



République Algérienne Démocratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de L'enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique

المركز الجامعي لعين تموشنت

Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent
Institut des Sciences
Département des sciences de la matière



Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de Master en :

Domaine : SCIENCES DE LA MATIERE

Filière : Physique

Spécialité : Physique des Matériaux

Thème

**Étude de l'énergie solaire photovoltaïque contrôlée
par ordinateur**

Soutenue le : 17/09/2020

Présente par : AMAMRA Nasreddin

Devant le jury composé de :

Dr. TOUIA Amina	M.CA	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Présidente
Dr. BELKADI Amina	M.CB	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Examinatrice
Dr. NEBATTI ECH-CHERGUI Abdelkader	M.CA	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Encadreur

Année universitaire 2019/2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

(وَقُلْ رَبِّ زِدْنِي عِلْمًا)

صدق الله العظيم

Remerciement

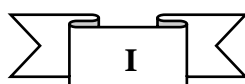
Avant tout, je rends ma profonde gratitude à Dieu, le tout puissant, de m'avoir donné la force et le courage, la confiance de, la volonté et la patience de mener à bien ce travail. J'exprime ma profonde gratitude à mes chers parents pour leurs encouragements leurs soutiens et pour les sacrifices qu'ils ont enduré.

Ce travail a été effectué au la Laboratoire de génie mécanique du centre universitaire d'Ain Temouchent.

Je remercie particulièrement mon professeur Dr. NEBATTI ECH-CHERGUI Abdelkader pour sa patience, sa confiance, ses remarques, ses conseils, sa disponibilité et sa bienveillance et guide intelligemment tout au long de ma mémoire. Je le remercie tout particulièrement pour l'intérêt qu'il a porté à ce sujet, pour la confiance qu'il m'a accordée. Grâce à son ouverture d'esprit, il a su me laisser prendre des initiatives et avec sa compétence, il a contribué de façon décisive à ma formation scientifique. J'ai été très sensible aux idées qu'il m'a prodigué, à la sollicitude avec laquelle il m'a orienté. J'ai pu bénéficier à la fois de ses compétences scientifiques, et de sa grande disponibilité, J'ajouterai que ses qualités humaines, et en particulier sa patience et ses encouragements m'ont permis de travailler dans les meilleures conditions. Qu'il trouve ici le témoignage de ma profonde gratitude.

Je tiens également à remercier vivement les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail, pour toutes leurs remarques et critiques constructives :

- Je remercie tout particulièrement Dr TOUIA Amina pour l'honneur qu'elle m'a fait en présidante mon jury.



- Je remercie également Dr BELKADI Amina pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'être examinatrice de ce travail.

Je suis très reconnaissant au directeur du Laboratoire de génie mécanique du centre universitaire d'Ain Temouchent, et en particulier les deux ingénieurs de labo : Mr MOUSSA Boudjemaa Fethi, et Mr HADJ SAID Nacer Djamel Eddine, pour l'accueil chaleureux et pour m'avoir donné l'opportunité de expérimentale au sein de son laboratoire. Sans avoir l'oublier, je voudrais remercier monsieur le Dr MOHAMEDI Mohamed Walid pour son soutien.

Mes sincères remerciements au professeur Dr TOUIA Amina, qui a été une inspiration pour moi dans la physique.

Je remercie tous les enseignants qui nous ont suivis durant notre cycle d'étude et leurs précieux conseils.

Je remercie mon cher frère et ma chère sœur pour tout le soutien, l'intérêt et l'encouragement.

Je voudrais également remercier les deux meilleures amies et sœurs que j'ai connues dans ma vie scolaire, sœurs Meriem et Maroua, pour leur intérêt et leur soutien pour moi.

Mes remerciements vont également à tous mes camarades et amis. Leur soutien et les nombreux conseils qu'ils m'ont donnés m'ont été précieux.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes et qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de ce travail.

Dédicaces

Avant tous, je remercie Dieu le tout-puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je saisis cette occasion mémorable dans le cours de ma vie pour dédier ce modeste travail :

À mon cher père et ma chère mère ; Tous les mots du monde ne sauraient exprimer l'immense amour que je leur porte pour leur tendresse, leur amour, leurs conseils, leurs sacrifices, leurs prières, leur présence à mes côtés et leur soutien, auxquels je dois ce que je suis.

À mon cher frère Kouider.

À ma chère sœur Djihane Khadidja.

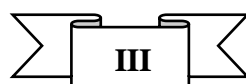
À BARNOUSSI Meriem et BENAMARA Maroua qui ont été une source constante d'encouragement, de soutien et de joie.

À tous mes enseignants du primaire jusqu'à présent, en particulier Dr. Nebatti ech-cherghi Abdelkader, pour le soutenir et son encadrement permanent.

À tous mes amis et mes camarades.

À tous ce que j'aime et qui m'aiment.

À tous mes collègues de promo 2020(physique des matériaux).



Résume

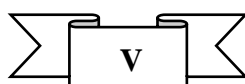
L'énergie solaire est une source d'énergie propre et renouvelable qui dépend du soleil. Cette énergie permet de produire de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou de centrales solaires thermiques, grâce à la lumière solaire collectée par les panneaux solaires.

Dans ce mémoire de fin d'études, on a utilisé des équipements d'énergie Solaire Photovoltaïque contrôlée par ordinateur avec SCADA (EESFC), l'équipement contrôlé par ordinateur (PC), où le système est composé essentiellement de deux panneaux solaires photovoltaïques, simulateur solaire composé de lampes solaires et batterie d'accumulation et inverseur, pour l'emploi de l'énergie débitée par les deux panneaux. Afin de décrire les deux panneaux solaires photovoltaïques, Nous avons résolu quatre exercices pour étudier les caractéristiques des deux panneaux photovoltaïques suivant plusieurs configurations individuelles, parallèle et série et suivant plusieurs paramètres tels que Rhéostat, intensité d'éclairément, l'utilisation de ventilateurs ...etc. On a trouvé que la valeur maximale de la puissance dépend de la position du rhéostat. L'intensité du rayonnement est responsable de l'efficacité de puissance et que le rendement dépend de l'intensité de courant. En addition, le branchement des deux panneaux en parallèle et en série permet l'accroissement du courant de sortie et de la tension respectivement, ainsi que les propriétés des panneaux fournis par le fabricant ont été vérifiées et confirmées. Finalement, l'influence de la température sur l'efficacité des panneaux a été reconnue. En plus de certaines perspectives dans cette technologie.

Abstract

Solar energy is a clean and renewable source of energy that depends on the sun. This energy allows the production of electricity from photovoltaic panels or solar thermal power plants, thanks to the sunlight collected by the solar panels.

In this final thesis, we used Photovoltaic Solar energy equipment controlled by computer with SCADA (EESFC), Equipment controlled by computer (PC), where the system consists essentially of two photovoltaic solar panels, solar simulator composed of solar lamps and storage battery and inverter, for the use of the energy delivered by the two panels. In order to describe the two photovoltaic solar panels, we have solved four exercises to study the characteristics of the two photovoltaic panels according to several individual configurations, parallel and series, and according to several parameters such as Rheostat, the intensity of lighting, use of fans...etc. It has been found that the maximum power value depends on the position of the rheostat. The intensity of the radiation is responsible for the power efficiency and the efficiency depends on the current intensity. In addition, connecting the two panels in parallel and in series increases the output current and the voltage respectively, as well as the characteristics of the panels supplied by the manufacturer have been verified and confirmed. Finally, the influence of temperature in the efficiency of the panels was recognized. In addition to some prospects in this technology.



ملخص

الطاقة الشمسية هي مصدر نظيف ومتجدد للطاقة يعتمد على الشمس. تتيح هذه الطاقة إنتاج الكهرباء من الألواح الكهروضوئية أو محطات الطاقة الشمسية الحرارية، وذلك بفضل الأشعة الشمسية الذي تم جمعه بواسطة الألواح الشمسية. في هذه الأطروحة النهائية، استخدمنا معدات الطاقة الشمسية الكهروضوئية التي يتم التحكم فيها بواسطة الكمبيوتر عن طريق برنامج SCADA (EESFC)، حيث يتكون النظام بشكل أساسي من لوحين من الخلايا الشمسية الكهروضوئية، جهاز محاكاة للطاقة الشمسية يتكون من مصابيح شمسية، وبطارية تخزين وعاكس من أجل استخدام الطاقة التي تقدمها اللوحان. من أجل وصف الألواح الشمسية الكهروضوئية، قمنا بحل أربع تمارين لدراسة خصائص الألواح الكهروضوئية وفقاً للعديد من التكوينات الفردية، المتوازية والمتسلسلة، ووفقاً للعديد من المعلمات مثل المتغيرة، وشدة الإضاءة، واستخدام مراوح... إلخ تم العثور على أن الحد الأقصى لقيمة الطاقة يعتمد على موقع المتغيرة. شدة الإشعاع مسؤولة عن كفاءة الطاقة والكفاءة تعتمد على الشدة الحالية. بالإضافة إلى ذلك، فإن توصيل اللوحين بالتوازي وفي التسلسل يزيد من التيار والجهد، بالإضافة إلى التحقق من خصائص الألواح التي تم توفيرها من قبل الشركة المصنعة وتأكيدا. أخيراً، تم التعرف على تأثير درجة الحرارة في كفاءة الألواح. بالإضافة إلى بعض الطموحات حول هذه التقنية في المستقبل.

Sommaire

Remerciements	I
Dédicace	III
Résumé	IV
Abstract	V
ملخص.....	VI
Table des matières.....	VII
Tableau des figures.....	XVIII
Liste des tableaux.....	XXIV
Tableau des Symboles.....	XXVII
Tableau des Acronymes.....	XXIX

Table des matières

Introduction générale :.....	1
------------------------------	---

CHAPITRE I : Généralité sur la jonction pn

I. Introduction :.....	4
I.2 Différence entre un isolant, un métal et un semi-conducteur :.....	4
I.2.1 Les matériaux conducteurs :.....	4

I.2.2 Les matériaux isolants :.....	5
I.2.3 Les matériaux semi-conducteurs :.....	6
I.3 Présentation des deux types de semi-conducteurs :.....	7
I.3.1 Semi-conducteurs intrinsèque (purs) :.....	7
I.3.2 Semi-conducteurs extrinsèques (dopage) :.....	8
I.3.2.1 Dopage type « n » :.....	9
I.3.2.2 Dopage type « p » :.....	10
I.4 Le semi-conducteur :.....	11
I.4.1 Propriétés électronique :.....	11
I.4.1.1 Semi-conducteur de type n :.....	13
I.4.1.2 Semi-conducteur de type p :.....	13
I.4.1.3 Semi-conducteur dope dégénéré :.....	14
I.5 Description de la jonction :.....	14
I.5.2 Polarisation d'une jonction pn :.....	15
I.5.2.1 La jonction pn polarisée en sens inverse :.....	15
I.5.2.2 La jonction pn polarisée en sens direct :.....	16
I.6 Conclusion :.....	17

CHAPITRE II : Généralité sur les énergies renouvelables

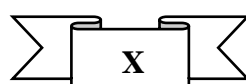
II.1 Introduction :	18
II.2 Les énergies renouvelables :.....	18
II.2.1 Energie éolienne :.....	19

II.2.1.1 Principe de fonctionnement :.....	20
II.2.1.2 Avantages et inconvénients d'énergie éolienne :.....	21
II.2.1.2.a Avantages :.....	21
II.2.1.2.b Inconvénients :.....	21
II.2.2 Energie solaire :.....	21
II.2.2.1 Potentiel :.....	22
II.2.2.2 Les types de l'énergie solaire :.....	23
II.2.2.2.a Solaire thermique :.....	23
II.2.2.2.a.1 Le principe fonctionnement :.....	23
II.2.2.2.b Solaire photovoltaïque (panneaux solaires photovoltaïques) :	24
II.2.2.3 Les pays les plus en avance dans l'énergie solaire :.....	24
II.2.2.4 Avantages et inconvénients d'énergie solaire :.....	25
II.2.2.4.a Avantages :.....	25
II.2.2.4.b Inconvénients :.....	25
II.2.3 Avantages et inconvénients des énergies renouvelables :.....	25
II.2.3.1 Avantages :.....	25
II.2.3.2 Inconvénients :.....	26
II.3 Conclusion :.....	26

CHAPITRE III : Généralité sur les cellules photovoltaïques

III.1 Introduction :.....	28
---------------------------	----

III.2 L'astre Solaire :.....	28
III.2.2 Rayonnement solaire :.....	30
III.2.2.1 Différents types de rayonnements :.....	31
III.3 C'est quoi L'effet photovoltaïque ? :.....	32
III.3.1 Historique :.....	33
III.3.2 Le principe de l'effet photovoltaïque :.....	34
III.4 C'est quoi une cellule photovoltaïque ? :.....	34
III.4.1 Caractéristique de la cellule photovoltaïque :.....	34
III.4.2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :.....	36
III.4.3 Les différentes générations des cellules photovoltaïques :.....	39
III.4.3.1 Technologies de la première génération à base de silicium cristallin :.....	40
III.4.3.1.a Cellule monocristalline :.....	40
III.4.3.1.b Cellule polycristalline :.....	40
III.4.3.1.c Propriétés des cellules cristallines :.....	41
III.4.3.1.d Les inconvénients du silicium cristallin :.....	41
III.4.3.2 Technologie de la deuxième génération à base de couche-mince:.....	42
III.4.3.2.a Les cellules amorphes :.....	42
III.4.3.2.b Le tellure de Cadmium (CdTe):.....	42
III.4.3.3 Technologie de la troisième génération « Les cellules organiques » :.....	42
III.4.4 Les caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque :.....	43
III.4.4.1 La courbe courant-tension d'une cellule photovoltaïque :.....	43
III.4.4.1.a Courant de court-circuit I_{cc} :.....	44
III.4.4.1.b Tension de circuit ouvert V_{oc} :.....	44



III.4.4.2 La puissance caractéristique d'une cellule photovoltaïque :.....	45
III.4.4.2.a La puissance maximale :.....	45
III.4.4.3 Rendement:.....	46
III.4.4.4 Facteur de forme :.....	46
III.4.5 Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque :.....	47
III.4.5.1 Cas d'une cellule idéale :	47
III.4.5.2 Cas d'une cellule réelle :.....	48
III.4.6 Association des Cellules Photovoltaïques en Série :.....	49
III.4.7 Association des Cellules Photovoltaïques en parallèle :.....	50
III.5 Module photovoltaïque et le panneau solaire photovoltaïque :.....	51
III.5.1 Caractéristiques d'un module :.....	52
III.5.1.1 Caractéristique $I=f(V)$:.....	53
III.5.1.2 Caractéristique $P=f(V)$:.....	54
III.6 Influence des différents paramètres :.....	55
III.6.1 Influence d'un changement d'éclairement :.....	55
III.6.2 Influence de la température :.....	56
III.6.3 Influence de l'éclairement inhomogène :.....	56
III.6.4 Influence de la résistance série :.....	57
III.7 Terminologie spécifique dans le champ des cellules photovoltaïques :.....	58
III.8 Différents types de systèmes photovoltaïque :.....	59
III.8.1 Les systèmes autonomes :.....	60
III.8.2 Les systèmes hybrides :.....	60
III.8.3 Les systèmes connectés au réseau :.....	60

III.9 Connexion au réseau :.....	61
III.9.1 Les onduleurs photovoltaïques :.....	62
III.9.2 Les batteries :.....	63
III.9.3 Le régulateur :.....	64
III.9.4 Le convertisseur :.....	64
III.10 Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque :.....	65
III.10.1 Avantages :.....	65
III.10.2 Inconvénients :.....	65
III.11 Conclusion :.....	66

**CHAPITRE IV : Généralité sur la technologie des équipements d'énergie Solaire
Photovoltaïque contrôlée par ordinateur avec SCADA (EESFC)**

IV.1 Introduction :.....	67
IV.2 La technologie des équipements d'énergie Solaire Photovoltaïque contrôlée par ordinateur avec SCADA (EESFC) :.....	67
IV.2.1 Un rappel sur le système SCADA :.....	67
IV.3 Spécification techniques complètes :.....	68
IV.4 Description général :.....	71
IV.4.1 Équipe EESFC :.....	71
IV.4.1.1 Deux panneaux solaires photovoltaïques (polycristallins) :.....	72
IV.4.1.2 Comprenant simulateur solaire :.....	72
IV.4.1.3 Système de ventilation, contrôlé par ordinateur (PC) :.....	73
IV.4.1.4 Régulateur DC pour les charges et la batterie :.....	73

IV.4.1.5 Chargeur de batterie auxiliaire :.....	73
IV.4.1.6 Module des charges DC :.....	73
IV.4.1.7 Capteurs :.....	74
IV.4.2 EESFC/CIB. Boîte d'Interface de Contrôle :.....	75
IV.4.2.1 Caractéristiques :.....	76
IV.4.3 DAB. Carte d'Acquisition de Données :.....	76
IV.4.4 EESFC/CCSOF. Logiciel de Contrôle :.....	77
IV.4.5 Câbles et Accessoires :.....	78
IV.5 Ecrans principaux du logiciel :.....	79
IV.6 Les travaux possibles et résultats pour cet appareil :.....	80
IV.7 Conclusion :.....	81

CHAPITRE V : RÉSULTATS EXPÉRIMENTALES

V.1 Introduction :.....	83
V.2 Les expériences et résultats :.....	83
V.2.1 Détermination des paramètres typiques du panneau solaire (exercice 1) :.....	83
V.2.1.1 Objective :.....	83
V.2.1.2 Matériels nécessaires :.....	84
V.2.1.3 Procédure pratique :.....	84
V.2.1.4 Résultats et tableaux :.....	85
V.2.1.4.a Un rappel sur le Rhéostat :.....	85

V.2.1.4.b Les Caractéristique courant-tension et puissance-tension des panneaux photovoltaïques pour différent rayonnements solaires :.....	86
V.2.1.4.b.1 Rayonnement solaire maximal 100% (Position 1) :.....	86
V.2.1.4.b.1.1 La courbe de courant- tension de panneau-1 et panneau-2 avec SUN-1 et SUN-2 à la position maximale 100% :.....	87
V.2.1.4.b.1.2 Détermination de : I_{CC} (A), V_{OC} (V) et puissance maximale P_{max} :...	88
V.2.1.4.b.1.3 La courbe de la puissance en fonction de la tension pour un rayonnement solaire maximal \Rightarrow position 1 :100 % :.....	89
V.2.1.4.b.2 Rayonnement solaire 80% (Position 2) :.....	91
V.2.1.4.b.2.1 La courbe de courant- tension de panneau-1 et panneau-2 avec SUN-1 et SUN-2 à la position 2 :80% :.....	91
V.2.1.4.b.2.2 La courbe de la puissance en fonction de la tension pour un Rayonnement solaire 80% \Rightarrow position 2 :80 % :.....	93
V.2.1.4.b.3 Rayonnement solaire 60% (Position 3) :.....	94
V.2.1.4.b.3.1 La courbe de courant- tension de panneau-1 et panneau-2 avec SUN-1 et SUN-2 à la position 3 :60% :.....	94
V.2.1.4.b.3.2 La courbe de la puissance en fonction de la tension pour un rayonnement solaire 60% \Rightarrow position 3 :60 % :.....	97
V.2.1.4.b.4 Rayonnement solaire 40% (Position 4) :.....	98
V.2.1.4.b.4.1 La courbe de courant- tension de panneau-1 et panneau-2 avec SUN-1 et SUN-2 à la position 4 :40% :.....	98
V.2.1.4.b.4.2 La courbe de la puissance en fonction de la tension pour un rayonnement solaire 40% \Rightarrow position 4 :40 % :.....	101
V.2.1.4.b.5 Les courbe de courant- tension et puissance-tension de panneau-1 et panneau-2 pour différents niveaux d'éclairment :.....	102

V.2.1.4.c Le point de puissance maximal PP_{max} de chaque panneau pour chaque niveau d'éclairément :.....	104
V.2.1.4.d Le facteur de remplissage (Facteur de forme) de chaque panneau avec le rayonnement solaire :.....	106
V.2.1.4.e Le rendement de chaque panneau avec le rayonnement solaire :.....	107
V.2.1.4.f Comparaison de rendement fournis par le fabricant et le rendement obtenue par notre pratique :.....	109
V.2.1.5 Conclusion pour l'exercice 1 :.....	110
V.2.2 Détermination l'efficacité (puissance maximal) et la relation entre la puissance générée et la puissance du rayonnement solaire (exercice 2)	111
V.2.2.1 Objectif :.....	111
V.2.2.2 Détermination l'efficacité (puissance maximal) :.....	111
V.2.2.2.a Matériel nécessaire :.....	111
V.2.2.2.b Procédure pratique :.....	111
V.2.2.2.c Résultats et tableaux :.....	112
V.2.2.2.c.1 Les valeurs de puissance maximale et rayonnement des deux panneaux à position du rhéostat de charge pour obtenir le point approximatif de puissance maximale :.	112
V.2.2.3 La relation entre la puissance générée et la puissance du rayonnement solaire :.	114
V.2.2.3.a Matériel nécessaire :.....	114
V.2.2.3.b Procédure pratique :.....	114
V.2.2.3.c Résultats et tableaux :.....	115
V.2.2.3.c.1 Les valeurs de courant et tension des deux panneaux à Rhéostat 50% :.	115
V.2.2.3.c.2 Les valeurs de la puissance générée par rapport au rayonnement solaire pour les deux panneaux solaires à Rhéostat 50% :.....	116

V.2.2.4 Conclusion pour l'exercice 2 :.....	118
V.2.3 Etude de l'efficacité des panneaux solaires connectés en Parallèle et en Série (exercice 3) :.....	119
V.2.3.1 Objectif :.....	119
V.2.3.2 Panneaux solaires connectés en Parallèle :.....	119
V.2.3.2.a Procédure pratique :.....	119
V.2.3.2.b Résultats et tableaux :.....	120
V.2.3.2.b.1 Courbe I-V des panneaux solaires connectés en Parallèle pour différents niveaux de rayonnement :.....	120
V.2.3.2.b.2 Courbe de la puissance en fonction de la tension des panneaux solaires connectés en Parallèle pour différents niveaux de rayonnement :.....	123
V.2.3.2.b.3 Détermination le point de la puissance maximale de chacune des courbes obtenues :.....	125
V.2.3.3 Panneaux solaires connectés en Série :.....	126
V.2.3.3.a Procédure pratique :.....	126
V.2.3.3.b Résultats et tableaux:.....	126
V.2.3.3.b.1 Courbe I-V des panneaux solaires connectés en Série pour différents niveaux de rayonnement :.....	126
V.2.3.3.b.2 Courbe de la puissance en fonction de la tension des panneaux solaires connectés en Série pour différents niveaux de rayonnement :.....	129
V.2.3.3.b.3 Détermination le point de la puissance maximale de chacune des courbes obtenues :.....	131
V.2.3.4 La différence entre des courbes I-V des panneaux solaires connectés en parallèle et en série :.....	133

V.2.3.5 Le facteur de remplissage (Facteur de forme) pour un rayonnement solaire maximal Max SUN 100% (Position 1) :.....	135
V.2.3.6 Le rendement pour un rayonnement solaire maximal (Position 1) :.....	135
V.2.3.7 Conclusion pour exercice 3 :.....	136
V.2.4 Etude de l'efficacité de panneau solaire en fonction de la température et des connexions des panneaux solaires (exercice 4) :.....	136
V.2.4.1 Objective :.....	137
V.2.4.2 Matériels nécessaires :.....	137
V.2.4.3 Procédure pratique :.....	137
V.2.4.4 Résultats et tableaux :.....	137
V.2.1.4.a Courbe I-V des panneaux solaires connectés en Parallèle avec les ventilateurs «ON» pour différents niveaux de rayonnement :.....	137
V.2.1.4.b Courbe de la puissance en fonction de la tension des panneaux solaires connectés en Parallèle pour différents niveaux de rayonnement :.....	140
V.2.1.4.c Détermination le point de la puissance maximale de chacune des courbes obtenues :.....	142
V.2.1.4.d La différence entre des courbes I-V et P-V pour les panneaux PVs connectés en parallèle sans ventilateurs et avec ventilateurs :.....	143
V.2.1.4.e La différence entre les panneaux PVs connectés en parallèle sans ventilateurs et avec ventilateurs par apport les caractéristiques électriques :.....	145
V.2.4.5 Conclusion pour exercice 4 :.....	148
Conclusion générale :.....	149
Bibliographie :	152

Tableau des figures

Introduction générale	
Figure.1	<i>La production d'électricité photovoltaïque en France a titre exemple depuis les années 2000-2006</i>
CHAPITRE I : Généralité sur la jonction pn	
Figure I.1	<i>Les niveaux d'énergie relatifs des conducteurs</i>
Figure I.2	<i>Les niveaux d'énergie relatifs des isolants</i>
Figure I.3	<i>Les niveaux d'énergie relatifs des semi-conducteurs</i>
Figure I.4	<i>Représentation simplifiée de la structure du silicium</i>
Figure I.5	<i>Semi-conducteur de type n</i>
Figure I.6	<i>Semi-conducteur de type p</i>
Figure I.7	<i>Schéma d'un semi-conducteur intrinsèque ($T > 0^\circ\text{K}$)</i>
Figure I.8	<i>Schéma d'un semi-conducteur extrinsèque ($T > 0^\circ\text{K}$)</i>
Figure I.9	<i>Schéma d'un semi-conducteur type n ($T > 0^\circ\text{K}$)</i>
Figure I.10	<i>Schéma d'un semi-conducteur type p ($T > 0^\circ\text{K}$)</i>
Figure I.11	<i>Jonction pn à l'équilibre</i>
Figure I.12	<i>Représentation d'une jonction pn à l'équilibre thermodynamique</i>
Figure I.13	<i>Polarisation inverse</i>
Figure I.14	<i>Polarisation direct</i>
CHAPITRE II : Généralité sur les énergies renouvelables	
Figure II.1	<i>Différents types des énergies renouvelables dans le monde</i>

Figure II.2	<i>La nacelle d'une éolienne</i>
Figure II.3	<i>Schéma de Principe de fonctionnement d'une éolienne</i>
Figure II.4	<i>Centrale de l'énergie solaire</i>
Figure II.5	<i>Capteur solaire à l'eau chaude</i>
Figure II.6	<i>Toit recouvert de panneaux photovoltaïques</i>
CHAPITRE III : Généralité sur les cellules photovoltaïques	
Figure III.1	<i>L'astre soleil</i>
Figure III.2	<i>Le rayonnement solaire</i>
Figure III.3	<i>Composantes du rayonnement solaire au sol</i>
Figure III.4	<i>L'effet photovoltaïque</i>
Figure III.5	<i>Représentation de la cellule photovoltaïque</i>
Figure III.6	<i>Structure basique d'une cellule photovoltaïque</i>
Figure III.7	<i>Constitution d'une cellule photovoltaïque</i>
Figure III.8	<i>Principe de fonctionnement d'une cellule à silicium</i>
Figure III.9	<i>Caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque pour un éclairement et une température donnés</i>
Figure III.10	<i>Les différentes technologies des cellules photovoltaïques</i>
Figure III.11	<i>Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque</i>
Figure III.12	<i>Puissance maximale idéale et celle de l'approche pratique</i>
Figure III.13	<i>Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale</i>
Figure III.14	<i>Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle</i>
Figure III.15	<i>Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque réelle</i>

Figure III.16	<i>Caractéristique courant tension de N_s cellule en série</i>
Figure III.17	<i>Caractéristique courant tension de (N_p) cellule en parallèle</i>
Figure III.18	<i>Caractéristiques de cellule photovoltaïque (a) en Série, (b) en Parallèle</i>
Figure III.19	<i>Tension aux bornes du module</i>
Figure III.20	<i>Courant débité par un module en court-circuit</i>
Figure III.21	<i>Caractéristique courant-tension d'une cellule Photovoltaïque</i>
Figure III.22	<i>Caractéristique Puissance (P)-Tension (V) d'une cellule photovoltaïque</i>
Figure III.23	<i>Résultats de simulation des caractéristiques I(V) et de la puissance délivrée par le générateur PV en fonction de différentes irradiation reçue à $T=25^{\circ}\text{C}$</i>
Figure III.24	<i>Evolution de la caractéristique (I-V) (P-V) du module en fonction de la température</i>
Figure III.25	<i>Caractéristiques électriques d'un générateur PV ayant des diodes de protection (dites diodes By-pass)</i>
Figure III.26	<i>Caractéristique I (V) d'un module pour différentes valeurs de résistance série</i>
Figure III.27	<i>Schéma de module, panneau et champ photovoltaïques</i>
Figure III.28	<i>Systèmes photovoltaïques connectés au réseau</i>
Figure III.29	<i>module PV connecté au réseau</i>
Figure III.30	<i>Onduleurs photovoltaïque</i>
Figure III.31	<i>Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec batterie de stockage</i>
CHAPITRE IV : Généralité sur la technologie des équipements d'énergie Solaire Photovoltaïque contrôlée par ordinateur avec SCADA (EESFC)	
Figure IV.1	<i>Schéma représenté de la technologie des équipements d'énergie Solaire Photovoltaïque contrôlée par ordinateur avec SCADA (EESFC)</i>
Figure IV.2	<i>Diagramme des éléments de l'Équipe EESFC</i>

