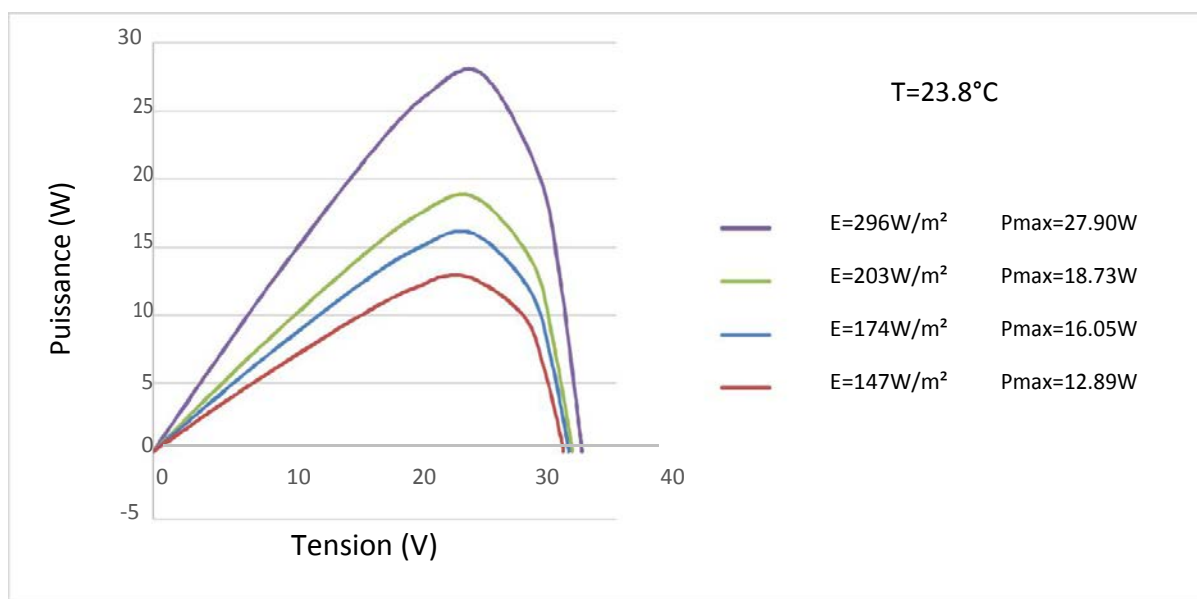


Figure 4: Courbes puissance –tension sous différents niveaux d'irradiations, à faibles éclairagements, à $T=23.8^{\circ}\text{C}$.

2. Influence de la température :

L'effet de la température sur le panneau varie en fonction de l'éclairement, de la vitesse du vent et du montage du module qui dépendent du site choisi pour l'installation.

2.1 Tracé des caractéristiques I (V) et P(V) à E=700 W/m² :

Pour les températures élevées (supérieures à 25°C), l'évolution de la caractéristique I-V en fonction de la température montre que le courant augmente en intensité (figure 5) lorsque la température augmente et engendre une décroissance moins prononcée de la tension de circuit-ouvert dont l'effet est négligeable au point de puissance maximal. Par conséquent, la puissance au point de puissance maximal augmente (figure 6).

L'augmentation du courant s'explique par un réarrangement de la structure et une réduction des défauts métastables du silicium amorphe lorsque la température augmente et par conséquent une diminution des centres de recombinaison des porteurs.

44,1°C			42,2°C			35,6°C		
V (V)	I (A)	P (W)	V (V)	I (A)	P (W)	V (V)	I (A)	P (W)
0	2,94428	0	0	2,71734	0	0	2,65734	0
3,90921	2,94428	11,5098	3,82703	2,71734	10,3993	3,86127	2,65734	10,2607
5,33375	2,92663	15,6099	5,16253	2,70781	13,9792	5,16253	2,64429	13,6512
8,48417	2,89839	24,5905	8,27871	2,67958	22,1834	8,3472	2,61958	21,8661
13,8604	2,84193	39,3903	13,655	2,63017	35,9149	13,8262	2,5737	35,5844
18,0382	2,77487	50,0535	17,8327	2,5737	45,896	18,0382	2,51723	45,4062
23,0035	2,62311	60,3407	22,798	2,44664	55,7787	23,1747	2,39723	55,5552
25,8115	2,44311	63,0604	26,4964	2,2243	58,9358	24,0993	2,36194	56,9211
28,3113	2,16077	61,1742	28,1743	2,04783	57,6963	30,1262	1,82902	55,1013
33,1396	1,03492	34,297	33,1396	0,98904	32,7765	33,0027	1,23609	40,7944
35,7079	0,02201	0,7861	35,7422	0,02201	0,78686	36,7695	0,01849	0,6797
35,7695	0	0	35,8312	0	0	36,7832	0	0

