

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique
Université Saad-DAHLAB-Blida1
Département des Energies Renouvelables



Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de
Master en énergies renouvelables
Option : Conversion Photovoltaïque

Thème :
**Caractérisation en conditions réelles
D'une cellule photovoltaïque
Sous concentration**

Présenté Par : *Erroukrma Sarah*

M.DOUMAZ Toufik	M.A.A	USDB1	Président Examineur
M. SAID Promoteur	M.A.A	CDER	Promoteur

2019/2020

ملخص

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تصميم وتجميع نموذج اختبار للتحقق في الظروف الحقيقية من سلوك الخلية تحت التركيز. لذلك ، فهي مسألة تحديد الموقع بدقة ، تحت الإضاءة العادية المباشرة والمتغيرة والظروف الجوية المعروفة ، خلية أحادية البلورية لاختبار استجابة تيار وتوتر و استطاعة لذلك يجب أن تسمح منصة الاختبار بتكرار هذه العملية وفقاً لمحاذاة مختلفة لجهاز التركيز (عدسات فرينل) في اتجاه وارتفاع بالنسبة للشمس. ستكون المعلمات التي سيتم تمييزها بشكل أساسي هي تيار الدائرة القصيرة وعامل الشكل والطاقة المنتجة.

كلمات مفتاحية
عدسات فرينل ,خلية احادية البلورية

Résumé

L'objectif principal de ce travail est de concevoir et monter un banc d'essai pour vérifier en conditions réelles le comportement d'une cellule PV sous concentration. Il s'agit donc de positionner de manière précise sous éclairage normal direct (DNI) variable et conditions météorologiques connues, une cellule PV monocristalline pour tester sa réponse I-V, P-V. Le banc d'essai doit permettre de répéter cette opération selon divers profils d'alignement de dispositif à concentration (lentilles de Fresnel) en azimut et en élévation par rapport au soleil. Les paramètres à caractériser seront principalement le courant de court-circuit I_{cc} , la tension V_{co} ; le facteur de forme (FF), le rendement électrique et la puissance produite P.

Mots clés : monocristallin, météorologiques, lentilles de Fresnel

Abstract

The main objective of this work is to design and assemble a test bench to verify in real conditions the behavior of a PV cell under concentration. It is therefore a matter of accurately positioning, under variable normal direct illumination (DNI) and known weather conditions, a mono-crystalline PV cell to test its I-V, P-V response. The test bench must allow this operation to be repeated according to various alignment profiles of the concentration device (Fresnel lenses) in azimuth and in elevation relative to the sun. The parameters to be characterized will mainly be the short-circuit current I_{sc} , V_{oc} ; the form factor (FF), the electric yield and the power produced P.

Keywords: mono-crystalline, azimuth and in elevation, Fresnel lenses

REMERCIEMENTS

Après avoir rendu grâce à DIEU le tout puissant pour ce qu'il nous a tant donné comme volonté, santé et surtout patience pour pouvoir, durant toutes ces longues années d'études arriver là où nous sommes aujourd'hui et de concrétiser tous nos efforts par ce modeste travail. Nous tenons à remercier vivement tous ceux qui participé, de près ou de loin.

À M. SAID Nouredine qui m'a permis de bénéficier de son encadrement, ses précieux conseils et son aide durant toute la période du travail.

Je tiens à le remercier sincèrement pour sa disponibilité, sa gentillesse et sa patience.

À M. DOUMAZ Toufik qui bien voulu présider ce jury et aux membres du jury pour l'intérêt qu'il a porté à notre modeste travail en acceptant de l'examiner.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail, en particulier les professeurs : M. DOUMAZ Toufik, M. Bourrai Azzedine et M. CHARANE Hamid. Et aussi, à tous nos enseignants du département des énergies renouvelables pour les efforts consentis et la formation qui nous ont donnés durant notre cycle d'étude

Dédicaces

*Je dédie ce travail à mes chers parents qui ont
toujours été là pour moi, pour tous les sacrifices
qu'ils ont consentis pour me permettre de suivre
mes études*

*À ma chère sœur Fatima, mes chers frères qui
Ont été toujours à mes cotés*

*À mes Cousines : Rima, Nesrine, Amal, Wissem,
je leur souhaite une belle vie plein de joie*

À toute ma famille, à tous mes amis et à tous

Ceux qui ont contribué à ce modeste travail

NOMENCLATURE-SYMBOLS-ACRONYMES

TS : Température de surface (Soleil)

Ti : Température interne (Soleil)

Ds : Diamètre (Soleil)

ΣT : Superficie (Soleil)

Vs : Volume (Soleil)

Ms : Masse (Soleil)

ρ_s : Densité (Soleil)

$D_{T,S}$: Distance moyenne Terre-Soleil

Ct : Le coefficient de correction de la distance Terre-Soleil

δ : La déclinaison solaire

ω : L'angle horaire

T_{sv} : solaire réelle

Tl : Temps locale (heures).

DTL : Différence entre temps locale et temps standard (heures).

Dhg : le décalage horaire

E : équation du temps

φ : l'altitude

h : hauteur de soleil

ψ : L'azimut du soleil

λ : longueur d'onde

I_{ph} : Densité de photo courant génère.

I_{obs} : Densité de courant d'obscurité

I_s : Courant de saturation de la diode.

q : Charge élémentaire d'un électron

K : Constante de Boltzmann

T : Température effective de cellule en Kelvin.

R_s : Résistance série

R_{sh} : Résistance shunt

FF : facteur de forme

η : Le rendement

HCPV : haute concentration

X : Facteur de concentration

LISTE DES FIGURES

Figure (I-1) : Structure du soleil.....	4
Figure (I-2) : La hauteur et l'azimut de soleil.....	6
Figure (I-3): Répartition spectrale de rayonnement solaire.....	7
Figure (I-4) : Composantes de rayonnement solaire.....	8
Figure (I-5) : L'effet Photovoltaïque.....	9
Figure (I-6) : Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque	9
Figure (I-7) : Représentation du principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	10
Figure (I-8) : Caractéristiques I-V à l'obscurité et sous éclairement d'une cellule photovoltaïque.....	11
Figure (I-9) : Caractéristiques I-V et P-V d'une cellule solaire.....	13
Figure (I-10): Schéma équivalent d'une cellule solaire.....	14
Figure (I-11) : Évolution en laboratoire du rendement des cellules photovoltaïques.....	15
Figure (I-12) : Technologies des cellules photovoltaïques.....	16
Figure (I-13): Structure d'une cellule à base de silicium.....	17
Figure (I-14) : Plaque de silicium monocristallin.....	17
Figure (I-15) : Plaque de silicium Poly cristallin.....	18
Figure (II-1): Carte du monde représentant l'Irradiation Normale Directe (DNI)[18].....	21
Figure (II-2) : Différents capteurs solaires à concentration : (1) miroir de Fresnel ;(2) cylindro parabolique ; (3) centrale à tour et (4) parabolique.....	22
Figure (II-3) : Cellules à concentration utilisant un miroir semi sphérique Fresnel SolFocus.....	24
Figure (II-4) : Cellules à concentration utilisant des lentilles de DeEnergy Innovations....	24
Figure (II -5) : Schéma d'un système CPV.....	25
Figure (II -6) : Schéma d'un système d'ensemble MCP.....	28
Figure (II -7): Caractéristique I-V selon différents niveaux d'éclairement.....	30
Figure (II -8) : Caractéristique I-V selon différentes plages de la température.....	31
Figure (II -9) : Caractéristique I-V selon différentes plages de la température.....	31
Figure (III-1): Multimètre pour mesurer le courant et la tension.....	34
Figure (III-2): Thermocouple pour mesurer la température.....	35

Figure (III-3):Pyranomètre.....	36
Figure (III-4): Méthode utilisé pour la mesure de l'éclairement.....	36
Figure (III 5):Le refroidissement de la cellule.....	37
Figure (III-6): Circuit électrique utiliser à l'expérimentation.....	37
Figure (III-7): Dispositif utilisé dans les tests sous concentration.....	38
Figure (III-8): Dispositif utilisé dans les tests sous un même soleil.....	39
Figure (IV-1) : Courbe de caractérisation I-V lors de test 1 sous un soleil.....	41
Figure (IV-2) : Courbe de caractérisation I-V lors de test 2 sous un soleil.....	42
Figure (IV-3) : Courbe de caractérisation I-V lors de test 3 sous un soleil.....	43
Figure (IV-4) : Courbe de caractérisation I-V lors de test 4 sous un soleil.....	44
Figure (IV-5) : Courbe de caractérisation I-V lors de test 5 sous un soleil.....	45
Figure (IV-6): Courbe de caractérisation I-V lors de test 6 sous un soleil.....	46
Figure (IV-7) :Caractéristiques I-V pour diverses conditions de rayonnement solaire (compte tenu de la résistance en série) sous un même soleil.....	48
Figure (IV-8) : Courbe de caractérisation I-V lors de test 1 sous concentration.....	49
Figure (IV-9): Courbe de caractérisation I-V lors de test 2 sous concentration.....	50
Figure (IV-10): Courbe de caractérisation I-V lors de test 3 sous concentration.....	51
Figure (IV-11): Courbe de caractérisation I-V lors de test 4 sous concentration.....	52
Figure (IV-12): Courbe de caractérisation I-V lors de test 5 sous concentration.....	53
Figure (IV-13): Courbe de caractérisation I-V lors de test 6 sous concentration.....	54
Figure (IV-14): Courbe de caractérisation I-V lors de test 7 sous concentration.....	55
Figure (IV-15) :Caractéristiques I-V pour diverses conditions de rayonnement solaire (compte tenu de la résistance en série) sous concentration.....	57

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre1

Tableau (I-1) : Caractéristiques du système Soleil-Terre.....4

Tableau (I-2) : comparaisons entre différents cellules photovoltaïques à base de silicium.18

Chapitre II

Tableau (II -1) : comparaison entre différents technologies photovoltaïques
concentrées.....23

Tableau (II-2): Technologies de cellules et modules en fonction du niveau de
concentration.....29

Chapitre IV

Tableau (IV-1):Paramètres de caractérisation de tous les tests.....47

Tableau (IV-2):Paramètres de caractérisation de tous les tests.....56

TABLE DES MATIERES

Résumé

Remerciements

Dédicaces

Nomenclatures-Symboles-Acronymes

Listes des Figures

Liste des Tableaux

INTRODUCTION GENERALE1

CHAPITRE I : GENERALITES SUR GISEMENT SOLAIRE, CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

Introduction.....	3
Gisement Solaire.....	3
I-Soleil.....	3
I-1Caractéristiques Astronomiques du système Soleil-Terre.....	4
I-2 Distance Terre-Soleil.....	4
I-3 Déclinaison solaire.....	5
I-4 Angle horaire.....	5
I-5 Coordonnées géographiques.....	5
I-6 Hauteur du Soleil.....	5
I-7 Azimut du soleil.....	6
I-8 Durée d'ensoleillement	6
II-Le rayonnement solaire.....	6
II-1 Composants de rayonnement solaire	7
III- Etude de la cellule à conversion photovoltaïque.....	8
III-1 L'effet photovoltaïque.....	8

III-2 La cellule photovoltaïque.....	9
III-3 Principe de fonctionnement de la cellule solaire.....	10
III-4 Caractéristiques électriques d'une cellule PV.....	11
III-4-1 Courant de court-circuit.....	12
III-4-2 Tension de circuit ouvert.....	12
III-4-3 Facteur de forme.....	12
III-4-4 Rendement de conversion.....	13
III-4-5 L'efficacité	13
III-4-6 Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	13
III-5 Etat de l'art sur les rendements	15
III-6 Filières des cellules photovoltaïques.....	15
III-6-1 Cellules photovoltaïques à base de silicium.....	17
III-6-2 Principe de fonctionnement d'une cellule monocristalline.....	18
Conclusion du chapitre I	19

CHAPITRE II : CONCENTRATION PHOTOVOLTAÏQUE

Introduction.....	20
I- La conversion photovoltaïque sous flux solaire concentré.....	20
I-1 Les différentes technologies des cellules Solaires sous Concentration...22	
I-2 Description des cellules photovoltaïques sous flux concentrée.....	23
I-3 Dispositif de suivi d'un système CPV.....	25
I-4 Suivi du CPV.....	26
I-4-1 Distance focale.....	26
I-5 Facteur de concentration.....	27
I-6 Impact de la concentration solaire	28
I-7 L'effet de l'éclairement sur les caractéristiques I-V.....	30
I-8 L'effet de la température sur la caractéristique I-V	31
Conclusion du Chapitre II.....	32

CHAPITRE III : CONCEPTION ET REALISATION DU BANC D'ESSAIS

Introduction.....	33
Description du dispositif.....	33
Description des instruments utilisés.....	34
➤ Multimètre.....	34
➤ Thermomètre.....	35
➤ Pyranomètre.....	35
➤ Système de refroidissement.....	36
➤ Circuit électrique utilisé à l'expérimentation.....	37
III-2 Test de cellule sous un soleil.....	38
III-3 Test de cellule sous concentration.....	38
Conclusion du Chapitre III.....	39

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Introduction	40
IV-1 Résultats et analyse sous un soleil.....	41
➤ Test 1.....	41
➤ Test 2.....	42
➤ Test 3.....	43
➤ Test 4.....	44
➤ Test 5.....	45
➤ Test 6.....	46
IV-2 Résultats et analyse sous concentration.....	49
➤ Test 1.....	49
➤ Test 2.....	50

➤ Test 3.....	51
➤ Test 4.....	52
➤ Test 5.....	53
➤ Test 6.....	54
➤ Test 7.....	55
IV-3 Comparaison des resultats des deux parties experimentaux(sous soleil et sous concentration).....	58
Conclusions et recommandations.....	59
Conclusion générale.....	60

INTRODUCTION GENERALE

La consommation d'énergie primaire mondiale reste dominée par les énergies fossiles, avec des conséquences économiques et environnementales de plus en plus évoquées : coûts croissants liés à la hausse des prix des ressources fossiles, niveau limité de sécurité énergétique, contribution à la pollution locale et aux changements climatiques, dont les impacts pourraient être dramatiques [1].

Dans ce contexte, l'exploitation des énergies renouvelables est de plus en plus cruciale. La source renouvelable la plus abondante et qui connaît depuis 2010 une croissance significative est l'énergie solaire à concentration photovoltaïque (CPV) qui est capable de produire de l'électricité en grande quantité sur le long terme sans émettre de gaz à effet de serre. Lancées par la crise pétrolière de 1973, les technologies de conversion photovoltaïque sous concentration ont fait l'objet de nombreuses recherches depuis 1975[2]. Différents matériaux ainsi que plusieurs architectures de cellules solaires sont apparus pour fabriquer un module photovoltaïque à haut rendement. L'expérience montre que le fonctionnement des cellules solaires dépend fortement de plusieurs paramètres; internes et externes (lié à l'environnement: éclairage, concentration, température, etc.). L'étude de l'influence de ces différents paramètres sur le fonctionnement des photovoltaïques solaires est possible à travers la connaissance de l'influence de chaque paramètre sur la caractéristique I-V de la cellule. En effet, en focalisant le rayonnement solaire sur ces cellules avec une lentille de Fresnel. Dans ce sens Ce projet consiste à la conception et la réalisation d'un banc d'essai extérieur de caractérisation de modules CPV, sous conditions réelles et variables pour tester la réponse (I-V, P-V) d'une cellule PV à base de silicium monocristallin. La méthodologie de test proposée dans cet article utilise la lumière solaire et une lentille de Fresnel pour concentrer la lumière sur la cellule PV en silicium. L'appareil est équipé d'un suivi solaire. Ainsi, le principal avantage de l'expérimentation solaire en extérieur est de travailler dans les conditions réelles de fonctionnement d'une installation solaire. L'insolation (irradiance solaire) et les facteurs ambiants ne sont pas contrôlables, mais les conditions de test extérieures peuvent être étudiées et enregistrées en mesurant les grandeurs physiques appropriées avec des instruments appropriés. Un autre avantage de l'utilisation de la lumière directe du soleil est d'éviter l'utilisation de sources artificielles, de lampes ou de simulateurs solaires, qui ne peuvent que tenter de reproduire la distribution spectrale, la divergence et l'intensité de la lumière solaire.

Pour ce faire, notre manuscrit se décompose de la manière suivante :

Dans le premier chapitre nous présentons une Généralité sur gisement solaire le rayonnement solaire les cellules photovoltaïques, le principe de fonctionnement, les caractéristiques électriques de la cellule et les filières des cellules photovoltaïques

Le chapitre 2 présente une étude sur la concentration photovoltaïque. En présentant

Les dispositif et les technologies des systèmes de concentration, facteur et impact de concentration on indiquant l'effet de l'alignement sur caractéristiques des cellules solaires monocristallins ainsi que l'effet de l'éclairement et de la température sur les caractéristiques de la cellule

Le chapitre 3 est consacré à la Conception et réalisation du banc d'essais et la Caractérisation en conditions réelles du dispositif (cellule-lentilles-suiveur), les instruments utilisés et l'expérimentation sous un soleil et sous concentration. Les résultats des tests et la comparaison entre les deux tests sont présentés et interprétés dans le quatrième chapitre.

Conclusions et recommandation

Chapitre I

Etat de l'art

Généralités sur le gisement solaire, cellules

Photovoltaïques

Introduction :

les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques capable de convertir directement la lumière en électricité en utilisant l'interaction de la lumière avec certains matériaux semi- conducteurs

Ce chapitre présente les bases du domaine dans lequel se situent ces travaux de thèse, Nous décrirons la nature et les normes associées au rayonnement solaire, l'effet photovoltaïque et les cellules photovoltaïques. Nous aborderont le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. Puis, Nous discuterons des paramètres électriques des caractéristiques courant-tension de ces cellules .en fin nous traiterons les différents filières des cellules photovoltaïques

Gisement Solaire :

I-Soleil :

Le soleil est une petite étoile, une boule de gaz, dont le diamètre est de 1391000Km, et qui est- situé à 150 000 000Km de nous. Cette distance est si grande que sa lumière nous parvient 8 minutes après avoir été émise. La lumière se propage à la vitesse 300 000 km/s c'est à dire quelle fait 7 fois le tour de la terre en 1 seconde. Le soleil tourne sur son axe environ une fois toutes les 4 semaines. Notre soleil est donc une énorme boule de gaz composée de 70% d'hydrogène et de 28% d'hélium, les 2 % restants sont formés par autres éléments présents dans l'univers. Le soleil a une température effective d'un corps noir de 5777K ° [3]

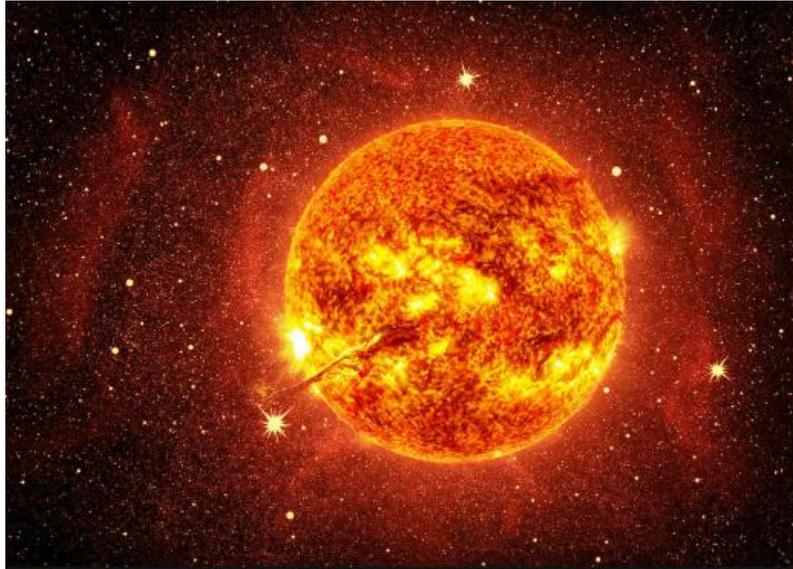


Figure I-1 : structure du soleil

I-1 Caractéristiques Astronomiques du système Soleil-Terre :

Grandeur		
Température de surface (Soleil)	T_S	6000 K
Température interne (Soleil)	T_i	40 000 000 K
Diamètre (Soleil)	D_S	$139.14 \times 10^4 \text{ km} = 109.05 D_T$
Superficie (Soleil)	Σ_T	$6.093 \times 10^{12} \text{ km}^2 = 11918 \Sigma_T$
Volume (Soleil)	V_S	$1.412 \times 10^{18} \text{ km}^3 = 1\,301\,000 V_T$
Masse (Soleil)	M_S	$332\,488 M_T$
Densité (Soleil)	ρ_S	$0.255 \rho_T$
Distance moyenne Terre-Soleil	$D_{T,S}$	$1.4953 \times 10^8 \text{ km}$

Tableau (I-1) : Caractéristiques du système Soleil-Terre [4].

I-2 Distance Terre-Soleil:

La trajectoire de la Terre autour du Soleil est une ellipse avec le Soleil à l'un des foyers. La distance moyenne Terre-Soleil varie de 144 (21 décembre) à 154 millions de km (21 juin). Le coefficient de correction de la distance Terre-Soleil (sans dimension) peut être calculé par l'équation [5]:

$$C_t = 1 + 0.034 \cdot \cos(j-2) \quad (\text{I-1})$$

Où J est le numéro de jour de l'année, compris entre 1 le 1er janvier et 365 le 31 décembre

I-3 Déclinaison solaire:

La déclinaison solaire δ (degrés) est l'angle entre la direction du Soleil et le plan équatorial de la Terre. La déclinaison varie de $-23^{\circ}27'$ au solstice d'hiver à $+23^{\circ}27'$ au solstice d'été, tandis qu'aux équinoxes elle est nulle. La déclinaison solaire peut être calculée par l'équation donnée par Copper (1967) [5]:

$$\delta = 23,25 \cdot \sin(0,986 \cdot (j + 284)) \quad (\text{I-2})$$

I-4 Angle horaire:

L'angle horaire ω (degrés) est l'angle entre le plan méridien passant par le centre du Soleil et le plan vertical du lieu (méridien) et définit le vrai temps solaire T_{sv} (heures). L'angle horaire peut être calculé par l'équation suivante [5]:

$$\omega = 15 \cdot (12 - T_{sv}) \quad (\text{I-3})$$

Avec T_{sv} (heures) est l'heure solaire réelle du local étudié et elle est déterminée par la relation: $T_{sv} = T_l - DTL + (Dhg + E/60)/60$ (I-4)

T_l : Temps locale (heures).