Figure IV.3	<i>Schéma de processus de l'appareil (L'équipement d'énergie Solaire Photovoltaïque -EESFC/CIB. Boîte d'Interface de Contrôle-)</i>
Figure IV.4	<i>Schéma d'Unité d'équipe EESFC</i>
Figure IV.5	<i>Schéma de module de charges CC</i>
Figure IV.6	<i>Schéma d'EESFC/CIB. Boîte d'Interface de Contrôle</i>
Figure IV.7	<i>Schéma de DAB. Carte d'Acquisition de Données</i>
Figure IV.8	<i>Schéma d'EESFC/CCSOF</i>
Figure IV.9	<i>Schéma de l'écran principal du logiciel</i>
CHAPITRE V : RÉSULTATS EXPÉRIMENTALES	
Figure V.1	<i>Schéma du Rhéostat</i>
Figure V.2	<i>Diagramme schématique de rhéostat et les régulateurs d'intensité lumineuse SUN-1, SUN-2</i>
Figure V.3	<i>Caractéristique courant-tension des panneaux (1) et (2) avec la condition suivante : Rayonnement solaire maximal (Position 1) 100%</i>
Figure V.4	<i>Caractéristique puissance-tension des panneaux (1) et (2) avec la condition suivante : Rayonnement solaire 100% (Position 1)</i>
Figure V.5	<i>Caractéristique courant-tension des panneaux (1) et (2) avec la condition suivante : Rayonnement solaire 80% (Position 2)</i>
Figure V.6	<i>Caractéristique puissance-tension des panneaux (1) et (2) avec la condition suivante : Rayonnement solaire 80% (Position 2)</i>
Figure V.7	<i>Caractéristique courant-tension des panneaux (1) et (2) avec la condition suivante : Rayonnement solaire 60% (Position 3)</i>
Figure V.8	<i>Caractéristique puissance-tension des panneaux (1) et (2) avec la condition suivante : Rayonnement solaire 60% (Position 3)</i>

Figure V.9	<i>Caractéristique courant-tension des panneaux (1) et (2) avec la condition suivante : Rayonnement solaire 40% (Position 4)</i>
Figure V.10	<i>Caractéristique puissance-tension des panneaux (1) et (2) avec la condition suivante : Rayonnement solaire 40% (Position 4)</i>
Figure V.11	<i>Evolution de la caractéristique (I-V) et (P-V) du panneau 1 pour différents niveaux d'irradiation (100% - 80% - 60% - 40%) à température constante $T=25^{\circ}\text{C}$</i>
Figure V.12	<i>Variation de la puissance maximale en fonction de l'intensité de rayonnement</i>
Figure V.13	<i>Caractéristique de puissance et rayonnement solaire pour les deux panneaux 1-2</i>
Figure V.14	<i>Caractéristique courant-tension des deux panneaux à position du rhéostat 50%</i>
Figure V.15	<i>Graphique de puissance générée par rapport au rayonnement solaire pour les deux panneaux PVs</i>
Figure V.16	<i>Caractéristique courant-tension pour deux panneaux connectés en parallèle avec la condition suivante : Trois niveaux d'éclairiments différents : 100% - 80% - 60%</i>
Figure V.17	<i>Caractéristique puissance-tension pour deux panneaux connectés en parallèle avec la condition suivante : Trois niveaux d'éclairiments différents : 100% - 80% - 60%</i>
Figure V.18	<i>Caractéristique courant-tension pour deux panneaux connectés en série avec la condition suivante : Trois niveaux d'éclairiments différents : 100% - 80% - 60%</i>
Figure V.19	<i>Caractéristique puissance-tension pour deux panneaux connectés en Série avec la condition suivante : Trois niveaux d'éclairiments différents : 100% - 80% - 60%</i>

Figure V.20	<i>Caractéristique puissance-rayonnement pour deux panneaux connectés en Parallèle et en Série avec la condition suivante : (pour trois niveaux d'éclairéments différents : 100% - 80% - 60%)</i>
Figure V.21	<i>Caractéristique courant-tension pour un seul panneau PV et deux panneaux connectés en Parallèle et en Série avec la condition suivante : Rayonnement solaire maximal (Position 1) 100%</i>
Figure V.22	<i>Caractéristique courant-tension pour deux panneaux connectés en parallèle avec ventilateurs, avec la condition suivante : Trois niveaux d'éclairéments différents : 100% - 80% - 60%</i>
Figure V.23	<i>Caractéristique puissance-tension pour deux panneaux connectés en parallèle avec ventilateurs, avec la condition suivante : Trois niveaux d'éclairéments différents : 100% - 80% - 60%</i>
Figure V.24	<i>Caractéristique courant-tension pour deux panneaux connectés en parallèle sans ventilateurs et avec ventilateurs à condition suivante : Trois niveaux d'éclairéments différents : 100% - 80% - 60%</i>
Figure V.25	<i>Caractéristique puissance-tension pour deux panneaux connectés en parallèle sans ventilateurs et avec ventilateurs à condition suivante : Trois niveaux d'éclairéments différents : 100% - 80% - 60%</i>

Liste des tableaux

CHAPITRE III : Généralité sur les cellules photovoltaïques

Tableau III.1 : Caractéristiques principales du soleil..... 29

CHAPITRE IV : Généralité sur la technologie des équipements d'énergie Solaire Photovoltaïque contrôlée par ordinateur avec SCADA (EESFC)

Tableau IV.1 : Les composants de DAB. Carte d'Acquisition de Données..... 78

CHAPITRE IV : Généralité sur la technologie des équipements d'énergie Solaire Photovoltaïque contrôlée par ordinateur avec SCADA (EESFC)

Tableau V.1 : Valeurs moyenne de courant et tension pour les deux panneaux 1 et 2 (pour un rayonnement solaire maximal, SUN-1 et SUN-2 \Rightarrow position 1 :100 %)...... 87

Tableau V.2 : Valeurs moyenne de puissance et tension pour les deux panneaux 1 et 2 (pour un rayonnement solaire maximal, SUN-1 et SUN-2 \Rightarrow position 1 :100 %)...... 90

Tableau V.3 : Valeurs moyenne de courant et tension pour les deux panneaux 1 et 2 (pour un rayonnement solaire 80%, SUN-1 et SUN-2 \Rightarrow position 2 :80 %)...... 91

Tableau V.4 : Valeurs moyenne de puissance et tension pour les deux panneaux 1 et 2 (pour un rayonnement solaire, SUN-1 et SUN-2 \Rightarrow position 2 :80 %)...... 93

Tableau V.5 : Valeurs moyenne de courant et tension pour les deux panneaux 1 et 2 (pour un rayonnement solaire 60%, SUN-1 et SUN-2 \Rightarrow position 3 :60 %)...... 95

Tableau V.6 : Valeurs moyenne de puissance et tension pour les deux panneaux 1 et 2 (pour un rayonnement solaire, SUN-1 et SUN-2 \Rightarrow position 3 :60 %)...... 97

Tableau V.7 : Valeurs moyenne de courant et tension pour les deux panneaux 1 et 2 (pour un rayonnement solaire 40%, SUN-1 et SUN-2 \Rightarrow position 4 :40 %)...... 99

Tableau V.8 : Valeurs moyenne de puissance et tension pour les deux panneaux 1 et 2 (pour un rayonnement solaire maximal, SUN-1 et SUN-2 \Rightarrow position 4 :40 %)...... 101

Tableau V.9 : Valeurs de courant optimale et tension optimale pour les deux panneaux 1 et 2 (pour différents niveaux d'irradiation).....	104
Tableau V.10 : Valeurs de puissance maximale pour les deux panneaux 1 et 2 (pour différents niveaux d'irradiation).....	105
Tableau V.11 : Caractéristique du panneau solaire (fournis par le fabricant).....	109
Tableau V.12 : Valeurs de rendement et FF pour panneau (fournis par le fabricant) et les deux panneaux (1) et (2) pour déférente éclairement.....	110
Tableau V.13 : Valeurs moyenne de puissance et rayonnement solaire pour les deux panneaux (1) et (2).....	113
Tableau V.14 : Valeurs de courant et tension des deux panneaux à position du rhéostat 50%.....	115
Tableau V.15 : Valeurs de la puissance générée par rapport au rayonnement solaire) pour les deux panneaux solaires.....	117
Tableau V.16 : Valeurs moyenne de courant et tension pour deux panneaux connectés en Parallèle (pour trois niveaux d'éclairéments différents : 100% - 80% - 60%).....	120
Tableau V.17 : Valeurs moyenne de puissance et tension pour deux panneaux connectés en Parallèle (pour trois niveaux d'éclairéments différents : 100% - 80% - 60%).....	123
Tableau V.18 : Valeurs de courant optimale et tension optimale pour deux panneaux connectés en Parallèle (pour trois niveaux d'éclairéments différents : 100% - 80% - 60%).....	125
Tableau V.19 : Valeurs de puissance maximale pour deux panneaux connectés en Parallèle (pour trois niveaux d'éclairéments différents : 100% - 80% - 60%).....	125
Tableau V.20 : Valeurs moyenne de courant et tension pour deux panneaux connectés en Série (pour trois niveaux d'éclairéments différents : 100% - 80% - 60%).....	127
Tableau V.21 : Valeurs moyenne de puissance et tension pour deux panneaux connectés en Série (pour trois niveaux d'éclairéments différents : 100% - 80% - 60%).....	130

Tableau V.22 : Valeurs de courant optimale et tension optimale pour deux panneaux connectés en Série (pour trois niveaux d'éclairéments différents : 100% - 80% - 60%).....	131
Tableau V.23 : Valeurs de puissance maximale pour deux panneaux connectés en parallèle (pour trois niveaux d'éclairéments différents : 100% - 80% - 60%).....	132
Tableau V.24 : Valeurs moyenne de courant et tension pour un seul panneau PV et deux panneaux connectés en Parallèle et en Série (pour trois niveaux d'éclairéments différents : 100% - 80% - 60%).....	133
Tableau V.25 : Valeurs moyenne de courant et tension pour deux panneaux connectés en parallèle avec ventilateurs (pour trois niveaux d'éclairéments différents : 100% - 80% - 60%).....	138
Tableau V.26 : Valeurs moyenne de puissance et tension pour deux panneaux connectés en Parallèle avec ventilateurs (pour trois niveaux d'éclairéments différents : 100% - 80% - 60%).....	141
Tableau V.27 Valeurs de courant optimale et tension optimale pour deux panneaux connectés en Parallèle avec ventilateurs (pour trois niveaux d'éclairéments différents : 100% - 80% - 60%).....	142
Tableau V.28 : Valeurs de puissance maximale pour deux panneaux connectés en Parallèle avec ventilateurs (pour trois niveaux d'éclairéments différents : 100% - 80% - 60%).....	143
Tableau V.29 : Valeurs de puissance maximale pour deux panneaux connectés en Parallèle sans ventilateurs et avec ventilateurs (pour trois niveaux d'éclairéments différents : 100% - 80% - 60%).....	145
Tableau V.30 : Valeurs de facteur de forme et de rendement pour deux panneaux connectés en Parallèle sans ventilateurs et avec ventilateurs (pour trois niveaux d'éclairéments différents : 100% - 80% - 60%).....	147

Tableau des Symboles

Symbole	Définition	Unités
ρ	La résistivité électrique	[Ω /cm]
σ	Conductivité électrique	[mS/m]
E_g	Energie de gap	[eV]
E_F	Energie de fermi ou niveau de fermi	[eV]
E_C	Energie de conduction	[eV]
E_V	Energie de valence	[eV]
E_D	Niveau d'énergie donneur	[eV]
E_A	Niveau d'énergie accepteur	[eV]
h	Constante de Planck ($6,62 \cdot 10^{-34}$)	[J.s]
λ	Longueur d'onde de la lumière	[μ m]
c	Célérité de la lumière dans le vide ($3 \cdot 10^8$)	[m/s]
E	Champ électrique	[V/cm]
I_{cc}	Courant de court-circuit	[A]
V_{oc}	Tension de circuit-ouvert (Tension à vide)	[V]
I_{sat}	Courant de saturation de la diode	[A]
I_{ph}	Photo courant	[A]
R_s	Résistance série	[Ω]
R_p	Résistance shunte	[Ω]
V_T	Tension thermique de la jonction	[J/C]

K_B	Constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$)	[J/K]
T	Température de la jonction pn de a cellule PV	[K]
q	Charge de l'électron ($1,602 \cdot 10^{-19}$)	[C]
n	facteur de non idéalité de la jonction	
I_{cell}	Le courant fourni par la cellule photovoltaïque	[A]
V_{cell}	La tension aux bornes de la cellule photovoltaïque	[V]
I_d	Courant à travers la diode	[A]
I_p	Courant à travers la résistance parallèle	[A]
P	Puissance mesuré aux bornes de la cellule PV	[W]
I	Courant fournis par la cellule PV	[A]
V	Tension mesuré aux bornes de la cellule PV	[V]
P_{max, idéal}	Puissance mesuré aux bornes de la cellule PV idéale	[W]
P_{max}	Puissance maximale	[W]
I_{opt}	Courant optimal au point P _{max}	[A]
V_{opt}	Tension maximale au point P _{max}	[V]
FF	Facteur de forme (facteur de remplissage)	
η	Rendement de la cellule PV	[%]
P_{in}	Puissance incidente	[W]
S	Le flux reçu	[W/m ²]
Φ	La surface effective de la cellule photovoltaïque	[m ²]

Tableau des Acronymes

Acronymes	Définition
SC	Semi-conducteur
Si	Silicium
Ge	Germanium
BC	La bande de conduction
BV	la bande de conduction
ENR	Energies nouvelles et renouvelables
ER	Energies renouvelables
AM	Nombre de masse d'air
GaAs	Arséniure de Gallium
CIS	Cuivre Indium Sélénium
CdTe	Le tellure de Cadmium
PV	Photovoltaïque
PPmax	Point de puissance maximale
Ns	Nombre de cellule reliée en série
Np	Nombre de cellule reliée en parallèle
I_{ccNp}	La somme des courants de court-circuit de cellule en parallèle
V_{ocNp}	Tension du circuit ouvert de cellules en parallèle
I_{ccNs}	Courant de court-circuit de Ns cellules en série
V_{ocNs}	La somme des tensions en circuit ouvert de Ns cellules en série

DC/DC	Continu/continu
AC/DC	Continu/alternative
DC	Direct current (courant continue)
AC	courant alternative
CC	Courant constant
SUN	Régulateur d'intensité lumineuse
GPV	Générateur photovoltaïque
N_{pp}	Nombre de panneaux PVs en parallèle
I_{ccN_{pp}}	La somme des courants de court circuit des (N _{pp}) panneaux en parallèle
V_{ocN_{pp}}	Tension du circuit ouvert des (N _{pp}) panneaux en parallèle
N_{ps}	Nombre de panneaux PVs en série
I_{ccN_{ps}}	Courant de circuit ouvert des (N _{ps}) panneaux en série
V_{ocN_{ps}}	La somme des tensions de court circuit des (N _{ps}) panneaux en série

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

La croissance de la consommation mondiale d'électricité a été remarquée pendant les dernières décennies. Néanmoins, la plus grande partie de l'énergie électrique est créée par combustion de ressources non renouvelables tel que [1] ; pétrole, nucléaire, gaz, carbone. etc dont le délai d'épuisement est considéré à quelques décennies. En addition, ce type de production d'énergie est très polluant et toxique. Le développement d'autres sources d'énergies renouvelables non toxique et non polluantes est donc d'actualité.[2]

Parmi les sources d'énergies renouvelables, on compte le solaire, les flux marins et océaniques, le vent la géothermie..., etc. Le soleil est une source d'énergie très puissante. En effet, la puissance du rayonnement solaire au niveau du sol est d'environ 950 Watt/m^2 . [3]

La quantité globale d'énergie solaire reçue au niveau du la terre durant sept jours dépasse l'énergie produite par les réserves mondiales de gaz, d'uranium, de carbone et pétrole.[3]

L'électricité photovoltaïque est soutirée par la transformation directe de la lumière du soleil en électricité, au moyen de cellules photovoltaïques. La production d'électricité photovoltaïque en France a titre exemple connaît un développement importante depuis les années 2000-2006, pour surpasser les 70 GW en 2016 (voire la figure ci-dessous).[4]

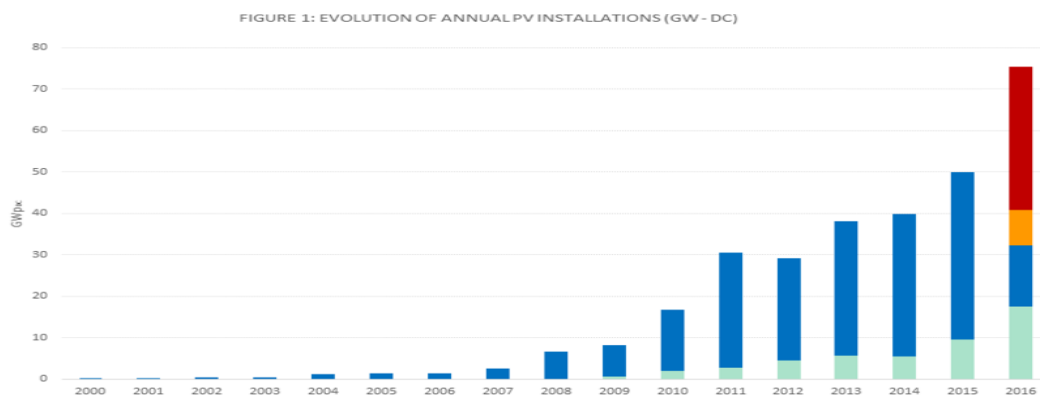


Figure.1 : La production d'électricité photovoltaïque en France a titre exemple depuis les années 2000-2006. [5]

L'Algérie dispose des ressources énergétiques renouvelables importantes et une solution qui peuvent notamment être utilisées dans la production d'énergie électrique, indispensable moyen de tout développement social et économique. La principale source de ces ressources est le gisement solaire. En cet effet l'utilisation de l'énergie solaire en Algérie présente une nécessité et un avantage de la diversité de l'énergie.[6]

Dans le passe la technologie du panneau solaire photovoltaïque en algerie repose essentiellement sur les besoins des régions éloignées (désert). Aujourd'hui, une autre stratégie propose pour que le panneau solaire devienne une source d'énergie alternative à d'autres sources classique d'énergie ou on peut bénéficier dans tout le pays et exporter. De ce fait, il y a un grand d'intérêt pour connaitre comment les installations et utilisation des panneaux solaire.[7]

Dans ce contexte, notre travail exposé dans ce mémoire concerne l'étude des caractéristiques de deux panneaux solaire photovoltaïque contrôlée par ordinateur.

Ainsi ce mémoire est structurée en cinq chapitres.

- ✚ Dans le premier chapitre : Les généralités sur la jonction pn où nous présenterons la différence entre un isolant, un métal et un semi-conducteur, types de semi-conducteurs et le dopage dans les semi-conducteurs
- ✚ Dans le second chapitre : Généralité sur les énergies renouvelables (Energie éolienne et énergie solaire), nous présentons en détails les deux types des énergies renouvelables tels que l'énergie éolienne et l'énergie solaire ainsi nous portons un intérêt particulier au principe de fonctionnement et sure les avantages et les inconvénients.
- ✚ Dans le troisième chapitre intitulé généralité sur les cellules photovoltaïques. Nous exposons en détail l'effet photovoltaïque on présente la théorie des panneaux photovoltaïque on particulier, Historique, effet photovoltaïque, Caractéristique de la cellule photovoltaïque ; Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque ; Technologies des trois générations ; les caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque ; Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque ; Module

photovoltaïque (panneau solaire photovoltaïque), l'association des cellules photovoltaïques et en termine par citation des avantages et les inconvénients.

- ✚ Le quatrième chapitre intitulé Généralité sur la technologie des équipements d'énergie solaire Photovoltaïque contrôlée par ordinateur avec SCADA (EESFC est inscrit toute les éléments principaux d'énergie solaire photovoltaïque et éléments principaux du logiciel SCADA
- ✚ Dans le dernier chapitre V : Intitulé résultats expérimentaux on présente les résultats des quatre exercices relatifs aux deux panneaux photovoltaïques : Détermination des paramètres typiques du panneau solaire, détermination l'efficacité (puissance maximale) et la relation entre la puissance générée et la puissance du rayonnement solaire, caractéristique des deux panneaux connecté en parallèle, caractéristique des deux panneaux connectés en série, l'efficacité de panneau solaire en fonction de la température et des connexions des panneaux solaires.

Ce mémoire sera achevée par une conclusion et des perspectives.

CHAPITRE I

Généralité sur la jonction pn

I. Introduction

Le silicium est un matériau semi-conducteur c'est-à-dire un matériau intermédiaire entre le conducteur et l'isolant, il est capable de convertir la lumière à l'électricité à l'aide des technologies de dopage de type n et de type p.

Les semi-conducteurs sont des éléments naturels. Sensibles à la lumière visible et invisible (rayon ultra-violet, infrarouge...). Ils conduisent le courant nettement moins bien que les métaux, mais d'autant mieux que la température est plus élevée

Dans ce chapitre, nous expliquons la différence entre un isolant, un métal et un semi-conducteur. Ensuite, nous allons examiner les propriétés des types de semi-conducteurs et les propriétés électroniques des SCs. En fin, nous présentons la description de la jonction, et la polarisation d'une jonction pn.

I.2 Différence entre un isolant, un métal et un semi-conducteur [1]

Tout matériau est constitué d'atomes. Ces atomes contribuent aux propriétés électriques d'un matériau. Les atomes sont connectés les uns aux autres avec les électrons de valence pour former des liaisons covalentes. L'état énergétique d'un matériau peut être représenté par des bandes d'énergie. Par leurs propriétés électriques, les matériaux peuvent être classés en trois catégories :

- ❖ Les matériaux conducteurs.
- ❖ Les matériaux isolants.
- ❖ Les matériaux semi-conducteurs.

I.2.1 Les matériaux conducteurs

Un conducteur est un matériau qui conduit facilement le courant électrique. Les meilleurs conducteurs sont des matériaux constitués d'un seul élément comme le cuivre, l'argent...etc. Dans ce type de matériaux la bande de valence et la bande de conduction se

chevauchent. Il n'y a pas de bande interdite. Des atomes composant les matériaux conducteurs libèrent des électrons qui peuvent circuler librement. Lorsqu'on applique une différence de potentiel à ce matériau où un champ électrique externe, les électrons libres se déplacent et on mesure une intensité de courant qui circule à travers le matériau conducteur.

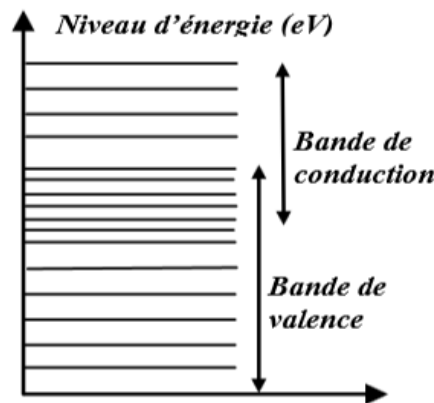


Figure I.1 : Les niveaux d'énergie relatifs des conducteurs.

Les métaux sont des conducteurs tels que le fer (Fe), le cuivre (Cu), l'or (Au), l'argent (Ag) et l'aluminium (Al) sont des conducteurs de courant électrique. La présence d'électrons libres dans la couche périphérique (densité $n \approx 10^{22}$ à 10^{23} $\text{é}/\text{cm}^3$) est à l'origine de la conductivité électrique. A température ambiante la résistivité ρ des conducteurs est très faible ($\rho \leq 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$).

I.2.2 Les matériaux isolants

Un isolant est un matériau qui ne conduit pas le courant électrique sous des conditions normales. Dans le cas des matériaux isolants, on a affaire à des liaisons de type covalente. Il n'y a pas des électrons libres dans la bande de conduction. Les électrons des couches périphériques forment des liaisons très fortes. Les charges restent immobiles même lorsqu'on applique une différence de potentiel où un champ électrique externe. Il n'y a pas possibilités de circulation de courant. On constate la présence d'une bande interdite dont l'entendue est de plusieurs électronvolts (eV).

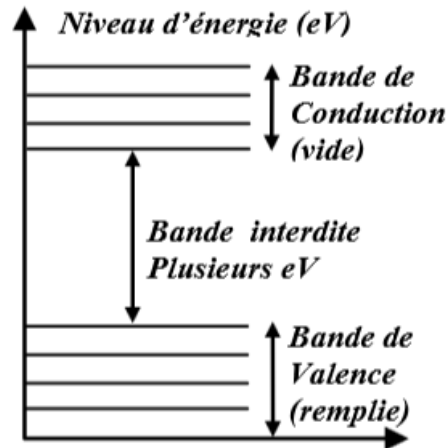


Figure I.2 : Les niveaux d'énergie relatifs des isolants.

Les matériaux isolants qui ont une résistivité ρ supérieure à $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ sont des isolants (matériaux non conducteurs de courant électrique). Parmi ces matériaux ; le verre, le mica, la silice (SiO_2) et le carbone (Diamant). Donc La conductivité des isolants est très faible

$$\left(\sigma = \frac{1}{\rho}\right).$$

I.2.3 Les matériaux semi-conducteurs [2]

On constate que ces matériaux ont une conductivité intermédiaire entre les conducteurs et les isolants. La bande de valence et la bande de conduction ne se chevauchent pas puisqu'il existe une bande interdite. Cependant, il faut noter que cette bande interdite est d'une étendue très étroite, puisqu'elle est de l'ordre de 1,1 eV pour le Silicium (Si) et de l'ordre de 0,7 eV pour le Germanium (Ge). Le Germanium et le Silicium sont les semi-conducteurs les plus anciens et les plus connus.

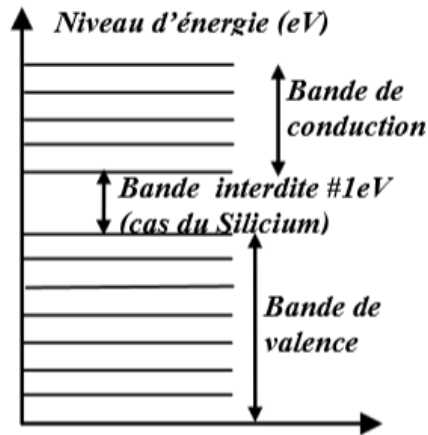


Figure I.3 : Les niveaux d'énergie relatifs des semi-conducteurs.

La résistivité des semi-conducteurs varie de (10^{-3} à $10^4 \Omega\text{m}$), les électrons libres et les trous mobiles sont des porteurs de charge responsable de la conductivité électrique.

I.3 Présentation des deux types de semi-conducteurs

I.3.1 Semi-conducteurs intrinsèque (purs)

Les semi-conducteurs les plus anciennement connus sont le Germanium et le Silicium, le plus utilisé étant ce dernier. La structure simplifiée à l'échelle moléculaire du silicium est représentée à la figure (I.4) chaque atome va se lier aux 4 atomes les plus proches par ses électrons de valence. La structure telle qu'elle est schématisée montre l'absence totale d'électrons libres, d'où l'impossibilité de créer d'un courant électronique. Pour avantager la conduction, il faut s'assurer de l'existence d'électrons libres en nombre suffisant [3]

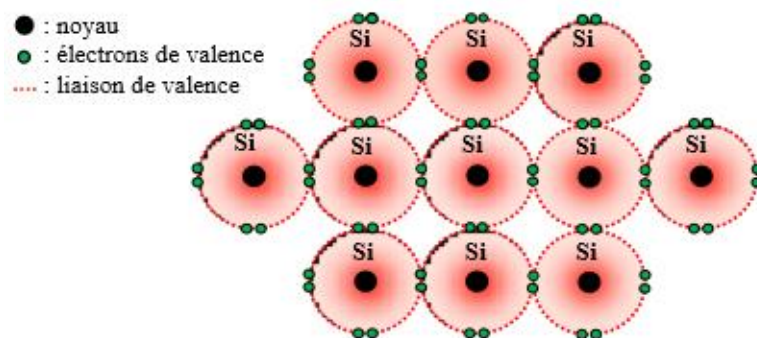


Figure I.4 : Représentation simplifiée de la structure du silicium.

Par l'apport d'énergie externe thermique, on peut casser les liaisons de valences et libérer des électrons qui vont passer de la bande de valence vers la bande de conduction laissant ainsi des places vides (des trous) dans la bande de valence qui peuvent également se déplacer. Les concentrations « n » des électrons et « p » des trous sont égales à « n_i » (concentration intrinsèque).

$$n = p = n_i(T) = AT^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{2KT}\right) \quad (\text{I.1})$$

Les semi-conducteurs appartiennent à la 4^{ème} colonne de la classification périodique des éléments. Par exemple : les atomes de silicium qui possèdent 4 électrons sur leur dernière couche se regroupent entre eux en échangeant leurs électrons de valence (liaison de covalence). Chaque électron est mis en commun par deux atomes voisins de manière à ce que le noyau se trouve entouré par une couche de 8 électrons (Cette structure est très stable).

I.3.2 Semi-conducteurs extrinsèques (dopage)

Le dopage est un moyen d'augmenter la conductivité électrique du corps. Les atomes du matériau de dopage, ou dopant (donneurs ou accepteurs d'électrons), et ceux de l'hôte ont un nombre différent d'électrons périphériques. Le dopage produit ainsi des particules électriques chargées positivement (type p) ou négativement (type n).[4]

Le dopage d'un semi-conducteur consiste à introduire des impuretés bien choisies dans le cristal semi-conducteur dans la perspective d'augmenter sa conductivité. Il existe deux types de dopages :

- Dopage type « n »
- Dopage type « p »

Le silicium à l'état pur est un semi-conducteur intrinsèque, avec un niveau de Fermi (E_F) placé au milieu du "gap", entre une bande de valence pleine (BV) et une bande de conduction vide (BC). Vis à vis des propriétés de conduction, il est nécessaire de posséder des porteurs mobiles pour permettre l'établissement d'un courant électrique. Avec une BC vide, une BV totalement remplie et aucun état permis dans le gap, la seule possibilité n'est la génération thermique de paires électrons-trous à travers tout le gap du semi-conducteur. Avec un gap de

1,1eV et $T= 300K$, la probabilité de générer une telle paire est extrêmement faible. De plus le gap du silicium étant indirect (déphasé dans l'espace réciproque), il n'est pas possible de générer ces paires directement avec une source de lumière : un couplage avec les phonons est nécessaire et la probabilité de cet événement est encore plus rare. Le silicium pur est donc extrêmement résistif à température ambiante. [5]

- ❖ l'ajout de phosphore (cinq électrons de valence [(K) 2, (L) 8, (M) 5]) au silicium (quatre électrons de valence [(K) 2, (L) 8, (M) 4]) se traduit par un excès d'électrons dans le réseau : cette association forme alors un semi-conducteur de type n (conductions assurées par des charges négatives).
- ❖ l'ajout de bore (trois électrons de valence [(K) 2, (L) 3]) au silicium se traduit par un défaut d'électrons formant des trous dans le réseau : il s'agit alors d'un semi-conducteur de type p (conductions assurées par des charges positives).