Tableau 3: Relevé des mesures effectuées avec le panneau solaire au silicium amorphe pour les hautes températures.

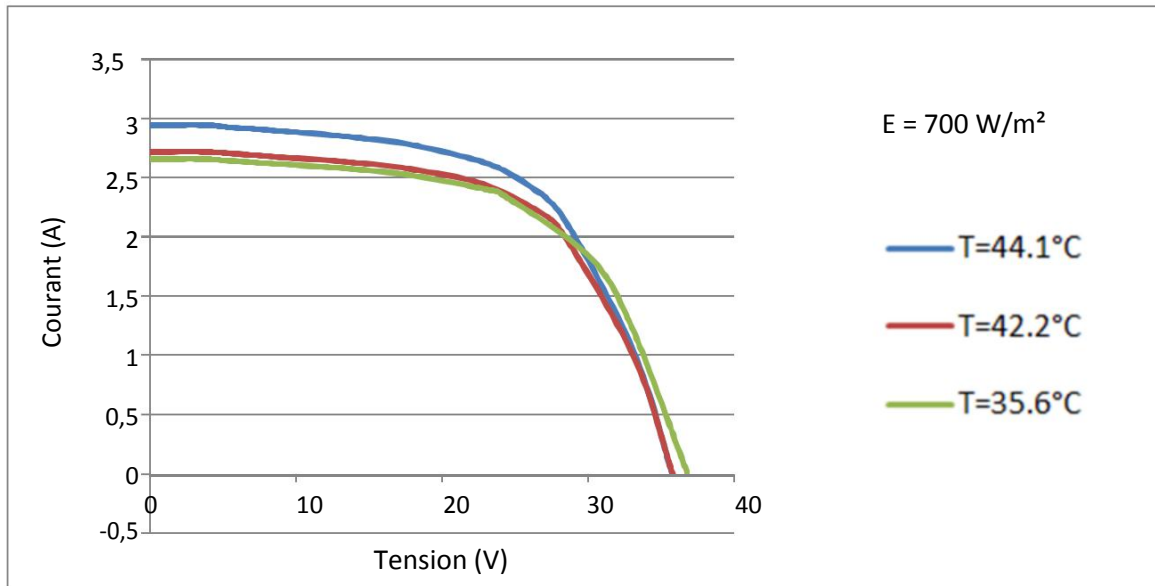


Figure 5: Courbes courant –tension sous différentes températures (à hautes températures) à $E=700\text{W/m}^2$.