DTL : Différence entre temps locale et temps standard (heures).

Dhg : le décalage horaire (avance de 4 minutes par degré).

E : équation du temps, qui est calculée par l'équation :

$$E = 45,8 \cdot \sin(2\pi \cdot j/365 - 0,026903) + 595,4 \cdot \sin(4\pi \cdot j/365 + 0,352835) \quad (\text{I-5})$$

I-5 Coordonnées géographiques:

Les coordonnées géographiques du lieu étudié sont représentées par : l'altitude φ (degrés), la longitude (degrés) et l'altitude z (m), où l'altitude est l'angle entre la position étudiée avec l'équateur et la longitude est l'angle entre le méridien de l'étude avec la position du méridien [5]

I-6 Hauteur du Soleil:

La hauteur du Soleil h (degrés) est l'angle entre les plans horizontaux et la direction du Soleil. La valeur $h = 0$ est au lever et au coucher du soleil, la hauteur du soleil varie entre 90° (zénith) et -90° (nadir) et est calculée par la formule suivante [5]:

$$h = \sin^{-1}(\sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega)) \quad (\text{I-6})$$

I-7 Azimut du soleil:

L'azimut du soleil ψ (degrés) est l'angle sur le plan horizontal, étant la projection de la direction du soleil avec la direction vers le sud. L'azimut est compris entre

$-180^\circ \leq \psi \leq 180^\circ$, et il est fonction de la déclinaison solaire δ , la hauteur du Soleil h et

l'angle horaire ω , peuvent être calculés par la formule suivante [5]:

$$\psi = \sin^{-1}(\cos(\delta) \cdot \sin(\omega) / \cos(h)) \quad (\text{I-7})$$

I-8 Durée d'ensoleillement :

Il est calculé par la formule suivante :

$$Sg = 2/15 \cdot \cos^{-1}(-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)) \quad (\text{I-8})$$

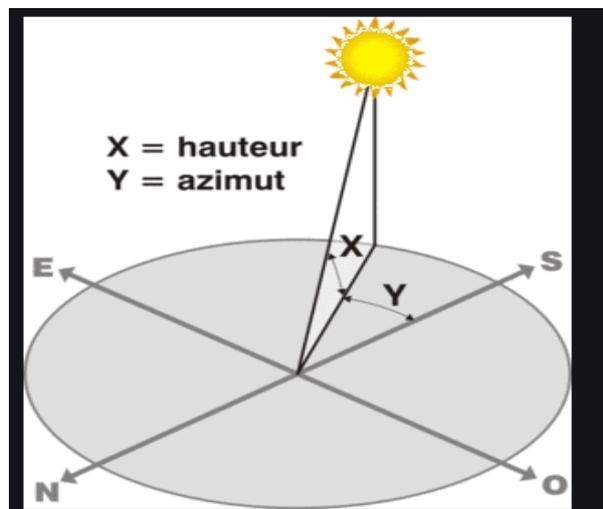


Figure I-2 La hauteur et l'azimut de soleil

II-Le rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire désigne l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le soleil. Le soleil se comporte comme un corps noir à 5 800 K (température moyenne de son atmosphère). Son rayonnement se compose d'ultraviolets (dans la gamme de longueur d'onde $\lambda : 200 \text{ nm} < \lambda \leq 380 \text{ nm}$), de la lumière visible ($380 \text{ nm} < \lambda \leq 780 \text{ nm}$) et d'infrarouges ($780 \text{ nm} < \lambda \leq 10\,000 \text{ nm}$). Par réflexion et absorption du rayonnement solaire, l'atmosphère modifie le spectre solaire arrivant au sol [6]

L'énergie solaire reçue par la terre en dehors de l'atmosphère est environ 1370 W/m^2 . cette grandeur appelée le constant solaire [7]

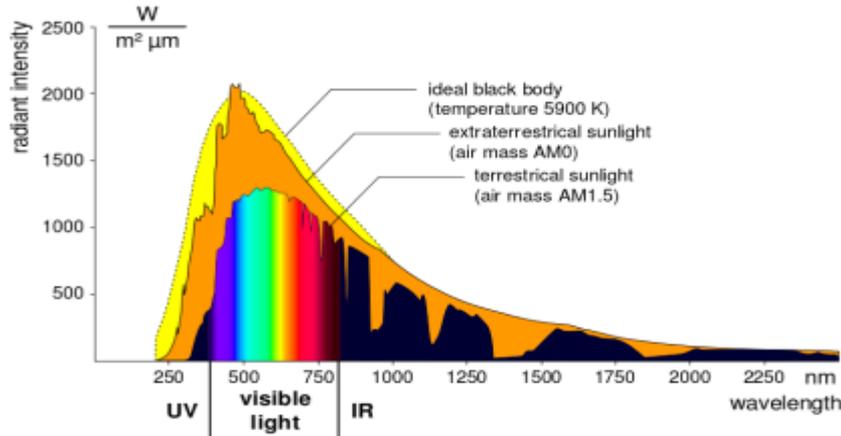


Figure I-3: Répartition spectrale de rayonnement solaire

Le domaine de longueur d'onde utile pour les applications solaires est situé entre $0.25\mu\text{m}$ et $2.5\mu\text{m}$ l'énergie émise dans cette bande (contenant les zones UV, Visible et IR) représente 95% environ du totale. Mais la concentration photovoltaïque ne concerne que le rayonnement direct provenant de soleil par temps clair.

Les concentrateurs sont alors dotés de dispositifs de suivi de la course du soleil en hauteur et en azimut. En effet, le trajet parcouru par le rayonnement solaire au cours d'une même journée est à son min aux premières heures de la matinée et en fin d'après midi. Par contre il est à son max lorsque le soleil est au Zénith. L'intensité du rayonnement varie au cours des saisons avec la latitude [8]

II-2 Composants du rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire global est alors la somme des deux types de rayonnements direct et diffus et dont l'intensité est variable d'un endroit à un autre et d'une heure à l'autre [9].

a. Rayonnement direct: il est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère, ses rayons sont parallèles entre eux, il ne forme donc pas d'ombres et peut être concentré par des Miroirs.

b. Rayonnement diffus: il 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.

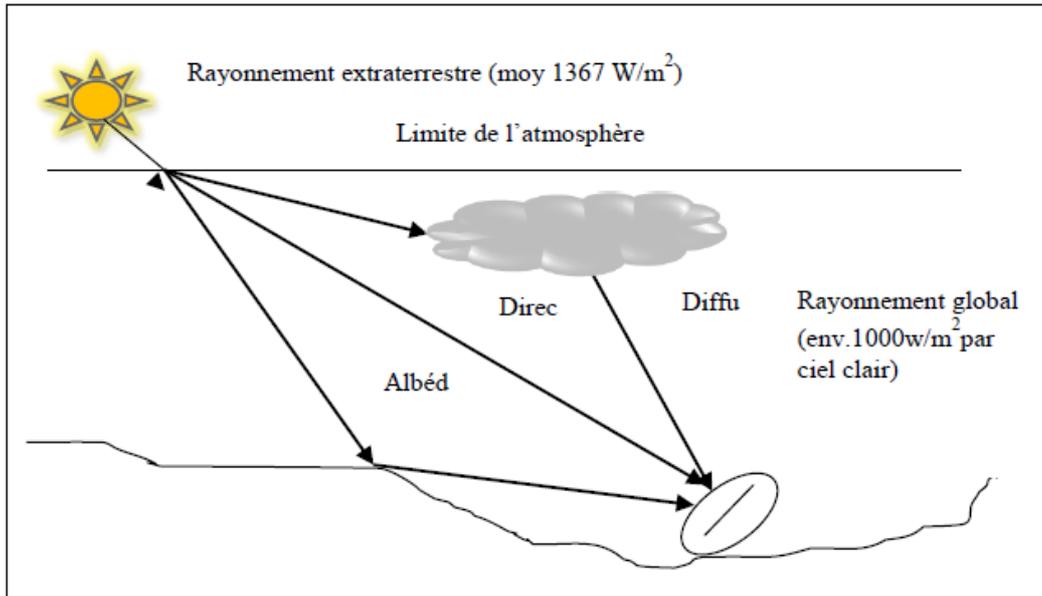


Figure I-4 : Composantes de rayonnement solaire

III- Etude de la cellule à conversion photovoltaïque :

III-1 L'effet photovoltaïque :

L'énergie photovoltaïque est obtenue en exposant à la lumière un capteur appelé cellule Solaire ou photopile. Il s'agit d'un phénomène physique dit "effet photovoltaïque" qui permet de produire d'électricité à partir du rayonnement solaire. La découverte de ce dernier est attribuée à Antoine Becquerel en 1839 [10]. Le principe repose sur l'interaction lumière-matière dans les semi-conducteurs. En effet, lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite sont absorbés créant ainsi des paires électron-trou par le passage des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction.

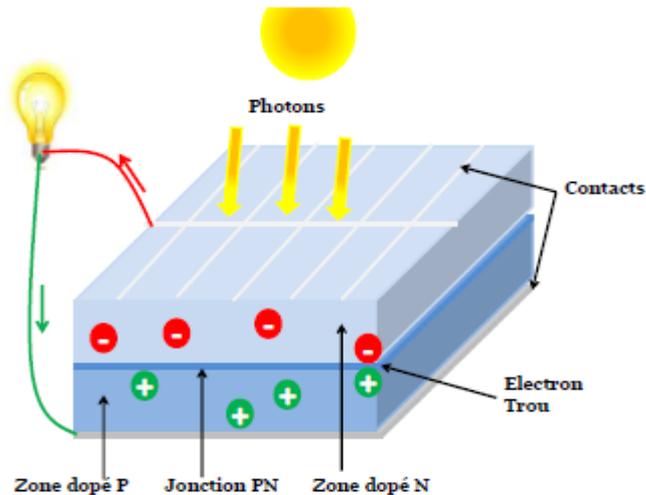


Figure I-5 : L'effet Photovoltaïque

III-2 La cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque (cellule PV), aussi appelée cellule solaire, constitue l'élément de base de la conversion photovoltaïque, il s'agit d'un dispositif semi-conducteur qui transforme en énergie électrique l'énergie lumineuse fournie par une source d'énergie, le soleil. Elle exploite les propriétés des matériaux semi-conducteurs utilisés dans l'industrie de l'électronique : diodes, transistors et circuits intégrés. La cellule photovoltaïque est schématisée de façon détaillée sur la figure (I-6).

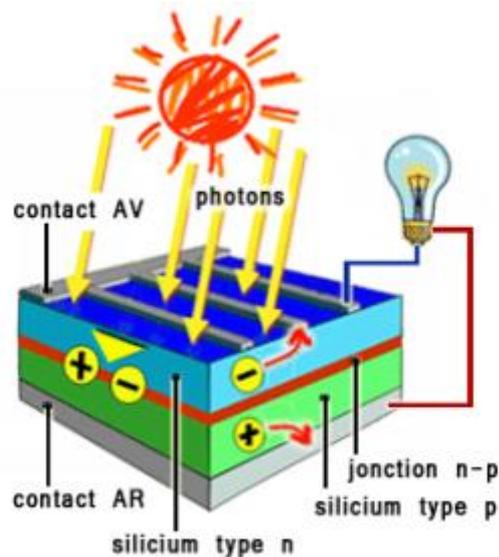


Figure I-6 : Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque [11].

III-3 Principe de fonctionnement de la cellule solaire :

La cellule solaire est un composant semi-conducteur qui converti l'éclairement incident en Puissance électrique. Pour simplifier, la cellule photovoltaïque est physiquement une tranche de silicium que l'on prend en sandwich entre deux électrodes métallique (+) et (-) pour collecter le courant produit. Cette cellule se compose d'une jonction PN, elle est obtenue en dopant les deux faces d'une tranche de silicium. Sous l'action d'un rayonnement solaire, les atomes de la jonction libèrent des charges électriques de signes opposés qui s'accumulent de part et d'autre de la jonction pour former un générateur électrique. [12].

La conversion d'énergie photovoltaïque met en jeu trois phénomènes physique, intimement liés et simultanés [13]:

- L'absorption des photons dont l'énergie est supérieure au gap par le matériau constituant le dispositif
- La conversion de l'énergie absorbée du photon en charge électrique libre. Ceci correspond à la création d'une paire électron-trou dans le matériau semi-conducteur.
- La collecte des particules générées dans un circuit électrique

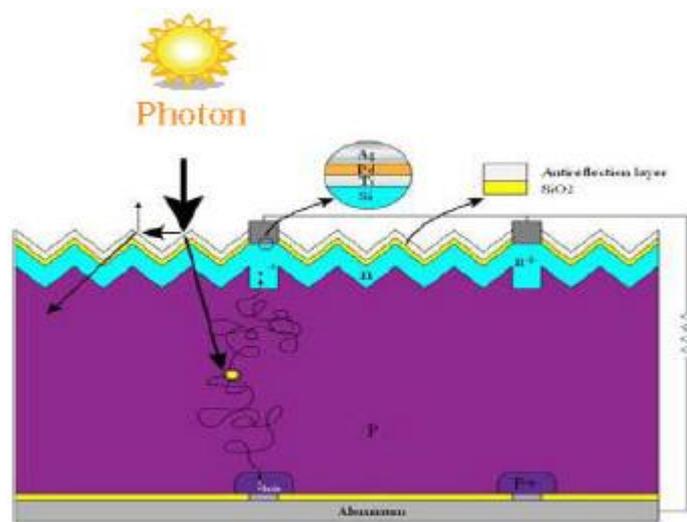


Figure I-7 : Représentation du principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [13].

III-4 Caractéristiques électriques d'une cellule PV :

Une cellule photovoltaïque est définie par sa courbe caractéristique électrique (courant-tension). Elle indique la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension aux bornes de la cellule depuis le court-circuit jusqu'au circuit ouvert [14].

$$(V) = I_{ph} - (V) = I_{ph} - I_s (e^{qV/KT} - 1) \quad (I-9)$$

I_{ph} : Densité de courant photo génère en Ampères.

I_{obs} : Densité de courant d'obscurité en Ampères.

V : Tension aux bornes de cellule en Volts.

I_s : Courant de saturation de la diode en Ampères.

q : Charge élémentaire d'un électron ($q = 1,602 \cdot 10^{-19}C$).

K : Constante de Boltzmann ($K = 8,62 \cdot 10^{-5} eV.K^{-1}$).

T : Température en Kelvin.

La caractéristique d'une cellule à l'obscurité est représenté sur la figure (I.8) les deux Caractéristiques courant-tension d'une cellule solaire à l'obscurité en noir, et sous illumination en rouge. On remarque que la courbe sous illumination est simplement décalée par rapport à la première d'une valeur qui traduit la génération constante du courant par la lumière. Cette valeur est appelée courant de court-circuit, puisque c'est le courant que génère la cellule sous lumière à tension nulle. La valeur V_{co} , à l'inverse, est la tension de circuit ouvert. Il représente en fait l'égalité du courant de génération par la lumière et du courant à l'obscurité [14].

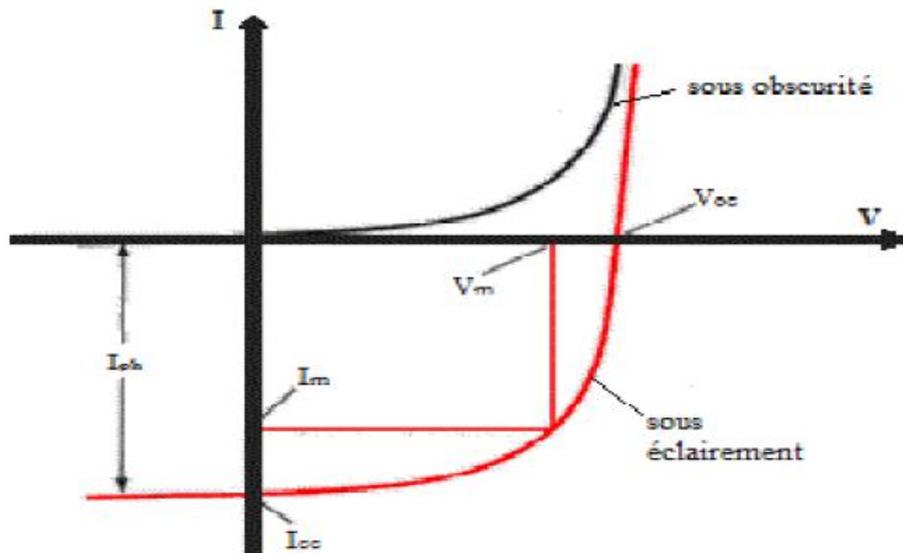


Figure I-8 : Caractéristiques I-V à l'obscurité et sous éclairnement d'une cellule photovoltaïque.

A partir de la caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque, on déduit les paramètres électriques propres à la cellule.

III-4-1 Courant de court-circuit :

Le courant de court-circuit I_{cc} exprimé en A, est le courant qui circule dans la cellule sous éclairement et en court-circuitant les bornes de la cellule. Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et il dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs de charges et de la température.

$$(V = 0), I = -I_{ph} = I_{cc}$$

$$I_{cc} = I_{ph} / \left[1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right] \quad (I-10)$$

Où :

I_{ph} : Photo-courant [A], proportionnel à l'irradiance F, avec correction selon T.

R_s : Résistance série [W].

R_{sh} : Résistance shunt (ou parallèle) [W].

Le terme condition optimisée est utilisé parce que pour une surface de cellule exposée fixe, la vitesse de production de courant dans une cellule solaire dépend également de l'intensité de la lumière et de l'angle sous lequel la lumière tombe sur la cellule.

III-4-2 Tension de circuit ouvert :

La tension exprimée en V mesurée aux bornes des électrodes quand le circuit est ouvert est appelée «tension de circuit ouvert» V_{co} . Quand le courant qui traverse la cellule est nul, la tension est donnée par la relation :

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \ln (I_{cc}/I_s + 1) \quad (I-11)$$

Avec :

q : Charge de l'électron = 1,602. 10⁻¹⁹ Coulomb

K : Constante de Boltzmann = 1,38. 10⁻²³ J/K

T : Température effective de la cellule [Kelvin].

I_0 : courant de saturation.

III-4-3 Facteur de forme :

Le facteur de forme est un paramètre important pour définir la qualité d'une cellule. C'est le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} * V_{co}$: $FF = P_M / I_{cc} V_{co} = I_M V_M / I_{cc} V_{co}$ (I-12)

Avec : P_M : puissance maximale.

Ce paramètre compris entre 0 et 1, on l'exprime en % qualifie la forme plus ou moins rectangulaire de la caractéristique I-V de la cellule solaire.

III-4-4 Rendement de conversion :

Le rendement η de la cellule solaire exprimé en pourcentage, Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{inc} .

$$\eta = P_{max}/P_{inc} = FF \cdot I_{cc} \cdot V_{oc} / P_{inc} \quad (I-13)$$

Si S est la surface de la cellule (en m^2) et E est (en W/m^2). Le rendement énergétique s'écrit :

$$\eta = \frac{P_m}{E} * S \quad (I.14)$$

Ou d'après:(I.14)

$$P_m = FF * V_{co} * I_{cc} \quad (I.15)$$

$$\eta = FF * V_{co} * I_{cc} / E * S$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert (figure I-9).

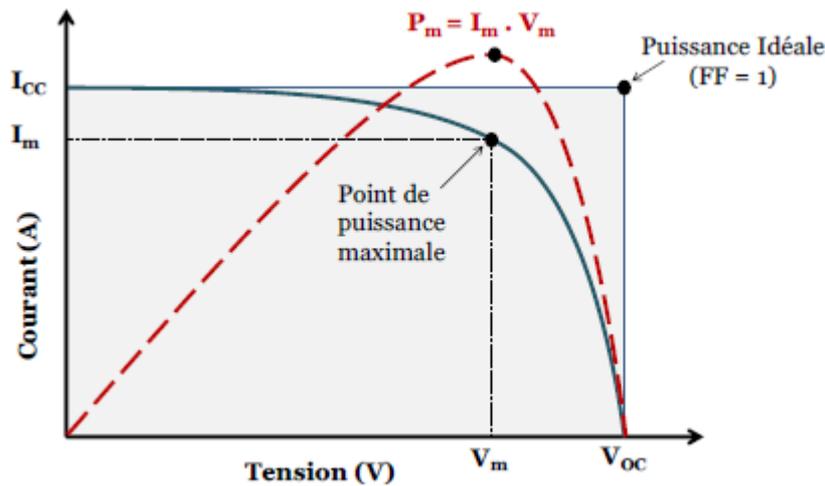


Figure I-9 : Caractéristiques I-V et P-V d'une cellule solaire. [15]

III-4-5 l'efficacité :

Il est défini comme le rapport entre la puissance électrique maximale et la puissance de rayonnement absorbée par la cellule. Efficacité = $P_m / (P_{inc} * A)$

III-4-6 Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque :

Une cellule solaire réelle peut être schématisée par la figure (I-10). Elle propose un modèle Électrique de la cellule photovoltaïque. On y retrouve le générateur de courant I_{ph} correspondant au courant photo généré opposé au courant d'obscurité $I_{obs} = I_d$ de la diode polarisée en direct, ainsi que des résistances R_S , R_{sh} et la résistance de charge R_L .