I.3.2.1 Dopage type « n »

Le dopage de type n consiste à introduire dans le cristal semi-conducteur (On prendra ici le silicium) des atomes d'impuretés pentavalents tels que le phosphore (P), l'arsenic (As), l'antimoine (Sb). Chaque atome possède 5 électrons sur la couche de valence. Chaque atome d'impureté, va apporter un électron de valence supplémentaire. Cet électron est peu lié au noyau et peut passer facilement de la bande de valence à la bande de conduction. Le nombre des électrons dans le matériau est bien entendu en rapport avec le nombre d'atomes de dopage. Dans ce type de dopage, la conduction est assurée par les porteurs de charges négatives qui sont les électrons (porteurs majoritaires). Les électrons libres sont majoritaires alors que les trous sont minoritaires.[4]

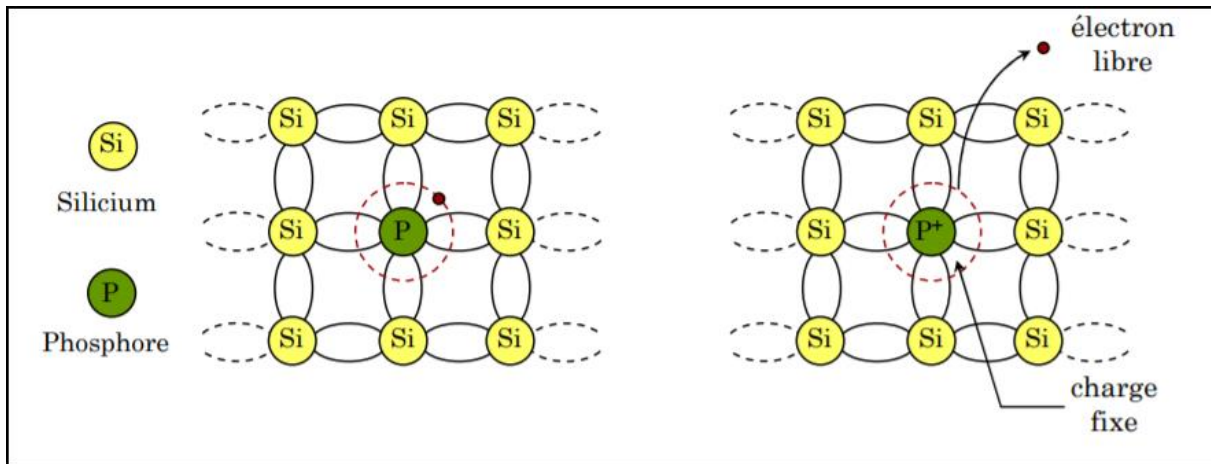


Figure I.5 : Semi-conducteur de type n.

I.3.2.2 Dopage type « p »

Les impuretés dans la structure du semi-conducteur type p sont des atomes trivalents (existence de trois électrons sur la couche de valence). Parmi ce type d'atomes on cite le bore (B), l'indium (In), le gallium (Ga) et l'aluminium (Al). La liaison de ces atomes trivalents à un atome de silicium est réalisée par trois électrons, le quatrième électron de valence du silicium retrouve seul. A la température ambiante certains électrons du cristal de silicium se libèrent et viennent combler ce trou, qui va se retrouver ailleurs qu'à l'emplacement de départ. On assure ainsi une conduction par trous mobiles. Le nombre de trous est bien sûr dépendant du nombre d'atomes d'impuretés injectées dans le cristal de silicium (les électrons libres sont minoritaires alors que les trous sont majoritaires). [6]

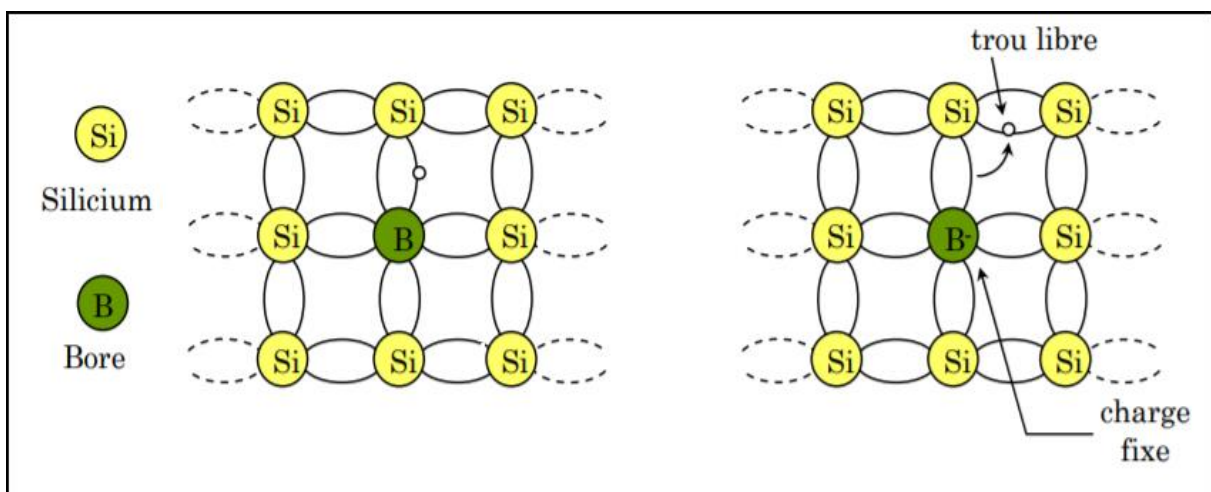


Figure I.6 : Semi-conducteur de type p.

I.4 Le semi-conducteur [7]

I.4.1 Propriétés électronique

La densité d'états $n(E)$ caractérise chaque bande d'énergie et représente le nombre maximum d'états électronique permis à l'énergie E .

Sous l'effet de la température les électrons de la bande de valence peuvent passer dans la bande de conduction, laissant des trous dans la bande de valence. La distribution des électrons et des dans les deux bandes obéit à la statistique de Fermi-Dirac ; La probabilité d'occupation du niveau d'énergie E est donnée par la fonction de Fermi $f(E)$:

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{KT}\right)} \quad (\text{I.2})$$

Où E_F représente l'énergie de Fermi pour laquelle la probabilité d'occupation est $1/2$ à $T=0^\circ\text{K}$.

Pour calculer les densités électroniques dans chaque bande, on fait l'approximation du gaz d'électrons libres pour les électrons de la bande de conduction et les trous de la bande de valence et on remplace la statistique de Fermi-Dirac par celle de Boltzmann[8] :

(Cette dernière approximation est justifiée si $E_C - E_F$ où $E_F - E_V$ sont supérieures à $3KT$) :

$$f_B(E) = \exp - \left(\frac{E - E_F}{KT}\right) \quad (\text{I.3})$$

Dans ces conditions on a :

$$n = N_C \exp - \left(\frac{E_C - E_F}{KT}\right) \quad (\text{I.4})$$

$$p = N_V \exp - \left(\frac{E_F - E_V}{KT}\right) \quad (\text{I.5})$$

Où N_C et N_V sont les densités effectives d'états dans les bandes de conduction et de valences.

Pour un semi-conducteur la largeur de bande interdite (gap) E_g on peut écrire [9] :

$$n = p = n_i^2 = N_C N_V \exp - \left(\frac{E_g}{KT}\right) \quad (\text{I.6})$$

Où n_i représente la densité de porteurs du semi-conducteur intrinsèque pour lequel E_F se trouve au milieu de bande interdite (figure(I.7)) ci-dessous :

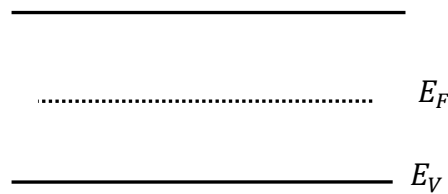


Figure I.7 : Schéma d'un semi-conducteur intrinsèque ($T > 0^\circ\text{K}$).

$$n_i = n = p \text{ et } E_F = \frac{(E_C - E_V)}{2} + \frac{KT}{2} \ln \left(\frac{N_V}{N_C} \right) \approx \frac{(E_C - E_V)}{2} \quad (\text{I.7})$$

En électrochimie on n'utilise quasiment jamais de semi-conducteurs intrinsèques mais des semi-conducteurs extrinsèques non dégénérés en modifiant la proportion relative des électrons (e^-) et des trous (h^+) par dopage en introduisant des éléments étrangers dans le réseau cristallin (figure(I.8)) ci-dessous :

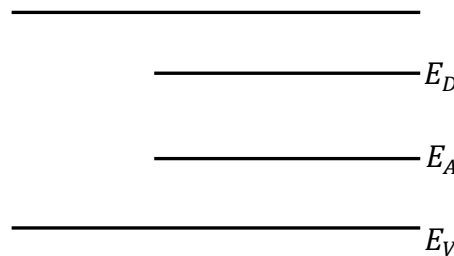


Figure I.8 : Schéma d'un semi-conducteur extrinsèque ($T > 0^\circ\text{K}$).

I.4.1.1 Semi-conducteur de type n

Un élément étranger donneur, de niveau d'énergie E_D proche de E_C fournit des électrons à la bande de conduction du semi-conducteur. La conductivité est assurée par les électrons,

$$n \approx N_D \quad p \ll n \quad N_D \gg n_i \quad (\text{I.8.a})$$

$$E_F = E_C - KTLn \left(\frac{N_C}{n} \right) \quad \text{Proche de } E_C \quad (\text{I.8.b})$$

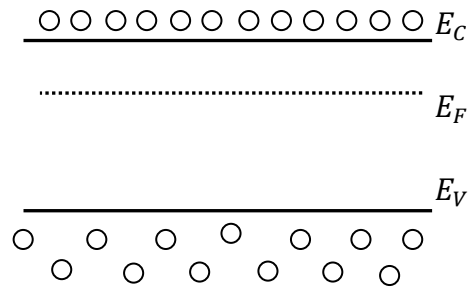


Figure I.9 : Schéma d'un semi-conducteur type n ($T > 0^\circ K$).

I.4.1.2 Semi-conducteur de type p [9]

Le même type raisonnement s'applique mais avec un élément étranger accepteur de niveau d'énergie E_A proche de E_V .

$$p \approx N_A \quad n \ll p \quad N_A \gg n_i \quad \text{(I.9.a)}$$

$$E_F = E_V + KTLn\left(\frac{N_V}{n}\right) \quad \text{Proche de } E_V \quad \text{(I.9.b)}$$

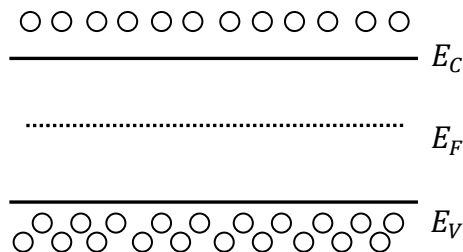


Figure I.10 : Schéma d'un semi-conducteur type p ($T > 0^\circ K$).

I.4.1.3 Semi-conducteur dope dégénéré

Un semi-conducteur forment dopé est dit dégénéré.

Le niveau de fermi est alors très proche d'une bande d'énergie :

(Pour un type (n) : $E_C - E_F < 3KT$; pour un type (p) : $E_F - E_V < 3KT$).

Ses propriétés sont sensiblement différentes car les équations (I.8 et I.9) ne sont plus valables.

A cause de la densité de porteurs le semi-conducteur présente un comportement quasi-métallique [9]

I.5 Description de la jonction

Une jonction pn est constituée de deux zones respectivement dopées « p » et « n » et juxtaposées d'une façon que nous supposons abrupte (figure I.11-I.12), c'est-à-dire que la transition de la zone « p » à la zone « n » se fait brusquement. Lorsque les deux régions sont combinées, la différence de concentration entre les porteurs des régions « p » et « n » va provoquer la circulation d'un courant de diffusion tendant à égaliser la concentration en porteurs d'une région à l'autre. Les trous de la région « p » vont diffuser vers la région « n » laissant derrière eux des atomes ionisés, qui constituent autant de charges négatives fixes. Il en est de même pour les électrons de la région n qui diffusent vers la région « p » laissant derrière eux des charges positives. Il apparaît aussi au niveau de la jonction une zone contenant des charges fixes positives et négatives. Ces charges créent un champ électrique E qui s'oppose à la diffusion des porteurs de façon à ce qu'un équilibre électrique s'établisse. [10]

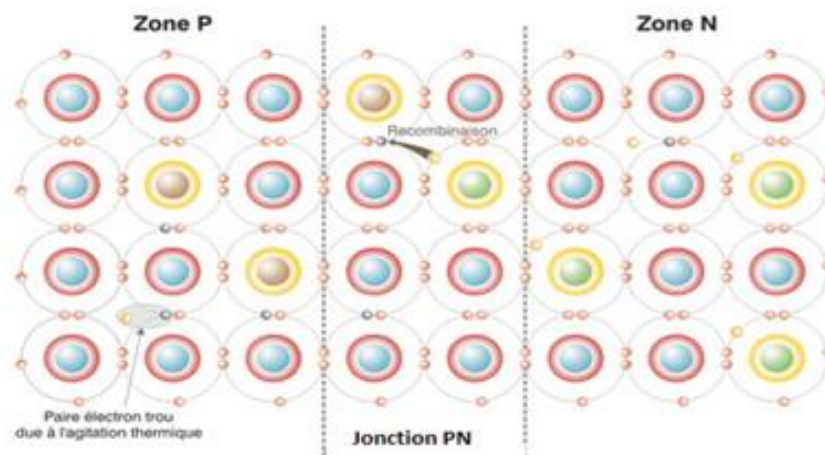


Figure I.11 : Jonction pn à l'équilibre.

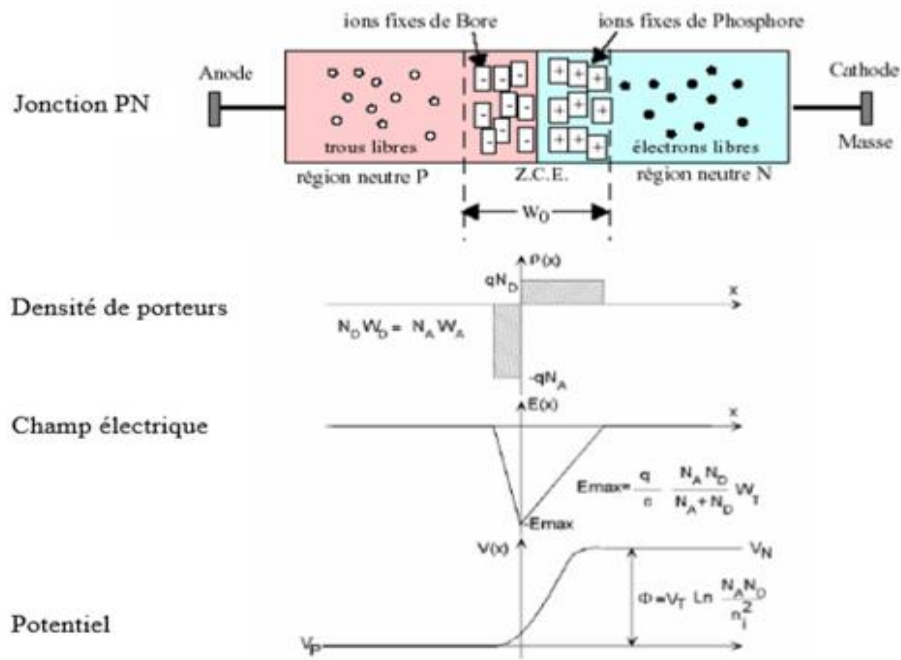


Figure I.12 : Représentation d’une jonction pn à l’équilibre thermodynamique.

I.5.2 Polarisation d’une jonction pn [11, 12]

I.5.2.1 La jonction pn polarisée en sens inverse

Le dipôle constitué par le cristal de semi-conducteur divisé par la jonction pn est une diode dont l’anode correspond à la zone P et la cathode à la zone N. En connectant la zone P à la borne (-) d’une source de tension continue et la zone N à la borne (+), les porteurs de charges s’éloignent de la jonction et la jonction devient quasiment isolante (la zone de déplétion (la zone de transition) devient plus large, et la barrière de potentiel augmente). La diode est dite polarisée en sens inverse, le courant qui la parcourt est très faible, il est dû aux porteurs minoritaires. Figure I.13.

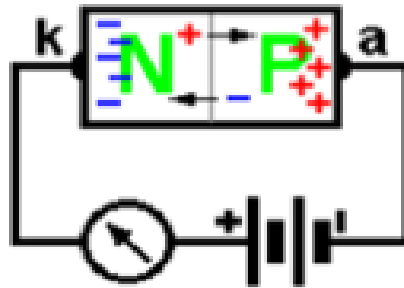


Figure I.13 : Polarisation inverse.

I.5.2.2 La jonction pn polarisée en sens direct

En reliant l'anode de la diode (zone P) au (+) de la pile et la cathode (zone N) au (-) les porteurs de charge traversent la jonction et un courant élevé parcourt le circuit. La différence de potentiel entre les zones P et N provoquée par la source de courant continu à la zone de transition doit être suffisamment faible pour annuler la différence de potentiel présente dans la jonction à l'état d'équilibre (la zone de transition devient plus étroite, et la barrière de potentiel diminue), figure I.14.

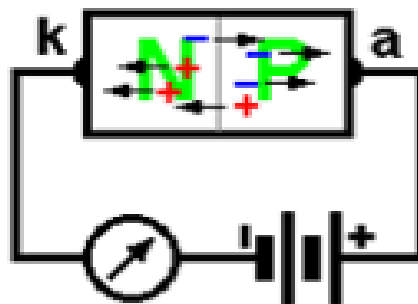


Figure I.14 : Polarisation direct.

I.6 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de donner une vue générale sur la différence entre les matériaux conducteurs, isolants, SCs. On a vu une étude théorique sur les semi-conducteurs et

la jonction pn. On a distingué aussi que chaque jonction est construite d'un semi-conducteur dopé « n » et un autre dopé « p ». Dans le chapitre suivant, nous allons présenter une généralité sur les énergies renouvelables

CHAPITRE II

Généralité sur les énergies renouvelables

II.1 Introduction

Sur notre planète la terre, il existe des sources d'énergies inépuisables des énergies naturelles qui ne s'épuisent jamais on les appelle les énergies renouvelables, utilisables afin de pouvoir répondre aux nombreuses demandes de la population mondiale. Ces demandes énergétiques concernent les transports, le chauffage ainsi que l'utilisation du téléphone ou même de la télévision. Cette utilisation de l'énergie a permis une amélioration du niveau de vie des populations des pays développés.

Dans ce chapitre, nous présentons la définition des énergies renouvelables. En suite expliquons l'énergie éolienne, le principe de fonctionnement et les avantages et inconvénients de cette énergie, puis nous expliquons l'énergie solaire, le potentiel de cette énergie et les types de l'énergie solaire et les avantages et inconvénients d'énergie solaire. Dans la dernière partie de ce chapitre, nous déterminons les avantages et inconvénients des énergies renouvelables.

II.2 Les énergies renouvelables [1, 2]

D'une façon générale, les énergies renouvelables sont des modes de production d'énergie utilisant des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités. L'eau des rivières faisant tourner les turbines d'un barrage hydroélectrique ; le vent brassant les pales d'une éolienne ; la lumière solaire excitant les photopiles ; mais aussi l'eau chaude des profondeurs de la terre alimentant des réseaux de chauffage. Sans oublier ces végétaux, comme la canne à sucre ou le colza, grâce auxquels on peut produire des carburants automobiles ou des combustibles pour des chaudières très performantes. Tout cela constitue les énergies nouvelles et renouvelables, " ENR " pour les adeptes du jargon énergétique, et plus justement ER pour les seules énergies renouvelables.

Les énergies renouvelables sont également désignées par les termes « énergies vertes » ou « énergies propres »

On parle généralement des énergies renouvelables par opposition aux énergies tirées des combustibles fossiles dont les stocks sont limités et non renouvelables à l'échelle du temps humain : charbon, pétrole, gaz naturel... Au contraire, les énergies renouvelables sont

produites à partir de sources comme les rayons du soleil, ou le vent, qui sont théoriquement illimitées à l'échelle humaine. Il existe différents types d'énergies renouvelables [3] :

- Éolien
- Hydroélectrique
- Géothermie
- Biomasse
- Solaire

Partage des énergies renouvelables dans le monde (2010)

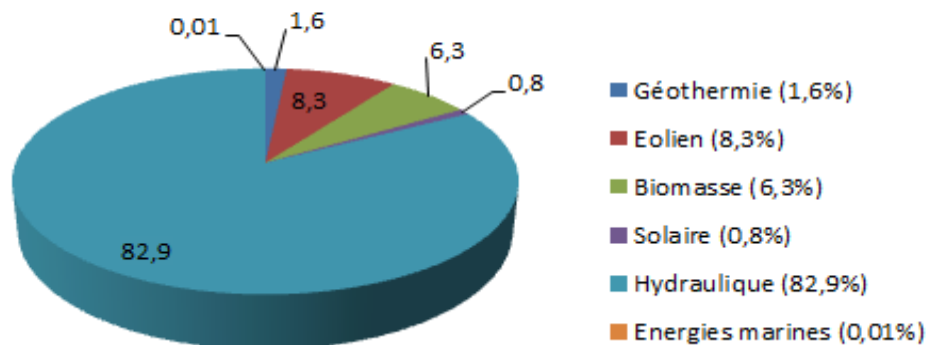


Figure II.1 : Différents types des énergies renouvelables dans le monde

Dans ce chapitre nous donnons seulement les détails sur **Energie éolienne et Energie solaire.**

II.2.1 Energie éolienne [4]

L'énergie éolienne génère de l'électricité à partir d'énormes éoliennes, car l'énergie cinétique du vent entraîne un générateur qui produit de l'électricité. La rotation des ventilateurs alimente les turbines placées à l'intérieur qui produiront le courant. Il existe plusieurs types d'énergie éolienne renouvelable : les éoliennes sauvages, les éoliennes marines, les éoliennes flottantes...mais le principe reste répandu pour tous ces types d'énergies renouvelables.



Figure II.2 : La nacelle d'une éolienne.

II.2.1.1 Principe de fonctionnement

Les éoliennes nous permettent d'exploiter l'énergie du vent et de la transformer en énergie électrique. Lorsque le vent souffle, les pales de la turbine tournent dans le sens des aiguilles d'une montre pour capter de l'énergie. Cela déclenche le vrillage de l'arbre principal, relié à une boîte de vitesses située dans la nacelle. La boîte de vitesses envoie cette énergie au générateur, la convertissant en électricité. L'électricité se rend ensuite dans la tour jusqu'à un transformateur, où les niveaux de tension sont ajustés pour correspondre au réseau.[5]

- **Transformer la force du vent s'exerçant sur l'éolienne en énergie électrique utilisable par l'homme.**

- **Constituée de 5 éléments principaux :**

- une fondation
- le mât
- la nacelle
- l'hélice
- la cabine de dispersion

- **2 principales formes possibles:**
→ bipale ou tripale

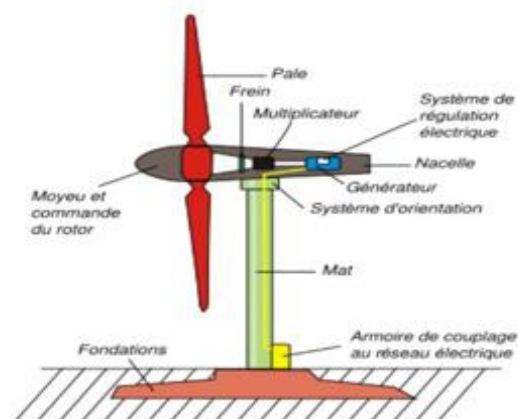


Figure II.3 : Schéma de Principe de fonctionnement d'une éolienne[6].

II.2.1.2 Avantages et inconvénients d'énergie éolienne

II.2.1.2.a Avantages

- Aucun rejet de gaz.
- Une éolienne peut fonctionner plusieurs dizaines d'années.
- Nécessite un entretien faible.
- Une grande éolienne peut produire 3 MW/h.
- Le coût de production de l'électricité éolienne est plutôt abordable : de 80 à 150 euros le MW/h.

II.2.1.2.b Inconvénients

- L'éolien est une énergie intermittente (25 % du temps).
- Cette énergie est seulement rentable dans des régions assez ventées. En France par exemple l'éolien est le plus rentable sur la face océanique et le pourtour méditerranéen, De plus de grandes surfaces sont nécessaires (séparation suffisante entre éoliennes).
- Les éoliennes, sur la terre ferme, présentent de nombreux désagréments : le bruit des pâles pour les voisins, la mort d'oiseaux et de chauves-souris par les grandes pâles, et une défiguration possible de certains paysages.

II.2.2 Energie solaire [7]

Ce type d'énergie renouvelable est issu directement de la captation du rayonnement solaire. On utilise des capteurs spécifiques afin d'absorber l'énergie des rayons du soleil et de la rediffuser selon deux principaux modes de fonctionnement :

- Solaire thermique (chauffe-eau solaire, chauffage, panneaux solaires thermiques)
- Solaire photovoltaïque (panneaux solaires photovoltaïques)



Figure II.4 : Centrale de l'énergie solaire.

II.2.2.1 Potentiel

L'énergie solaire est très abondante, mais elle représente aujourd'hui une infime proportion de l'électricité mondiale : seulement 0,03 % en 2011. Le prix du Mega watt heure solaire a fortement diminué : depuis 1976 chaque fois que la capacité solaire double, le coût des panneaux chute de 20% ce qui est assez prometteur.

Actuellement, les panneaux solaires en silicium convertissent 10 à 20 % de l'énergie solaire en électricité, les recherches en nouvelles technologies permettront un jour peut être un rendement de 40 %, c'est-à-dire de produire deux fois plus avec la même surface, mais il faut encore attendre pour le développement de telles technologies.

Le principal écueil de l'énergie solaire est son intermittence. Actuellement, seules certaines centrales thermiques arrivent à garder la chaleur du soleil pendant la nuit grâce à des sels fondus. On peut imaginer dans le futur, des centrales solaires fonctionnant en couplage avec des centrales d'énergies fossiles, ou capables de stocker l'énergie par exemple grâce à l'électrolyse de l'eau permettant la production d'hydrogène « vert ».[7]

II.2.2.2 Les types de l'énergie solaire [8]

II.2.2.2.a Solaire thermique (chauffe-eau solaire, chauffage, panneaux solaires thermiques)

Capte la chaleur du soleil pour chauffer une substance fluide pour le chauffage domestique ou la production d'électricité si la température de chauffage est suffisamment élevée. L'énergie solaire thermique qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.



Figure II.5 : Capteur solaire à l'eau chaude.

II.2.2.2.a.1 Le principe fonctionnement

Le principe consiste à capter le rayonnement solaire et à le stocker dans le cas des systèmes passifs (véranda, serre, façade vitrée) ou, s'il s'agit de système actif, à redistribuer cette énergie par le biais d'un fluide caloporteur.

L'énergie solaire chauffe directement un fluide caloporteur permettant de chauffer un bâtiment, de l'eau sanitaire. Il est même possible, si l'énergie est suffisante, de produire de la vapeur pour faire tourner une turbine qui produira de l'électricité.

II.2.2.2.b Solaire photovoltaïque (panneaux solaires photovoltaïques) [8, 9]

La photovoltaïque c'est la conversion directe de lumière solaire en électricité. Le mot "photo" vient du grec qui veut dire lumière et "voltaïque" vient du nom d'un physicien Italien Alessandro Volta qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité et d'après son nom on a aussi nommé l'unité de tension électrique le "volt".

L'énergie photovoltaïque transforme le rayonnement lumineux du soleil en électricité grâce à des panneaux formés de cellules de semi-conducteurs.



Figure II.6 : Toit recouvert de panneaux photovoltaïques.

II.2.2.3 Les pays les plus en avance dans l'énergie solaire [3]

- En tête de ce classement, c'est la Chine qui se démarque, avec 43,5 Gigawatts.
- Ensuite l'Allemagne avec 39,7 Gigawatts.

- Et en troisième position vient le Japon, avec 34,4 Gigawatts.

II.2.2.4 Avantages et inconvénients d'énergie solaire

II.2.2.4.a Avantages

- Aucun rejet de gaz.
- Les panneaux peuvent produire de l'énergie pendant plus de vingt ans.
- Demande un entretien faible.
- Un potentiel énorme : En 45 minutes, la Terre reçoit une quantité d'énergie solaire équivalente à la consommation mondiale de l'Humanité en un an.

II.2.2.4.b Inconvénients

- faut une surface géante de panneaux pour produire des quantités conséquentes d'énergie.
- Cette énergie n'est pas utilisable dans toutes les régions du monde : certaines ont un ensoleillement très favorable (comme le Mexique, le Sahara, l'Arabie Saoudite...) d'autres beaucoup moins (Islande, Norvège, ..).
- Le prix de l'électricité solaire bien qu'il ait diminué ces 50 dernières années reste élevé.
- Le solaire est une énergie intermittente : pas de production la nuit et très peu de production les jours nuageux (10 fois moins environ), dépend aussi des heures d'ensoleillement dans la journée et donc des saisons.
- Le prix de l'électricité solaire est le plus élevé des énergies renouvelables, de 240 à 400 euros MW/h.
- La fabrication de panneaux photovoltaïques requiert une grande quantité d'énergie, les panneaux mettent de 2 à 5 ans pour compenser cette énergie.