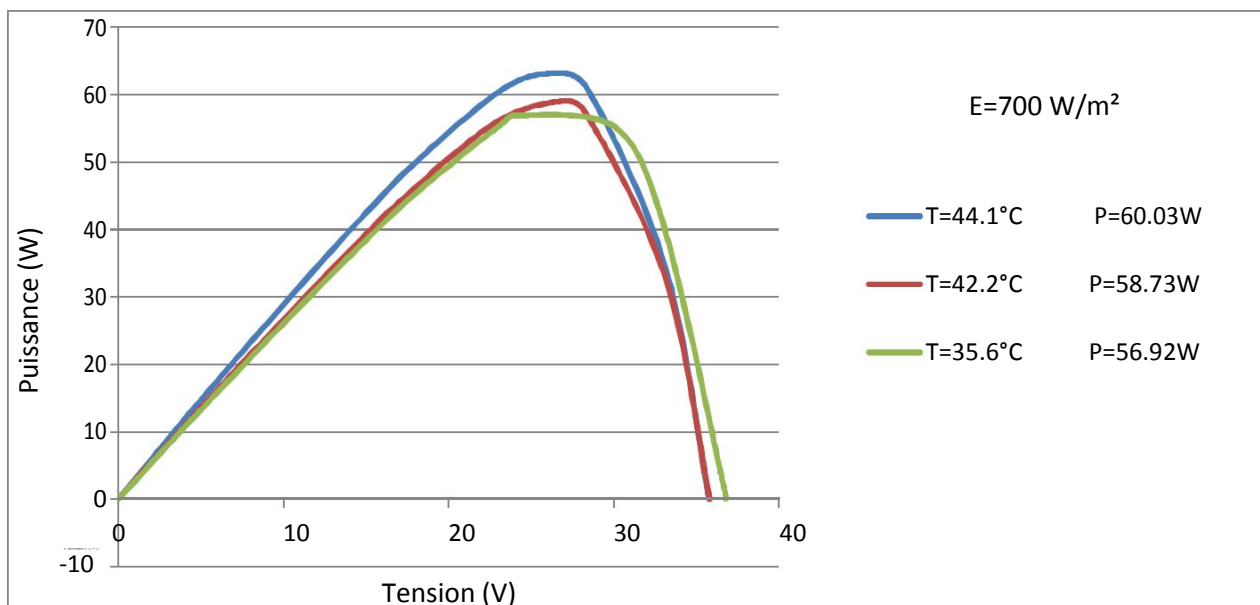


Figure 6: Courbes puissance-tension sous différentes températures (à hautes températures) à $E=700\text{W/m}^2$.

2.2 Tracé des caractéristiques I (V) et P (V) à E=150 W/m²:

Pour les basses températures, L'évolution de la caractéristique I–V en fonction de la température montre que l'intensité du courant décroît légèrement lorsque la température diminue et engendre une légère croissance de la tension de circuit ouvert (figure 7), ce qui donne une variation des courbes de puissance moins importante (figure 8).

T = 19,6 °C			T = 21 °C			T = 24 °C		
V (V)	I (A)	P (W)	V (V)	I (A)	P (W)	V (V)	I (A)	P (W)
0	0,61073	0	0	0,62823	0	0	0,65008	0
2,96409	0,61073	1,81024	2,95039	0,62823	1,85353	2,92299	0,65008	1,90019
11,0867	0,59444	6,59038	11,0867	0,61208	6,78598	10,9155	0,63244	6,90338
12,1825	0,59173	7,2087	12,1825	0,60937	7,42363	11,977	0,62973	7,54224
17,593	0,57408	10,0999	17,6272	0,59173	10,4305	17,2848	0,61208	10,5797
18,6545	0,57137	10,6586	18,6888	0,5863	10,9572	18,3121	0,60801	11,134
27,5579	0,4913	13,5392	27,5922	0,50351	13,893	26,9415	0,52523	14,1504
32,0781	0,34473	11,0582	32,0781	0,3488	11,1888	31,3932	0,37594	11,8021
36,1531	0,00273	0,09881	35,9819	0,00409	0,14717	35,5709	0,00545	0,19376
36,1736	0	0	36,0024	0	0	35,5915	0	0

Tableau 4: Relevé des mesures effectuées avec le panneau solaire au silicium amorphe pour les basses températures.