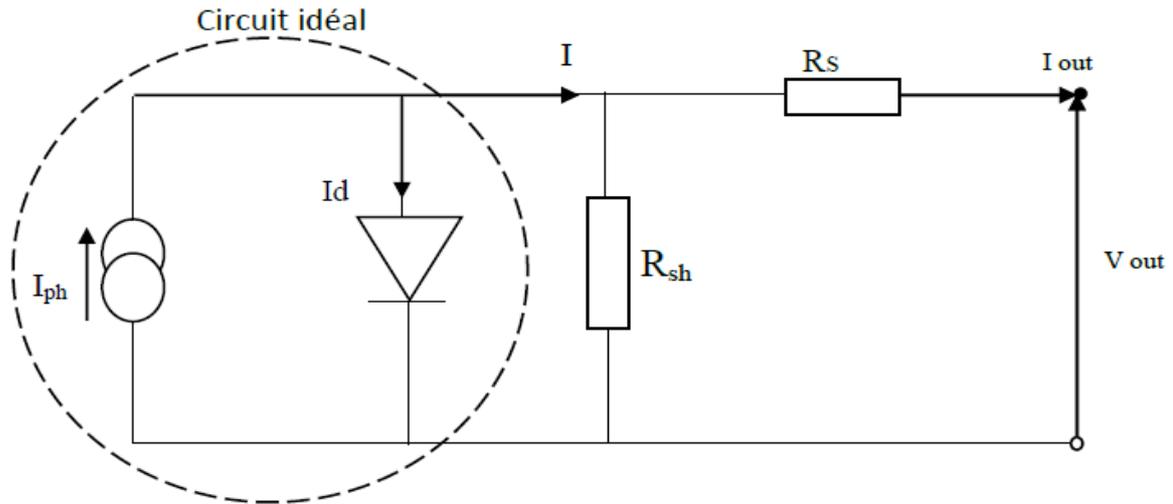


Figure I-10: Schéma équivalent d'une cellule solaire

III-5 Etat de l'art:

La technologie photovoltaïque (PV) est une solution propre et inépuisable pour convertir l'énergie solaire en énergie électrique [16]. Depuis les débuts de l'application photovoltaïque terrestre, étant donné que les cellules solaires PV étaient trop chères, pour cela l'utilisation de la concentration de la lumière solaire est apparue comme une solution pour réduire considérablement le coût du photovoltaïque. [17]. Ce concept est connu sous le nom de technologie photovoltaïque à concentrateur. Cette technologie consiste à rediriger la lumière du soleil sur une petite zone de cellule solaire grâce à des dispositifs optiques. Ainsi, la surface de la cellule PV est réduite tandis que, dans le même temps, l'intensité lumineuse sur le dispositif augmente du même rapport. Les systèmes CPV a commencé en 1975 et son développement a été encouragé par le "Concentrator Program" américain qui a vu le jour en raison de la prévision de l'augmentation des coûts des combustibles fossiles à la suite des crises pétrolières des années 70.

Le CPV a été principalement conçu pour les grandes centrales électriques, visant à produire de grandes quantités d'énergie renouvelable et à concurrencer les centrales à combustibles fossiles conventionnelles [18]. Dans le cadre de ce programme, le premier prototype de concentrateur a été développé au Sandia National Laboratories d'Albuquerque au milieu de 1976. Ce prototype était un concentrateur 40x, utilisant cellules solaires en silicium et lentilles de Fresnel montées sur un système de suivi à deux axes [19].

Différentes technologies sont aujourd'hui utilisées dans la filière photovoltaïque. La Figure (I-11) présente les évolutions des rendements des différentes filières.

Nous pouvons observer qu'à ce jour, les plus hauts rendements sont obtenus avec les Cellules multi jonction sous concentration, tandis que les plus faibles rendements sont obtenus avec les cellules solaires organiques.

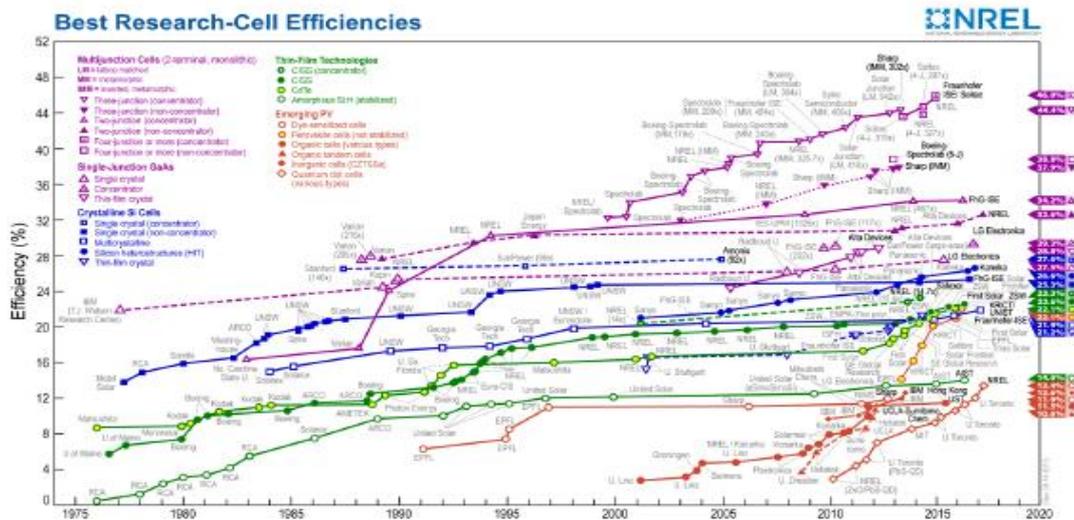


Figure (I-11) : Amélioration de l'efficacité des cellules solaires de laboratoires pour les différentes filières des cellules photovoltaïques [20].

Ces cellules multi jonctions peuvent certes donner des meilleurs rendements mais ils ont aussi des coûts de fabrication élevés, ce qui limite leur application au niveau spatial et militaire. Afin de diminuer ces coûts, on utilise pour cette technologie, des cellules solaires sous forte concentration lumineuse. Cela consiste à capter le rayonnement solaire grâce à une série de dispositifs optiques (lentilles ou miroirs) pour le concentrer sur une cellule solaire de faible surface. La concentration varie de 2 à plus de 1000 fois la puissance lumineuse émise par le soleil. Elle s'exprime en unité dite "soleil" ("Sun") qui indique par combien la densité de puissance incidente du soleil est multipliée. Comme le montre la figure (I.11), le rendement maximal des cellules à base de silicium est d'environ 25%, et peut atteindre 28% pour les cellules sous concentration, alors que les cellules multi jonctions approchent les 46% de rendement sous concentration [21].

III-6 Filières des cellules photovoltaïques :

Il existe plusieurs technologies de cellules qui ont toutes des propriétés différentes. Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteur qui est capable de conduire l'électricité. Cellules photovoltaïques sont généralement classées en

trois générations, en fonction du matériau de base utilisé et du niveau de maturité commerciale.

Les systèmes PV de première génération (entièrement commerciaux) utilisent la technologie du silicium cristallin (c-Si) à base de plaquettes, soit monocristalline (sc-Si) ou multicristallin (mc-Si).

Les systèmes photovoltaïques de deuxième génération (premier déploiement sur le marché) reposent sur des technologies PV à couches minces et comprennent généralement trois grandes familles:

- (1) silicium amorphe (a-Si) et micro morphe (a-Si / c-Si);
- (2) tellure de cadmium (CdTe);
- (3) séléniure de cuivre-indium (CIS) et de cuivre-indium-gallium (CIGS).

Les systèmes PV de troisième génération comprennent des technologies, telles que la concentration de PV (CPV) et des cellules PV organiques, qui sont encore en cours de démonstration ou qui n'ont pas encore été largement commercialisées, ainsi que de nouveaux concepts en cours de développement.

La production commerciale de modules c-Si a commencé en 1963 lorsque Sharp Corporation du Japon a commencé à produire des modules PV commerciaux et a installé un module PV de 242 watts (W) sur un phare, la plus grande installation PV commerciale du monde à l'époque [22].

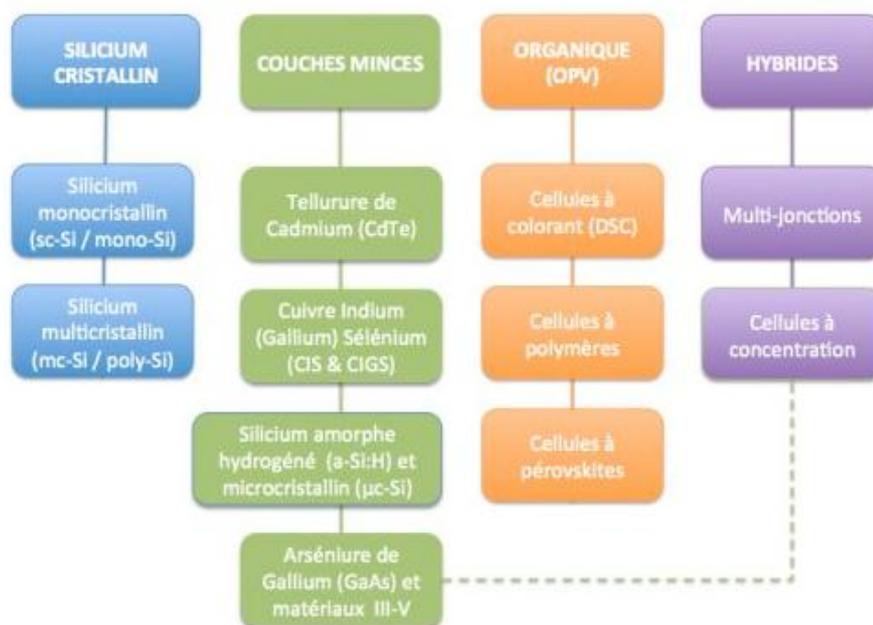


Figure (I-12) technologies des cellules photovoltaïques

III-6-1 Cellules photovoltaïques à base de silicium :

Le silicium représente le deuxième élément le plus abondant sur terre après l'oxygène et peut donc être considéré comme inépuisable [23]. La recherche sur la filière du silicium cristallin a débuté dans les années 1950 en France [24]. Les cellules cristallines se subdivisent en 2 catégories : mono- et poly- cristalline selon le type de structure. Ces deux types de cellules proviennent de procédés de purification et de solidification différents.

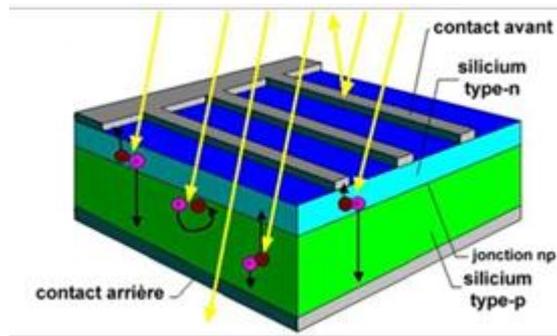


Figure (I-13): Structure d'une cellule à base de silicium

➤ Le silicium mono cristallin :

Le silicium mono cristallin est difficile à obtenir. En effet, il nécessite un taux de pureté très élevé et donc plusieurs étapes de purification. Les cellules monocristallines ont un taux de rendement excellent (16 à 24%) mieux que le poly cristallin et l'amorphe mais leur méthode de production est laborieuse et délicate, et donc, très chère ; il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur. Pour cela ils ont utilisé de la concentration pour diminuer du coût de cellules [25]



Figure (I-14) Plaque de silicium monocristallin.

- **Silicium poly cristallin :** Le silicium multi cristallin (Poly cristallin) est devenu aujourd'hui la technologie la plus utilisée. A-t-elle seule elle représente près de 50% du marché [24]. Les cellules poly cristallin ont un coût de production moins élevé et un rendement qui varie entre 14 à 18% [25].



Figure (I-15) Plaque de silicium Poly cristallin.

Type de cellules	Rendement			Cout
	Théorique	En laboratoire	Actuel	
Silicium monocristallin	27%	27.4%	14à16%	+++
Silicium poly cristallin	27%	19.8%	12à14%	++
Silicium Amorphe	25%	13%	6à8%	+

Tableau (I-2) : comparaisons entre différents cellules photovoltaïques à base de silicium

III-6-2 Principe de fonctionnement d'une cellule monocristalline:

Dans une cellule mono jonction, seuls les photons dont l'énergie est égale ou supérieure à la bande interdite du matériau (notée E_g en eV) sont absorbés et capables de créer des paires électron-trou. Les photons ayant une longueur d'onde inférieure à celle de la bande interdite sont « perdus ». Ainsi, la plupart des photons traversent le matériau sans création de paires électrons trous. De plus, lorsque l'énergie apportée par un photon est supérieure à la bande interdite, l'excès d'énergie est dissipé sous forme de chaleur par thermalisation. Une solution, pour limiter les pertes, consiste à utiliser des cellules multi-jonctions comportant plusieurs jonctions réalisées avec des matériaux possédant des gaps décroissants. Ainsi il est

possible de mieux exploiter le spectre solaire avec des rendements de conversion plus importants.

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules.

Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme.

Conclusion du chapitre I :

Nous avons rappelé dans ce chapitre quelques notions sur le gisement, le rayonnement solaire. Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque et ses caractéristiques électriques principales. Enfin, nous avons montré les différentes technologies des cellules à base de silicium cristallin précisément sur les cellules monocristallin.

Chapitre II

Concentration photovoltaïque

Introduction :

La méthode de production des cellules monocristallins est laborieuse et délicate, et donc, très chère ; il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pour cela il y a une autre voie d'amélioration consiste à réduire la surface des modules tout en augmentant le flux surfacique du rayonnement incident à l'aide de systèmes optiques performants : c'est ce que propose le CPV (Concentrator PhotoVoltaic). Les avantages du CPV sont nombreux. Outre le gain provenant de la réduction des surfaces des modules, les rendements atteints sont plus élevés, les temps de retour énergétique sont plus faibles [26] et les performances électriques des cellules sont moins affectées par l'élévation de la température. Car si les rendements sont souvent donnés à 25°C, cette température ne correspond absolument pas à la température réelle de fonctionnement. En moyenne, les modules atteignent des températures de l'ordre de 60°C ; et les conséquences sur la production électrique sont désastreuses.

Ce chapitre est consacré à la concentration photovoltaïque sous flux concentré, les différentes technologies des cellules solaires sous flux concentrée on présente aussi le principe de fonctionnement des cellules monocristallins, on schématise ensuite le dispositif de concentration d'un système CPV enfin le facteur et l'impact de concentration

I- La conversion photovoltaïque sous flux solaire concentré :

En concentration solaire, l'augmentation du rendement de conversion est proportionnelle au logarithme de la concentration solaire. Cela reste vrai si les effets thermiques sont maîtrisés, donc pour des faibles pertes résistives. Le courant débité par la cellule étant proportionnel au flux solaire absorbé, il est également possible de fabriquer des cellules beaucoup plus petites pour produire une puissance électrique donnée. Par exemple, en simplifiant, pour une cellule qui fonctionne à 1 000 soleils, la surface de cellule nécessaire sera 1 000 fois plus

petite que celle d'une cellule dite classique, d'où une économie considérable sur la matière première. Cependant, le photovoltaïque sous concentration, CPV, ne se résume pas à une seule cellule mais il y a des sous-cellules pour la meilleure absorption du rayonnement solaires

Le CPV est une technologie photovoltaïque haut rendement. Elle utilise la concentration du soleil pour augmenter l'irradiation sur des cellules haute efficacité qui peuvent comporter une ou plusieurs jonctions. Nous parlerons de cellules simple-jonction (1J). L'augmentation de l'intensité sur les cellules a pour effet l'augmentation de leur rendement. L'utilisation d'optiques de concentration permet de rentabiliser l'utilisation de cellules haute efficacité en minimisant la surface active nécessaire pour une surface de captation donnée. Le système optique impose au module de suivre la course du soleil au moyen d'un tracker. Nous détaillerons plus loin dans ce chapitre l'architecture d'un module CPV. L'enjeu du CPV. Les rendements des modules CPV installés aujourd'hui sont d'environ 30%. Le photovoltaïque à concentration se positionne comme un concurrent direct du PV sur le marché des centrales solaires. [27]

Le photovoltaïque à concentration devient très intéressant si on l'utilise à un endroit sur la planète où le DNI (Direct Normal Irradiation) est plus important (voir carte ci-dessous).

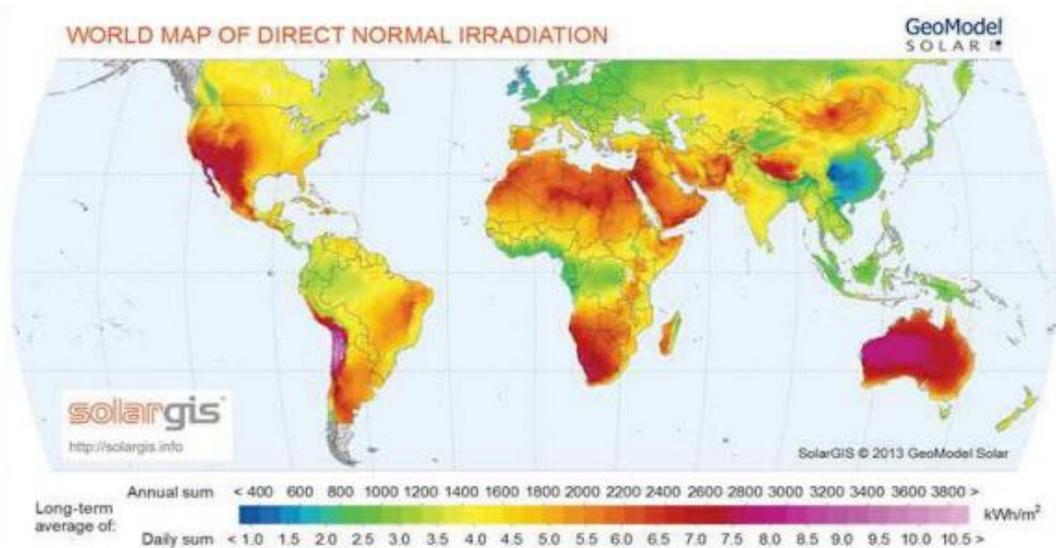


Figure (II-1): Carte du monde représentant l'Irradiation Normale Directe (DNI) [28].

Les zones géographiques dont l'énergie d'irradiation annuelle dépasse les 2500 kWh/m² sont particulièrement intéressantes pour le photovoltaïque à concentration solaire (CPV). [29]

I-1 Les différentes technologies des cellules Solaires sous Concentration :

Selon les moyens de concentrer les rayonnements solaires nous qualifions les différentes technologies des cellules PV et alors différentes centrales solaires thermodynamiques. } Les centrales solaires à miroir de Fresnel ; } Les centrales à collecteurs cylindro-paraboliques ; } Les centrales à tour ; } Les centrales à capteurs paraboliques.



Figure (II-2) : Différents capteurs solaires à concentration : (1) miroir de Fresnel ; (2) cylindro parabolique ; (3) centrale à tour et (4) parabolique.

Il existe deux principales façons de concentrer fortement la lumière du soleil : soit à l'aide d'un miroir parabolique, soit avec une lentille. La lentille de Fresnel utilise moins de matériau qu'une lentille classique et son coût est moindre.

➤ La technologie cylindro-paraboliques :

Un collecteur cylindro-parabolique est un capteur solaire à foyer linéaire, fondamentalement composé d'un concentrateur en forme de cuvette parabolique qui reflète le rayonnement solaire direct sur un tube récepteur situé dans la ligne focale de la parabole

Avec ce type de technologie, la parabole réfléchit les rayons du soleil sur une cellule photovoltaïque pour produire de l'électricité. Cette technologie est aussi largement utilisée dans la concentration à but thermique tel que les paraboles linéaires.

➤ La technologie à miroirs de type de Fresnel :

La technologie à miroirs de type Fresnel, plus récente, utilise des réflecteurs plans (légèrement courbes) donc plus simples d'élaboration que les miroirs cylindro-paraboliques.

La motorisation se fait également sur un axe. Plusieurs miroirs reflètent les rayons du Soleil sur un même tube. Les miroirs de Fresnel basés sur la même technologie que les lentilles de Fresnel, les miroirs permettent de mettre à plat une parabole en la «découpant » en plusieurs tronçons. L'espace occupé est donc restreint comparé à une parabole classique et la prise au vent se voit réduite puisque chaque mouvement de miroir est contrôlé par des moteurs.

On peut donc orienter les miroirs pour réguler la concentration (ex : enlever ou rajouter la focalisation d'un miroir), ou passer en position sécurité en les positionnant à plats (en cas de vent violent).

La lentille de Fresnel (ou lentilles à échelon). Ce type de lentille a permis de réduire considérablement l'épaisseur du verre.

Les rendements sont inférieurs aux réflecteurs de types paraboliques mais l'industrialisation de ce procédé est nettement plus accessible, moins onéreuse et facile à l'installation. De plus, cette technologie est largement répandue dans la concentration solaire thermique donc les processus d'industrialisation sont déjà développés.

Technologie	Cylindro-parabolique	Tour	Parabole
Rendement thermique nominal	70%	73%	75%
Puissance des installations	80-300 kW_{th}	10-100 kW_{th}	1-100 kW_{th}
Concentration	60- 400	700-1200	6000-10000
Température de travail	270- 450° C	450-1000°C	600-1200°C
Prix du champ solaire	210- 250 €/m ²	140- 220 €/m ²	~ 150 €/m ²
Coût total d'investissement	2.8- 3.5 €/W _e	3- 4€/W _e	10- 14 €/W _e

Tableau (II -1) : comparaison entre différents technologies photovoltaïques concentrées

[30]

I-2 Description des cellules photovoltaïques sous flux concentrée :

Les cellules monocristallines permettent donc d'atteindre de très hauts rendements sous concentrations. Cependant, cette technologie de cellules reste complexe et très coûteuse, ce qui la limite aux applications spatiales et militaires. Afin, d'utiliser ce type de cellules photovoltaïques sur terre, une réduction des coûts est nécessaire. Une solution peut être la concentration, c'est-à-dire que l'on concentre le rayonnement incident sur une cellule de faible surface. Cette technique a le double avantage d'augmenter la densité du courant

produite, et donc le rendement des cellules, et de diminuer la surface des cellules nécessaires, limitant les coûts de fabrication. Il existe deux grandes familles de concentrateurs : les concentrateurs à miroir et les concentrateurs à lentille de Fresnel. La figure (II-3) et la figure (II-4) montrent des cellules à concentration commerciales utilisant ces technologies. Les rendements commerciaux annoncés approchent les 40 % [31].