II.2.3 Avantages et inconvénients des énergies renouvelables

II.2.3.1 Avantages

- Plus les sources sont variées, plus l'indépendance énergétique est assurée.
- Facilité d'installer, d'utiliser et de combiner plusieurs sources en même temps.

- Pas d'émission de CO₂.
- Pour la plus part des méthodes.
- Coût au kWh fixe, faible et stable.
- L'investissement et le rendement sont prévisibles à long terme.
- Les EnR sont « gratuites ».
- Les EnR sont plus écologiques.
- Les EnR sont notamment un vecteur privilégié de la lutte contre le réchauffement climatique.
- De manière générale, les énergies renouvelables sont plus propres que les énergies fossiles et fissiles actuellement exploitées dans le monde entier.

II.2.3.2 Inconvénients

- Investissement important.
- L'installation doit s'intégrer dans l'environnement.
- Variabilité de la production de l'éolien qui dépend d'un vent aléatoire.
- Projets de longue durée.
- Le stockage de l'électricité.

Les énergies renouvelables ont également leurs petits défauts. On notera en priorité un coût relativement important à l'achat des installations dont la rentabilité peut se faire attendre des années. De plus, la plupart de ces énergies vertes sont sujettes aux caprices de Dame nature. En effet, des journées sans vent ou sans grande luminosité peuvent contrarier fortement la production de l'éolien et du solaire.

II.3 Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre que l'énergie renouvelable est de plus en plus très répondeuse dans la production mondiale de l'électricité. Ainsi, nous avons vu aussi tous les détails de l'énergie éolienne et l'énergie solaire et les avantages et inconvénients des ERs.

Dans le chapitre qui suit, nous allons présenter définitions et les mécanismes de base du principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Ainsi, nous avons présenté une étude théorique pour les cellules PVs et les panneaux PVs.

CHAPITRE III

Généralité sur les cellules photovoltaïques

III.1 Introduction

La limitation des réserves en ressources fossiles ainsi que leur impact négatif sur l'environnement d'une part, et la croissance de la demande en énergie d'autre part, font naître un nouveau principe de production d'électricité utilisant des énergies renouvelables tel que l'énergie photovoltaïque. C'est que l'énergie photovoltaïque devient de plus en plus une solution parmi les options énergétiques prometteuses avec des avantages comme l'abondance et l'absence de toute pollution et disponibilité en plus ou moins grandes quantités en tout point du globe terrestre, parce que c'est une énergie propre et inépuisable. Actuellement, on assiste à un regain d'intérêt pour les installations utilisant l'énergie solaire, surtout pour les applications dans des endroits isolés.

Dans ce chapitre, nous allons présenter un rappel sur l'astre solaire et le rayonnement solaire. Puis, nous détaillerons l'effet photovoltaïque et le principe de fonctionnement d'une cellule PV, les différentes générations des cellules PVs, les caractéristiques électriques d'une cellule PV, branchement des cellules PVs en Série et en Parallèle, module et panneau photovoltaïques et l'influence des différents paramètres, les différents types de systèmes photovoltaïque. Enfin, nous présenterons l'ensemble des éléments de système PV connecté au réseau, et les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

III.2 L'astre Solaire

Le soleil est de constitution gazeuse, de forme sphérique de 14×10^5 km de diamètre, sa masse est de l'ordre de 2×10^{30} kg. Il est constitué principalement de 80% d'hydrogène, de 19% d'hélium, le 1% restant est un mélange de plus de 100 éléments [1, 2]. Sa température intérieure, supérieure à 10 millions de degrés, permet aux réactions nucléaires de fusion de transformer à chaque seconde environ 6 millions de tonnes de sa masse en énergie rayonnée dans l'espace. En première approximation, le soleil rayonne globalement comme un corps noir de température $T = 5800$ K [3]. Il est situé à une distance de la terre égale à environ 150 millions de km. Sa luminosité totale, c'est-à-dire la puissance qu'il émet sous forme d'ondes électromagnétiques ; 30% de cette puissance est réfléchi vers l'espace, 47% est absorbée et 23% est utilisée comme source d'énergie pour le cycle d'évaporation-précipitation de l'atmosphère [4] (voir figure III.1).



Figure III.1 : L'astre soleil.

Hors atmosphère, l'énergie moyenne annuelle reçue par la Terre est d'environ 5,5 KWh/m² et par jour. En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit une atténuation et une modification de son spectre[1], à la suite de phénomènes complexes d'absorption par les gaz, de diffusion par les molécules, et d'absorption et de diffusion par les poussières et les aérosols [3]. Ainsi la couche d'ozone absorbe la majeure partie du rayonnement ultraviolet, tandis que la vapeur d'eau absorbe le rayonnement infrarouge.[4]

Les caractéristiques principales du soleil sont présentées dans le tableau ci-dessous [5]

Diamètre (km)	14×10^5
Masse (kg)	2×10^{30}
Surface (km ²)	6.09×10^{12}
Volume (km ³)	1.41×10^{18}
Masse volumique moyenne (kg/m ³)	1408
Vitesse (km/s)	217
Distance du centre de la voie lactée (km)	2.5×10^{17}

Tableau III.1 : Caractéristiques principales du soleil [5]

III.2.2 Rayonnement solaire

Le soleil, notre plus grande source d'énergie. Elle émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 μm [figure (I.2)]. Ce rayonnement est composé de grains de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde λ par la relation suivante [1-5]

$$E_{ph} = h \times \frac{c}{\lambda} \quad (\text{III.1})$$

h : La constante de Planck.

c : La vitesse de la lumière.

λ : La longueur d'onde.

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne Terre-soleil de 150 Millions de km), c'est ce que l'on appelle la constante solaire égale à $1367\text{W}/\text{m}^2$. [2, 3, 5]. La part d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée nombre de masse d'air AM. Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à $1000\text{W}/\text{m}^2$ [3, 6]. Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de $1000\text{W}/\text{m}^2$ et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1). [2]

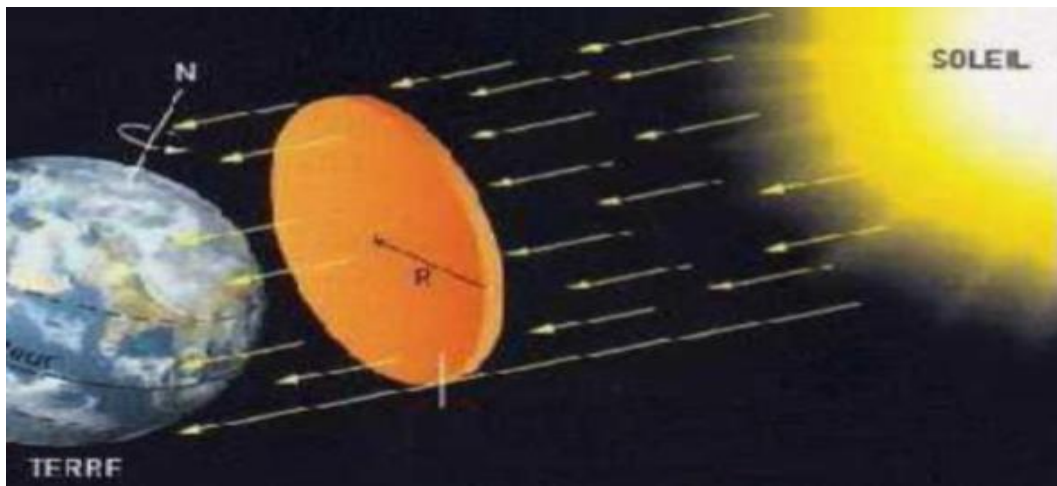


Figure III.2 : Le rayonnement solaire.

Le rayonnement ou spectre solaire est comparable à celui d'un corps noir à une température de 5800 K, il est compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 μm et se décompose approximativement sur 3 bandes [6]:

- 9% dans la bande des Ultraviolets ($< 0,4 \mu\text{m}$).
- 47% dans la bande visible (0,4 à 0,8 μm).
- 44% dans la bande des infrarouges ($> 0,8 \mu\text{m}$).

III.2.2.1 Différents types de rayonnements

L'énergie solaire reçue sur terre en dehors de l'atmosphère est estimée à 1370 W/m^2 cependant elle s'atténue et perd son intensité en traversant l'atmosphère ne dépassant pas les 1000 W/m^2 à la surface de la terre en raison de l'absorption dans ce dernier, ce chiffre variera par la suite en fonction de la localisation géographique du site (latitude), la saison, l'heure, les conditions météorologiques (nébulosité, poussière, humidité...)[3, 4, 6], et l'altitude du lieu[7]. Etant absorbé et diffusé en traversant l'atmosphère seul une fraction modifiée du rayonnement solaire parvient à la surface de la terre se composant de 3 différents types de rayonnements (voire la Figure III.3) :

- **Le rayonnement direct** : est reçu directement du Soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs.
- **Le rayonnement solaire réfléchi (albédo)** : ou l'albédo du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).
- **Le rayonnement diffus** : Radiation solaire arrivant sur la surface de la terre après déviation de la lumière par les nuages et les molécules diverses, elle est donc nulle que la nuit.
- **Le rayonnement global** : est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. [3, 4, 6]

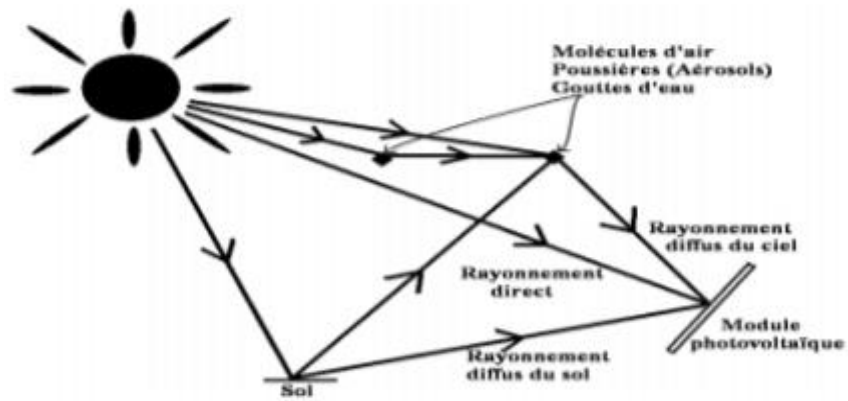


Figure III.3 : Composantes du rayonnement solaire au sol.

III.3 C'est quoi L'effet photovoltaïque ? [1-8]

L'effet photovoltaïque est l'effet photoélectrique, caractérisé par la production d'un courant électrique entre deux parties de matériaux différents qui sont en contact et exposée à la lumière ou à un rayonnement électromagnétique générale(Figure III.4).Cet effet photovoltaïque est le principe des cellules photovoltaïques et est donc essentielle pour la production de mendiante de l'électricité solaire. Lorsqu'un matériau (semi-conducteur) est exposé à la lumière du soleil[4], Les atomes exposés au rayonnement sont " bombardés " par les photons constituant la lumière. Sous l'action de ce bombardement, les électrons sont décrochés. Les électrons " décrochés " créent une tension électrique continue faible[1]. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque[8]

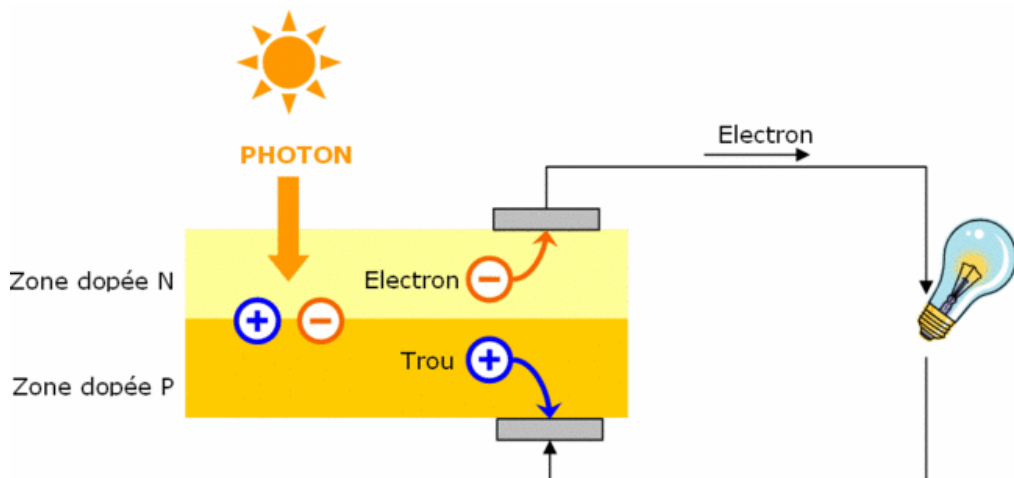


Figure III.4 : L'effet photovoltaïque [6].

III.3.1 Historique [2, 3, 6, 8]

Le terme « photovoltaïque » désigne le processus physique qui consiste à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique par le transfert de l'énergie des photons aux électrons d'un matériau. Le principe photovoltaïque a été découvert par le physicien français A. Becquerel en 1839 et expliqué par Albert Einstein en 1905 (c'est pour cette explication qu'il a reçu le prix Nobel de Physique en 1921). Le préfixe Photo vient du grec « phos » qui signifie lumière. « Volt » vient du patronyme d'Alessandro Volta (1745-1827), physicien qui a contribué aux recherches sur l'électricité Photovoltaïque (PV) signifie donc littéralement électricité lumineuse. [9]

Dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

- **En 1839** : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque[6].
- **En 1875** : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.
- **En 1905** : Einstein découvre que l'énergie de ces quanta de lumière est proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique. L'utilisation des cellules solaires débute dans les années quarante.
- **En 1954** : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement [1-9]
- **En 1958** : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point.
- **En 1973** : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.
- **En 1983** : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.
- **En 1954** : La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux États-Unis par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés".
- **En 1995** : Des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001.

III.3.2 Le principe de l'effet photovoltaïque [2, 3, 6, 8, 9]

- Les "grains de lumière" - les photons - heurtent la surface du matériau photovoltaïque disposé en cellules ou en couche mince,
- Ils transfèrent leur énergie aux électrons présents dans la matière, qui se mettent alors en mouvement dans une direction particulière,
- Le courant électrique continu qui se crée est alors recueilli par des fils métalliques très fins connectés les uns aux autres et acheminé à la cellule suivante.

III.4 C'est quoi une cellule photovoltaïque ? [1, 6]

La cellule photovoltaïque est l'élément qui permet de convertir l'énergie solaire en énergie électrique (Figure III.5). Un panneau solaire photovoltaïque peut être constitué de certaines cellules photovoltaïques, Une cellule photovoltaïque (ou photopile) est un dispositif qui transforme l'énergie lumineuse en courant électrique. La cellule photovoltaïque est le composant électronique semi-conducteur qui compose un panneau solaire photovoltaïque et qui exposé à la lumière, produit de l'électricité[9].

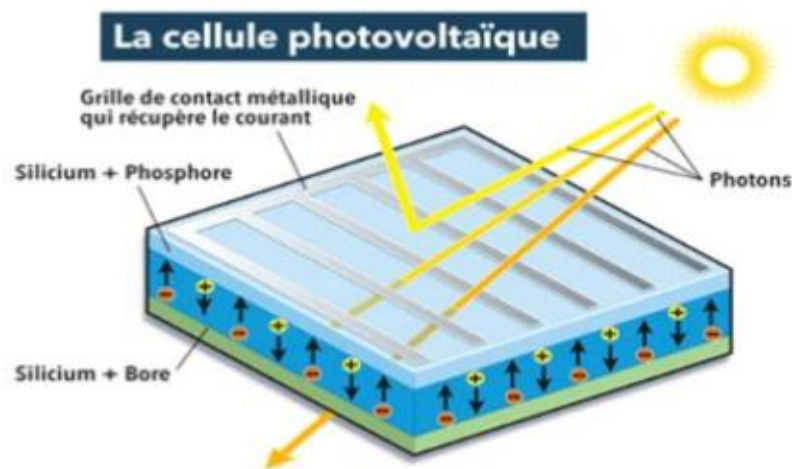


Figure III.5 : Représentation de la cellule photovoltaïque [6].

III.4.1 Caractéristique de la cellule photovoltaïque [2, 4, 9]

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photosensible, elle est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposé à la lumière. La tension générée peut varier entre

0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que la température et du vieillissement de la cellule. Composée de matériaux semi-conducteurs les cellules photovoltaïques sont constituées de (Figure III.6) :

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne[1].
- D'une couche anti-reflet permettant une pénétration maximale des rayonnements solaires.
- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode[1].
- Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement[6].

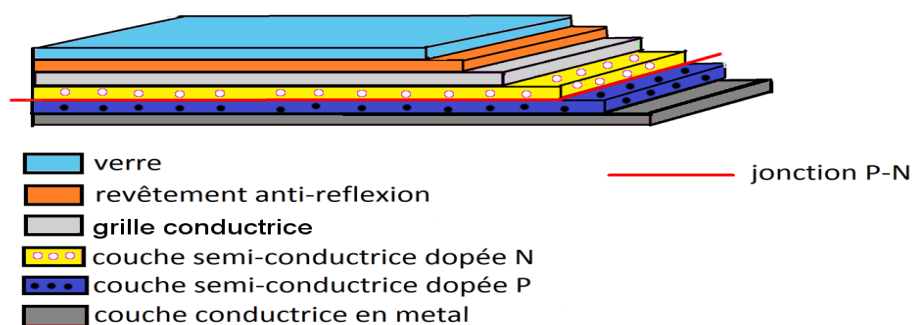


Figure III.6 : Structure basique d'une cellule photovoltaïque.

Une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteur qui sont dopées différemment (Figure III.7). Pour la couche n, c'est un apport d'électrons périphériques et pour la couche p c'est un déficit d'électrons, les deux couches présentes ainsi une différence de potentiel. L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche n) leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu. Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches du semi-conducteur. L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des

rayons lumineux. Une couche anti reflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée[10].

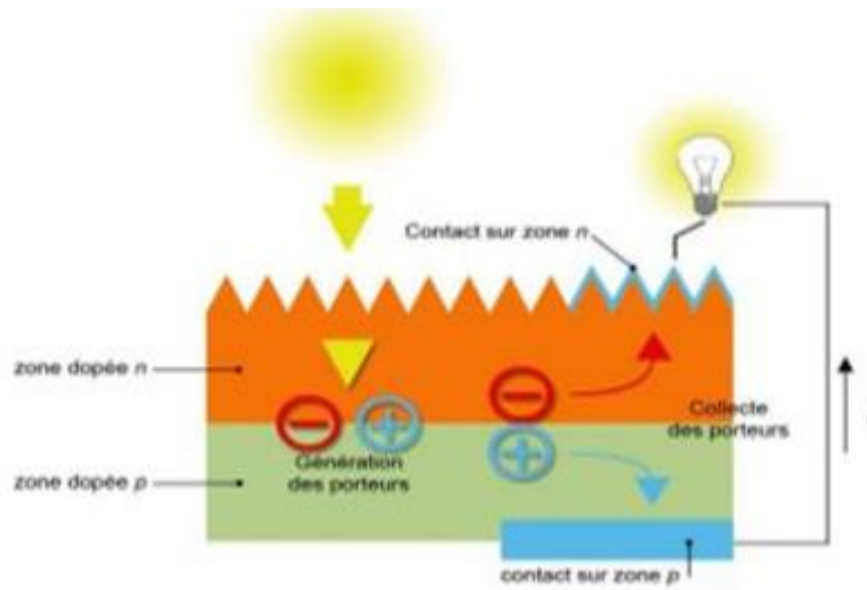


Figure III.7 : Constitution d'une cellule photovoltaïque[3, 8].

III.4.2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [11, 12]

La cellule solaire est une photodiode à jonction pn de grande surface qui génère un signal électrique sans l'aide d'une source d'énergie auxiliaire. Lorsque les photons issus du soleil frappent la cellule, certains sont réfléchis et d'autres sont transmis ou absorbés dans la cellule solaire, seuls les photons absorbés participent à l'effet photoélectrique. La conversion photovoltaïque met en jeu trois phénomènes physiques, intimement liés et simultanés :

- ✓ L'absorption de la lumière dans le matériau,
- ✓ Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques,
- ✓ La collecte des charges.

Il est donc clair que les matériaux constituant une cellule solaire doivent avoir des propriétés optiques et électriques spécifiques pour permettre la conversion photovoltaïque. Les photons incidents génèrent des paires électron-trou dans les régions de type n et p et dans la zone de charge d'espace (plus détaillée présente dans le chapitre II). Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction pn de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges n) et des trous (charges p). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette

différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule (Figure III.8). A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs. La tension maximale de la cellule pour un courant nul est nommée tension de circuit ouvert (V_{oc}). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit (I_{cc}) et dépend fortement du niveau d'éclairement. Une cellule PV a une caractéristique $I=f(V)$ non linéaire[12]

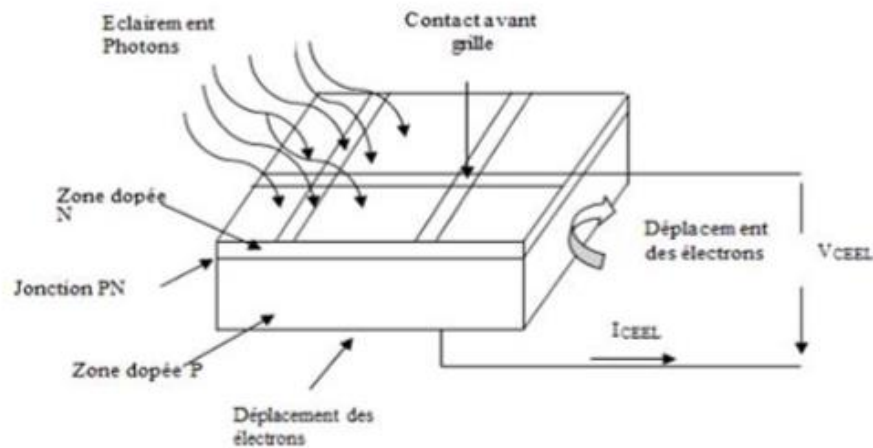


Figure III.8 : Principe de fonctionnement d'une cellule à silicium [4, 6, 11, 12]

Comparable à une diode utilisée classiquement en électronique, une cellule PV peut être réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée p (dopée au bore) et l'autre dopée n (Dopée au phosphore) [4, 6, 11, 12]. Entre les deux zones se développent une jonction pn avec une barrière de potentiel. La zone n est couverte par une grille métallique qui sert de cathode (contact avant) et surtout de collecteurs d'électrons, tandis qu'une plaque métallique (contact arrière) recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode.

Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux électrons par collision. Si l'énergie transmise est supérieure à celle associée à la bande interdite (E_g) du semi-conducteur, des paires électrons-trous sont alors créés dans cette zone de déplétion par arrachement des électrons. Sous l'effet d'un champ électrique E qui règne dans cette zone, ces porteurs libres sont drainés vers les contacts métalliques des régions p et n. Il en résulte alors un courant électrique dans la cellule PV et une différence de potentiel (de 0.6 à 0.8 Volt) supportée entre les électrodes métalliques de la cellule, communément nommée tension de circuit ouvert (V_{oc}) fortement dépendante de la température. Le courant maximal PV se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées. On parle alors de courant de court-

circuit (I_{CC}) dépendant fortement du niveau d'éclairement (E).[1-12] La **figure III.9** illustre la caractéristique non linéaire $I(V)$ d'une cellule PV à base de silicium pour un éclairement et une température donnée, avec la présence d'un point de puissance maximal (PP_{max}) caractérisé par sa tension et son courant optimaux (V_{opt} et I_{opt}). [13]

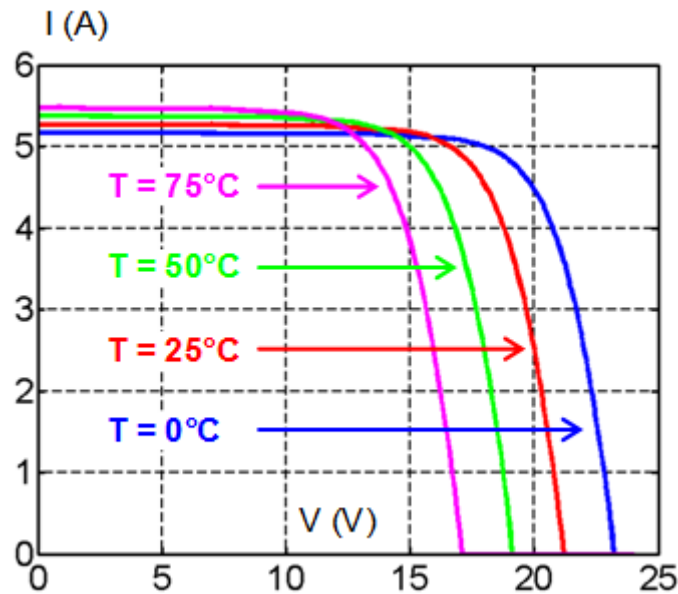


Figure III.9 : Caractéristique $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque pour un éclairement et une température donnés.

En résumé, technologiquement, un capteur PV est proche d'une diode pn de par sa constitution, les matériaux utilisés, et les phénomènes physiques identiques mis en œuvre. Le comportement d'une cellule PV peut donc se modéliser comme celui d'une mauvaise jonction pn autant en statique qu'en dynamique lorsque cette dernière n'est pas éclairée. Pour tenir compte du courant engendré par l'éclairement de la cellule et des différentes résistances modélisant les pertes dues à la connectique, trois termes sont ajoutés I_{cc} , R_s et R_p . Ainsi, en statique, le comportement d'une cellule PV constituée d'une jonction pn à base de silicium peut être décrit par l'équation suivante [F. Lasnier, T. G. Ang, "Photovoltaic Engineering Handbook", IOP Publishing Ltd.1980, ISBN 0-85274-311-4.]

$$I_{ph} = I_{CELL} + I_d + I_p \quad \text{(III.2.a)}$$

$$I_{ph} = I_{CELL} + I_{sat} \left(e^{\frac{V_{CELL} + (I_{CELL} R_s)}{nVT}} - 1 \right) + \frac{R_s I_{CC}}{R_p} \quad \text{(III.2.b)}$$

$$I_{ph} = I_{CELL} + I_{sat} \left(e^{\frac{q[V_{CELL} + (I_{CELL} R_s)]}{nKT}} - 1 \right) + \frac{R_s I_{CC}}{R_p} \quad \text{(III.2.c)}$$

I_{ph} (A) : Photo courant produit.

I_{sat} (A) : Correspondant au courant de saturation.

V_T (V) : La potentielle thermodynamique $\rightarrow V_T = \frac{kT}{e}$.

K (J.K⁻¹) : La constante de Boltzmann, (1,381 10⁻²³ J/K).

T (K) : La température effective de la cellule, en Kelvin.

q (C) : La charge de l'électron, (1,6.10⁻¹⁹ C).

n : Un facteur de non idéalité de la jonction.

I_{CELL} (A) : Le courant fourni par la cellule.

V_{CELL} (V) : La tension aux bornes de la cellule.

I_{CC} (A) : Le courant de court-circuit de la cellule dépendant de l'ensoleillement et de la température.

R_p (Ω) : La résistance de shunt caractérisant les courants de fuites de la jonction.

R_s (Ω) : La résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions.

III.4.3 Les différentes générations des cellules photovoltaïques

Il existe un grand nombre de technologies mettant en œuvre l'effet photovoltaïque (Figure III.10). Beaucoup sont encore en phase de recherche et développement[14]. Les principales technologies industrialisées en quantité à ce jour sont : le silicium mono ou polycristallin (plus de 80% de la production mondiale) et le silicium en couche mince à base de silicium amorphe ou CIS (Cuivre Indium Sélénium)[14].

Il existe plusieurs technologies de cellules qui ont toutes des propriétés différentes. On parle par 3 technologies est : silicium cristallin, de silicium amorphe, et de CdTe.

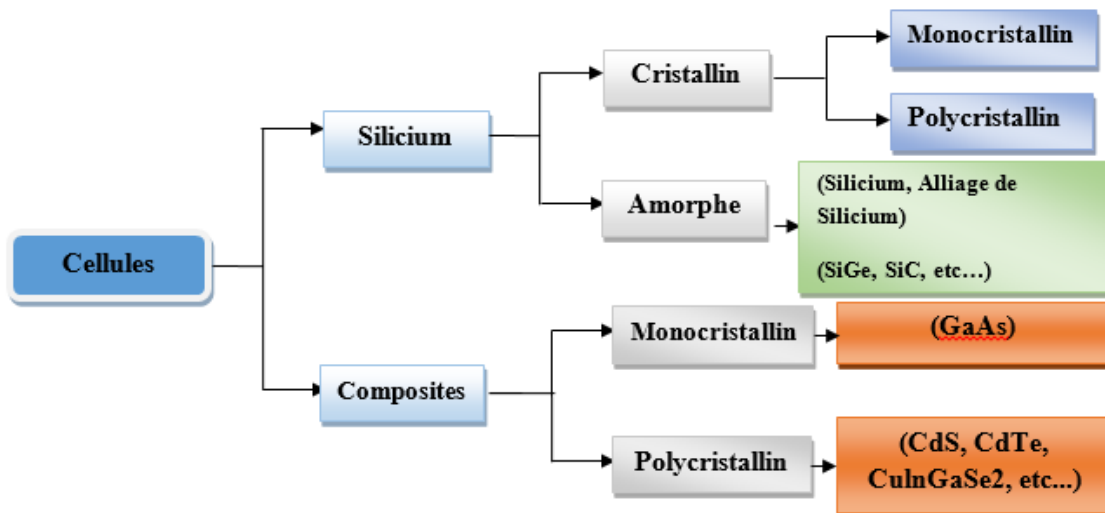


Figure III.10 : Les différentes technologies des cellules photovoltaïques.