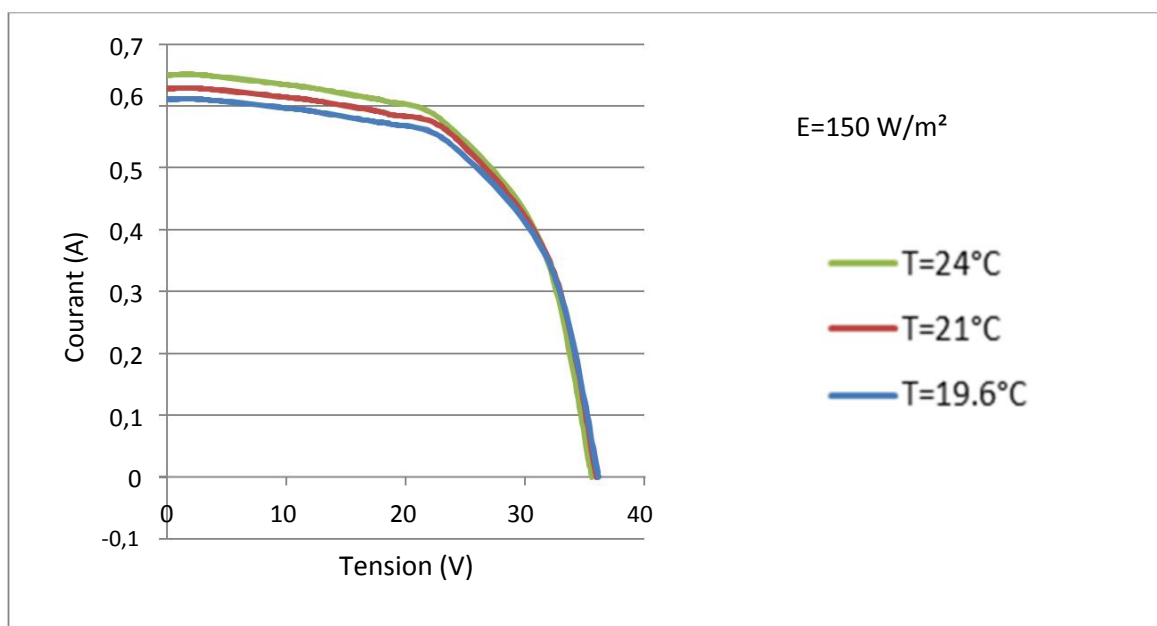


Figure 7: Courbes courant –tension sous différentes températures (à basses températures) à $E=1550 \text{ W/m}^2$.

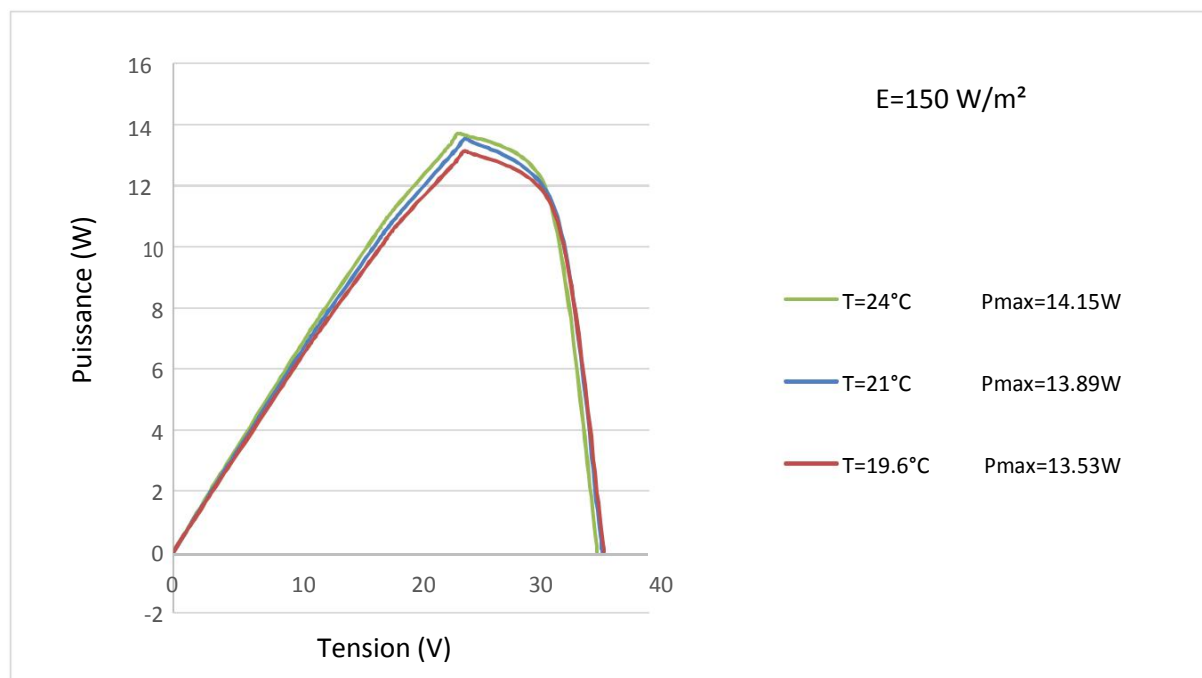


Figure 8: Courbes puissance –tension sous différentes températures (à basses températures) à $E=150 \text{ W/m}^2$.