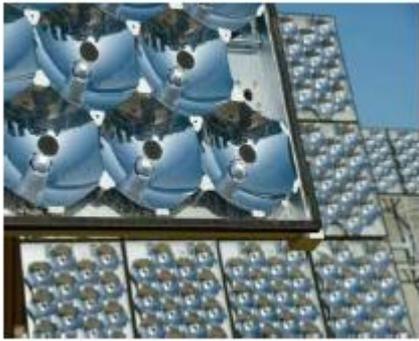


Figure (II-3) : Cellules à concentration
Utilisant un miroir semi-sphérique
SolFocus [32].



Figure (II-4) : Cellules à concentration
utilisant des lentilles de Fresnel de
D'Energy Innovations [33].

Dans les premières conceptions, les cellules solaires intégrées dans les systèmes CPV se composaient de cellules solaires en silicium conventionnelles ou de cellules en silicium modifiées pour de meilleures performances sous des niveaux d'irradiation plus élevés (plus d'un soleil). A cette époque, les cellules solaires à base de semi-conducteurs III-V, plus efficaces, n'étaient utilisées que dans les applications spatiales car elles étaient trop chères. Cependant, cette perspective a changé avec le développement de systèmes CPV à concentration élevée et très élevée, qui peuvent se permettre ces cellules à haut rendement sans poids significatif sur le coût total du système CPV en raison de la très petite surface de cellule requise [34].

I-3 Dispositif de suivi d'un système CPV :

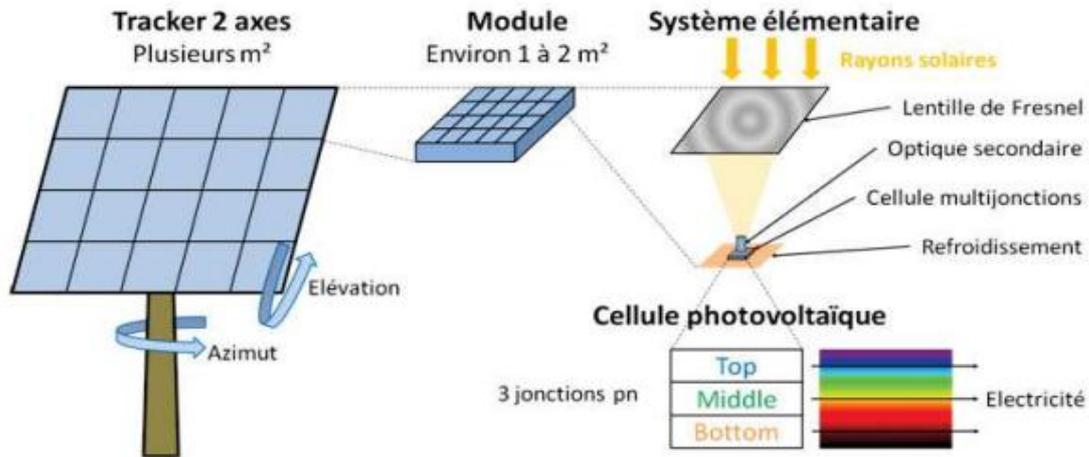


Figure (II-5): Schéma d'un système CPV (source : séminaire de Mathieu Baudrit à Lyon en 2015).

Le schéma de la Figure (II-5) représente un exemple d'un système photovoltaïque à concentration solaire (CPV). Il est constitué d'un suiveur solaire à deux axes (Tracker) dans lequel sont emboîtés des modules, eux-mêmes constitués de systèmes élémentaires sous lesquels sont placées les cellules photovoltaïques.

La cellule solaire fixée sur un diffuseur de chaleur refroidi (de manière active ou passive) est placée au foyer d'une lentille de Fresnel ou d'un miroir parabolique qui concentre le rayonnement directement sur elle. Une optique secondaire peut également être utilisée pour homogénéiser le flux solaire et le guider sur la cellule. Plusieurs de ces ensembles élémentaires (cellule, refroidissement, guide optique) sont alors assemblés afin d'obtenir un module dont la taille sera de l'ordre du m². La tendance actuelle va vers la fabrication de modules de plus en plus grands. La raison est simple : un système CPV doit rester parfaitement perpendiculaire au soleil. Les modules sont donc positionnés sur des systèmes de suivi du soleil (Trackers) à deux axes qui suivent en permanence la trajectoire du soleil avec une précision de l'ordre du dixième de degré. Ces suiveurs solaires doivent être très précis et résister au vent. Les trackers de grande superficie (typiquement quelques dizaines de m² ou plus) s'avèrent moins coûteux mais ils doivent supporter des poids importants [35].

I-4 Suivi du CPV :

L'utilisation de la technologie de suivi permettant aux modules solaires de suivre la trajectoire du soleil peut augmenter la production d'électricité d'environ un tiers (à condition d'optimiser l'angle d'incidence du rayonnement solaire sur leur surface). Certains affirment qu'elle peut être augmentée jusqu'à 40% dans certaines régions, par rapport à des modules à angle fixe.

En général, les modules sont fixés selon un angle optimal pour une latitude donnée, mais c'est un angle optimisé pour englober une année. Selon la latitude du lieu, l'angle peut varier de 30° selon les différentes hauteurs que peut prendre le soleil dans le ciel. La fixation des modules photovoltaïque à l'angle optimal donne généralement une amélioration d'environ 15% par rapport à une pose à plat. Les traqueurs, s'adaptent à la fois au passage quotidien du soleil et éventuellement au changement de saison.[36]

Dans de nombreuses technologies solaires de concentration (photovoltaïque et thermique), le suivi est une composante essentielle.

Il existe deux principaux types de système de suivi

- Traqueur mono-axe : le panneau tourne autour d'un axe selon un déplacement azimutal d'est en ouest au cours d'une journée.
- Traqueur double axe : le panneau tourne selon un axe d'est en ouest et selon un axe vertical.

Les chiffres sont en fonction de la latitude, mais par rapport aux modules fixés à un angle optimal, un traqueur mono-axe augmente en général la production d'électricité de 27% à 32%. De plus, un traqueur double axe ajoute en moyenne un bonus de 6% sur la performance et une amélioration de 35% à 40% de la production par rapport aux panneaux fixes.

Ces chiffres sont particulièrement impressionnants étant donné que l'industrie solaire photovoltaïque a pour but d'améliorer les performances de conversion des cellules par un simple pourcentage voire moins.

I-4-1Distance focale : On définit la distance focale comme étant la distance séparant le centre de la lentille et le foyer principale de l'objet

I-5 Facteur de concentration :

Les concentrateurs PV ont beaucoup plus de paramètres caractéristiques que les modules plats, et ils peuvent être classés selon beaucoup de critères. Par exemple, ils peuvent être divisés en deux catégories principales en fonction du niveau de concentration atteint: systèmes de mise au point ponctuelle haute concentration ($> 300 X$, HCPV) avec cellules très efficaces ($> 35\%$) et avec un coût spécifique élevé.

Concentration faible ou moyenne (2–60 X) avec des cellules en silicium d'une efficacité allant jusqu'à 20–22% et à faible coût. Au-delà, les concentrateurs peuvent être classés en fonction des moyens optiques utilisés pour concentrer la lumière, du nombre d'axes de suivi du soleil, du mécanisme mécanique qui affecte le suivi.

La HCPV (haute concentration) utilise plutôt des cellules de types composées III-V (Figure Ci-dessous). Ces cellules sont beaucoup plus performantes et donc adaptées à la haute concentration (système plus coûteux mais très performant).[37]

La moyenne et haute concentration augmente le rayonnement solaire par un facteur de 100 à 1000. Nous pouvons préciser que la moyenne a pour maximum 300 « soleils ».

Ces procédés utilisent généralement des lentilles de Fresnel à la place des miroirs mais bien-sûr beaucoup de systèmes sont mis en place.

Voici la présentation d'un exemple de système de concentration.

Les lentilles concentrent beaucoup plus les rayons du soleil que les miroirs de Fresnel sur un endroit bien précis que nous appellerons la tâche de focalisation. Or, cette tâche, si elle n'est pas précise, chauffera la cellule anormalement. Il faut donc un dissipateur performant pour évacuer de très hautes températures pour ne pas endommager la cellule.

La surface active de cellule solaire est nettement réduite grâce à la concentration du soleil. Et comme ce système est plus coûteux, il est intéressant d'utiliser des cellules photovoltaïques plus performantes du type composé III.V avec un haut rendement pour optimiser le système.

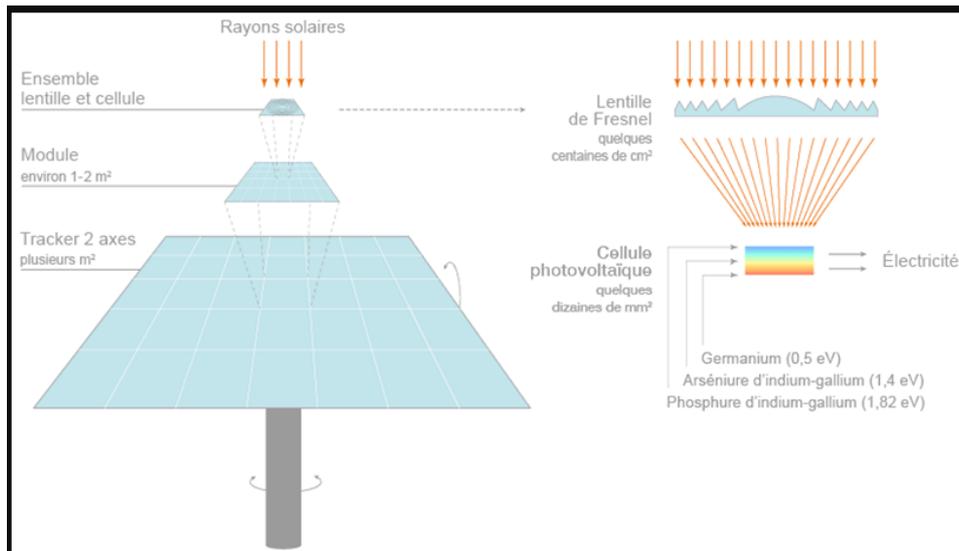


Figure (II-6) : schéma Système d'ensemble MCPV

Deux principaux dispositifs de concentration optique sont utilisés, intégrant des lentilles de Fresnel ou des miroirs paraboliques. Dans les deux cas, la cellule photovoltaïque multi-jonctions est placée au plan focal du dispositif. Plus la concentration est importante, plus l'orientation vers le soleil du panneau solaire regroupant les modules doit être précise. Pour un facteur de concentration précis, le système CPV doit être orienté avec une précision. La structure orientable du (tracker) a aussi pour rôle d'évacuer les calories issues de la transformation en chaleur de l'énergie solaire incidente qui n'est pas transformée en énergie électrique à l'intérieur des cellules. Le refroidissement de la structure est effectué par convection naturelle et ne nécessite donc aucun fluide [37]

I-6 Impact de la concentration solaire :

Le principe des systèmes sous concentration est de focaliser le flux solaire sur des cellules de petites dimensions via un système optique (lentilles, miroirs, etc). La technologie de la cellule ainsi que les matériaux utilisés dépendent alors du facteur de concentration [38]

Tableau (II-2) :

	Faible Concentration	Moyenne concentration	Forte Concentration
Concentration	2-10 soleils	10-100 soleils	> 100 soleils
Tracking	Non	1 axe	Axes
Refroidissement	Non ou passif	Passif	Actif
Technologie	Silicium	Silicium / III-V	III-V / MJ

Tableau (II-2): Technologies de cellules et modules en fonction du niveau de concentration

Le fait de concentrer la lumière présente un double intérêt :

- En diminuant la taille des cellules, on diminue les quantités de matières premières utilisées et donc le prix des cellules.
- Le rendement de conversion des cellules augmente sous concentration solaire pour une même cellule. En effet, si l'on admet que le courant de court-circuit I_{CC} d'une cellule est pratiquement égal au courant photo généré I_{ph} qui lui-même est proportionnel à l'éclairement, le courant de court-circuit d'une cellule sous concentration s'écrit :

$$I_{CC}(X) = X * I_{CC}(1 \text{ soleil}) \quad (\text{II-1})$$

La tension en circuit ouvert V_{CO} sous concentration s'obtient alors simplement à partir de l'équation de Schrockley lorsque l'on néglige le courant de saturation de la diode par rapport au courant photo générée :

$$\begin{aligned} V_{OC}(X) &= nKT/q \ln (I_{CC}(X)/I_0) = nKT/q \ln(X * I_{CC}(1 \text{ soleil})/I_0) \\ &= V_{OC}(1 \text{ soleil}) + nKT/q \ln(X) \end{aligned} \quad (\text{II-2})$$

On observe que la tension en circuit ouvert est proportionnelle au logarithme du facteur de concentration. Ainsi que le rendement des cellules sous concentration solaire augmente également selon $\ln(X)$.

I-7 L'effet de l'éclairement sur les caractéristiques I-V :

Le courant débité par une cellule dépend fortement du niveau d'éclairement. On constate expérimentalement que le courant de court-circuit est directement proportionnel à l'éclairement. Quant à la tension, celle-ci est peu sensible aux variations du niveau d'éclairement.

Sur l'exemple ci-contre, lorsque le niveau d'éclairement est divisé par 2 (il passe de 1000 W/m² à 500 W/m²), on constate que le courant de court-circuit I_{cc} est aussi divisé par 2 (il passe de 5 A à 2.5 A) et la tension en circuit ouvert V_{co} diminue de 4 %.

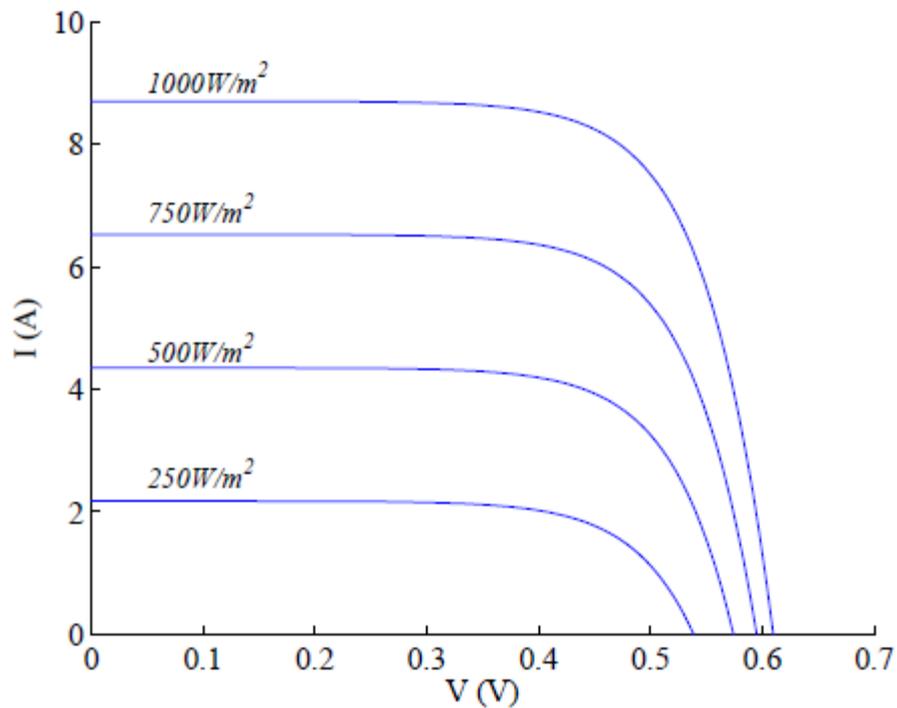


Figure (II-7) : Caractéristique I-V selon différents niveaux d'éclairement

I-8 L'effet de la température sur la caractéristique I-V :

On observe que le courant reste constant mais la tension diminuée avec l'augmentation de la température donc la température influe sur la valeur de la tension

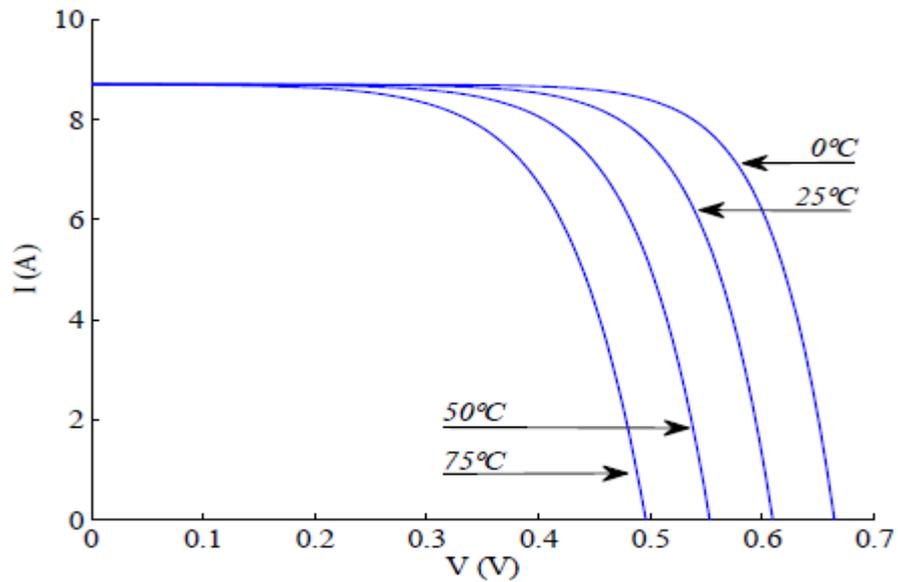


Figure (II -8): Caractéristique I-V selon différents plages de la température

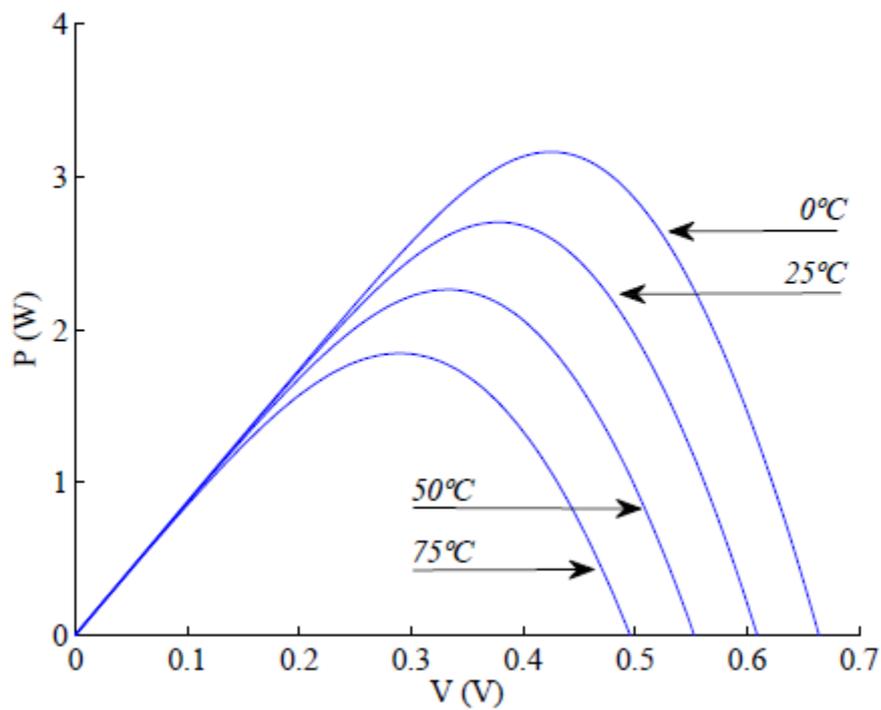


Figure (II-9) : Caractéristique I-V selon différents plages de la température

On observe que le point de puissance maximal change avec la température lorsque la température augmente le point de puissance maximal diminue aussi que la tension

Conclusion du Chapitre II :

Nous avons vu dans ce chapitre les technologies de cellules photovoltaïques, principe de fonctionnement de des cellules PV et la description de telles cellules sous concentration, nous avons également décrit le dispositif de système CPV, le facteur de concentration et son impact.

Chapitre III

Conception et Réalisation du banc d'essai

Expérimentation

Introduction :

Plusieurs technologies telles que la mécanique, l'électronique, l'optique et la thermique sont utilisées dans le domaine des énergies renouvelables. L'enquête expérimentale est menée sur un suiveur solaire à double axe qui a une cellule solaire photovoltaïque en silicium très pur (monocristallin) et a une surface de 2 cm * 2 cm.

III-1 Description du Dispositif :

L'arrière entièrement métallisé de la cellule solaire est placé sur le système de refroidissement juste pour diminuer la température. Lorsque la cellule solaire fonctionne dans des conditions extérieures, la variation de la température pour une tension de fonctionnement donnée fait varier la condition de fonctionnement de la cellule. Un thermomètre est utilisé pour mesurer la température de la cellule. L'objectif est d'atteindre une efficacité toujours croissante de la cellule solaire et une réduction des coûts, des exigences: des résultats de test précis, répétables, rapides et fiables. Les travaux de recherche, de conception et de développement nécessaires pour atteindre des performances supérieures nécessitent des équipements de test précis.

Pour la partie mécanique, le dispositif de la figure III-1 est un suiveur solaire à deux axes, qui nous permet de suivre manuellement la position du soleil en en azimut et en hauteur. D'autre part, une lentille de Fresnel d'une surface de 15 * 16 cm² est utilisée pour concentrer l'éclairement solaire incident directe sur la cellule.

Notre travail expérimental est divisé en deux parties:

La 1ère partie: consiste à caractériser la cellule solaire en la testant sous un soleil (1X).

La 2ème partie: consiste à tester la cellule sous concentration.

Une variété de mesures est utilisée pour caractériser les performances d'une cellule solaire, y compris sa puissance et son efficacité. Cette caractérisation électrique est réalisée dans le cadre de la recherche et développement de cellules et matériaux photovoltaïques, ainsi que lors du processus de fabrication. Plusieurs paramètres sont utilisés pour caractériser l'efficacité de la cellule solaire, y compris le point de puissance maximale (P_{max}), le rendement de conversion d'énergie (η) et le facteur de remplissage (FF) . Pour prendre ces mesures, nous avons besoin de deux multimètres numériques pour le courant et tension et un thermomètre pour la température. Pour plus de précision, nous utilisons un photomètre et un compteur d'énergie solaire.