III.4.3.1 Technologies de la première génération à base de silicium cristallin

Considérée comme la technologie photovoltaïque la plus efficace et la plus dominante la première génération comprend le monocristallin et le poly cristallin. Le silicium monocristallin reste encore plus cher que le silicium poly cristallin mais permet d'obtenir un rendement plus élevé, avec près de 19.8% contre 24.7% de rendement en laboratoire[15]

III.4.3.1.a Cellule monocristalline [16]

La cellule monocristalline est celle qui s'approche le plus du modèle théorique. 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. Cependant pour arriver à ce résultat la fabrication est complexe et coûteuse en énergie, les rendements de conversion obtenue varient entre 14 et 16%.

III.4.3.1.b Cellule polycristalline [17]

Contrairement à la cellule monocristalline, la cellule polycristalline n'a pas besoin d'un silicium aussi pur et ordonné. Pour fabriquer ce matériau, on refond tous les déchets

provenant du tirage des monocristaux. Les rendements de conversion industrielle qui étaient de l'ordre de 8 à 10% avant 1980 sont actuellement de 16 à 17% [17]. Il s'agit de la technologie la plus représentée sur le marché du photovoltaïque car elle allie à la fois des rendements de conversion élevés avec un coût de production faible par rapport à la filière silicium monocristallin.

III.4.3.1.c Propriétés des cellules cristallines [18]

- Influence de l'éclairement : la tension baisse de manière importante lorsque l'éclairement descend en dessous de 30-50 W m⁻². Cela est pénalisant pour l'emploi du cristallin dans les pays à climat tempéré ou encore sous lumière artificielle.
- Influence de la température : une cellule cristalline a une perte de l'ordre de 0.4%/°C, en puissance, pour une température supérieure à 25°C, principalement due à une chute de la tension.
- Propriétés physiques :
 - ✓ Masse atomique : 28
 - ✓ Température de fusion : 1496°C
 - ✓ Structure tétraédrique cubique faces centrées
 - ✓ Hybridation : sp³
 - ✓ Gap optique à l'état cristallin : 1.12 eV

III.4.3.1.d Les inconvénients du silicium cristallin

Les inconvénients principaux de cette technologie sont :

- Un coût de fabrication élevé ;
- Une performance qui diminue fortement lorsque la température de module augmente
- Une performance qui diminue fortement à faible éclairement ;
- Presque aucune flexibilité d'utilisation (surface rigide...) ;
- Un gap indirect à 1.12 eV : pour absorber 90% de l'énergie reçue, il faudrait une épaisseur de 100 µm, ce qui est conséquent notamment par rapport aux couches minces que nous verrons par la suite.

III.4.3.2 Technologie de la deuxième génération à base de couche-mince

Les premiers essais de couches minces remontent au milieu du XXème siècle avec de fins dépôts sur cristaux massifs puis finalement des structures complètement à base de couches minces [14]. Ces technologies reposent sur des matériaux possédant un fort coefficient d'absorption du spectre solaire, et promettent un avenir prometteur vu leurs croissance importante ces dernières années.

III.4.3.2.a Les cellules amorphes

Les cellules amorphes sont à base d'un matériau composé de silicium hydrogéné (état non cristallin) déposé sur un substrat de verre, elles se caractérisent par un fort coefficient d'absorption, et sont souvent utilisées dans de petits produits de consommation tel que des calculatrices solaires ou encore des montres. L'avantage de ces derniers est le fonctionnement avec un éclairage faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment). Leurs rendement est assez faible de 5% à 8% voir jusqu'à 13% en laboratoire, mais ne nécessite que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevés.

III.4.3.2.b Le tellurure de Cadmium (CdTe) [19]

Il s'agit d'une technologie extrêmement prometteuse, permettant d'obtenir des rendements tout à fait convenables (16,5% en laboratoire). De part une bande interdite de 1,45eV parfaitement adaptée au spectre solaire[19] et un très fort coefficient d'absorption, seule une couche de 2 µm est nécessaire pour obtenir un matériau très opaque et absorbant une grande partie du spectre solaire. Cependant, les matériaux nécessaires à la fabrication de ce type de cellule ne sont pas disponibles en grandes quantités.

III.4.3.3 Technologie de la troisième génération « Les cellules organiques »

Apparues dans les années 1990, les cellules organiques font aujourd'hui l'objet d'un sujet d'étude très actif en laboratoire, ce sont des cellules photovoltaïques dont, au moins, la couche active est constituée de molécules organiques. Il en existe principalement deux types : les cellules photovoltaïques organiques moléculaires et les cellules photovoltaïques organiques en

polymères. Les progrès de ces technologies sont très rapides, des records de rendement sont très fréquemment annoncés (actuellement près de 6%). Le principal frein à ces technologies est actuellement la stabilité de leurs performances ainsi que leur durée de vie. Les nanosciences ouvrent cependant de nouvelles voies à leurs améliorations. Leur avenir industriel n'est pas encore établi mais ces technologies ouvriraient la voie à des modules à très bas coût, biodégradables et pouvant être intégrés à toutes formes de surface. Pratiquement, ces technologies ne sont utilisées commercialement aujourd'hui que dans le secteur de l'électronique de consommation (chargeur de GSM/ baladeur MP3) où la durée de vie de la cellule et du produit associé sont approximativement égales (2 ans). En améliorant la durée de vie ou en réduisant les coûts de production, d'autres applications devront voir le jour dans les années à venir.

III.4.4 Les caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

III.4.4.1 La courbe courant-tension d'une cellule photovoltaïque

La caractéristique courant-tension, illustrée dans la figure (III.11), décrit le comportement de la cellule photovoltaïque sous l'influence des conditions météorologiques (niveau d'éclairement et température ambiants). La courbe de la cellule solaire $I=f(V)$ passe par trois points importants qui sont :

- Le courant de court-circuit I_{CC} en point M.
- La tension de circuit-ouvert V_{OC} en point S.
- La puissance maximale en point A.

La figure (III.11) montre bien qu'une cellule photovoltaïque ne peut être assimilée à aucun générateur classique (elle n'est ni un générateur de courant ni un générateur de tension).

En effet, sa caractéristique se divise en trois parties :

- la zone MN où la cellule se comporte comme un générateur de courant I_{cc} proportionnel à l'éclairement.
- la zone PS où la cellule se comporte comme un générateur de tension V_{co} .
- la zone NP où l'impédance interne du générateur varie rapidement.

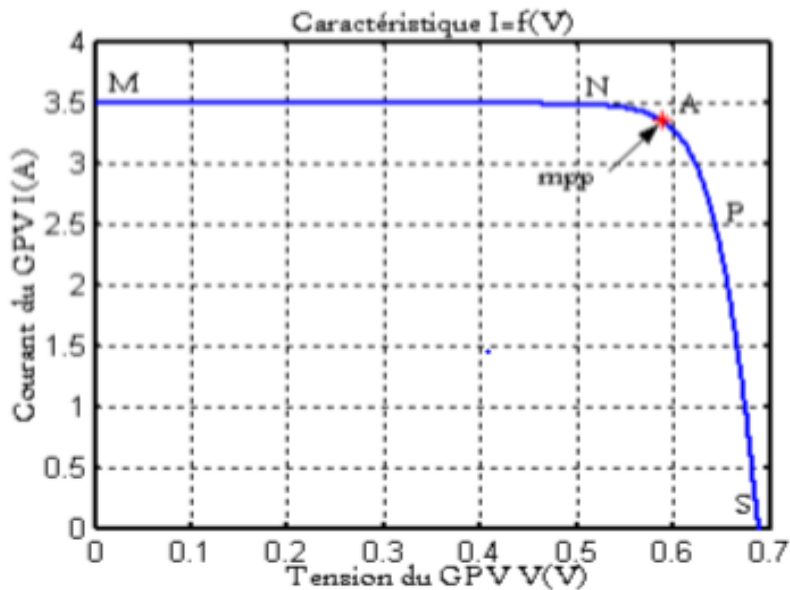


Figure III.11 : Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.

III.4.4.1.a Courant de court-circuit I_{CC}

Le courant de court-circuit I_{CC} de la cellule photovoltaïque est exprimé par l'expression suivante, lorsque la tension est nulle ($V = 0$) [6, 8, 11, 12, 14]

$$I_{CC} = I_{ph} - I_{sat} \left(e^{\frac{q(R_s I_{CC})}{nK_B T}} - 1 \right) - \frac{R_s I_{CC}}{R_p} \quad (\text{III.3})$$

Il est directement proportionnel à l'énergie rayonnante reçue, c'est-à-dire à l'éclairement S (W/m^2), à la température ambiante. A un niveau d'éclairement (égale à $1 \text{ KW}/\text{m}^2$), l'effet de la résistance série est négligeable (point M de la figure (III.11)). Dans ce cas, le courant de court-circuit peut être considéré comme étant équivalent au photo-courant I_{ph} .

On obtient sa valeur en branchant un ampèremètre aux bornes de la cellule.

III.4.4.1.b Tension de circuit ouvert V_{OC}

La tension de circuit ouvert V_{OC} (point S de la figure (III.11)), est déterminée pour un courant de sortie nul ($I = 0$), elle peut être exprimée analytiquement suivant la formule :

$$V_{OC} = \frac{nK_B T}{q} \ln \left(\frac{I_{ph} + I_{sat}}{I_{sat}} \right) \quad (\text{III.4})$$

On l'obtient en branchant directement un voltmètre aux bornes de la cellule. Dans les cellules PV au silicium, la tension V_{OC} est de l'ordre de 0,4 à 0,7 V et le courant I_{CC} est de l'ordre de 12 mA/cm².

III.4.4.2 La puissance caractéristique d'une cellule photovoltaïque

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairage, température), la puissance électrique $P(W)$ disponible aux bornes d'une cellule PV :

$$P = U \cdot I \quad (\text{III.5})$$

P (W) : Puissance mesurée aux bornes de la cellule PV.

U (V) : Tension mesurée aux bornes de la cellule PV.

I (A) : Intensité mesurée aux bornes de la cellule PV.

III.4.4.2.a La puissance maximale

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale idéale P_{max} , correspondrait donc à la tension de circuit ouvert V_{OC} multipliée par le courant de court-circuit I_{CC} :

$$P_{max, idéal} = V_{OC} \cdot I_{CC} \quad (\text{III.6})$$

$P_{max, idéal}$ (W) : La puissance mesurée aux bornes de la cellule PV.

V_{OC} (V) : La tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV.

I_{CC} (A) : L'intensité de court-circuit mesurée aux bornes de la cellule PV.

En pratique, la courbe caractéristique d'une cellule PV est plus "arrondie" (Figure III.12), et la tension au point de puissance maximale V_{Pmax} (tension optimale) est inférieure à la tension de circuit ouvert V_{OC} , de même que le courant fourni I_{Pmax} (courant optimale) est inférieur, pour cette même tension, au courant de court-circuit I_{CC} , l'expression de la puissance à ce point est donnée par :

$$P_{max} = V_{Pmax} \cdot I_{Pmax} \quad (\text{III.7})$$

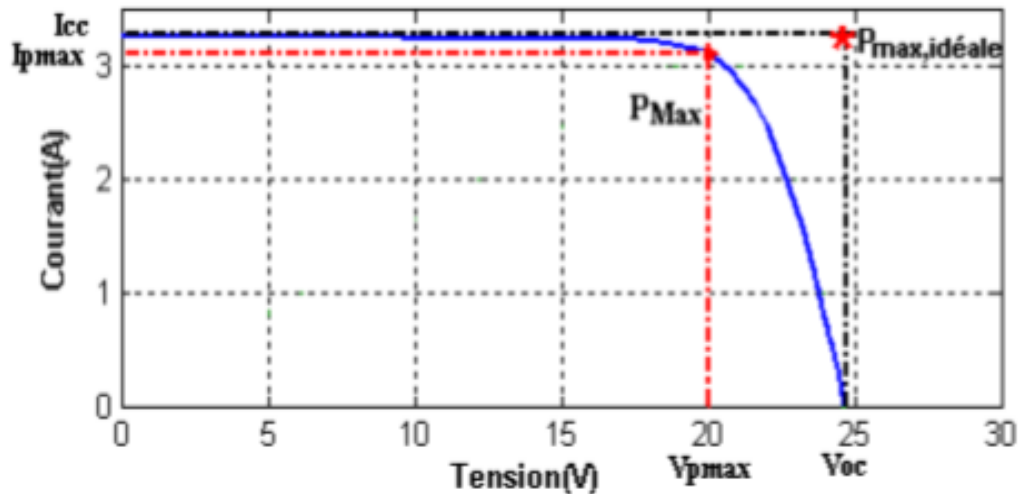


Figure III.12 : Puissance maximale idéale et celle de l'approche pratique.

III.4.4.3 Rendement

Le rendement η d'une cellule PV est une grandeur essentielle (le rendement de conversion effectué en puissance). On pourrait augmenter sa valeur par l'augmentation de la tension à circuit ouvert V_{oc} , le facteur de remplissage et le courant de court-circuit.

Nous pouvons définir le rendement d'une cellule photovoltaïque comme le quotient de la puissance maximale et de la puissance lumineuse reçue par la cellule.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{P_{max}}{S\Phi} \quad (III.8)$$

P_{in} : La puissance lumineuse reçue (puissance incidente).

Φ : Le flux reçu en W/m^2 .

S : La surface effective de la cellule en m^2 .

III.4.4.4 Facteur de forme

Le facteur de remplissage (Fill factor selon l'abréviation FF) est déterminé la qualité d'un panneau ou cellule photovoltaïque souvent extrait de caractéristique (V).

On appelle facteur de forme FF le rapport entre la puissance maximale fournie par la cellule P_{max} , dans des conditions d'éclairement, de température donnés, et le produit du courant de court-circuit I_{CC} par la tension de circuit ouvert V_{OC} .

$$FF = \frac{P_{max}}{(V_{oc} \cdot I_{cc})} \quad (III.9)$$

FF : Facteur de forme.

P_{max} (W) : Puissance maximale aux bornes de la cellule PV.

V_{oc} (V) : Tension de circuit ouvert.

I_{cc} (A) : Intensité de court-circuit.

III.4.5 Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque

III.4.5.1 Cas d'une cellule idéale

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction pn soumise à l'éclairement photovoltaïque connecté à une charge peut être schématisée par un générateur de courant I_{ph} en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la figure (III.13), qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale [11, 14, 19].

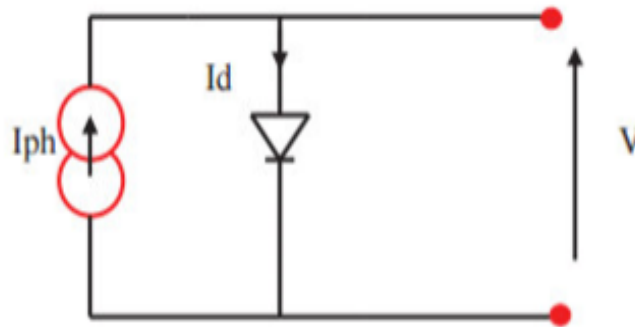


Figure III.13 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale.

Si la caractéristique de la jonction est de la forme : $I = I_{sat} \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$ (III.10)

On peut admettre qu'en présence de lumière il y a apparition d'un photo-courant supplémentaire, I_{ph} dont le sens est opposé au courant direct. En branchant un circuit extérieur sur la cellule claire, on recueille ce courant [3] :

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (III.11)$$

Et la tension V est donnée par :

$$V = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph} + I_{sat}}{I_{sat}} \right) \quad (III.12)$$

III.4.5.2 Cas d'une cellule réelle

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs parasites dues à la fabrication et représenté sur la figure (III.14). Ce schéma équivalent est constitué d'une diode (d) caractérisant la jonction, une source de courant (I_{ph}) caractérisant le photo-courant, une résistance série (R_s) représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunte (R_p) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à (R_s). [1, 17, 19] [7]

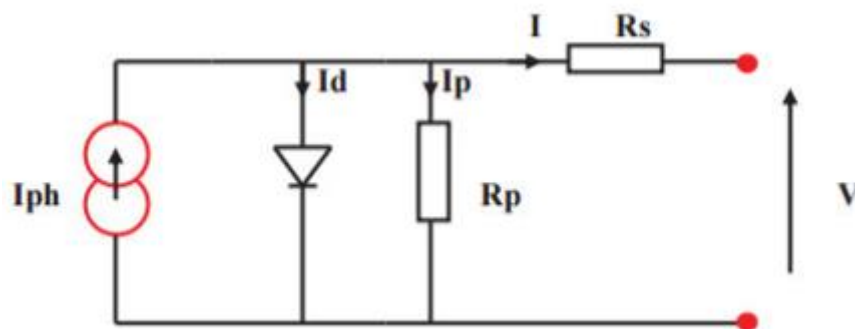


Figure III.14 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.

La figure III.14 présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle, où deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma, elles vont influencer la caractéristique $I(V)$ de la cellule (Figure III.15). La première est la résistance série R_s , cette résistance est liée de l'impédance des électrodes et de la base, il en résulte que la tension V aux bornes de la cellule est différente de la tension aux bornes de la jonction. La deuxième est la résistance shunte (R_p) qui correspond aux pertes dans la surface et pertes dues aux défauts dans le matériau, il en résulte qu'une partie du courant I_{ph} sera drainée par cette résistance et il ne pourra être délivré à la charge. L'équation de la caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque compte tenu des résistances R_s et R_p s'écrit donc [11, 12] :

$$I(V) = I_{ph} - I_d - I_p \quad (\text{III.13.a})$$

$$I(V) = I_{ph} - I_{sat} \left(e^{\frac{q(V+R_s I)}{KT}} - 1 \right) - \frac{V+R_s I}{R_p} \quad (\text{III.13.b})$$

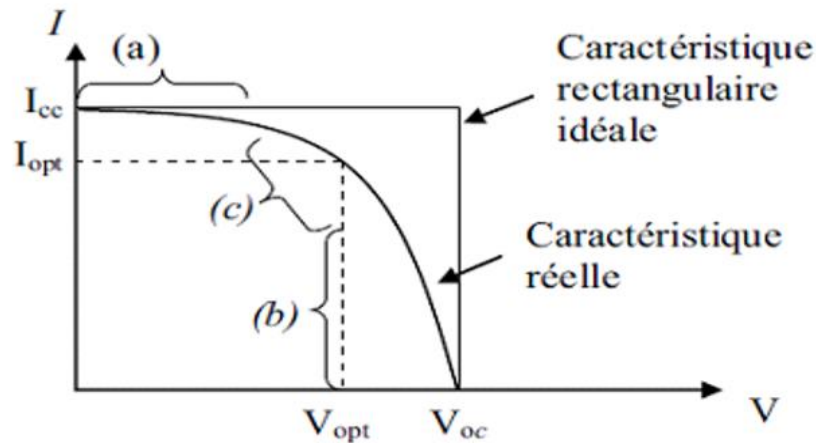


Figure III.15 : Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque réelle.

La caractéristique se divise en trois parties :

- ✓ La zone (a) où la cellule se comporte comme un générateur de courant I_{cc} proportionnel à l'éclairement.
- ✓ La zone (b) où la cellule se comporte comme un générateur de tension V_{oc} .
- ✓ La zone (c) où l'impédance interne du générateur varie rapidement.

Résistance série R_s : En pratique, la cellule photovoltaïque, contient des pertes dans le matériel qui constitue les semi-conducteurs, la grille en métal, les contacts. L'ensemble des pertes dépend de la résistance série R_s . [7]

Résistance parallèle R_p : Egalement, la résistance en déviation, représente une partie des pertes liées à une fuite de courant par un chemin résistif parallèlement au dispositif intrinsèque. Ceci peut être représenté par une résistance parallèle (R_p). Son effet est beaucoup moins remarquable dans un module photovoltaïque comparé à la résistance série, qui devient seulement apparent quand un certain nombre de module sont reliés en parallèle pour créer un générateur photovoltaïque.[5, 14]

III.4.6 Association des Cellules Photovoltaïques en Série

Une association de N_s cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque et donc accroître la puissance (Figure III.20). Les cellules sont alors traversées pour le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, l'équation (III.19) et (III.20), résume les caractéristiques électriques d'une association de N_s cellules en séries.[14, 17]

$$V_{ocN_s} = N_s \times V_{oc} \tag{III.19}$$

$$I_{CC} = I_{ccNs} \quad (III.20)$$

V_{ocNs} : La somme des tensions en circuit ouvert de (Ns) cellules en série.

I_{ccNs} : Courant de court-circuit de (Ns) cellules en série.

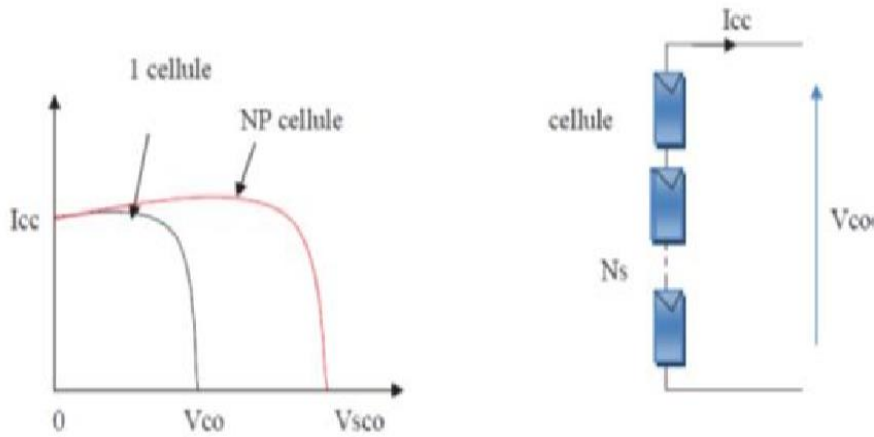


Figure III.20 : Caractéristique courant tension de Ns cellule en série [20].

III.4.7 Association des Cellules Photovoltaïques en parallèle

D'autre part une association parallèle de N_p est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé (Figure III.21). Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle les cellules ont soumis la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants [14]. Avec :

$$I_{ccNp} = N_p \times I_{CC} \quad (III.21)$$

$$V_{OC} = V_{ocNp} \quad (III.22)$$

I_{ccNP} : La somme des courants de court circuit de (N_p) cellule en parallèle.

V_{ocNP} : Tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle.

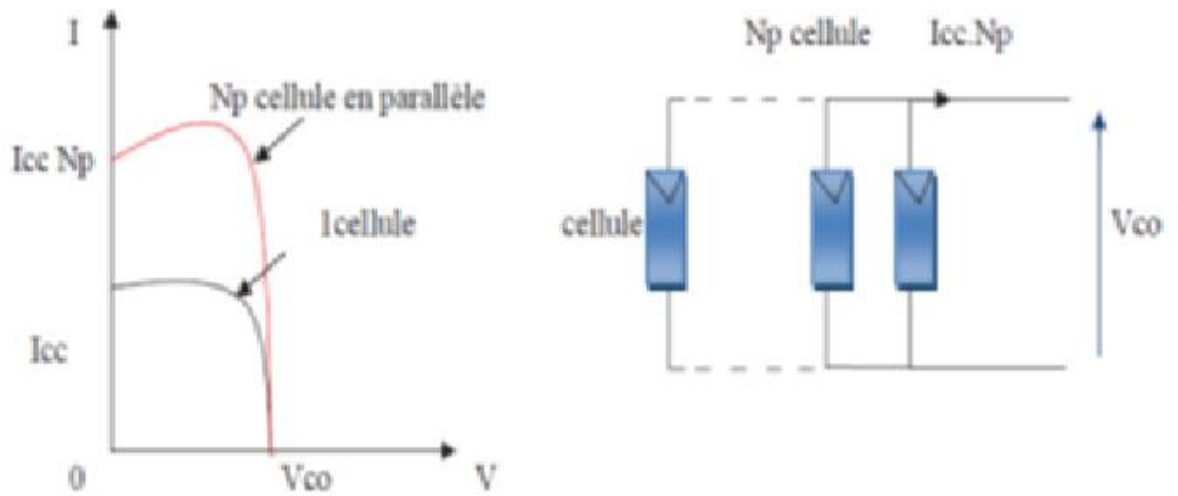


Figure III.21 : Caractéristique courant tension de (N_p) cellule en parallèle [20].

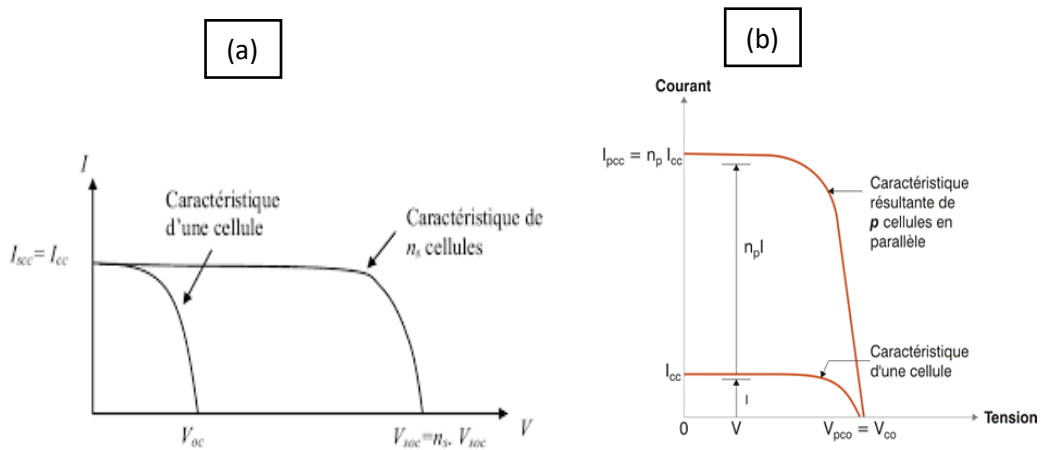


Figure III.22 : Caractéristiques de cellule photovoltaïque (a) en Série, (b) en Parallèle.

III.5 Module photovoltaïque et le panneau solaire photovoltaïque

Un module solaire photovoltaïque est un ensemble de cellules photovoltaïques reliées électriquement entre elles et contenues dans une enveloppe scellée. Un panneau constitué d'un ensemble de modules reliés dans une structure rigide. Les modules photovoltaïques ou les panneaux solaires sont des dispositifs utilisés pour capturer l'énergie de la lumière du

soleil, les panneaux solaires photovoltaïques contiennent un ensemble des cellules solaires qui convertissent la lumière en électricité. Les cellules solaires sont parfois appelées cellules photovoltaïques et le photovoltaïque signifie littéralement « électricité légère ». Les cellules solaires ont l'effet photovoltaïque pour absorber l'énergie du soleil et faire circuler le courant électrique entre deux couches chargées dans la direction opposée. [7]

III.5.1 Caractéristiques d'un module

Les modules sont généralement des parallélépipèdes rectangles rigides minces (quelques Centimètres d'épaisseur), dont les caractéristiques suivantes [3, 8, 10-12, 14]:

- ❖ **La puissance de crête, P_c** : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m²).
- ❖ **La caractéristique $I=f(V)$** : Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- ❖ **Tension à vide, V_{OC}** : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement « plein soleil ». (Figure III.16), avec l'équation (III.14) suivante :

$$V_{OC} = \left(\frac{KT}{q}\right) \ln \left[\left(\frac{I_{CC}}{I_{sat}}\right) + 1 \right] \quad \text{(III.14)}$$

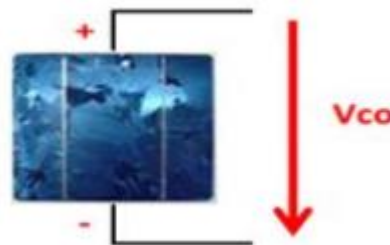


Figure III.16 : Tension aux bornes du module[8].

- ❖ **Courant de court-circuit, I_{CC}** : Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule ($V = 0$) (Figure III.17). Ce courant croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule, il dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température, avec l'équation (III.15) suivante :

$$I_{CC}(V = 0) = I_{ph} \quad \text{(III.15.a)}$$

$$I_{ph} = q \cdot G(L_n + L_p) \quad \text{(III.15.b)}$$

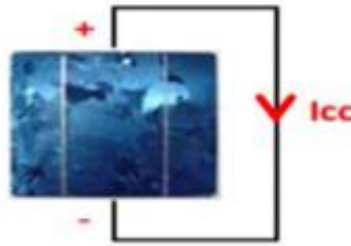


Figure III.17 : Courant débité par un module en court-circuit [2, 3, 9, 10, 14, 19].

- ❖ **Point de fonctionnement optimale, P_{max} (V_{opt}, I_{opt})** : C'est le point de puissance maximale où il est le produit du courant optimale et la tension optimale.

$$P_{max} = V_{opt} \cdot I_{opt} \quad (\text{III.16})$$

- ❖ **Facteur de forme** : Il définit l'efficacité de la cellule solaire, FF (Fill Factor) est le rapport entre la puissance optimale P_{max} et la puissance maximale idéale.

$$FF = \frac{P_{max}}{P_{max, idéale}} = \frac{V_{opt} \cdot I_{opt}}{V_{OC} \cdot I_{CC}} \quad (\text{III.17})$$

- ❖ **Rendement de conversion** : On appelle rendement de conversion η le rapport de la puissance électrique maximale fournit par la cellule sur la puissance incidente (d'éclairement). [1, 12, 14] Il exprime selon l'équation suivante :

$$\eta = FF \cdot \frac{I_{CC} \cdot V_{OC}}{P_{in}} = \frac{P_{max}}{P_{in}} \quad (\text{III.18})$$

Ou P_{in} : est la puissance incidente du rayonnement solaire au sol (d'éclairement).

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de courtcircuit et la tension de circuit ouvert.