Conclusion :

Nous avons présenté, dans ce chapitre, les résultats de caractérisation du panneau solaire au silicium amorphe, grâce à la plateforme de caractérisation PV automatisée de l'UDES. Cette étude nous a permis d'obtenir des informations sur le comportement du panneau PV, dans les conditions réelles d'utilisation, en fonction de l'éclairement, du spectre solaire et de la température.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail développé dans ce mémoire concerne l'étude de l'effet de la température et de l'éclairement sur les performances des modules photovoltaïques à base de silicium amorphe. La plateforme de caractérisation PV automatisée installée à l'UDES nous a permis de caractériser le panneau solaire au silicium amorphe, dans les conditions réelles d'utilisation. En comptant sur l'expertise de l'UDES, nous avons pu observer le comportement électrique de ce module PV au silicium amorphe en fonction de la température et de l'intensité lumineuse qui varient au cours de l'année et de la journée. La caractérisation du panneau solaire en extérieur prend en compte son fonctionnement pour toutes les conditions météorologiques et atmosphériques et évite par conséquent les incertitudes liées à ces facteurs.

Nous avons effectué plusieurs mesures, en temps réel, pendant une journée d'hiver et une autre d'été, qui nous ont permis d'obtenir les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ et d'évaluer ainsi la production électrique du panneau PV en fonctionnement pour différentes températures et irradiances solaires.

L'analyse des résultats de caractérisation du panneau PV au silicium amorphe montrent que :

- La puissance électrique fournie par les modules PV au silicium amorphe augmente avec l'augmentation de l'ensoleillement.
- Pour les forts éclaircements, ces modules continuent à délivrer une forte puissance même pour une irradiance inférieure à 1000 W/m^2 .
- Pour les faibles éclaircements (intensité lumineuse $< 200 \text{ W/m}^2$), les modules PV au silicium amorphe continuent à produire de l'électricité avec une puissance électrique très supérieure à celle des modules au silicium cristallin. Cette technologie est donc bien adaptée pour les régions nuageuses.
- Les modules PV au silicium amorphe résistent aux hautes températures et continuent à délivrer une forte puissance. Les basses températures ($< 25^\circ\text{C}$) ont moins d'influence sur leur production électrique.

La plateforme de caractérisation PV de l'UDES, nous a permis d'acquérir une meilleure connaissance du fonctionnement des panneaux solaires au silicium amorphe. Cette étude ouvre la voie à plusieurs perspectives de recherche, notamment :

- Etude de l'impact de l'angle d'incidence du rayonnement et des ombrages sur la production électrique des modules PV;
- Etude de l'impact de la salissure sur le rendement de ces modules PV.

Références

Références

- [1]: OUSSIDHOUM Samira, Etude comparative des performances de cellules solaires simples et multiples, mémoire de MAGISTER, 2015.
- [2] : B.Loic, thèse de DOCTORA, Cellules photovoltaïques organiques souples à grandes surfaces, 2008.
- [3] : S. Lamine, thèse de DOCTORAT, Etude expérimentale et thermodynamique du procédé de démoulage appliqué aux semi-conducteurs, 2008.
- [4] : F. Bougenna, mémoire de MAGISTER, Modélisation et optimisation d'une cellule solaire Tandem a-Si : H /a-SiGe ,2009.
- [5] : K. Amira, Elaboration de nouvelles phases du silicium en couche mince, mémoire de MAGISTER, 2008.
- [6] : A. Bencherat, mémoire de MASTER, Etude de transfert des films minces de silicium monocristallin dans la réalisation de cellules solaires à faibles budget thermique, 2012.
- [7] : BENOURDJA Saadia, Etude par spectrophotométrie du silicium microcristallin déposé par pulvérisation cathodique magnétron RF «influence du temps de dépôt », thèse de MAGISTER, 2009.
- [8] : KEFIF Kheira, Elaboration et caractérisation optique des semi-conducteurs amorphes et nano cristallins de silicium (a-SiC : H, nc-SiC : H), thèse de DOCTORAT, 2015.
- [9] : MERAZGA Saloua, Etude des propriétés des couches minces de carbure de silicium : application couche antireflet et passivation, thèse de DOCTORAT ,2015.
- [10]: FRANCIS MAURY, Elaboration par OM-CVD du semi-conducteur composite désordonné GaAs : (SiC, H) : corrélation entre sa structure hétérogène et ses propriétés électroniques, thèse de DOCTORAT, 1985.