III-2 Description des instruments utilisés :

Multimètre : Un multimètre numérique (DMM) est un outil de test utilisé pour mesurer deux ou plusieurs valeurs électriques, principalement la tension (volts), le courant (ampères) et la résistance (ohms).

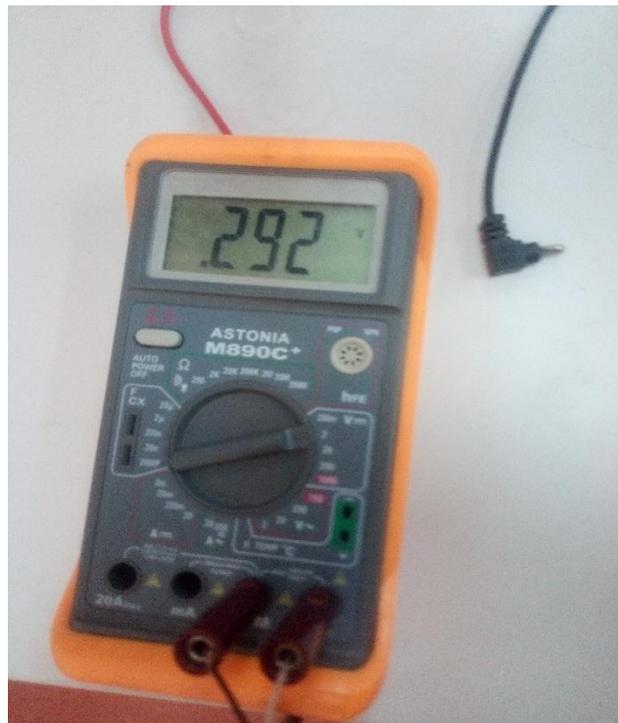


Figure (III-1) : Multimètre pour mesurer le courant et la tension

Thermomètre :

Un thermocouple est un appareil électrique constitué de deux conducteurs différents formant des jonctions électriques à des températures différentes. Un thermocouple produit une tension dépendante de la température à la suite de l'effet thermoélectrique, et cette tension peut être interprétée pour mesurer la température.



Figure (III-2) : Thermocouple pour mesurer la température

Pyranomètre :

Un pyranomètre est un capteur de flux thermique utilisé pour la mesure de la quantité d'énergie solaire en lumière naturelle et est notamment utilisé en météorologie. Il permet la mesure de la puissance du rayonnement solaire total en watts par mètre carré.



Figure (III-3):Pyranomètre

La méthode utilisée pour la mesure de l'éclairement est de déterminer une valeur par le multimètre en mV. Cette valeur se divise par le coefficient de sensibilité qui égale à 10.6×10^{-6} pour notre instrument, par exemple : $7.3(\text{mV})/10.610^{-6}=688.67\text{wm}^2$



Figure (III-4) : Méthode utilisé pour la mesure de l'éclairement

Systeme de refroidissement de la cellule :

La température de la cellule est très élevée lorsqu'elle est disposée au soleil et surtout lorsqu'elle est sous concentration, elle peut atteindre la valeur de 1075°C . Pour cela on refroidir la cellule par une ventilation alimenté par une batterie de 12V.



Figure (III -5) : Le refroidissement de la cellule

Circuit électrique :

Le circuit électrique se compose de trois résistances variables, 2 résistances de $100\ \Omega$ et une autre de $200\ \Omega$ branchée en série. En met ces résistances en série avec le voltmètre et la cellule et en parallèle avec l'ampèremètre

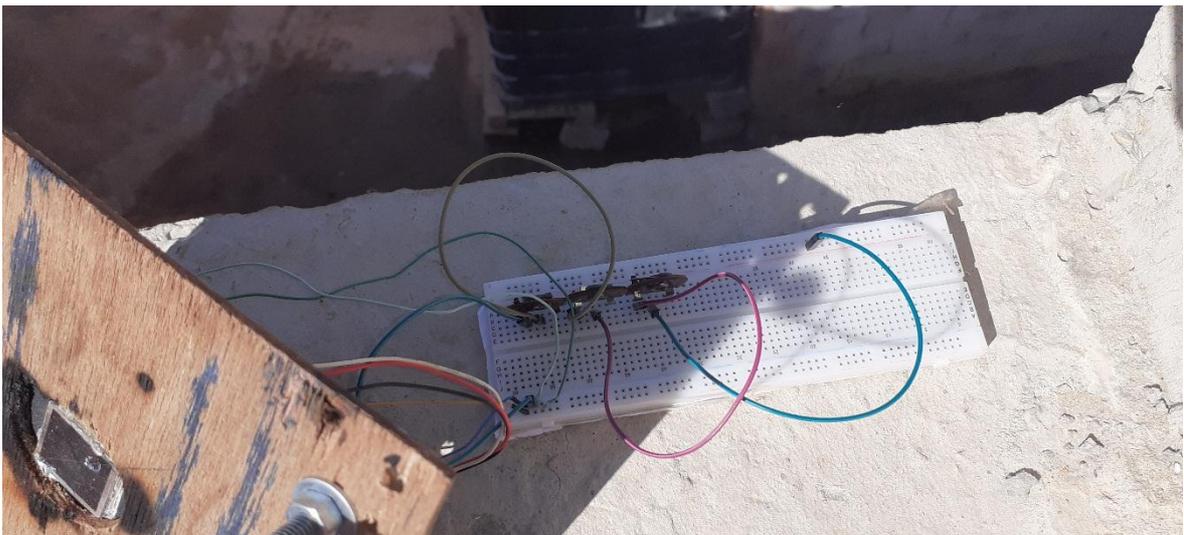


Figure (III-6): Circuit électrique utiliser à l'expérimentation

III-3 Test de cellule sous un soleil :

Les cellules sont réalisées en utilisant le suivi du soleil comme le montre la figure III-7.

Diverses mesures sont utilisées pour caractériser les performances de la cellule solaire, à différentes intensités lumineuses et différentes valeurs de résistances, on fait varier de résistances pour déterminer les caractéristiques I-V.



Figure (III-7): Dispositif utilisé dans les tests sous concentration

III-4 Test de la cellule sous concentration :

L'expérimentation optique consiste à exposer la cellule solaire à la lumière solaire concentrée par la lentille de Fresnel qui est installée sur le système de suivi solaire comme le montre la figure (III-8) La lentille est fixée à la grille au moyen de quatre petites colonnes, qui la maintiennent fixe à une certaine distance (28cm et 29cm) et parallèle au plan de la grille.

La même caractérisation pour la cellule sous un soleil est utilisée pour celle sous concentration, avec la même façon de mesurer, sauf que les changements de puissance incidente vu le vieillissement d'effet de suivi et l'alignement, nous ajoutons un autre facteur. C'est le facteur de concentration

$$P(\text{sous concentration}) = \text{DNI} * X * A_{\text{lent}}$$

$$x = C_{géo} * \eta_{op}$$

$$C_{géo} = A_{lent}/A_{cell}$$

Pour cette expérimentation $C_{géo} = (16*15)/(2*2)=225/16=60$

DNI : rayonnement direct

X : facteur de concentration

C : concentration géométrique

A_{lent} : Surface de lentille

A_{cell} : surface de la cellule

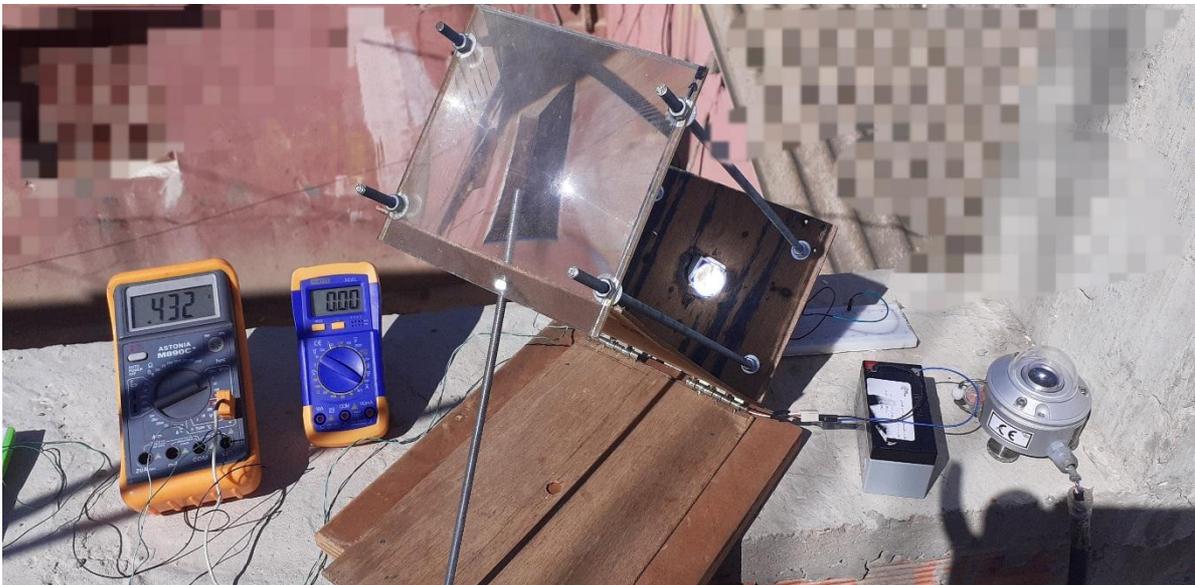


Figure (III-8): Dispositif utilisé dans les tests sous un même soleil.

Conclusion du Chapitre III :

Ces mesures sont généralement effectuées à différentes intensités lumineuses et dans différentes conditions de température. L'instrumentation telle que le multimètre, qui peut mesurer à la fois le courant et la tension, vise à simplifier les tests des matériaux photovoltaïques, ces tests, qui incluent l'éclairement, et la température.

Chapitre IV

Résultats et Discussions

Introduction:

La caractérisation électrique est réalisée dans le cadre de la recherche et développement de cellules et matériaux photovoltaïques. Plusieurs paramètres sont utilisés pour caractériser le rendement de la cellule solaire, notamment le point de puissance maximale (P_{max}), le rendement de conversion d'énergie (η) et le facteur de remplissage (FF). La caractérisation électrique est importante pour déterminer l'efficacité de la cellule. Pour déterminer cette caractérisation I-V on prend en compte des trois résistances en séries. L'expérimentation en conditions extérieures des cellules solaires est essentielle pour maximiser leurs performances. Les mesures en extérieur surveillent les effets de l'exposition d'une cellule photovoltaïque monocristalline en silicium. Notre travail expérimental est divisé en deux parties de caractérisation selon l'azimut et la hauteur de soleil ainsi que différents intensités d'éclaircissements et de températures.

Première partie consiste à caractériser la cellule solaire exposée sous un soleil. Deuxième partie consiste à tester la cellule sous la lumière solaire focalisée (concentration.)

Les résultats des tests est l'acquisition continue de la courbe I-V (courant-tension) des cellules dans différentes conditions de concentration solaire et de température d'exercice pour évaluer leur comportement.

IV-1 Résultats et analyse sous un soleil (1X):

1^{ère} expérience :

Il s'agit de la mesure de la courbe I-V comme le montre la figure (IV-1), la durée du test est de près de 3 heures de 10h30 min du matin jusqu'à midi. La hauteur de soleil est $h=36.8^\circ$ et l'azimut $a=140.4^\circ$ sous une intensité lumineuse de 876 W/m^2 , où la température ambiante est de 39° C . La température de la cellule au début du travail expérimental est de 27° C puis elle atteint

42° C durant la troisième heure. La principale caractérisation du comportement de la cellule solaire est illustrée par la courbe I-V comme le montrent les figures (IV-1).

La tension est presque stable là où le courant augmente avec l'éclairement d'une valeur de $80,4 \text{ mA}$ de et la tension prend une plage comprise entre $0,283 \text{ V}$ et $0,295 \text{ V}$.

La température de la cellule augmente. Le graphique représente un comportement correct pour une cellule photovoltaïque.

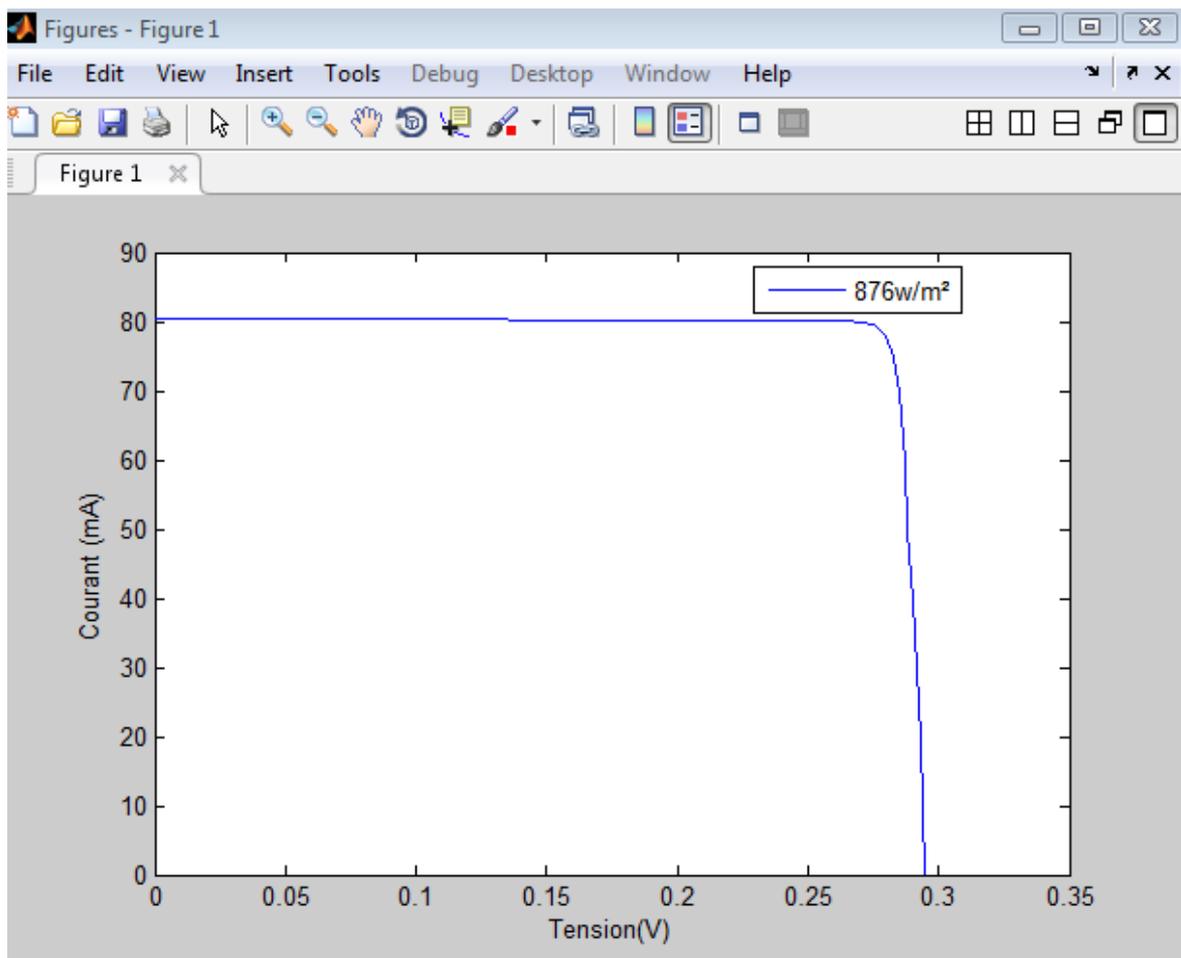


Figure (IV-1): Courbe de caractérisation I-V lors de test 1 sous un soleil

2^{ème} expérience:

La caractérisation du comportement de la cellule solaire est illustrée par la courbe I-V comme le montre la figure (IV-2), avec une durée d'exposition de près de 2 heures (à Midi) la hauteur de soleil $h=39.9^\circ$ et l'azimut $a=169.7^\circ$, sous un éclairement de $968\text{W}/\text{m}^2$, où la température ambiante est de 41°C . La tension augmente avec une valeur très petite est presque stable se situant entre 0.295 0.303V et courant augmente de $120,5\text{mA}$ et la tension se situe entre $0,260\text{V}$ et $0,269\text{V}$. La température de la cellule est de 41°C . Le graphique représente un comportement correct pour une cellule photovoltaïque. Par rapport au test1, l'efficacité de la cellule est supérieure et proportionnelle à l'éclairement.

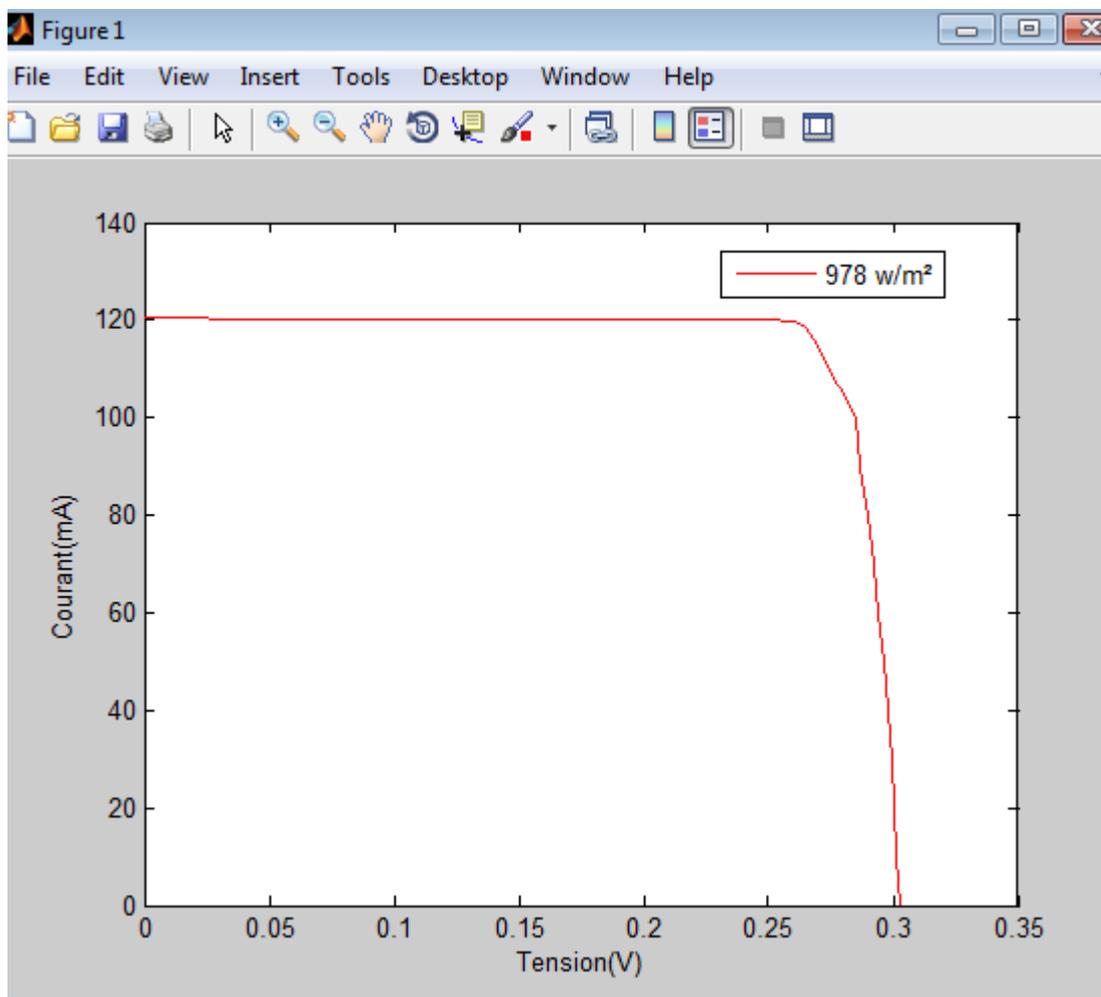


Figure (IV-2) : Courbe de caractérisation I-V lors de test 2 sous un sol

3^{ème} expérience :

Avec presque la même durée d'exposition, sous un éclairage de 678 W/m^2 et une température ambiante de 40°C , la principale caractérisation du comportement de la cellule solaire est illustrée par la courbe I-V comme le montre la figure (IV-3), avec $h=36.3^\circ$ et $a=206.8^\circ$.

La tension est comprise entre $0,265\text{V}$ et $0,276\text{V}$. Le courant diminue de $72,8 \text{ mA}$. La température de la cellule augmente lentement et atteint 42°C à la troisième heure. Le graphique représente un comportement correct pour une cellule PV.