III.5.1.1 Caractéristique I=f(V)

La cellule photovoltaïque produit un courant électrique, une différence de potentiel supportée entre ses électrodes métalliques est apparue communément nommée tension de circuit ouvert (V_{OC}) fortement dépendante de la température de la cellule.

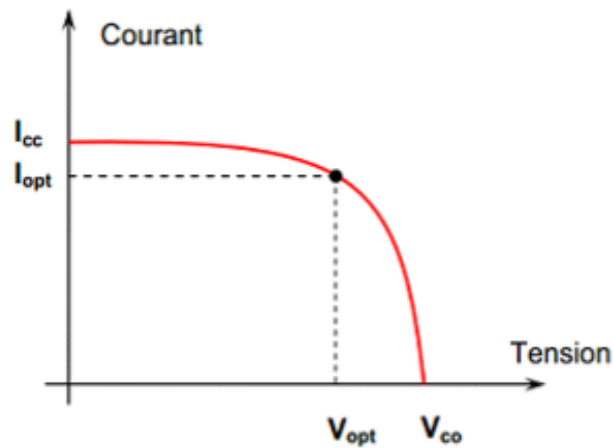


Figure III.18 : Caractéristique courant-tension d'une cellule Photovoltaïque [7].

Le courant maximal photovoltaïque se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées. On parle alors de courant de court-circuit (I_{CC}) dépendant fortement du niveau d'éclairement (E). La figure (III.18) illustre la caractéristique non linéaire I(V) d'une cellule PV à base de silicium pour un éclairement et une température donnée, avec la présence d'un point de puissance maximale (PP_{max}) caractérisé par sa tension et son courant optimaux (V_{opt} et I_{opt}).

III.5.1.2 Caractéristique $P=f(V)$



Figure III.19 : Caractéristique Puissance (P)-Tension (V) d'une cellule photovoltaïque [1, 12, 14].

La courbe de la puissance en fonction de la tension indique que la quantité d'énergie produite par la cellule photovoltaïque varie considérablement selon ses conditions

opérationnelles. Il est important de faire fonctionner le système photovoltaïque au PP_{max} (Point de Puissance Maximale), afin d'exploiter sa puissance maximale, figure (III.19)[1, 12, 14].

III.6 Influence des différents paramètres

Les caractéristiques d'un panneau dépendent de l'éclairement et de la température. Selon la technologie du générateur photovoltaïque, les variations des paramètres seront différentes[21].

III.6.1 Influence d'un changement d'éclairement

La puissance délivrée par un générateur PV dépend de l'irradiation qu'il reçoit, cette puissance est proportionnelle au flux comme le montre de la figure(III.23). En effet, pour une unité donnée, la variation de l'intensité du courant est proportionnelle à l'éclairage. La figure (III.23), représente les résultats de simulation obtenus.

Notons aussi la légère diminution de la tension du circuit ouvert V_{co} (V) suite à une chute du flux lumineux.

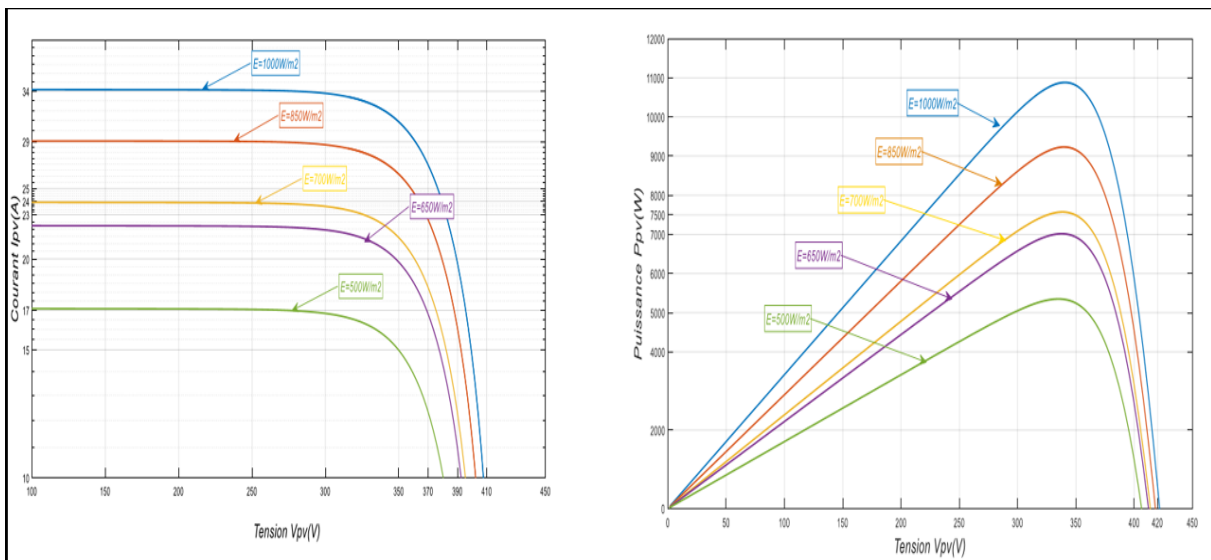


Figure III.23 : Résultats de simulation des caractéristiques I(V) et de la puissance délivrée par le générateur PV en fonction de différentes irradiation reçue à $T=25^{\circ}C$.

III.6.2 Influence de la température

La température est un paramètre important dans le comportement des cellules photovoltaïques.

Quand la température diminue, la tension de circuit ouvert augmente, mais le courant de court-circuit diminue dans des proportions moindres (Figure III.24). La diminution du courant de saturation est la principale cause de la chute de courant à basse température[21].

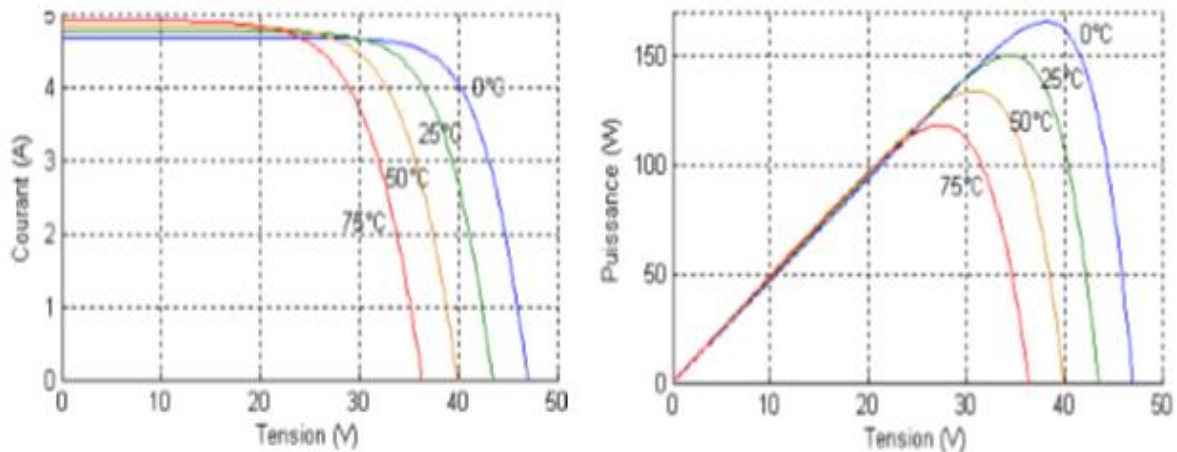


Figure III.24 : Evolution de la caractéristique (I-V) (P-V) du module en fonction de la température [10].

III.6.3 Influence de l'éclairement inhomogène

Lorsque les diverses cellules d'un générateur PV ne sont pas éclairées de manière identique, (feuilles d'arbre tombées à l'automne, ou des facteurs qui bloquent la lumière, conditions d'exposition des ombres d'infrastructures de bâtiments) un comportement nouveau apparaît pour GPV [3]. Certaines cellules peuvent recevoir moins de rayonnement (et donc apparaître comme des charges). Comme elle le montre la figure (III.25).

Remarque :

Des poussières sur l'ensemble des capteurs peuvent sous certaines conditions produire des résultats semblables mais dans des proportions réduites. En effet, l'éclairement bien qu'inhomogène n'est pas complètement occulté sur une partie de la surface des capteurs PV, on s'aperçoit que la puissance délivrée par le générateur chute parfois même fortement par rapport à la puissance normalement produite sous éclairement homogène.

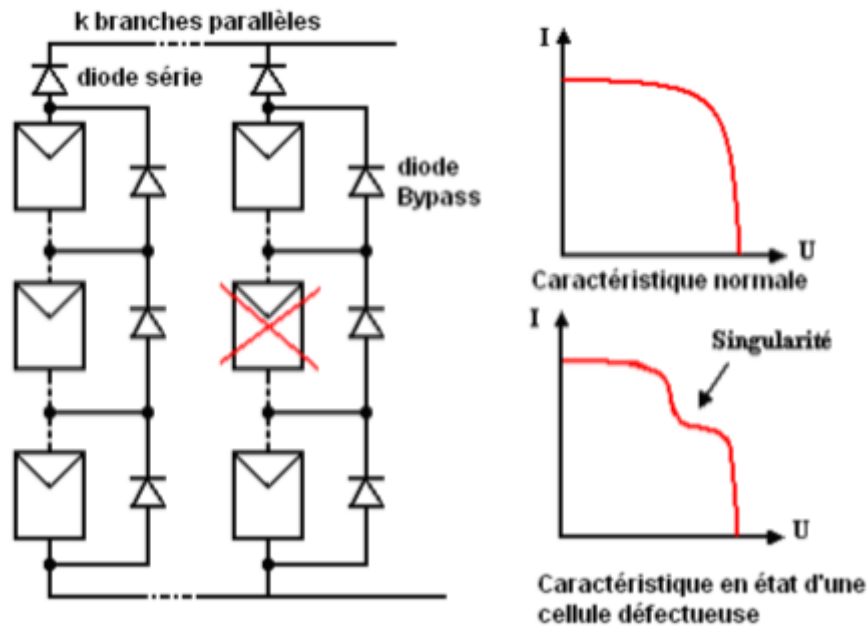


Figure III.25 : Caractéristiques électriques d'un générateur PV ayant des diodes de protection (dites diodes By-pass).

Si nous analysons ce qui se passe aux bornes des cellules qui sont moins éclairées que le reste du panneau PV, nous nous apercevons que ces cellules au lieu d'être génératrices deviennent réceptrices. Par conséquent, il en résulte de mauvaises performances puisque c'est les cellules les moins éclairées qui imposent leurs performances aux autres, elles risquent aussi de s'échauffer excessivement et même de se détruire définitivement si le défaut persiste. C'est pourquoi le diodes By-pass est utilisé pour protéger les cellules de la chaleur et des dommages.

III.6.4 Influence de la résistance série

La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la photodiode se comporte comme un générateur de tension, et lorsqu'elle est élevée, elle diminue la valeur du courant de court-circuit (Figure III.26).

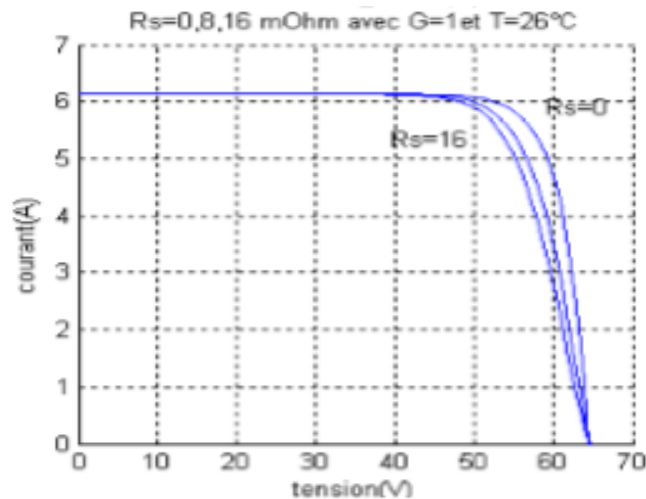


Figure III.26 : Caractéristique I (V) d'un module pour différentes valeurs de résistance série.

III.7 Terminologie spécifique dans le champ des cellules photovoltaïques

En résumé une liste de termes que l'on emploie couramment dans les systèmes photovoltaïques :

- **Cellule photovoltaïque** : composant à semi-conducteur réalisant la conversion directe de l'énergie solaire en énergie électrique.
- **Module** : ensemble de cellules photovoltaïques reliées électriquement entre elles et contenues dans une enveloppe scellée. Le module est l'unité la plus petite qu'on peut manipuler individuellement. Un module standard est constitué par 36 cellules reliées en série et, en origine, il a été conçu pour charger des batteries de 12 V.
- **Panneau** : ensemble de modules reliés dans une structure rigide. Le panneau est l'unité la plus petite que l'on peut enlever du générateur photovoltaïque tout entier.
- **Chaîne** : ensemble de panneaux reliés en série de façon à débiter la tension nominale de l'installation.
- **Champ photovoltaïque** : ensemble de tous les panneaux reliés entre eux de façon opportune et constituant le générateur d'énergie électrique.
- **Système de poursuite de la puissance maximale** : machine électrique qui permet de faire fonctionner le champ photovoltaïque toujours dans des conditions de puissance maximale débitée.

- **Système d'accumulation** : il est constitué par des batteries d'accumulateurs, ayant la fonction de volant entre l'énergie produite par le champ PV et l'énergie demandée par la charge.
- **Inverseur** : il transforme le courant continu produit par l'installation PV, en courant alternatif.

A la figure III.27 on montre un module, un panneau et un champ photovoltaïques.

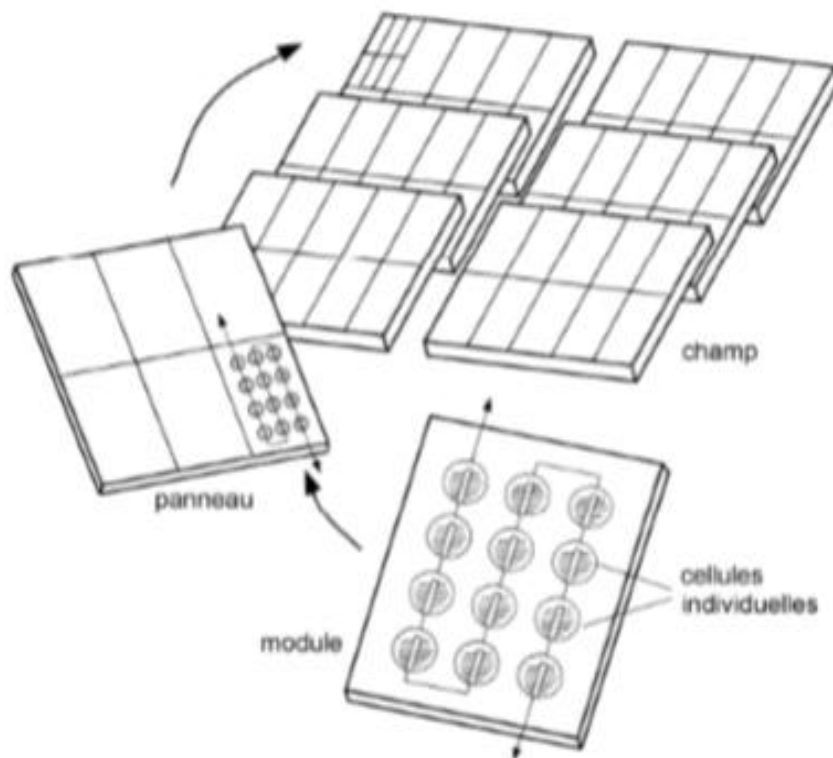


Figure III.27 : Schéma de module, panneau et champ photovoltaïques.

III.8 Différents types de systèmes photovoltaïque

On rencontre généralement trois types de systèmes photovoltaïques ; Les systèmes autonomes, les systèmes hybrides, les systèmes connectés au réseau [22]. Les deux premiers sont indépendants du système de distribution d'électricité, en retrouvant souvent dans les régions éloignées.

III.8.1 Les systèmes autonomes

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau.

III.8.2 Les systèmes hybrides

Les systèmes d'énergie hybride associent au moins deux sources d'énergie renouvelable aussi une ou plusieurs sources d'énergie classiques. Les sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque et l'éolienne ne délivrent pas une puissance constante, mais vu leurs complémentarités, leur association permet d'obtenir une production électrique continue. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées.

III.8.3 Les systèmes connectés au réseau

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectés à un réseau (Figure III.28) sont une résultante de la tendance à la décentralisation du réseau électrique. L'énergie est produite plus près des lieux de consommation. Les systèmes connectés à un réseau réduisent la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Il produit sa propre électricité et achemine son excédent d'énergie vers le réseau, auprès duquel il s'approvisionne au besoin, ces transferts éliminent le besoin d'acheter et d'entretenir une batterie. Il est toujours possible d'utiliser ceux systèmes pour servir d'alimentation d'appoint lorsque survient une panne de réseau.

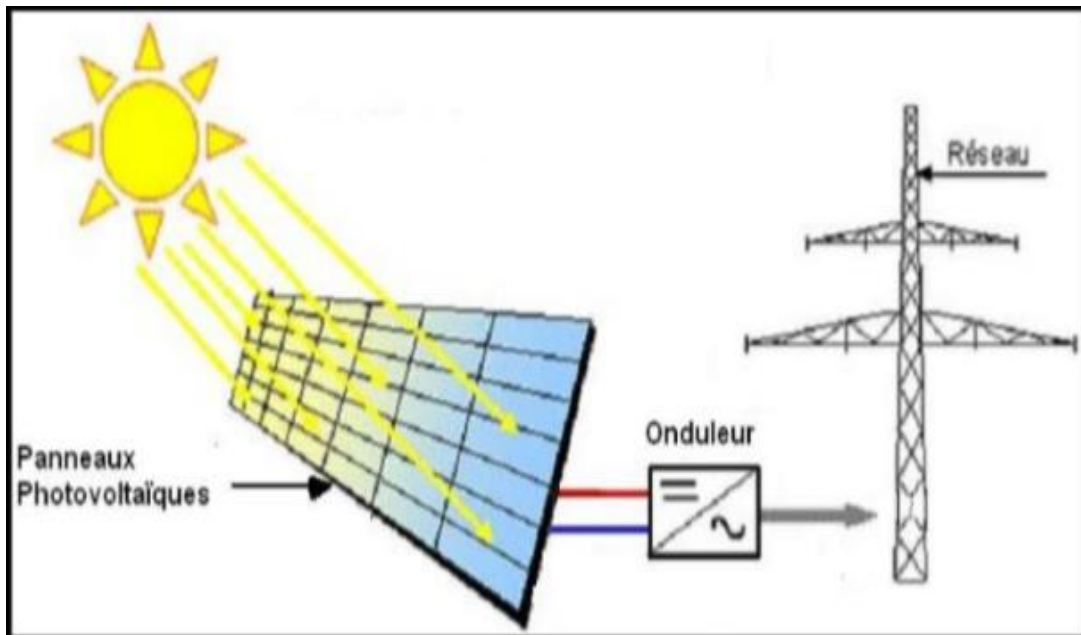


Figure III.28 : Systèmes photovoltaïques connectés au réseau.

III.9 Connexion au réseau

Les panneaux photovoltaïques produisent une tension continue variable en fonction de l'ensoleillement, ils sont couplés en séries pour atteindre une tension de 300 à 600 V.

Ces panneaux sont connectés à un onduleur qui régule et convertit le courant continu en courant alternatif connecté et synchronisé au réseau. Ce type d'onduleur ne peut pas fonctionner seul sans réseau.

Ce principe permet d'obtenir le meilleur rendement dans l'utilisation de l'énergie solaire, pas de batterie, pas d'entretien. L'énergie solaire est entièrement récupérée, ce que vous ne consommez pas sera consommé par le voisinage.

- Si le système PV n'est pas raccordé au réseau on l'appelle un système PV autonome.
- Si le système PV est raccordé à une autre source (éolienne) on l'appelle ça un système hybride.

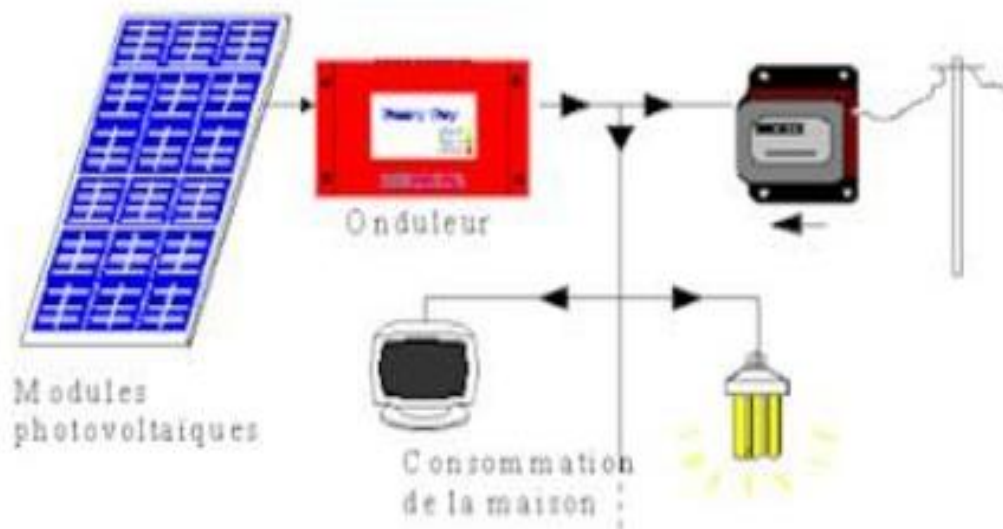


Figure III.29 : module PV connecté au réseau.

III.9.1 Les onduleurs photovoltaïques

Ils font le lien entre les panneaux photovoltaïques et le réseau. Ils convertissent le courant continu en courant alternatif synchronisé à la fréquence du réseau. Ils régulent la tension des panneaux photovoltaïques pour rechercher la valeur de tension ou la puissance est maximum (MPP).

Le rendement d'un onduleur est compris entre 92 et 95% pour les modèles avec transformateur d'isolation, 95 à 97% pour les modèles sans transformateur, 96 à 98% pour les modèles sans transformateur et sans étage élévateur, ces derniers ne peuvent pas fonctionner avec une tension inférieure à 350V DC.

Les onduleurs avec transformateur sont plutôt destinés aux capteurs couche mince, et aux systèmes à faible tension (faible puissance).



Figure III.30 : Onduleurs photovoltaïque.

III.9.2 Les batteries

Les batteries servent de zone tampon entre production et consommation d'énergie (utilisation). Leur capacité doit être suffisamment grande pour faire face à tous les aléas de la production et de la consommation.

Lorsque le réservoir d'énergie est plein toute quantité d'énergie supplémentaire entraînera le bouillonnement de l'électrolyte :

- Le niveau dans la batterie baisse, et celle-ci peut être gravement endommagée
- Les gaz produits peuvent exploser avec une flamme ou une étincelle
- Le surplus d'énergie risque de détériorer les plaques en plomb en arrachant la matière active.

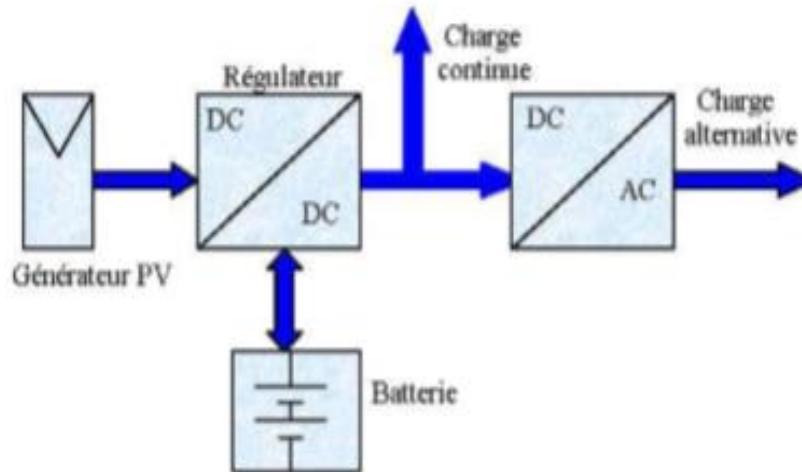


Figure III.31 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec batterie de stockage[23]

III.9.3 Le régulateur

Le régulateur contrôle l'état du réservoir d'énergie pour protéger la batterie. Son rôle est de stopper :

- La charge de la batterie lorsque celle-ci est chargée pour éviter le bouillonnement de l'électrolyte,
- Le prélèvement d'énergie sur la batterie lorsqu'elle est trop chargée.

III.9.4 Le convertisseur

Le convertisseur permet de convertir le courant continu en courant alternatif pour alimenter les utilisations qui fonctionnent avec ce type de courant (onduleur PV).

⇒ La caractérisation du modèle de la photopile est très intéressante ; (l'influence des différents paramètres climatiques et autres sur les caractéristiques $I(V)$, $P(V)$, ainsi qu'une synthèse d'assemblage des panneaux et une spécification des différentes zones de

fonctionnement) pour déterminer les avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

III.10 Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque

III.10.1 Avantages

- Une haute fiabilité ; les modules sont garantis pendant 25 ans par la plupart des constructeurs.
- Elle ne comporte pas de pièces mobiles, qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions. [11].

III.10.2 Inconvénients

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%.
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru. La fiabilité et les performances du

système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient.

- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes[24].

III.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un rappel sur l'astre soleil et le rayonnement solaire. Aussi, nous avons présenté les mécanismes de base du principe de la conversion photovoltaïque, les caractéristiques électriques fondamentales de cellule PV, aussi le module photovoltaïque et leurs performances. Ensuite, nous avons étudié les caractéristiques du panneau photovoltaïque avec plusieurs configurations (série, parallèle), et les systèmes photovoltaïques aussi les avantages et les inconvénients d'énergie PV.

Dans le chapitre (IV) suivant, nous avons présenté la technologie des équipements d'énergie Solaire Photovoltaïque contrôlée par ordinateur avec SCADA (EESFC) et ses composants. Aussi, nous avons donné les caractéristiques et les avantages de cette technologie.

CHAPITRE IV

Généralité sur la technologie

des équipements d'énergie

Solaire Photovoltaïque

contrôlée par ordinateur avec

SCADA (EESFC)

IV.1 Introduction

Le soleil nous fournit un large spectre d'énergie solaire. A part la lumière du soleil que nous voyons tous les jours, le reste de l'énergie solaire est invisible. D'autres parties du spectre se composent de faisceaux cosmiques, de rayons gamma, de rayons X, de rayons ultraviolets, de rayons infrarouges, d'ondes de radio et chauffage.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique (effet photovoltaïque).

Dans ce chapitre, nous expliquons la technologie des équipements d'énergie Solaire Photovoltaïque contrôlée par ordinateur avec SCADA (EESFC) et ses composants en plus de ses caractéristiques et des travaux possibles sur celle-ci.

IV.2 La technologie des équipements d'énergie Solaire Photovoltaïque contrôlée par ordinateur avec SCADA (EESFC)

Le "EESFC" est un ordinateur contrôlé (PC), pour étudier la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique de l'équipement. Cette technologie se compose de nombreux appareils qui contribuent à améliorer votre entreprise et à améliorer votre utilisation des panneaux solaires.

IV.2.1 Un rappel sur le système SCADA

SCADA permet un fonctionnement local sur votre site d'installation PV, où vous pouvez visualiser toutes les valeurs mesurées localement et en temps réel. Dans le cas de défaut, répondez rapidement et efficacement. Dans cet objectif, des analyses, des graphiques des flux et une gestion intelligente des alarmes sont fournis. Le système comprend des interfaces pour les enregistreurs de données, les contrôleurs logiques programmables et les lecteurs.

IV.3 Spécification techniques complètes

Cet appareil comprend :

- 1) Unité : EESFC. Équipement d'Énergie Solaire Photovoltaïque, Contrôlé par Ordinateur (PC).

- 2) EESFC/CIB. Boîte-Interface de Contrôle.
- 3) DAB. Carte d'Acquisition de Données.
- 4) EESFC/CCSOF. Logiciel de Contrôle + Acquisition de Données + Logiciel de Gestion des Données.
- 5) Câbles et Accessoires.

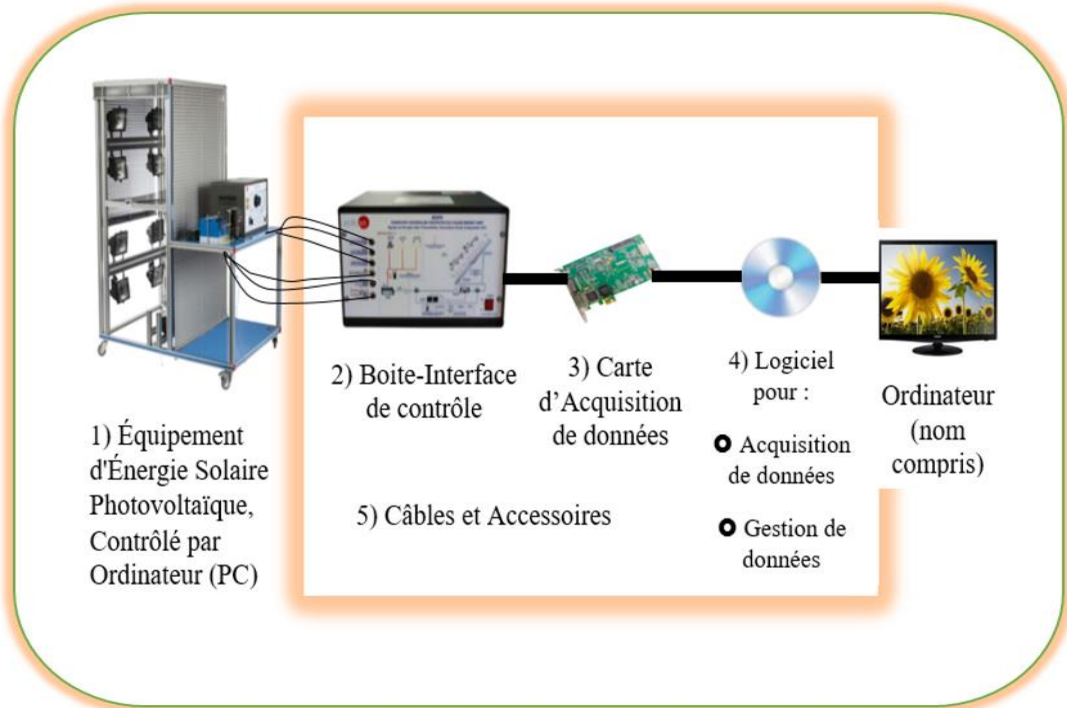


Figure IV.1 : Schéma représenté de la technologie des équipements d'énergie Solaire Photovoltaïque contrôlée par ordinateur avec SCADA (EESFC)

IV.4 Description général

L'équipement d'énergie Solaire Photovoltaïque, Contrôlé par Ordinateur (PC), "EESFC", comprend le matériel qui utilise la loi de la photo-conversion, qui convertit directement le rayonnement solaire en électricité. L'énergie absorbée est fournie par le rayonnement solaire simulée, qui dans notre cas est fournie au moyen d'un panneau avec une source lumineuse très puissante (lampes solaires) [1].