- [11] : Vanessa Terrazzoni-Daudrix, Cellules solaires en couches minces de silicium amorphe : Effet du substrat réflecteur texturé et de la couche intrinsèque sur le courant photogénéré, thèse de DOCTORAT, 2004.
- [12] : Ouahiba Aissaoui, Etude des propriétés physiques des couches minces des structures chalcopryrite, thèse de DOCTORAT, 2011.
- [13] : MEKELLECHE Sidi Mohammed, Modélisation et simulation de nouveaux matériaux destinés, master, 2014/2015.
- [14] : Anne Labouret et Michel Viloz, Energie solaire photovoltaïque, 4^{ème} édition.
- [15] : NAMOUDA Aboubacar, Dégradation (effet Stabler –Wronski) et caractérisation des cellules solaires à base de silicium amorphe hydrogéné a-Si :H,1999.
- [16] : KHALED Amira, Elaboration de nouvelles phases se silicium en couches mince, mémoire de MAGISTER,2008.
- [17] : Adda Habib, Dépôt et caractérisation optique du silicium nanocristallin, mémoire de MAGISTER, 2011/2012
- [18] : WWW.intechopen.com/books/optoelectronic-materials-and-techniques.
- [19] : Daniel Lincot, les filières photovoltaïques en couches minces et leurs perspectives d'application à l'habitat, 2008.
- [20] : PACER, Centrale photovoltaïque (Guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets à l'usage des bureaux d'ingénieurs. Office fédéral des questions conjoncturelles, 1996.
- [21] : AMARA Karima, contribution à l'étude d'une conception d'une centrale photovoltaïque (1MW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension, mémoire de MAGISTER,2015.
- [22] : SALAHEDDINE BENSALAM, Effet de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires, mémoire de MAGISTER ,2011.
- [23] HADJAB Moufdi, Développement des performances d'un système photovoltaïque, mémoire de MAGISTER , 2011 .

-
- [24] : Lahreche Imen, Mesure des propriétés externes d'une cellule photovoltaïque, mémoire de MASTER, 2013.
- [25]: BENDJELLOULI ZAKARIA, Contribution à la modélisation d'une cellule solaire, mémoire de MAGISTER, 2009.
- [26] : Abaidia Abdel Ghafour et Dahmane Abderrahmane, Simulation d'une cellule solaire photovoltaïque à base d'hétérojonction : a-Si :H(n)/c-Si(p), mémoire Master académique, 2016.
- [27] : SLAMA Fateh, Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique, Mémoire de MAGISTER, 2011.
- [28] : YANNIK Veschetti, Modélisation, caractérisation et réalisation de nouvelles structures photovoltaïques sur substrat de silicium mince, thèse de DOCTORAT, 2005
- [29] : Kahoul Fouad, Caractéristique électrique d'une cellule solaire à hétérojonction a-Si: H/ μ c-Si, mémoire de MASTER, 2014.
- [30] : MOHAMED MIMOUNE, Etude des capteurs photovoltaïques basés sur les nanotechnologies, mémoire de maîtrise en génie électrique, 2016.
- [31] : Jean-Claude Muler, Electricité photovoltaïque (filiale et marché), membre du programme interdisciplinaire énergie du CNRS , 2008.
- [32] : Mansour Assani Dahouénon, le manuel du technicien photovoltaïque (PERACOD) , 2011.
- [33] : M. PETIBON Stéphane, nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques, thèse de DOCTORAT, 2009.
- [34] : Jamil BDUL AZIZ, Solaire photovoltaïque : principe et application, INSA ROUEN à taille humaine à l'échelle du monde, Projet de physique P6 STPI/P6/2014-sujet 42.
- [35] : SOFIANE ABADA, Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur SEPIC, mémoire pour l'obtention du grade de maître de science (M.Sc), 2011.
- [36] : <http://www.kippzonen.com>

[37] : <http://www.omega.fr/pptst/SA1-RTD.html>

[38] : Guenounou Abderrezak, Contribution à la mise au point d'un banc de caractérisation photovoltaïque piloté par ordinateur, 2016.