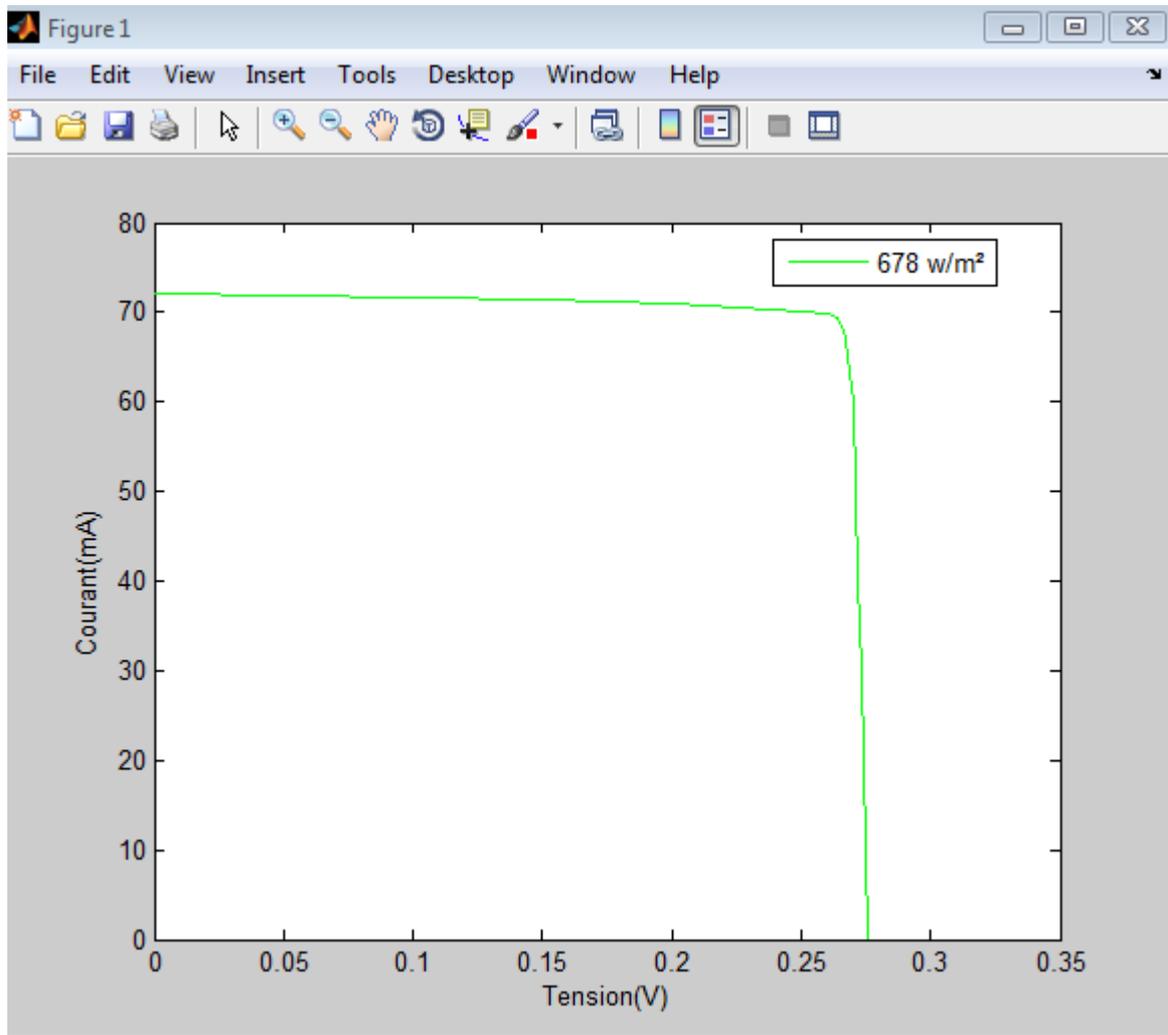


Figure (IV-3) : Courbe de caractérisation I-V lors de test 3 sous un soleil

4^{ème} expérience :

Avec une durée d'exposition de 2 heures, et sous un éclairage de 678 W/m^2 , une température ambiante de 38°C , la principale caractérisation du comportement de la cellule solaire est illustrée par la courbe I-V comme le montre la figure (IV-4), avec une hauteur de soleil $h=34.6^\circ$.

La tension diminue d'une faible valeur dans une plage presque stable comprise entre $0,260-0,269 \text{V}$. Le courant diminue de $62,4 \text{ mA}$. Lorsque l'éclairage change pour une température constante, le courant du circuit de court change proportionnellement avec l'éclairage, en même temps la tension de circuit ouvert change un peu.

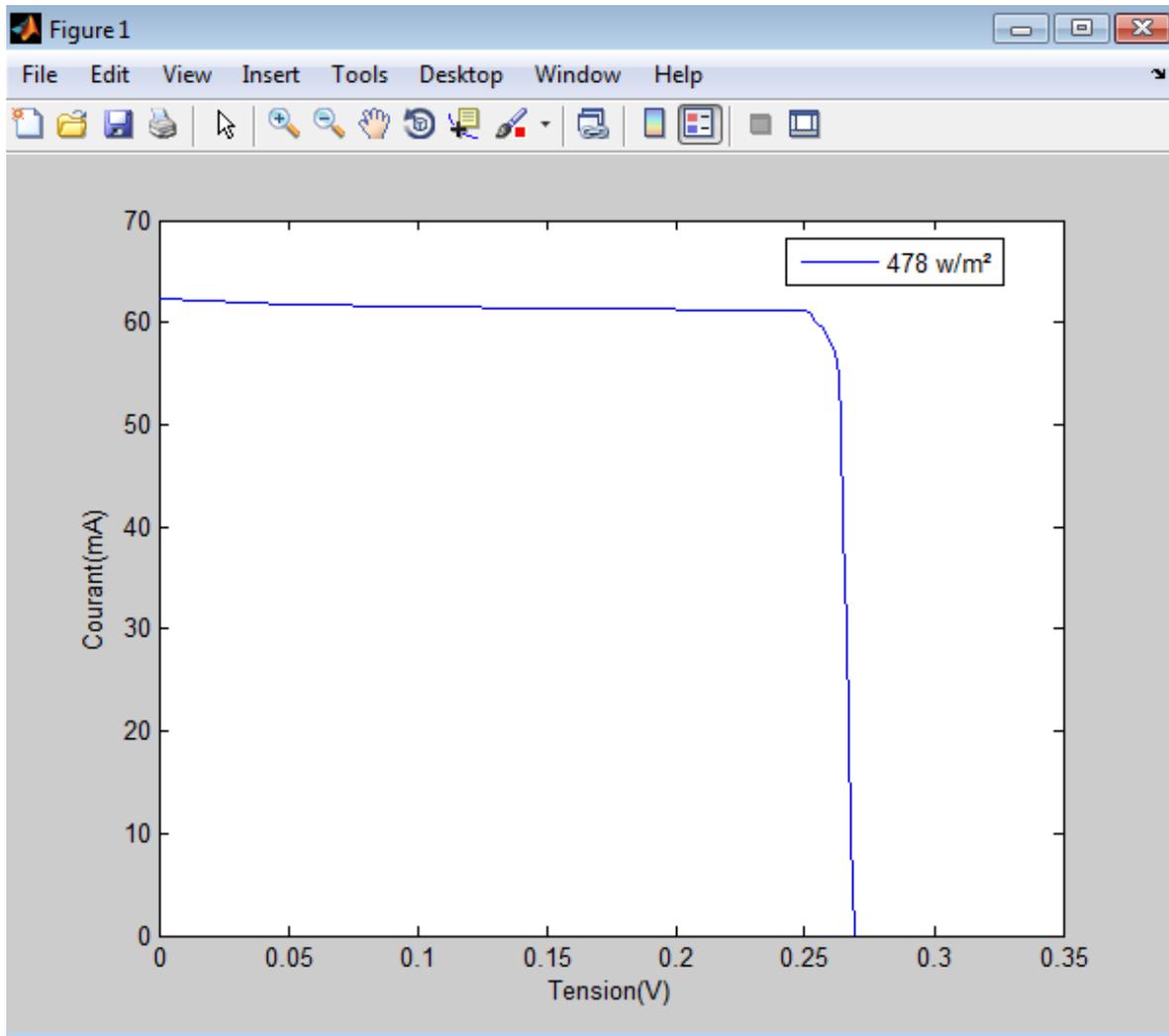


Figure (IV-4) : Courbe de caractérisation I-V lors de test 4 sous un soleil

5^{ème} expérience :

Les résultats de ce test sont présentés sur la figure (IV-5), où la durée d'exposition est d'environ 1,5 heure. La hauteur de soleil est de $h=29.4^\circ$ et l'azimut $a=222.2^\circ$, sous un éclairement de 325 W/m^2 et une température ambiante de 37°C . Dans les dernières minutes il ya une variation importante du courant où il diminue proportionnellement avec le temps et prend la valeur de 58.6 mA et la température de la cellule augmente à 44°C .

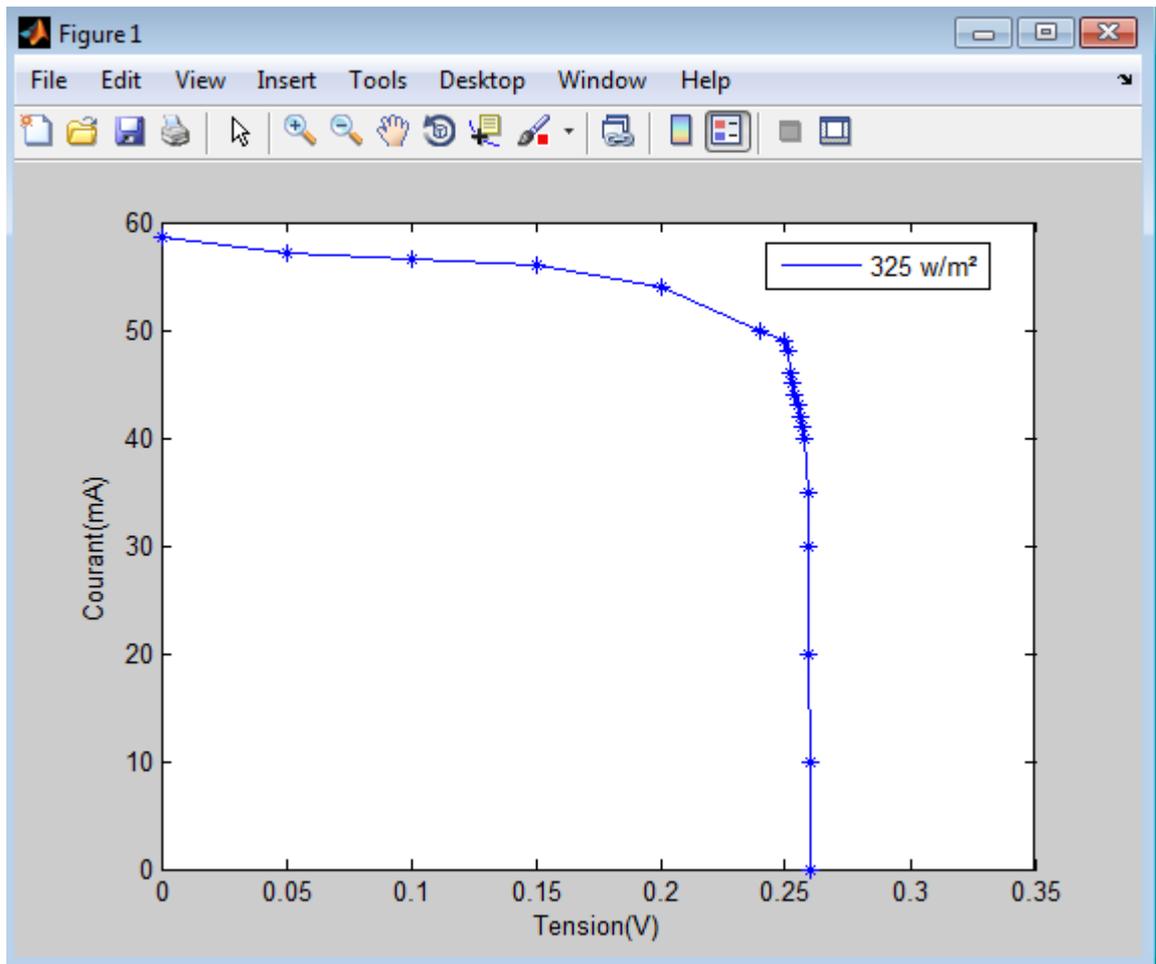


Figure (IV-5) : Courbe de caractérisation I-V lors de test 5 sous un soleil

6^{ème} expérience :

Avec presque la même durée d'exposition, les conditions d'éclairement solaire changent, sous une intensité de 228 W/m^2 , où la température ambiante est de 35° C , la caractérisation du comportement de la cellule solaire est illustrée par la courbe I-V comme le montrent les figures (IV-6),

Lorsque l'éclairement est faible, la cellule atteint une valeur de courant très faible de $41,2 \text{ mA}$, à la fin du travail expérimental, la température de la cellule augmente.

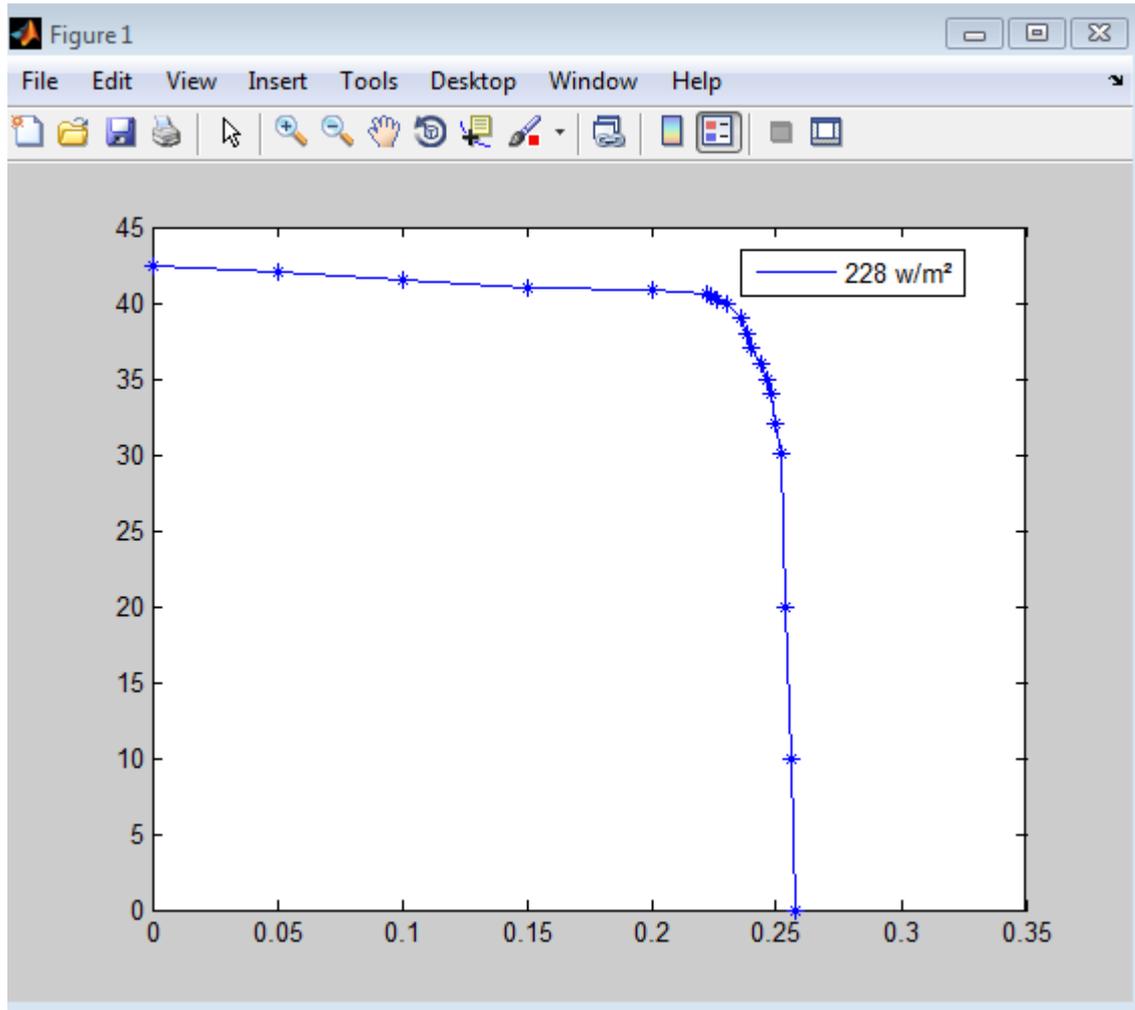
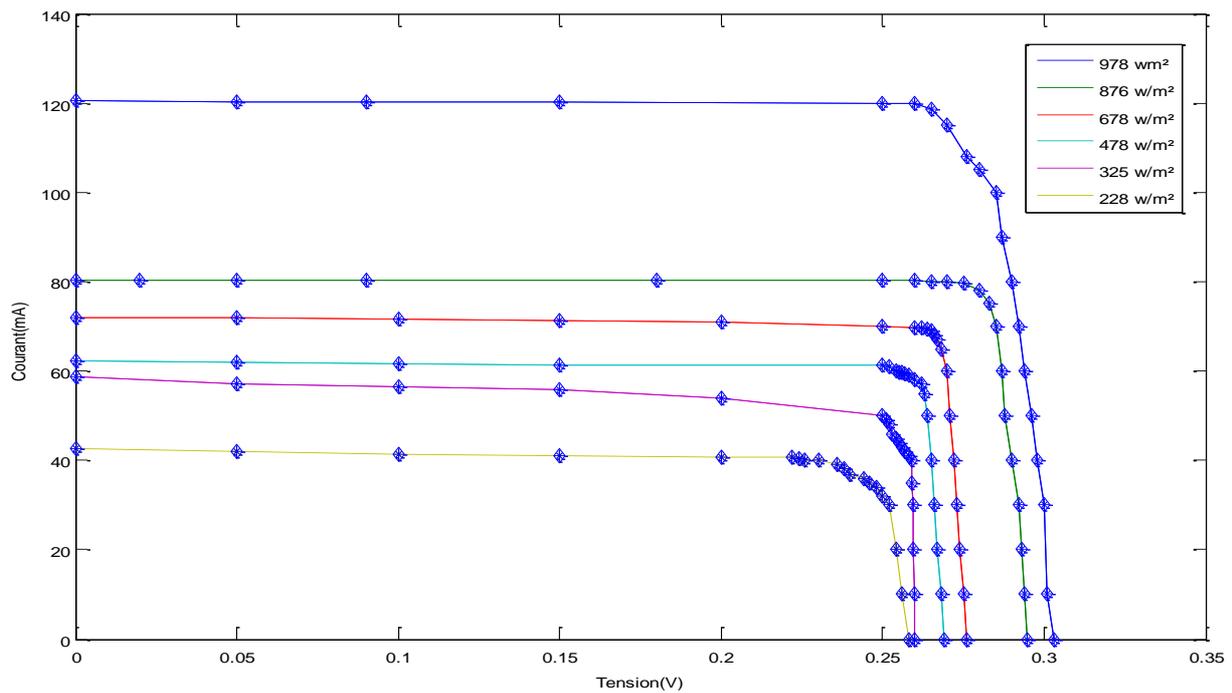


Figure (IV-6): Courbe de caractérisation I-V lors de test 6 sous un soleil

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6
I_{cc}(mA)	80.4	120.5	72.8	62.4	58.6	42.2
V_{co}(V)	0.295	0.303	0.276	0.269	0.260	0.257
T_a(°C)	39	41	40	38	37	35
T_{cell}(°c)	43	41	42	43	44	45
I(w/m²)	876	978	678	478	325	228
P_{max}(mW)	22.23	34.398	18.2	15.6	13.75	10
FF	0.93	0.94	0.90	0.92	0.90	0.92
η(%)	6.34	8.79	6.71	8.15	10.5	10.96

Tableau (IV-1):Paramètres de caractérisation de tous les tests.



Figure(IV-7) :Caractéristiques I-V pour diverses conditions de rayonnement solaire (compte tenu de la résistance en série) sous un même soleil.

Explication des résultats sous un soleil :

Dans tous les tests sous un soleil, la variation de l'éclairement influe sur le courant. Le courant augmente de valeur de 42.2-120.5mA en fonction de l'éclairement mais la tension reste quasiment fixe.

IV-2 Résultats et analyse sous concentration :

1^{ère} expérience :

La température de la cellule T_{cell} est une grandeur très importante. Lors des tests sous concentration par la lentille de Fresnel pendant 2 heures, la distance focale $D=29$ cm a été mesurée. Nous avons fait en sorte que toute la surface de la cellule soit illuminée uniformément pour déterminer le foyer. À cette distance, les températures sont élevées et la plage de T_{cell} est entre 38 à 52° C sous un éclairage de 868 W/m².

Le courant de court-circuit et la puissance électrique maximale sont plus élevés. Le courant atteint la valeur de 920 mA et la puissance 340 mW avec hauteur de soleil $h=39.9^{\circ}$ et un azimut $a=169,7^{\circ}$. La caractérisation du comportement de la cellule solaire est illustrée par la courbe I-V comme le montre la figure(IV-8).