L'équipe est composée de (figure IV.1) :

- Panneaux solaires photovoltaïques.
- Simulateur solaire composé de lampes solaires.

Chapitre IV : Généralité sur la technologie des équipements d'énergie solaire photovoltaïque contrôlée par ordinateur avec SCADA (EESFC)

- Système de ventilation.
- Régulateur pour charges CC.
- Chargeur de batterie auxiliaire.
- Batterie.
- Module de charge DC.
- Capteurs (température, rayonnement solaire, courant continu et tension continue).

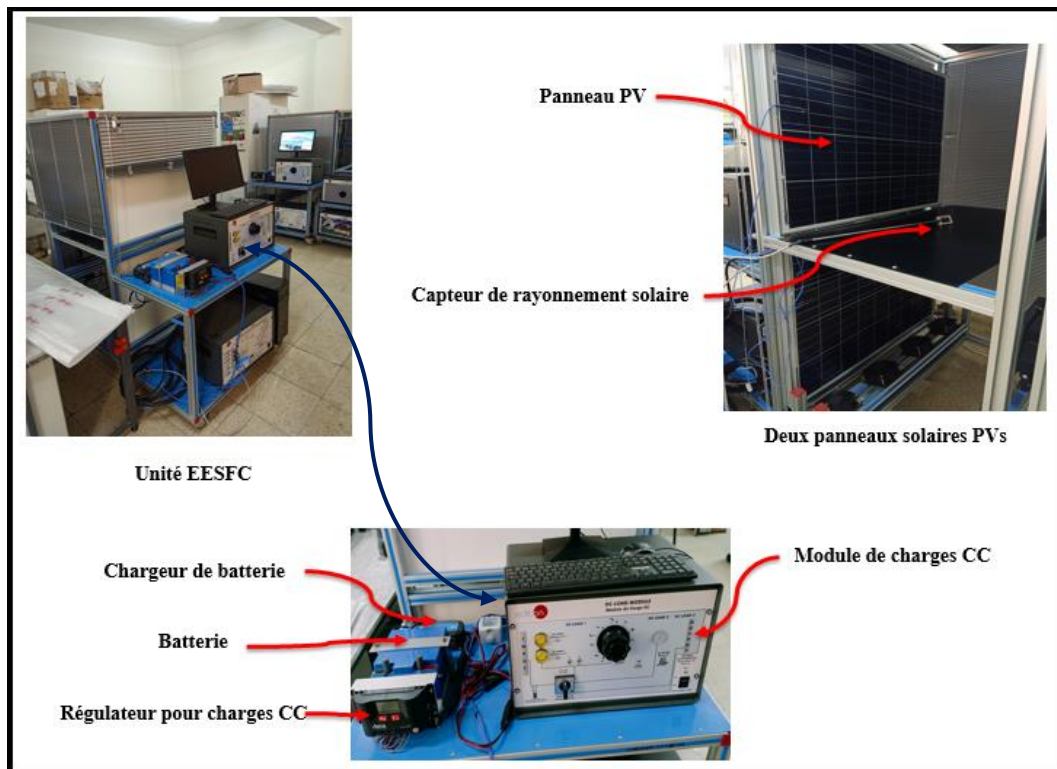


Figure IV.2 : *Diagramme des éléments de l'Équipe EESFC.*

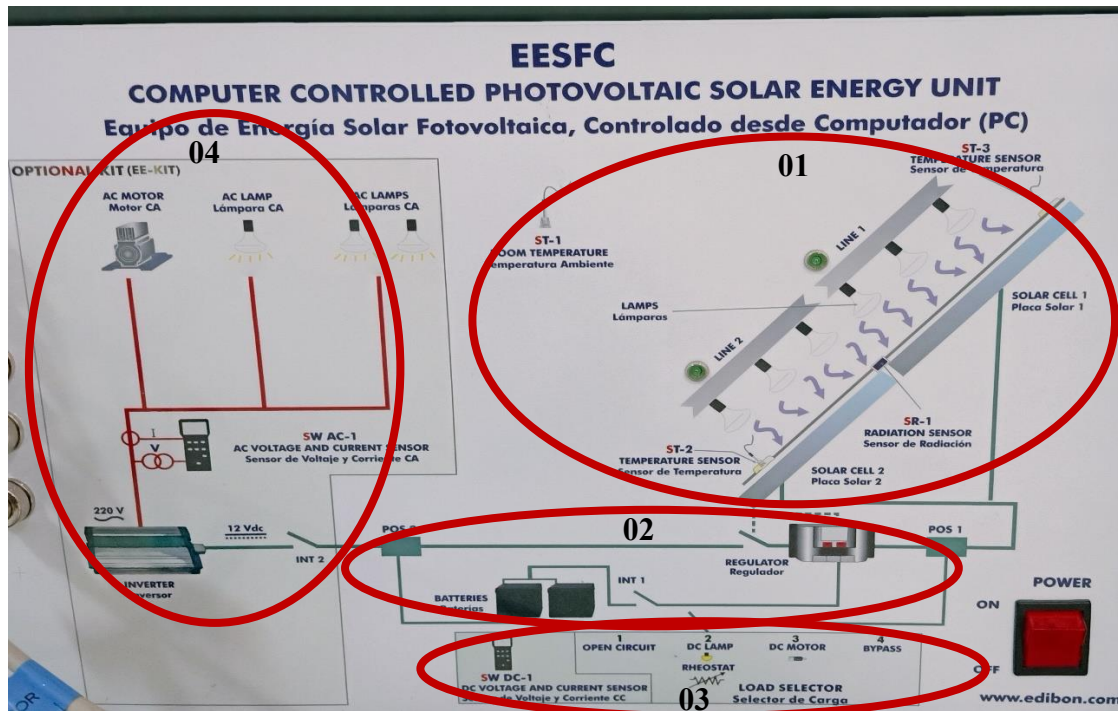


Figure IV.3 : Schéma de processus de l'appareil (L'équipement d'énergie Solaire Photovoltaïque -EESFC/CIB. Boîte d'Interface de Contrôle-). [1]

À travers le schéma de fonctionnement de l'appareil (équipement solaire photovoltaïque - ESFC / CIB. Boîtier d'interface de contrôle -), nous mentionnons les principaux éléments du schéma :

● Nous divisons les éléments en 4 groupes de base :

a) Groupe 01 :

Ce groupe comprend des éléments d'équipe EESFC :

- ❖ Deux panneaux PVs.
- ❖ Capteur de rayonnement :
 - ST-1 : Capteur de température ambiante.
 - ST-2 : Capteur de température de panneau 02.
 - ST-3 : Capteur de température de panneau 01.

❖ Lampes de simulateur solaire.

b) Groupe 02 :

- ❖ Régulateur pour charges CC et batterie.

- ❖ Chargeur de batterie auxiliaire.

Remarque : Les groupes 2 et 3 sont connectés en parallèle, où le régulateur peuvent être placés avant ou après le sélecteur de charge CC.

c) Groupe 03 :

- ❖ Capteur de courant continue et tension (mesure de courant CC et de tension).
- ❖ Sélecteur de charge CC :
 - Position 1 : Les panneaux solaires fonctionnent en circuit ouvert.
 - Position 2 : Le rhéostat et les lampes sont connectés directement aux panneaux solaires. Ces charges peuvent être connectés de manière indépendante ou en parallèle avec l'aide de commutateurs manuels.
 - Position 3 : Le moteur à courant continu est relié directement aux panneaux solaires.
 - 4 ⇒ pour la protection par diode de by-pass (Empêcher la surchauffe des cellules photovoltaïques et ainsi protéger les cellules contre les dommages) ⇒ [voir le chapitre III].

Remarque : Si une cellule ou un groupe de cellule est ombragé, le courant passera par la diode de by-pass et on évite ainsi un échauffement trop intense de ces cellules.

d) Groupe 04 : est un ensemble supplémentaire en option.

- ❖ Inverseur : Pour convertir la tension de 12V à 220V
- ❖ Capteur de courant alternative et tension (mesure de courant CA et de tension)
- ❖ Éléments connectés en parallèle :
 - Moteur AC.
 - Une lampe AC.
 - Deux lampes AC.

Cette Unité Contrôlée par Ordinateur est fournie avec le Système de Contrôle par Ordinateur EDIBON (SCADA), et comprend : L'unité elle-même + un Boîtier d'Interface de Contrôle + une Carte d'Acquisition de Données + des Progiciels de Contrôle par Ordinateur, d'Acquisition de Données et de Gestion de Données, pour contrôler le processus et tous les paramètres impliqués dans le processus.

IV.4.1 Équipe EESFC

Le "EESFC" est un ordinateur contrôlé (PC), pour étudier la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique de l'équipement. Il a une structure en aluminium anodisé et panneaux en acier peint. L'équipement comprend des roues pour faciliter la mobilité. Principaux éléments métalliques en acier inoxydable. Diagramme sur le panneau avant avec une distribution similaire aux éléments de l'appareil réel. L'équipe comprend :

IV.4.1.1 Deux panneaux solaires photovoltaïques (polycristallins)

- Modules en verre trempé à haute transmissibilité.
- Encapsulation Matériel : acétate de vinyle éthyle modifié.
- Puissance nominale de puissance : 66 W.
- Surface d'écran : 0,51 m².
- Courant maximum : 3,76 A.
- Tension maximale : 17,53 V.
- Trente-six cellules, 156 x 156 mm de chacun.



Figure IV.4 : Schéma d'Unité d'équipe EESFC

IV.4.1.2 Comprenant simulateur solaire

- Structure en aluminium.
- Huit 400 W lampes halogènes chacun répartis en deux circuits séparés tension réglementés.
- Sécurité électrique.

IV.4.1.3 Système de ventilation, contrôlé par ordinateur (PC)

- Pour analyser l'effet de la température sur le fonctionnement de l'équipement, comprenant :
 - Quatre ventilateurs axiaux compacts avec protections en plastique.

IV.4.1.4 Régulateur DC pour les charges et la batterie

Il régit la manière dont l'énergie générée dans les panneaux solaires photovoltaïques est distribuée vers et depuis la batterie auxiliaire et vers la charge. Un écran informe de l'état de la charge, des paramètres de fonctionnement. Les fonctions de la protection électronique sont :

- ❖ Haut arrêt de tension, la protection de court-circuit de charge et le module de protection contre les surtensions à l'entrée du module, protection contre la surchauffe et la surcharge et la batterie d'arrêt de surtension.

IV.4.1.5 Chargeur de batterie auxiliaire

- Évalue soigneusement la batterie et distribue ensuite la charge optimale requise.
- Batterie tension nominale : 12 V, + capacité (20 heures) : 24A / H.

IV.4.1.6 Module de charges DC

- Diagramme de boîte métallique sur le panneau avant.
- Deux lampes 24 V.
- Moteur à courant continu : Tension : 36 V, Puissance : 5 W. 500 W rhéostat.



Figure IV.5 : Schéma de module de charges CC

Le diagramme ci-dessus montre les symboles des éléments et des fonctions de l'unité :

- **INPUT / OUTPUT:** Entrée et sortie de courant continu.
- Capteur de courant continu et tension (mesure de courant CC et de tension).
- Outil de contrôle contient 4 positions :
 - Connexion indépendante de chaque charge à l'aide du sélecteur 4 positions :
 - ➡ Les panneaux solaires fonctionnent en circuit ouvert.
 - ➡ Le rhéostat et les lampes CC sont connectés directement aux panneaux solaires. Ces charges peuvent être connectés de manière indépendante ou en parallèle avec l'aide de commutateurs manuels.
 - ✚ Le rhéostat et les lampes connectés en parallèle. Nous pouvons déconnecter ou connecter des lampes CC ou le rhéostat par un interrupteur manuel (OFF / ON).
 - ➡ Le moteur à courant continu CC est relié directement aux panneaux solaires.
 - ➡ La charge de courant continu est déconnectée et les panneaux solaires sont reliés directement au dispositif de commande de charge.

IV.4.1.7 Capteurs

- Capteur de rayonnement solaire pour étudier le comportement des panneaux solaires photovoltaïques.
- Trois sondes de température de pour mesurer la température ambiante (ST-1), la température dans le panneau solaire 02 (ST-2) et la température dans le panneau solaire 01 (ST-3).
- DC capteur de courant et un capteur de tension continue. La valeur de la puissance DC peut être affichée avec le logiciel.

Le raccordement des panneaux solaires en série ou en parallèle, la mesure de la tension et le courant avant ou après la régulation et la régulation de l'intensité lumineuse des lampes de deux circuits indépendants sont commandés à partir de l'ordinateur (PC).

L'équipement comprend quatre nuances pour réduire le contact visuel et direct avec des lampes halogènes et de réduire le contact direct avec les panneaux photovoltaïques lorsque l'appareil est en fonctionnement.

IV.4.2 Boîte d'Interface de Contrôle

La Control Interface Box fait partie du système SCADA. Boîtier d'interface de contrôle comporte sur La façade avant un diagramme de processus, avec la même distribution des éléments que sur l'équipement (Figure IV.3). Tous les capteurs, avec leurs signaux respectifs, sont préparés de manière adéquate pour une sortie d'ordinateur de -10V. un + 10V.

Les connecteurs des capteurs dans l'interface ont un nombre différent de broches (de 2 à 16) pour éviter les erreurs de connexion (détrompeur). Câble entre la boîte d'interface de contrôle et l'ordinateur.

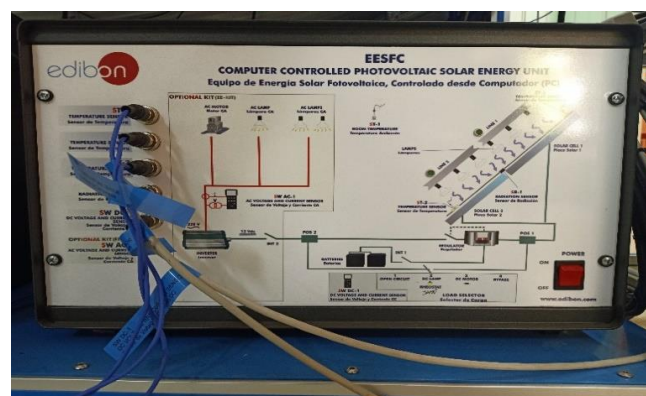


Figure IV.6 : Schéma d'EESFC/CIB. Boîte d'Interface de Contrôle

IV.4.2.1 Caractéristiques

- ❖ Les éléments de commande de l'équipement sont contrôlés en permanence depuis l'ordinateur, sans besoin de modifications ou de connexions pendant tout le processus d'utilisation.
- ❖ Visualisation simultanée depuis l'ordinateur de tous les paramètres intervenant dans le processus.
- ❖ Calibration de tous les capteurs impliqués.
- ❖ Représentation en temps réel des courbes des réactions du système.
- ❖ Stockage de toutes les données du processus et des résultats dans un fichier.
- ❖ Représentation graphique, en temps réel, de toutes les réactions système/processus.
- ❖ Toutes les valeurs des actionneurs peuvent être modifiées à tout moment depuis le clavier, ce qui permet l'analyse des courbes et des réactions de l'ensemble du processus.
- ❖ Toutes les valeurs des actionneurs et des capteurs et leurs réactions sont affichées sur le même écran sur l'ordinateur.
- ❖ Les signaux sont protégés et filtrés pour éviter les interférences externes.
- ❖ Le contrôle par ordinateur en temps réel avec la possibilité de modifier les paramètres à partir du clavier de l'ordinateur, à tout moment pendant le processus.
- ❖ Le contrôle par ordinateur contrôle la marche/arrêt en temps réel pour les pompes, les compresseurs, les résistances, les vannes de régulation, etc.
- ❖ Le contrôle par ordinateur contrôle la marche/arrêt en temps réel pour les paramètres intervenant simultanément dans le processus.
- ❖ Contrôle ouvert permettant de modifier, à tout moment et en temps réel, les paramètres intervenant simultanément dans le processus. Possibilité d'automatisation des actionneurs impliqués dans le processus.
- ❖ Trois niveaux de sécurité, l'un mécanique dans l'équipement, l'autre électronique avec l'interface de contrôle et le troisième dans le logiciel de contrôle.

IV.4.3 DAB. Carte d'Acquisition de Données

- Carte d'Acquisition de Données fait partie du système SCADA (Figure IV.3). Carte d'Acquisition de Données PCI Express (National Instruments) pour être placé dans une fente d'ordinateur. Bus PCI Express.
- les composants de DAB. Carte d'Acquisition de Données :

Entrée analogique	Sortie analogique	Entrée/sortie numérique
<ul style="list-style-type: none"> ● Nombre de chaînes= 16 asymétriques ou 8 différentiel. Résolution=16 bits, l'un à 65536. Jusqu'à 250 KS/s (kilo échantillons par seconde). ● Plage de entrée(V)=±10V. Transferts de données=DMA, interruptions, programmé I/O. DMA chaînes=6 	<ul style="list-style-type: none"> ● Nombre de chaînes= 2. Résolution=16 bits, l'un à 65536. ● Débit de sortie maximum jusqu'à 900 KS/s. ● Plage de sortie(V)=±10V. Transferts de données=DMA, interruptions, programmé I/O. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Nombre de chaînes=24 entrées/sorties. ● DO ou DI Échantillon Fréquence d'horloge : 0 à 100 MHz. ● Calendrier : Nombre de compteurs et de chronomètres=4. ● Résolution : Compteur/temporisateur : 32 bits.

Tableau IV.1 : Les composants de DAB. Carte d'Acquisition de Données.



Figure IV.7 : Schéma de DAB. Carte d'Acquisition de Données

IV.4.4 EESFC/CCSOF. Logiciel de Contrôle + Acquisition de Données + Gestion des Données

Chapitre IV : Généralité sur la technologie des équipements d'énergie solaire photovoltaïque contrôlée par ordinateur avec SCADA (EESFC)

C'est un logiciel de système SCADA, est flexible, ouvert et multi-contrôle développé par des systèmes graphiques (Figure IV.3). Compatible avec les normes de l'industrie. Logiciel compatible avec les systèmes d'exploitation Windows existants. Simulation graphique et intuitive de l'opération à l'écran. Vitesse d'échantillonnage jusqu'à 250 KS/s (échantillons de kilo par seconde). Il présente les caractéristiques suivantes :

- ❖ Enregistrement et visualisation de toutes les variables de processus de manière automatique et simultanée.
- ❖ Logiciel ouvert et multi-contrôle, agissant simultanément sur tous les paramètres de processus. Gestion, traitement, comparaison et stockage de données.
- ❖ Système d'étalonnage pour les capteurs impliqués dans le processus. Il permet l'enregistrement de l'état des alarmes et de la représentation graphique en temps réel.
- ❖ Analyse comparative des données obtenues, après le processus et la modification des conditions au cours du processus.
- ❖ Logiciel ouvert, permettant modifier les textes, les instructions.

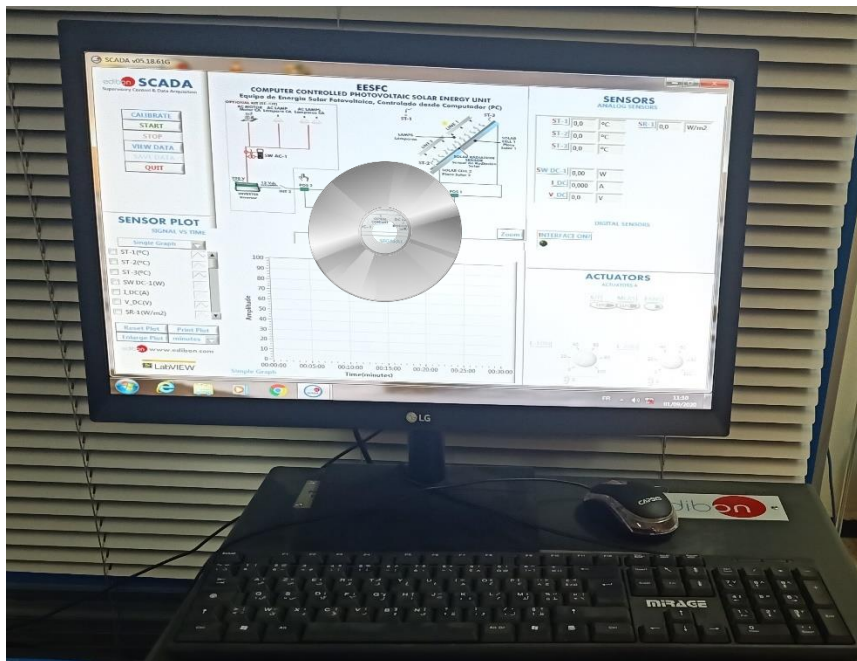


Figure IV.8 : Schéma d'EESFC/CCSOF

IV.4.5 Câbles et Accessoires

➔ Pour un fonctionnement normal.

IV.5 Ecrans principaux du logiciel

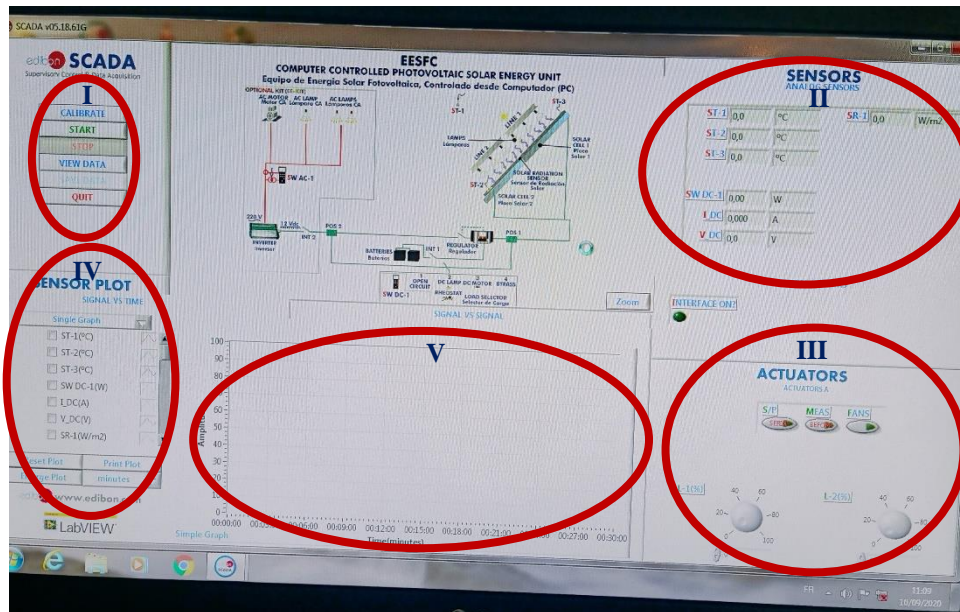


Figure IV.9 : Schéma de l'écran principal du logiciel

I) Principales possibilités d'utilisation du logiciel.

II) Affichage des capteurs, des valeurs en temps réel et des paramètres de sortie supplémentaires.

- Capteurs : ST=Capteur de température.
- SRL=Capteur de rayonnement.
- I_DC=Capteur de courant continu.
- V_DC=Capteur de tension continue.
- SW DC-1=Mesure de la puissance continue.

III) Commande des actionneurs.

Actionneurs

- Serial/Paral=Sélecteur pour panneaux solaires photovoltaïques montés en série ou en parallèle.
- MEAS=Sélecteur pour mesurer la tension et le courant avant ou après le régulateur.
- FAN=Activation/désactivation du système de ventilation.

☉ SUN-1= Système de ventilation marche/arrêt Régulateur d'intensité lumineuse (lampes à circuit n°1).

☉ SUN-2=Régulateur d'intensité de la lumière (lampes du circuit n° 2).

IV) Sélection des canaux et autres paramètres du tracé.

V) Affichage graphique en temps réel.

IV.6 Les travaux possibles et résultats pour cet appareil

- Détermination des paramètres caractéristiques du panneau solaire.
- Etude des matériaux constituant la cellule solaire.
- Etude de la côté p et n d'une cellule solaire.
- Etude des courbes IV et PV.
- Etude du courant inverse ou la saturation.
- Etude de V, I et W en fonction de différentes charges.
- Mesure de la tension et du courant de court-circuit en circuit ouvert pour un panneau solaire sous charge.
- Mesure de la charge de sortie maximale du panneau solaire.
- L'étude de la relation entre la puissance générée et la puissance du rayonnement solaire.
- Etude de la puissance maximale du panneau solaire.
- Etude de l'influence de la température sur la tension des panneaux solaires en circuit ouvert.
- Détermination de l'efficacité de la photo-conversion.
- Etude de l'efficacité des panneaux solaires connectés en parallèle.
- Etude de l'efficacité des panneaux solaires connectés en série.
- Etude de l'efficacité, en fonction de la température, le système photovoltaïque connecté en parallèle.
- Etude du fonctionnement du système de génération photovoltaïque alimentation en énergie à courant continu à des charges différentes, sans une batterie auxiliaire.
- Etude du fonctionnement du système de production photovoltaïque d'une puissance de la batterie auxiliaire et la puissance d'alimentation à différentes charges DC/AC.
- Etude du fonctionnement du système photovoltaïque dans le cadre de la série / parallèle de différentes charges, sans l'appui de la batterie.

- Etude de l'opération de la série système photovoltaïque / parallèle avec la connexion de différentes charges en courant continu et avec le support de la batterie.
- Détermination de la résistance d'une cellule solaire connectée en série et en parallèle.
- Etude des paramètres qui définissent la qualité d'une cellule solaire.
 - Possibilités pratiques supplémentaires :
- Le calibrage des capteurs.
- Profil des lampes d'éclairage d'étude.

IV.7 Conclusion

On a commencé ce chapitre par une vue générale sur la technologie des équipements d'énergie Solaire Photovoltaïque contrôlée par ordinateur avec SCADA (EESFC), et ses composantes bien détaillé et les travaux possibles pour cet appareil. Après cette étude, et grâce au programme SCADA. On détermine les caractéristiques et les avantages de cet appareil :

❖ Les caractéristiques :

- Visualisation détaillée des données mesurées en temps réel.
- Les capteurs permettent une identification rapide des erreurs.
- Diagramme de flux de puissance.
- Enregistrement des données redondantes à long terme sur site.
- Permet le déclenchement d'actionneurs.
- La possibilité d'adapter l'interface utilisateur pour répondre aux exigences locales.
- De nombreuses fonctions et tâches peuvent être exécutées grâce aux capteurs, écrans et privilèges supplémentaires (voir les travaux possibles mentionnées ci-dessus).
- Les données mesurées peuvent être utilisées directement sur le site.
- L'écran du système offre une représentation et un contrôle facile des capteurs, des paramètres.
- Connexion flexible et facile pour ajouter de nombreux appareils à l'intérieur de la technologie.
- les données sont enregistrées sur un serveur industriel désigné pour l'installation.

❖ **les avantages :**

- Facile, confortable et personnalisable.
- Un aperçu de toutes les données mesurées et de l'énergie solaire.
- Un regard scientifique détaillé pour votre installation.
- Aucune connexion Internet n'est requise sur site.
- L'interface utilisateur peut être adaptée pour répondre aux exigences locales
- Les données enregistrées peuvent être utilisées directement sur site.
- Données très réservées et fiables.
- Sécurité et protection.
- Plusieurs langues disponibles.

Dans le chapitre qui suit, nous avons présenté les résultats expérimentaux issus de panneau solaire photovoltaïque avec l'appareil des équipements d'énergie Solaire Photovoltaïque contrôlée par ordinateur avec SCADA (EESFC).

CHAPITRE V

Résultats expérimentale

V.1 Introduction

Pour faire cette étude, on utilise la technologie des équipements d'énergie Solaire Photovoltaïque contrôlée par ordinateur avec SCADA (EESFC), pour obtenir bien résultats sur les panneaux PVs.

Ce présent chapitre a comme objectif primordial, la présentation de quatre exercices (pratique) d'un système panneaux solaires contient deux panneaux intégré dans une unité (plus de détaille dans le chapitre précédent IV). Ce chapitre est organisé de la manière suivante :

- ➔ *Dans le premier exercice intitulé : Détermination des paramètres typiques du panneau solaire*
- ➔ *Le deuxième exercice, présente la détermination l'efficacité (puissance maximal), ainsi la relation entre la puissance générée et la puissance du rayonnement solaire*
- ➔ *Le troisième exercice, présente les résultats expérimentaux obtenus sur une étude de l'efficacité des panneaux solaires connectés en Parallèle et en Série*
- ➔ *Le quatrième exercice, présente les résultats expérimentaux obtenus sur une étude de l'efficacité de panneau solaire en fonction de la température et des connexions des panneaux solaires*

Enfin chaque exercice se terminera par une conclusion.