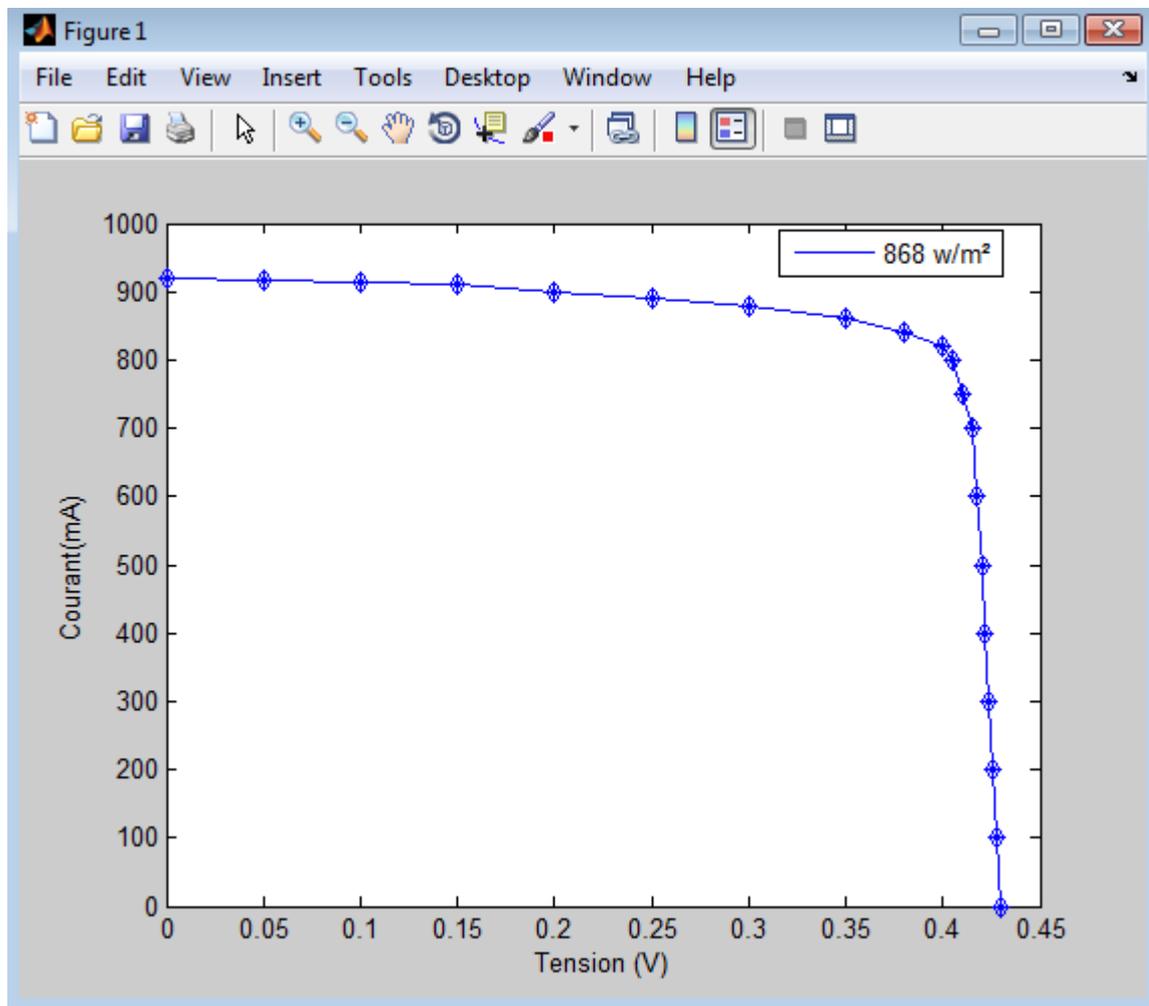


Figure (IV-8) : Courbe de caractérisation I-V lors du test 1 sous concentration

2^{ème} expérience :

Presque pour la même durée d'exposition sous concentration, les températures sont plus élevées sous un éclairage de 969 W/m^2 , la valeur de la température de la cellule est de 67°C . La tension en circuit ouvert et la puissance électrique maximale extraite ne présentent que de petites fluctuations vers des valeurs inférieures lorsque T_{cell} augmente, mais le courant atteint une valeur plus élevée de $1,32 \text{ A}$ avec petite augmentation de la tension à $0,438 \text{ V}$ avec une hauteur de soleil $h=40,4^\circ$ et un azimut $a=188,8^\circ$.

La caractérisation du comportement de la cellule solaire est illustrée par la courbe I-V comme le montre la figure (IV-9).

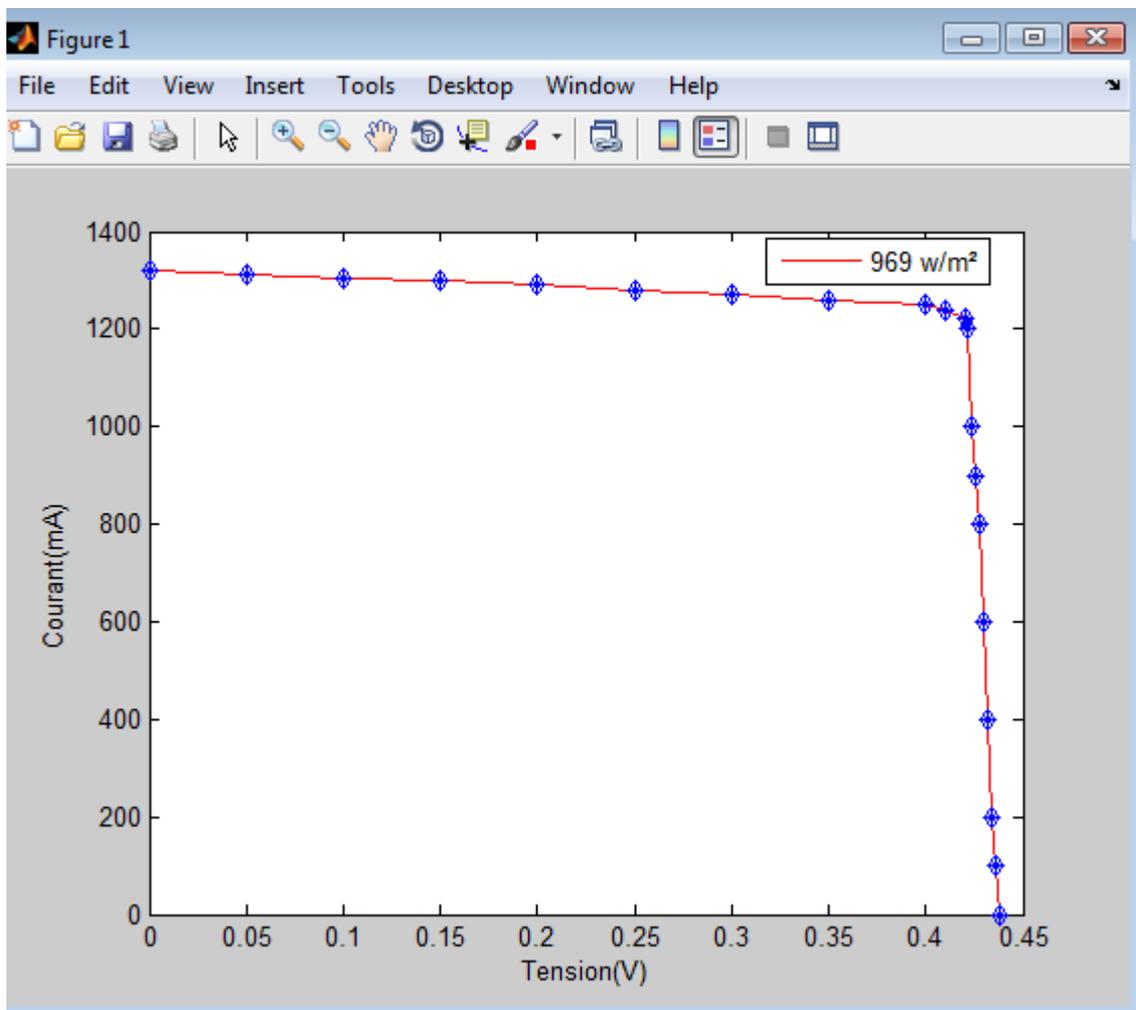


Figure (IV-9): Courbe de caractérisation I-V lors du test 2 sous concentration

3^{ème} expérience :

L'éclairement diminué par rapport au premier test à une valeur de 735 w/m^2 et puisque le courant proportionnel à éclairement, on obtient une valeur de 868 mA de l'intensité et une diminution de la tension à $0,425 \text{ V}$.

Les paramètres spécifiques sont les suivantes: distance lentille-cellule = 29 cm , durée d'exposition = 2 heures , variation de la température de la cellule.

La caractérisation du comportement de la cellule solaire est illustrée par la courbe I-V comme le montre la figure (IV-10).

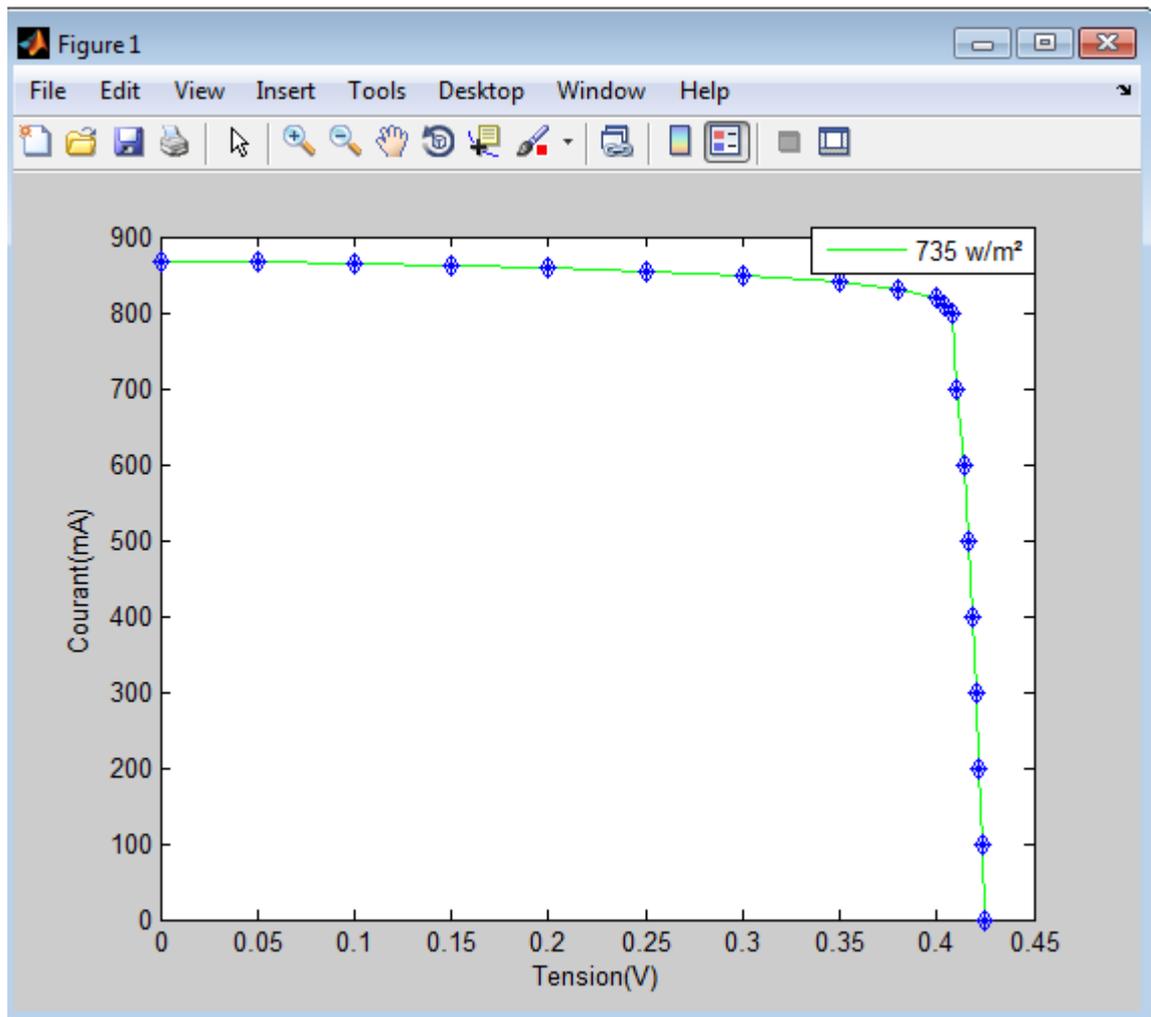


Figure (IV-10): Courbe de caractérisation I-V lors du test 3 sous concentration

4^{ème} expérience :

Pour la même durée d'exposition et un éclairage de 509 W/m^2 , le courant de circuit ouvert et la puissance maximale diminuent avec une petite variation de la tension à 0, 15 V et une variation de température comprise entre 33 et 57°C .

La caractérisation du comportement de la cellule solaire est illustrée par la courbe I-V comme le montre la figure (IV-11).

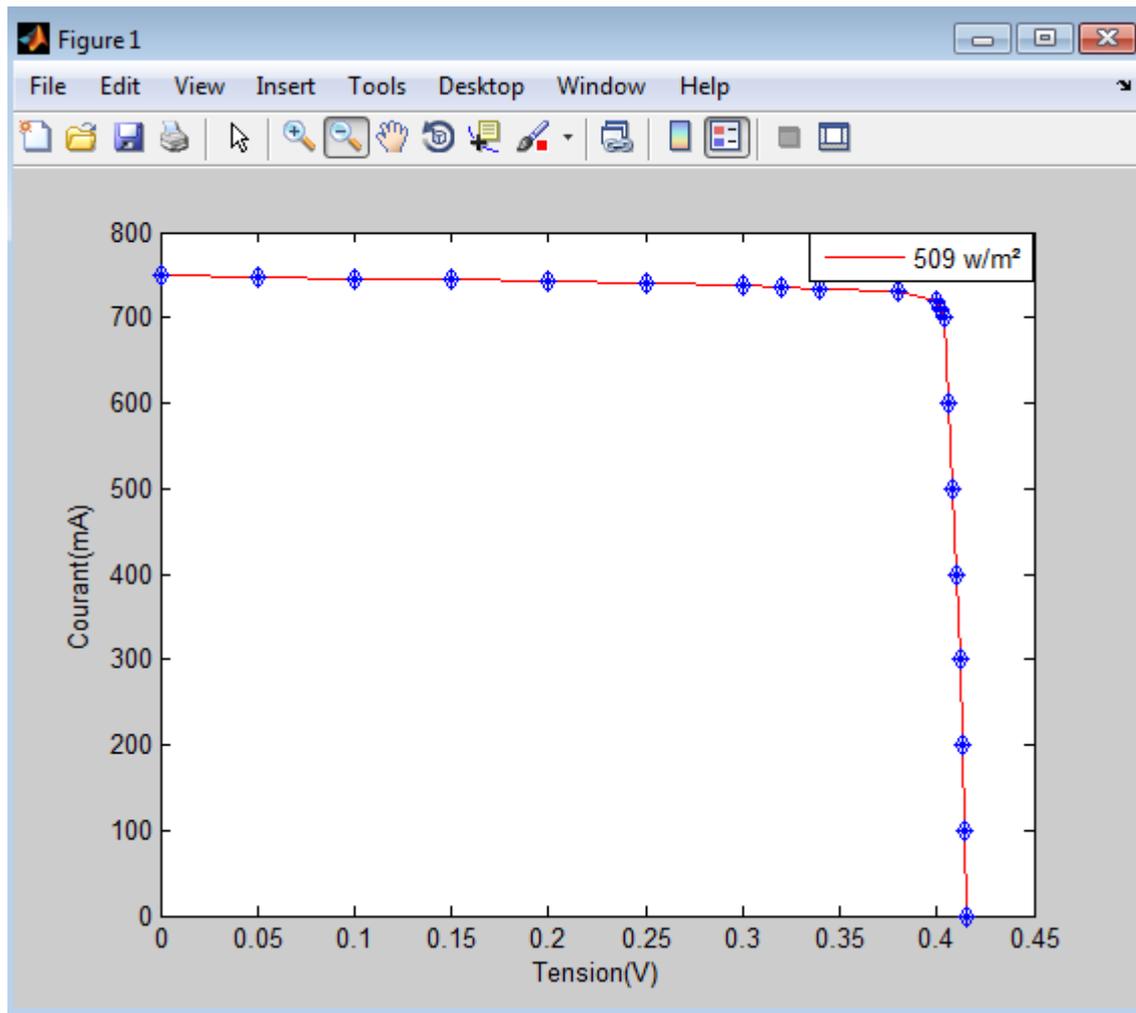


Figure (IV-11): Courbe de caractérisation I-V lors du test 4 sous concentration

5^{ème} expérience :

Pour durée d'exposition de 1,5 heure et une variation de la température de la cellule de 40 à 52 °C avec un éclairement de 325 W/m², on observe une diminution du courant à 508 mA et une diminution de la tension à 0,408 V pour des coordonnées du soleil suivantes : $h=36.3^\circ$ $a=206.8^\circ$.

La caractérisation du comportement de la cellule solaire est illustrée par la courbe I-V comme le montre la figure (IV-12).

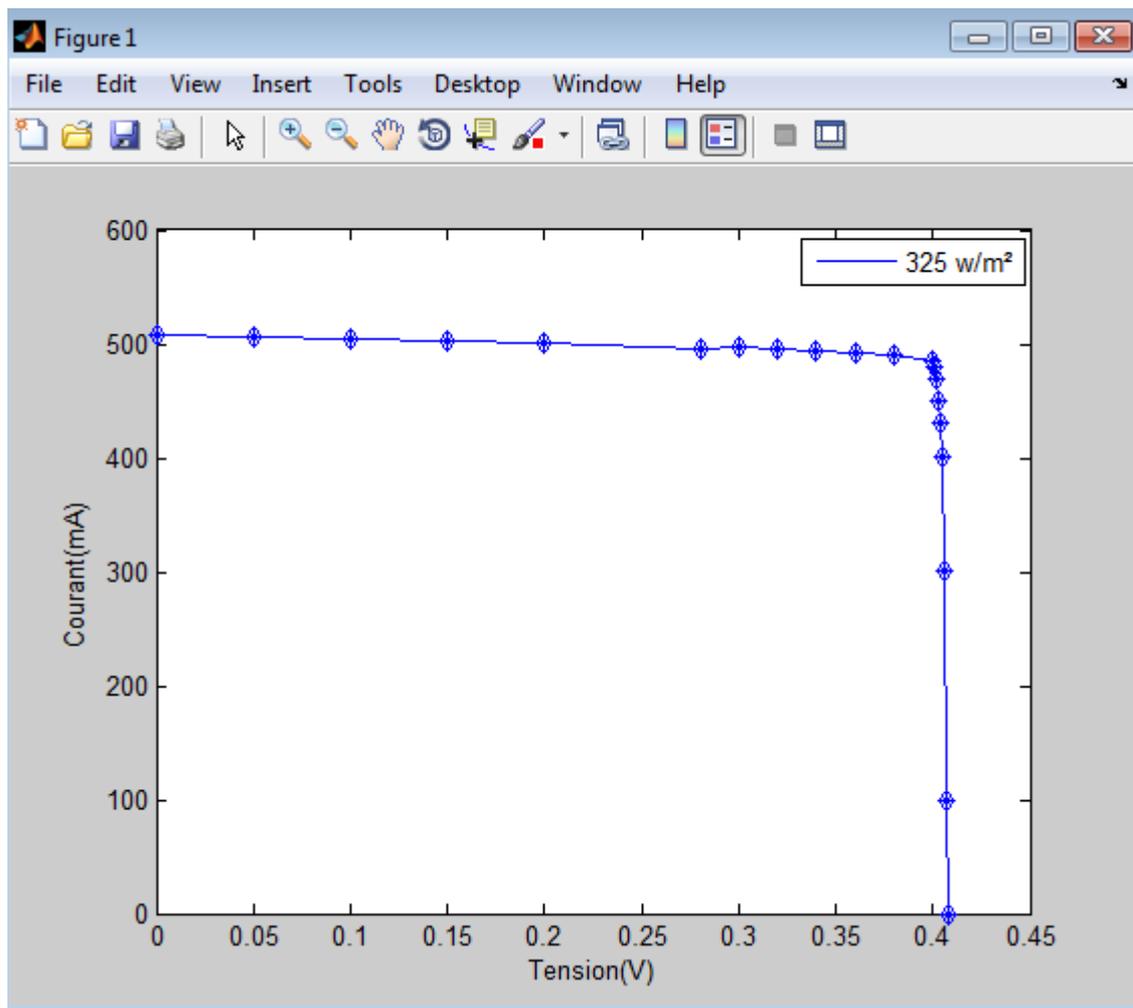


Figure (IV-12): Courbe de caractérisation I-V lors du test 5 sous concentration

6^{ème} expérience :

Pour une durée d'exposition de 1,5 heure et une variation de la température de la cellule entre 29 et 45 °C et un éclairement de 202 W/m², on observe une diminution importante du courant se situant à 302 mA et diminution de la tension à une valeur de 0,398 V ($h=29.4^\circ$ et $a=222.2^\circ$).

La caractérisation du comportement de la cellule solaire est illustrée par la courbe I-V comme le montrent la figure (IV-13).

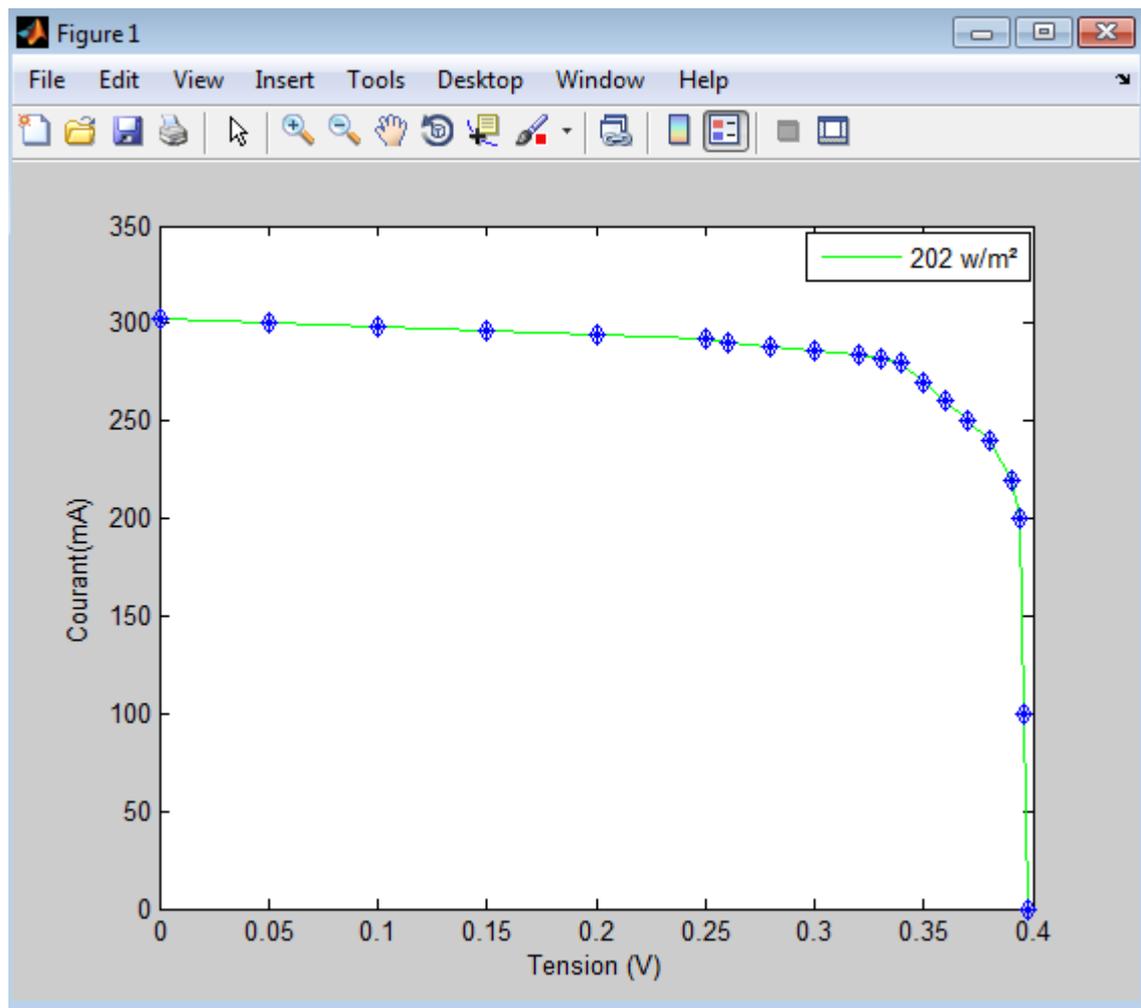


Figure (IV-13): Courbe de caractérisation I-V lors du test 6 sous concentration

7^{ème} expérience :

Sous un éclairage de 158 w/m^2 (le soir de 14h30 min-16 h), la valeur du courant a diminuée pour atteindre la valeur de 168 mA et une tension de $0,387 \text{ V}$ avec une température ambiante de 34°C , une hauteur du soleil $h=20,4^\circ$ et un azimut $a=234,8^\circ$. La caractérisation du comportement de la cellule solaire est illustrée par la courbe I-V comme le montre la figure (IV-14).

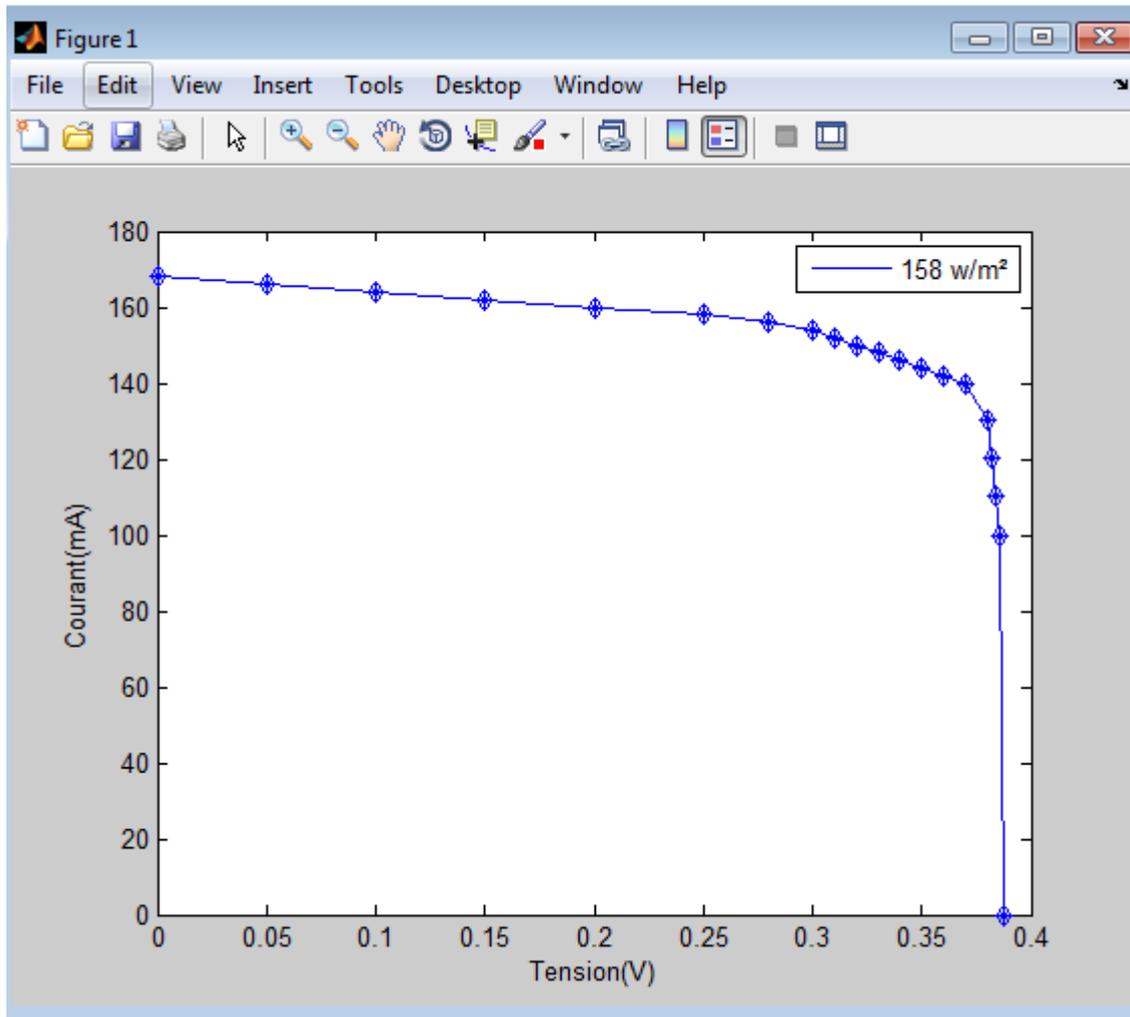
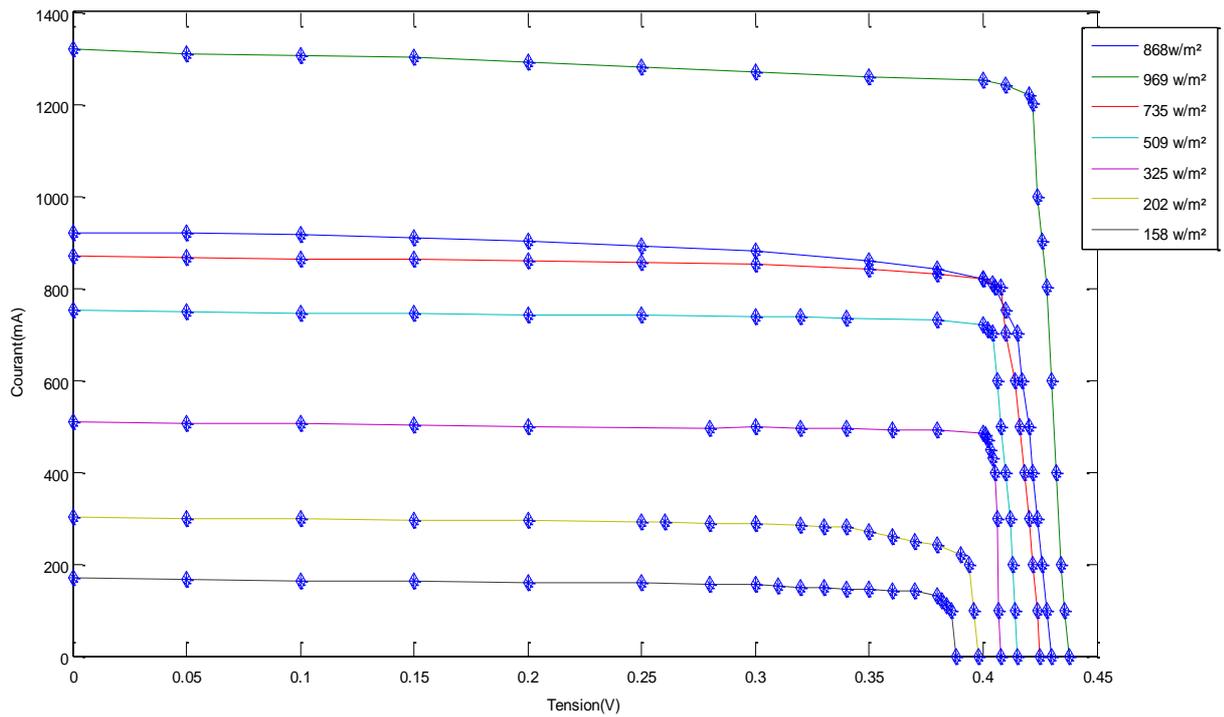


Figure (IV-14): Courbe de caractérisation I-V lors du test 7 sous concentration

Dans le tableau IV-2 et à la figure IV-15, les résultats des expérimentations sont résumés.

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7
I_{cc}(mA)	920	1320.2	868	750	508	302	168
V_{oc}(V)	0.430	0.438	0.425	0.415	0.408	0.398	0.387
T_a(°C)	40	41	39	38	37	35	34
T_{cell}(°c)	65	67	60	57	52	45	41
I(w/m²)	868	969	735	509	325	202	158
P_{max}(mw)	340.21	531.9	335.69	289.46	194.8	99.76	61.18
FF	0.86	0.92	0.91	0.93	0.94	0.83	0.85
η(%)	26.4	27.2	25.3	30.71	31.6	25.4	24.7

Tableau (IV-2):Paramètres de caractérisation de tous les tests.



Figure(IV-15) :Caractéristiques I-V pour diverses conditions de rayonnement solaire (compte tenu de la résistance en série) sous concentration.

Explication des résultats sous concentration :

Dans tous les tests sous concentration le courant augmente en fonction de l'éclairement, I_{cc} est d'environ 168-1320.2mA avec une augmentation d'éclairement d'environ 158-969w/m² tandis que le V_{co} reste quasiment fixe mais plus élevé que V_{co} sous un soleil

IV-3 Comparaison des résultats des deux parties expérimentales(sous un soleil et sous concentration):

La comparaison des résultats des différents tests d'exposition sous un même soleil et sous concentration permet de déduire que la cellule sous un soleil montre un comportement correct et une efficacité améliorée par rapport à cellule sous concentration.

Les courbes I-V pour la cellule sous un soleil ont une variation similaire à celle prédites par la théorie où la température influence, mais pas beaucoup, sur son comportement. Par contre pour une cellule sous concentration l'influence de la variation de la température n'est pas claire.

De plus, les performances de la cellule sous un soleil et sous concentration sont définitivement bonnes, en termes de tension en circuit ouvert et de puissance électrique qui changent selon les conditions ambiantes.

Dans tous les tests, la variation de l'éclairement influe sur le courant. Le courant augmente en fonction de l'éclairement mais la tension reste quasiment fixe. La tension en circuit ouvert V_{co} est d'environ 0,257-0,303V pour la cellule sous un soleil, tandis que le V_{co} mesuré avec la cellule en concentration est plus élevé, 0,398-0,438V ce qui concerne le comportement dans le temps, les courbes ne subissent pas de changements significatifs pour une exposition de 2 à 3 heures. Le rendement dépend de l'éclairement, de facteur de concentration et des deux surfaces (de lentille et de cellule)

L'augmentation de température ne produit pas vraiment de changements sur les courbes I-V dans le régime de températures examiné (41–67 ° C) en concentration et (41-45 ° C) sous un soleil. Mais la température influe surtout sur la tension et le point de puissance maximal

Et aussi le rendement de cellule sous concentration est plus élevé que la cellule exposé au soleil ce qui déduire que La puissance sous concentration de la cellule est (15) fois meilleure que celle de la cellule sous un soleil

Conclusions et recommandations :

Ce Mémoire montre que la partie mécanisme du suiveur solaire présente de nombreux avantages elle permet de pointer la cellule photovoltaïque face au soleil à tout moment de la journée et au fil de l'année à travers le repérage du soleil en latitude et en azimut. -Le coût des équipements solaires est très élevé, en particulier les cellules ou panneaux solaires, qui sont les plus chers de l'installation. Le suivi solaire est la méthode la plus simple pour augmenter l'efficacité globale d'un système d'énergie solaire. Le suiveur solaire permet de maintenir un angle suffisamment perpendiculaire face au soleil et donc les mesures des caractéristiques courant, tension et point de puissances maximal sont les plus élevées. En particulier, lors de l'utilisation d'une lentille de Fresnel on observe à une augmentation de ces paramètres. Lorsque la cellule solaire fonctionne dans des conditions extérieures (température, l'éclairement la hauteur de soleil et durée d'exposition) ces caractérisation électrique changent selon la variation de ces conditions. La variation de la température fait varier surtout la tension et la puissance .Quel que soit le système, sous un soleil ou sous concentration, l'éclairement et la température influent sur le comportement de la cellule (l'éclairement influe sur le courant et la température influe sur la tension). De plus, lorsque l'éclairement augmente, le courant de court-circuit augmente proportionnellement à celui-ci. De plus, la tension en circuit ouvert varie un peu pour la même température. De plus, parce que la température est un paramètre très important dans le comportement d'une cellule solaire, lorsqu'elle augmente la tension en circuit ouvert diminue, ce qui a été montré dans les figures de caractérisation précédentes. L'efficacité moyenne d'une cellule monocristalline de dimension de 2cm*2cm sous un soleil est d'environ 10.96%, et d'environ 31.6 % pour la cellule sous concentration, elle est assez importante pour une cellule avec cette petite surface et sans oublier le facteur d'âge de la cellule.

CONCLUSION GENERALE

Nous avons commencé dans ce travail par une étude sur le gisement solaire et les cellules solaires à conversion photovoltaïque, en abordant le rayonnement solaire par une présentation détaillée, à travers de laquelle, les équations régissant ce phénomène physique ont été expliquées, ainsi que la détermination du spectre solaire a été discutée. En seconde étape, le schéma de principe d'une cellule solaire avec son principe de fonctionnement et son schéma électrique équivalent ont donnés plus d'éclaircissement sur l'effet photovoltaïque. La détermination des paramètres et les caractéristiques d'une cellule solaire faisaient partie de l'enjeu de cette étude.

Un très vaste aperçu sur la concentration photovoltaïque, en commençant par un état de l'art sur le rendement de la cellule photovoltaïque sous flux concentré, ensuite les différentes technologies des systèmes sous concentration et leurs applications dans le domaine photovoltaïque sont présentées. Ainsi, nous avons étudié les cellules solaires à concentration utilisant des lentilles de Fresnel et discuté des systèmes de suiveur solaire et du facteur de concentration.

Ce mémoire a inclut la réalisation d'un banc d'essai composé d'une cellule monocristalline, d'un suiveur manuel et d'une lentille de Fresnel. La partie expérimentale consiste à caractériser une cellule sous un soleil et sous concentration.

Dans ce travail, on a utilisé le logiciel de simulation Matlab pour la simulation des caractéristiques de la cellule sous un soleil et sous concentration selon différents éclaircissements et températures.

Une comparaison entre les deux tests et les résultats de travail sont analysés et discutées. Ceci nous a permis de conclure qu'une amélioration de performance des cellules solaires conduit étroitement à un bon rendement sur toute la gamme de la température opérationnelle étudiée. On peut affirmer que les cellules solaires sous concentration permettent de meilleures performances.

Avec l'avancée de ces technologies, la filière photovoltaïque connaît un renouveau, ce qui implique des perspectives économiques intéressantes. On peut observer un développement de cette filière qui tend vers de nouvelles zones géographiques (à fort DNI) et qui permet l'expansion du PV à travers le monde.

Ce secteur manque de développement induisant des lacunes économiques, techniques ou encore industrielles, étant essentiellement dues à la nouveauté de cette technologie. Un regard sur le passé nous permet de tirer des conclusions optimistes quant à l'évolution de la filière photovoltaïque. Depuis la première cellule de 1914 jusqu'à la haute concentration de nos jours, l'évolution de la production d'électricité solaire ne cesse de s'accroître. Cela démontre un engagement mondial et un avenir fleurissant

Référence:

- [1] : PETIBON, S., Thèse de Doctorat Université Toulouse III (2009).
- [2]: Swanson R M.,« The Promise of Concentrators », in Prog. Photovolt.Res. Appl. 8, 2000
- [3]:JCBoulay.Free.Fr/astro/Sommaire/Astronomie/Univers/Galaxie/étoile/Système solaire/soleil/page-soleil htm
- [4] : Uqam.ca-pascal.sca.uqam.ca sca5002/Présentation théorique d'une magazine Energies renouvelable
- [5]: Yamaguchi, M., et al. Novel materials for high-efficiency III–V multi-junction solar cells. Solar energy. 2008, Vol. 82, 173.
- [6] : Emmanuel Giudicelli « Evaluation d'une filière technologique de cellules photovoltaïques multi-jonctions à base de matériaux antimoniures (III-V)-Sb pour applications aux très fortes concentrations solaires » Université Montpellier, 2016. Français. ffNNT : 2016MONTT330ff. fftel-01816922f
- [7]:Bernard, G.Menguy,M.Shchwartz,Le rayonnement solaire ,conversion thermique et application Techniques et documentations Paris 1979
- [8] : Energie Solaire ,les machines élévatoires archives ,document FAO, pt de développement durable
- [9] :D.R. Divaldalbero “la Recherche énergétique européenne :pont de coopération sur la méditerranée ‘Liaison énergétique Francophone N 7& (Energie et développement durable en méditerranée)2eme trimestre 2006,page 71-76
- [10] : Pierre GARCIA, « Outils d'évaluation technico-économique et d'aide à la conception des centrales solaires thermodynamiques du futur », Thèse de Doctorat, Université de Perpignan, 2007.
- [11] Bruxelles Environnement .IBGE-Institut Bruxellois pour la gestion de l'environnement. INFOS FICHE-Energie. Le photovoltaïque-Module3 Fonctionnement et Technologie. Novembre 2010.
- [12] A.Labouret, P. Cumunel, B. Jean-Paul, B.Faraggi, “Cellules solaire les bases de l'énergie photovoltaïque”, ETSF, Ed Dunod, 2010.

[13] S. R. Wenham, M. A. Green, M. E. Watt, "Applied Photovoltaic Bridge Printer", Sidney, 1994.

[14]: Y. Marouf, "Modélisation des cellules solaires en In GaN en utilisant Atlas Silvaco", Mémoire magistère, Université Mohamed Kheider-Biskra, 2013.

[15] : Hasni Hadjèr « Caractérisation Automatisée d'une cellule solaire »
Département des Sciences de la Matière Filière de Physique Spécialité
Physique Photovoltaïque Université Med Khider Biskra

[16] : I. S. E. Fraunhofer. Photovoltaics report. Fraunhofer ISE, Freiburg, 2017. 1, 12, 13, 15

[17] : Mr. SKENDER Ayoub « Etude et simulation des cellules solaires à triples-jonctions à concentration à base des semi-conducteurs III-V ». Pour l'obtention du diplôme de Magister en électronique Option : Microélectronique en 07/04/2016.

[18]: SOLAR, s.G. World map of direct normal irradiation. 2015; Available from : <http://solargis.info/doc/free-solar-radiation-maps-DNImars> 2005.

[19]: Sergi Tutashkonko "Magazine de ResearchGate", principe de fonctionnement d'une cellule à triple jonction

[20] : Walid EL-HUNI « Modélisation de cellules solaires multi-tandem bas coût et très haut rendement à base de nitrures des éléments III-V »
l'Université Paris-Saclay préparée à : L'Université Paris-Sud XI 'Ecole doctorale n 575 EOB : Electrical, Optical, Bio -physics and Engineering issue de site web NREL

[21] : Martin A. Green, Keith Emery, Yoshihiro Hishikawa, Wilhelm Warta, and Ewan D. Dunlop. Solar cell efficiency tables (version 48). Progress in Photovoltaics : Research and Applications, 24(7) : 905–913, July 2016. pages 1, 2, 14, 15, 16, 17, 89, 90, 110, 111

[22]: ABDELMOULA Yasmina Etude et Simulation des Sources Renouvelables dans le Réseau Electrique : Générateurs Photovoltaïques université de Jijel Spécialité : Réseaux Électriques

- [23]: Dharmadasa, I., Third generation multi-layer tandem solar cells for achieving high conversion efficiencies. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2005. 85(2): p. 293-300.
- [24]: Ng, K.K. and R. Liu, On the calculation of specific contact resistivity on Si . *Electron Devices*, IEEE Transactions on, 1990. 37(6): p. 1535-1537. cells. *Journal of Applied Physics*, 1980. 51(8): p. 4494-4500.
- [25]: Salah Eddine Bensalem, « Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires », Thèse magister, université FERHAT ABBAS – SETIF, 2011
- [26]: ASTM. Reference Solar Spectral Irradiance: ASTM G-173. 2015; Available from: <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/ASTMG173/ASTMG173.html>
- [27]; SKENDER « Etude et simulation des cellules à concentration à base de semi-conducteur » université de Tizi Ouzou Faculté de génie électrique et d'informatique 'département d'électronique Option : Microélectronique (2015/2016.)
- [28]: SOLAR, s.G. World map of direct normal irradiation. 2015; Available from: <http://solargis.info/doc/free-solar-radiation-maps-DNI>.
- [29]: ASTM. Reference Solar Spectral Irradiance: ASTM G-173. 2015; Available from: <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/ASTMG173/ASTMG173.html>.
- [30]: King, R.R., et al. Solar cell generations over 40% efficiency: 26th European photovoltaic solar energy conference and exhibition, 2011.
- [31]: Zaouk, D., et al. « Electrical and optical characteristics of NAPS solar cells of Si (PiN) structure », *Environment and Solar*, 2000 Mediterranean Conference for 16-17 Nov. 2000, Page(s): 93 – 95.
- [32]: Sol Focus CPV systems. [Online] 2011. [Cited: 01 20, 2012.] <http://www.solfocus.com/en/technology/#2>.
- [33]: Energy Innovations. Sunflower HCPV system. [Online] 2011. [Cited: 01 20, 2012.] <http://www.energyinnovations.com/mount/>.
- [34]: Yamaguchi, M., et al. Novel materials for high-efficiency III–V multi-junction solar cells. *Solar energy*. 2008, Vol. 82, 173.

[35] : Emmanuel Giudicelli « Evaluation d'une filière technologique de cellules photovoltaïques multi-jonctions à base de matériaux antimoniures (III-V)-Sb pour applications aux très fortes concentrations solaires » thèse de doctorat, l'UNIVERSITE DE MONTPELLIER Spécialité : Electronique 20/06/2016

[36] : Bouzaki Mohammed Moustafa « Etudes comparées et modélisation des performances des différentes technologies de cellules photovoltaïques en vue du dimensionnement des systèmes et installations photovoltaïques », thèse de doctorat, université de Tlemcen, 2016

[37]: Silicon CPV - Si-ConTM120X Medium Concentration PV

[38] :SunPower – SunPoweTM concentration solaire refroidissement passive et actif