V.2 Les expériences et résultats

- ❖ **Dans ces expériences, nous utilisons l'équipe EESFC avec la séparation matérielle suivante : Régulateur pour charges CC, chargeur de batterie auxiliaire, batterie.**

Exercice 1

V.2.1 Détermination des paramètres typiques du panneau solaire

V.2.1.1 Objective

L'objectif de cet étude est premièrement de vérifier et de comprendre le fonctionnement des panneaux solaires en déterminant la courbe I-V et des paramètres de fonctionnement types,

tels que le courant de court-circuit (I_{CC}), la tension à vide (V_{OC}) et la puissance maximale (P_{max}). Et deuxièmement de montrer l'effet du rhéostat sur la détermination de caractéristique des panneaux solaires.

V.2.1.2 Matériels nécessaires

- Unité solaire photovoltaïque. (Plus de détails dans le chapitre III et IV)

V.2.1.3 Procédure pratique

- 1) Le disjoncteur triphasé (situé sur le panneau arrière de la console électronique) doit être mis en position ON. Ensuite, on fait les étapes suivantes : Vérifiez que le rhéostat de charge CC est à la position de résistance maximale / minimale actuelle (tournez avec précaution dans le sens contraire des aiguilles d'une montre jusqu'à ce qu'il ne puisse plus tourner) et que le commutateur manuel du rhéostat soit sur ON /ON.
- 2) Placez le sélecteur de charge CC en position 2.
- 3) Déconnectez les lampes à courant continu (interrupteur manuel DOWN / OFF), qui sont connectées en parallèle avec le rhéostat.
- 4) Connectez l'alimentation triphasée et, après avoir vérifié que tous les capteurs sont correctement connectés, allumez le module et la console électronique.
- 5) Vérifiez la position des commutateurs suivants : les ventilateurs sont en position OFF, les panneaux solaires sont disposés en **parallèle** et les charges CC sont placées **avant** le régulateur de charge.
- 6) Laissez les panneaux solaires connectés en parallèle. Faites glisser la commande du SUN-1 jusqu'à la position maximale, pour un rayonnement solaire maximale. Notez les valeurs mesurées du courant continu (I), de la tension continue (V) et du rayonnement SRL (W_r).
- 7) Modifiez la position du rhéostat de charge à environ 90% et notez les valeurs des paramètres obtenus.
- 8) Répétez l'étape 7 avec des diminutions incrémentielles d'environ 10% de la valeur du rhéostat de charge jusqu'à atteindre 0%, qui est le point de court-circuit du panneau solaire.

Note : N'oubliez pas de ne pas laisser le rhéostat à la position de résistance minimale (court-circuit) trop longtemps. Cela provoque une chaleur excessive qui peut endommager l'équipement.

- 9) Pour obtenir la tension à vide ou de circuit ouvert du panneau solaire, placez le sélecteur de charge CC en position 1.
- 10) Pour obtenir les paramètres et la courbe I-V de panneau-2, répétez les étapes 6 à 9 de l'exercice pratique lorsque vous utilisez panneau-2 et SUN-2.
- 11) À la fin de l'expérience, mettez le module et la console électronique hors tension. Ensuite, débranchez l'alimentation triphasée. Enfin, placez le disjoncteur triphasé (situé sur le panneau arrière de la console électronique) en position OFF.

V.2.1.4 Résultats et tableaux

V.2.1.4.a Un rappel sur le Rhéostat

Rhéostat est une résistance électrique réglable à volonté, intercalée en série dans un circuit, permet d'en modifier l'intensité du courant passant dans un circuit (augmenter ou de diminuer l'intensité du courant) (figure V.1). Il est généralement constitué d'une résistance variable dimensionnée de manière à supporter l'intensité maximale du courant devant la traverser. En tournant le bouton, un système de guidage hélicoïdal déplace un contact qui vient frotter sur les spires de fil de nichrome.

Un rhéostat a 3 bornes : une pour l'entrée du courant, une (intermédiaire, pour le réglage de variation de résistance) et une de sortie.

Les rhéostats sont utilisés pour le réglage de puissance des **moteurs à courant continu**, les postes de soudage ou les générateurs électriques.

La loi d'ohm dans une résistance donne : $U = R.I$

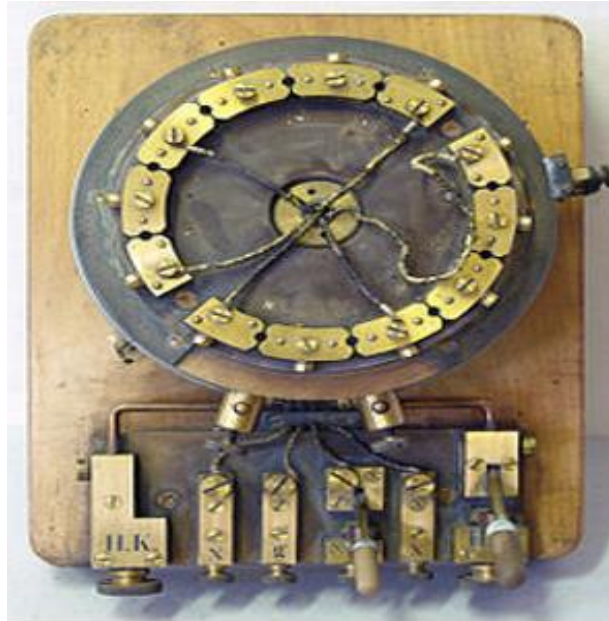


Figure V.1 : Schéma du Rhéostat.

V.2.1.4.b Les Caractéristique courant-tension et puissance-tension des panneaux photovoltaïques pour différente rayonnements solaires

V.2.1.4.b.1 Rayonnement solaire maximal 100% (Position 1)

Remarque : Fixez la position de rayonnement solaire à 100 et modifiez la position de rhéostat (100% jusqu'à 0%) pour obtenue les caractéristique des panneaux solaires (figure V.2).

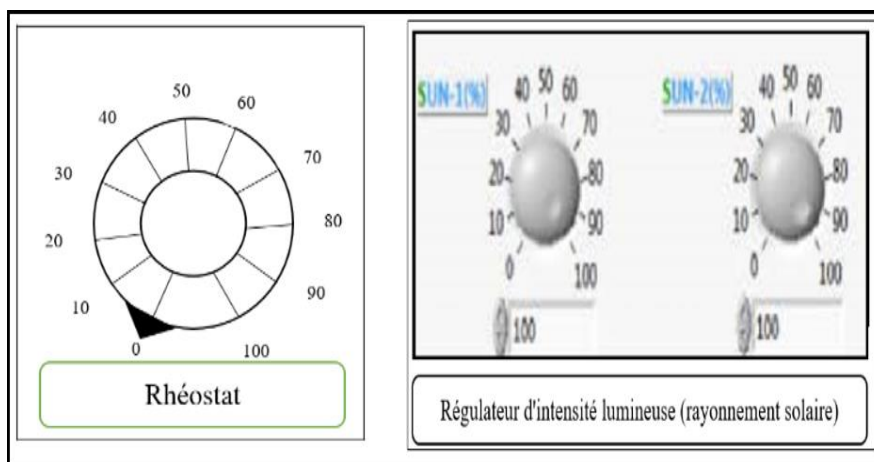


Figure V.2 : Diagramme schématique de rhéostat et les régulateurs d'intensité lumineuse SUN-1, SUN-2.

V.2.1.4.b.1.1 La courbe de courant- tension de panneau-1 et panneau-2 avec SUN-1 et SUN-2 à la position maximale 100%

Comme nous l'avons déjà mentionné précédemment, on met les deux panneaux 1 et 2 avec le simulateur solaire à la position maximal (position idéale), pour un rayonnement solaire maximal. SUN-1 et SUN-2 à position 1 :100 % (rayonnement solaire maximal) ⇒ étudier les paramètres de chaque panneau seule. Une fois note les valeurs du courant I (Amp) et V (Volts) détectée sur l'afficheur (programme SCADA) pour les deux panneaux 1 et 2, on procède avec l'acquisition des données au tableau (V.1).

Il faut note que les valeurs présentées dans le tableau (V.1) tel que courant (I) et voltage (V) sont des valeurs moyenne car on a répète chaque expérience trois fois pour faire une étude statistique.

Position R (%)	Max SUN 100% (Position 1)					
	Panneau 01			Panneau 02		
	Imoy (Amp)	Vmoy (Volts)	Wrmoy (w/m ²)	Imoy (Amp)	Vmoy (Volts)	Wrmoy (w/m ²)
0	1,285	1,06	345,9	1,251	0,96	354
10	0,977	16,43	345,9	1,006	15,66	354
20	0,502	17,66	345,9	0,501	17,83	354
30	0,352	17,86	345,9	0,355	18,06	354
40	0,263	17,96	345,9	0,27	18,2	354
50	0,208	18,06	345,9	0,212	18,26	354
60	0,168	18,1	345,9	0,17	18,3	354
70	0,139	18,1	345,9	0,14	18,3	354
80	0,117	18,13	345,9	0,119	18,3	354
90	0,099	18,13	345,9	0,101	18,3	354
100	0,089	18,13	345,9	0,09	18,3	354

Tableau V.1 : Valeurs moyenne de courant et tension pour les deux panneaux 1 et 2 (pour un rayonnement solaire maximal, SUN-1 et SUN-2 ⇒ position 1 :100 %).

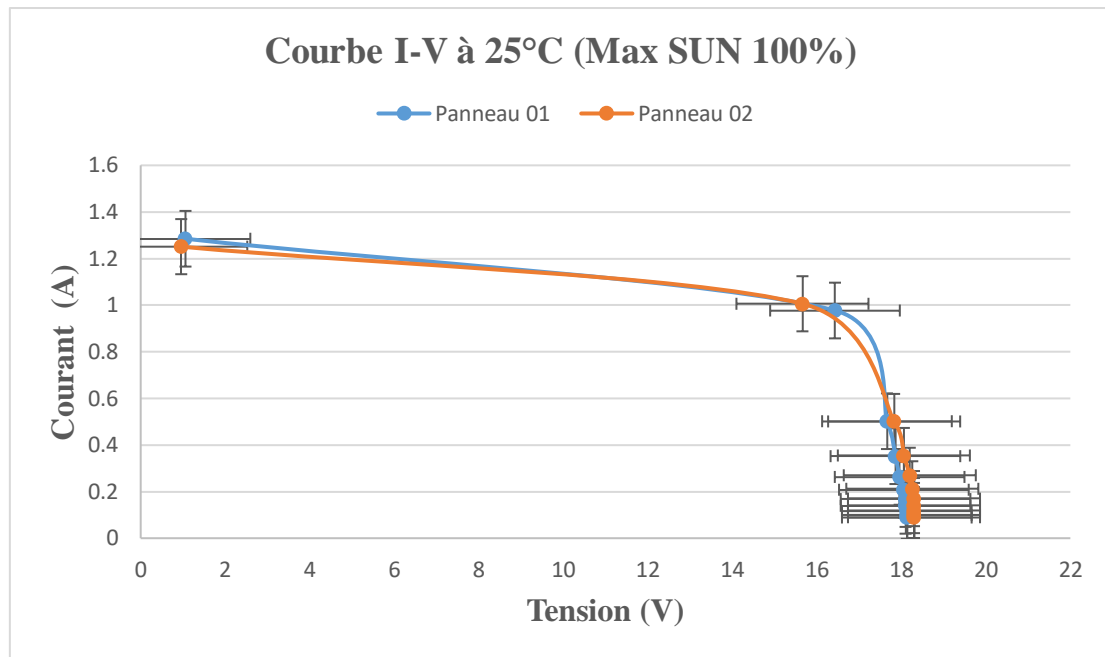


Figure V.3 : Caractéristique courant-tension des panneaux (1) et (2) avec la condition suivante : *Rayonnement solaire maximal (Position 1) 100%*.

Selon le graphique caractéristique courant-tension pour les deux panneaux 1 et 2 (voir la figure V.3 ci-dessus). On distingue deux régions : Un courant approximativement constant dans l'intervalle de tension compris entre 0 V et 15,5V. Entre 15,6 V et 18V on constate une chute de courant brusque de 0,9 A à 0 A. Pour pouvoir montrer la fiabilité des données, on a effectué 3 fois les mesures pour chaque point. On remarque qu'il n'y a pas de différence entre les deux panneaux.

V.2.1.4.b.1.2 Détermination de : I_{CC} (A), V_{OC} (V) et puissance maximale P_{max}

On constate sur la figure (V.3) que les valeurs extrêmes de la courbe courant-tension (I-V) sont comme suit :

- ➔ *Courant de court-circuit* I_{CC} (A) : L'intensité de court-circuit mesurée aux bornes du panneau 1, égal à la valeur de l'intensité du courant débité, en correspondance avec une certaine valeur d'intensité de rayonnement incident (W/m^2), à une certaine température, pour une valeur bien déterminée de la surface du panneau éclairée
- ➔ *Tension à vide* V_{OC} (V) : La tension de circuit ouvert mesurée aux bornes du panneau 1, correspondant à la différence de potentiel mesurée aux extrémités du panneau en

circuit ouvert, pour une certaine intensité de rayonnement et à une température du panneau bien déterminée.

→ P max (W) : La puissance mesurée aux bornes du panneau 1, correspondant au produit de I_{opt} (A) et V_{opt} (V).

Pour Panneau 1 :

$$I_{cc_{moy}} \text{ (A)} = 1,285 \text{ A} \quad V_{oc_{moy}} \text{ (V)} = 18,4 \text{ V}$$

$$P_{max, idéale} = I_{cc_{moy}} \cdot V_{oc_{moy}} = 23,644 \text{ W}$$

- **Déterminer le point de puissance maximale PPmax**

$$I_{opt} \text{ (A)} = 0,97 \text{ A}$$

$$V_{opt} \text{ (V)} = 16,6 \text{ V}$$

$$P_{max} = I_{opt} \cdot V_{opt} = 16,102 \text{ W}$$

Pour Panneau 2 :

$$I_{cc_{moy}} \text{ (A)} = 1,251 \text{ A} \quad V_{oc_{moy}} \text{ (V)} = 18,5 \text{ V}$$

$$P_{max, idéale} = I_{cc_{moy}} \cdot V_{oc_{moy}} = 23,144 \text{ W}$$

- **Déterminer le point de puissance maximale PPmax**

$$I_{opt} \text{ (A)} = 0,988 \text{ A}$$

$$V_{opt} \text{ (V)} = 16 \text{ V}$$

$$P_{max} = I_{opt} \cdot V_{opt} = 15,808 \text{ W}$$

V.2.1.4.b.1.3 La courbe de la puissance en fonction de la tension pour un rayonnement solaire maximal ⇒ position 1 :100 %

Les valeurs de puissance et de la tension dans le tableau (V.2) suivant :

$$P_{moy} = I_{moy} \cdot V_{moy}$$

Max SUN 100% (Position 1)						
Position R (%)	Panneau 01			Panneau 02		
	Pmoy (W)	Vmoy (Volts)	Wrmoy (w/m ²)	Pmoy (W)	Vmoy (Volts)	Wrmoy (w/m ²)
0	1,362	1,06	345,9	1,201	0,96	354
10	16,052	16,43	345,9	15,754	15,66	354
20	8,865	17,66	345,9	8,934	17,83	354
30	8,287	17,86	345,9	6,411	18,06	354
40	4,723	17,96	345,9	4,914	18,2	354
50	3,756	18,06	345,9	3,871	18,26	354
60	3,04	18,1	345,9	3,111	18,3	354
70	2,516	18,1	345,9	2,562	18,3	354
80	2,121	18,13	345,9	2,178	18,3	354
90	1,795	18,13	345,9	1,848	18,3	354
100	1,614	18,13	345,9	1,647	18,3	354

Tableau V.2 : Valeurs moyenne de puissance et tension pour les deux panneaux 1 et 2 (pour un rayonnement solaire maximal, SUN-1 et SUN-2 ⇒ position 1 : 100 %).

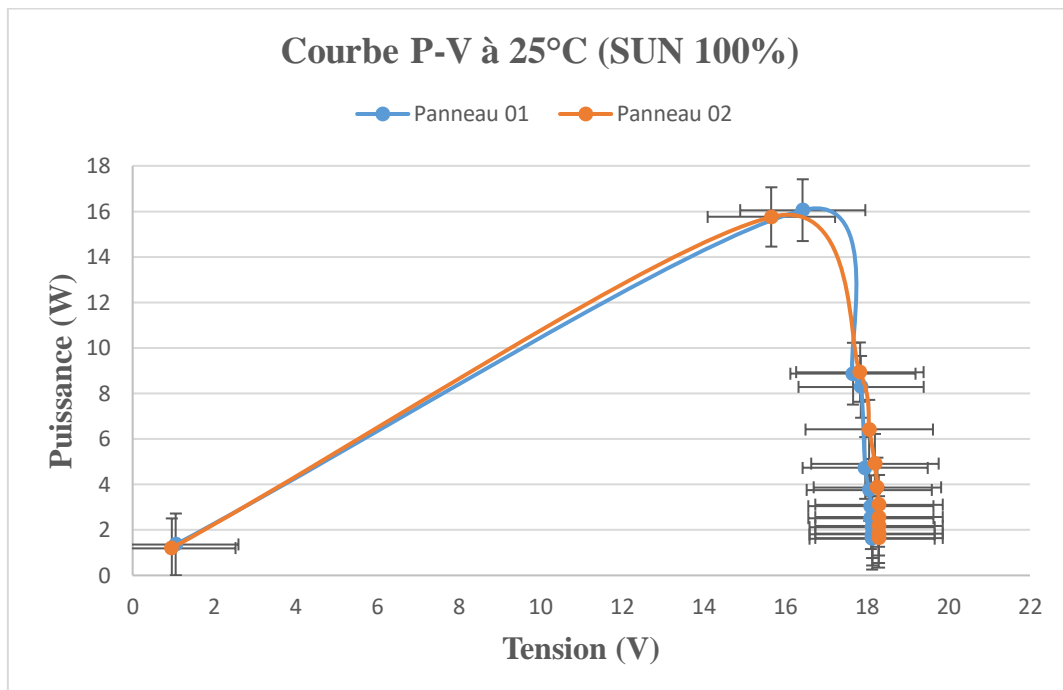


Figure V.4 : Caractéristique puissance-tension des panneaux (1) et (2) avec la condition suivante : Rayonnement solaire 100% (Position 1).

La figure (V.4) illustre la caractéristique de courbe la puissance en fonction tension des deux panneaux 1 et 2 pour un éclairage 100% (position 1) (voir la figure ci-dessus). On voit que les deux panneaux ont les mêmes caractéristiques et qu'il n'y a pas de différence entre leurs courbes. On distingue deux régions : On note premièrement une puissance augmente de 1.3W à 16W dans l'intervalle de tension compris entre 1V et 16,4V jusqu'à atteindre **une valeur maximale (puissance maximale)** à **valeur de tension optimale**. Deuxièmes une chute puissance brusque de 15.9 à 1.6W entre 17V et 18,1V.

La position parfaite du rhéostat pour obtenir la puissance maximale : **Environ 10%**

V.2.1.4.b.2 Rayonnement solaire 80% (Position 2)

V.2.1.4.b.2.1 La courbe de courant- tension de panneau-1 et panneau-2 avec SUN-1 et SUN-2 à la position 2 :80%

Dans ce cas, on diminue l'intensité de rayonnement pour obtenir une valeur environ 80%, position 2. (**Voir la figure V.3**). On adopte les mêmes procédures expérimentales que la position 1 (rayonnement maximal) sauf on réduit l'intensité de rayonnement solaire à 80% (position 2).

Position R (%)	Panneau 01			Panneau 02		
	Imoy (Amp)	Vmoy (Volts)	Wrmoy (w/m ²)	Imoy (Amp)	Vmoy (Volts)	Wrmoy (w/m ²)
0	1,091	0,8	302,1	1,113	0,76	321,7
10	0,932	15,5	302,1	0,932	14,86	321,7
20	0,479	17,4	302,1	0,49	17,33	321,7
30	0,343	17,66	302,1	0,345	17,6	321,7
40	0,261	17,8	302,1	0,261	17,7	321,7
50	0,208	17,93	302,1	0,205	17,83	321,7
60	0,165	17,96	302,1	0,165	17,86	321,7
70	0,139	17,96	302,1	0,137	17,86	321,7
80	0,116	17,96	302,1	0,116	17,86	321,7
90	0,097	17,96	302,1	0,097	17,9	321,7
100	0,087	17,96	302,1	0,087	17,9	321,7

Tableau V.3 : Valeurs moyenne de courant et tension pour les deux panneaux 1 et 2 (pour un rayonnement solaire 80%, SUN-1 et SUN-2 ⇒ position 2 :80 %).

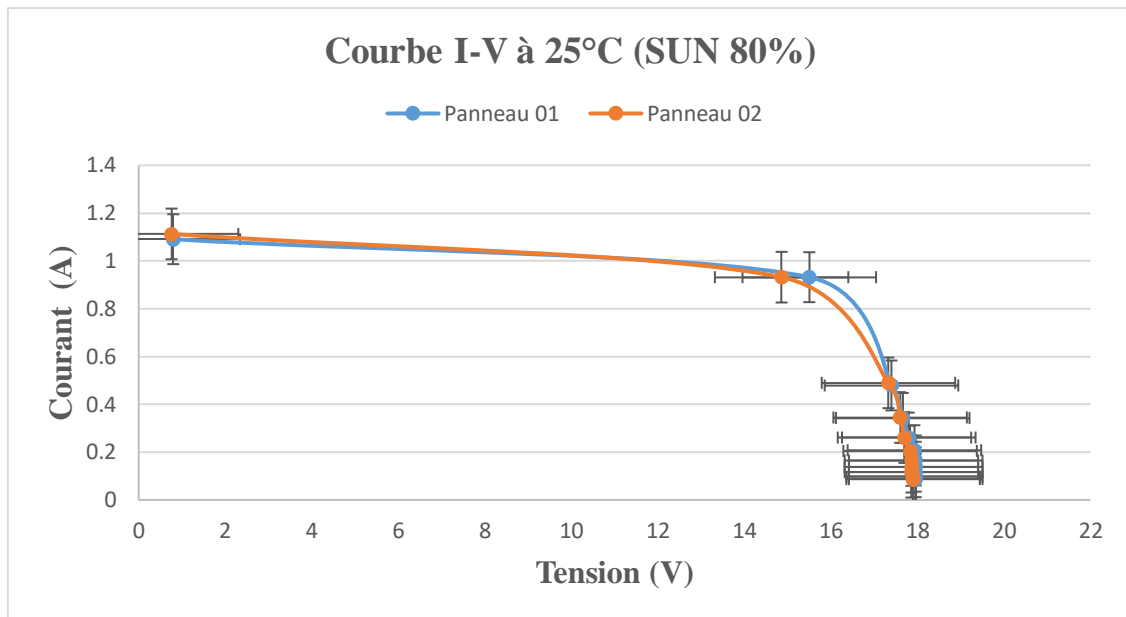


Figure V.5 : Caractéristique courant-tension des panneaux (1) et (2) avec la condition suivante : *Rayonnement solaire 80% (Position 2)*.

La figure (V.5) illustre la caractéristique de courbe (I-V) des deux panneaux 1 et 2 pour un éclairage 80% position 2. On analyse deux régions comme l'expérience précédente (position 1, 100%). Dans ce cas-là, on note premièrement un courant environ constant dans l'intervalle de tension compris entre 0 V et 15,5V. Entre 15,6 V et 18V on constate une chute de courant brusque de 0,9 à 0 A. Deuxièmes, presque même comportement pour les deux panneaux mais avec un abaissement du courant par rapport à la situation précédente **position 1 : 100%**.

Les valeurs extrêmes de la courbe courant-tension (I-V) (pour panneau-1 et panneau-2 ⇒ position 2 : 80 %)(figure V.5). Sont comme suit :

Pour Panneau 1 :

$$I_{cc_{moy}} \text{ (A)} = 1,091 \text{ A} \quad V_{oc_{moy}} \text{ (V)} = 18,1 \text{ V}$$

$$P_{max, idéale} = I_{cc_{moy}} \cdot V_{oc_{moy}} = 19,747 \text{ W}$$

- **Déterminer le point de puissance maximale PPmax**

$$I_{opt} \text{ (A)} = 0,91 \text{ A}$$

$$V_{opt} \text{ (V)} = 15,9 \text{ V}$$

$$P_{max} = I_{opt} \cdot V_{opt} = 14,469 \text{ W}$$

Pour Panneau 2 :

$$I_{cc_{moy}} \text{ (A)} = 1,113 \text{ A} \quad V_{oc_{moy}} \text{ (V)} = 18 \text{ V}$$

$$P_{max,idéale} = I_{cc_{moy}} \cdot V_{oc_{moy}} = 20,034 \text{ W}$$

- **Déterminer le point de puissance maximale PPmax**

$$I_{opt} \text{ (A)} = 0,92 \text{ A}$$

$$V_{opt} \text{ (V)} = 15,2 \text{ V}$$

$$P_{max} = I_{opt} \cdot V_{opt} = 13,984 \text{ W}$$

V.2.1.4.b.2.2 La courbe de la puissance en fonction de la tension pour un Rayonnement solaire 80% ⇒ position 2 : 80 %

Les valeurs de puissance et de la tension dans le tableau (V.4) suivant :

Position R (%)	SUN 80% (Position 2)					
	Panneau 01			Panneau 02		
	Pmoy (W)	Vmoy (Volts)	Wrmoy (w/m ²)	Pmoy (W)	Vmoy (Volts)	Wrmoy (w/m ²)
0	0,873	0,8	319,2	0,846	0,76	321,7
10	14,446	15,5	319,2	13,85	14,86	321,7
20	8,335	17,4	319,2	8,492	17,33	321,7
30	6,057	17,66	319,2	6,072	17,6	321,7
40	4,646	17,8	319,2	4,62	17,7	321,7
50	3,729	17,93	319,2	3,655	17,83	321,7
60	2,963	17,96	319,2	2,947	17,86	321,7
70	2,496	17,96	319,2	2,447	17,86	321,7
80	2,083	17,96	319,2	2,072	17,86	321,7
90	1,742	17,96	319,2	1,736	17,9	321,7
100	1,563	17,96	319,2	1,557	17,9	321,7

Tableau V.4 : Valeurs moyenne de puissance et tension pour les deux panneaux 1 et 2 (pour un rayonnement solaire, SUN-1 et SUN-2 ⇒ position 2 : 80 %).

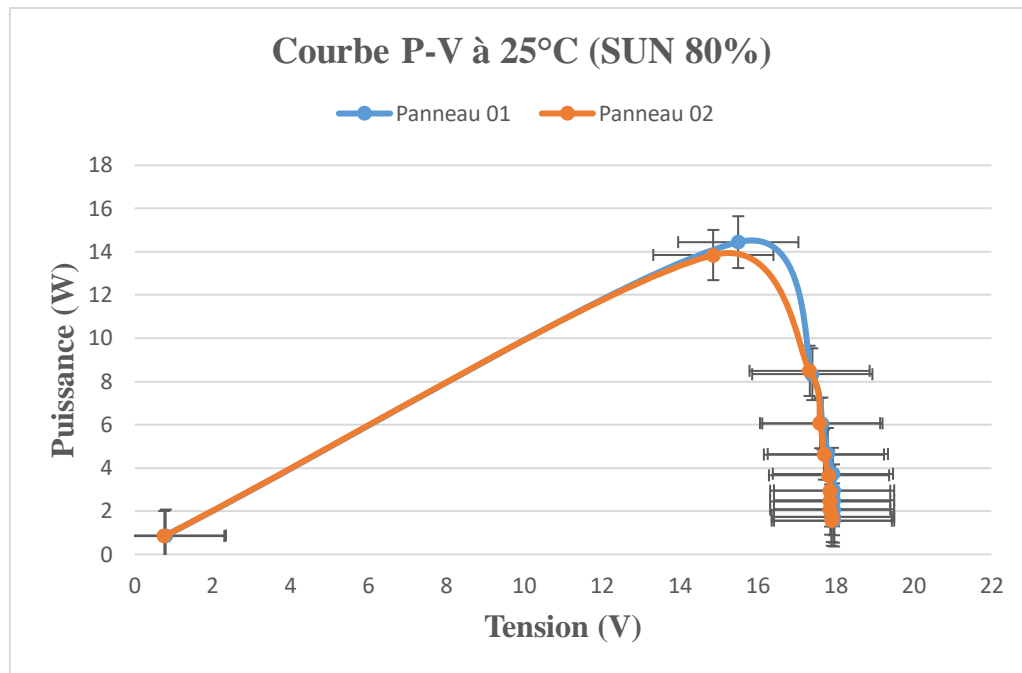


Figure V.6 : Caractéristique puissance-tension des panneaux (1) et (2) avec la condition suivante : *Rayonnement solaire 80% (Position 2)*.

On constate même comportement pour les deux panneaux par rapport aux situations précédentes position 1 (100%).

La figure (V.6) représente le graphique de la courbe résultante puissance-tension des panneaux (1) et (2) avec éclairage 80% (position 2). On remarque sur la courbe ci-dessus (figure V.6), il y'a deux régions : [Augmentation de puissance de 0,8W à 14,4W entre 0,8V et 15,5V pour le panneau 1 et Augmentation de puissance de 0,8W à 13,8W entre 0,7V et 14,8V pour le panneau 2] jusqu'à atteindre **une valeur maximale (puissance maximale)** à une **valeur de tension optimale** (La raison de la différence de puissance et de puissance maximale est la différence d'intensité de rayonnement pour les deux panneaux). Ensuite, il décroissante de puissance jusqu'à 1,5W entre 16,1V et 17,9V.

La position parfaite du rhéostat pour obtenir la puissance maximale : **Environ 10%**

V.2.1.4.b.3 Rayonnement solaire 60% (Position 3)

V.2.1.4.b.3.1 La courbe de courant- tension de panneau-1 et panneau-2 avec SUN-1 et SUN-2 à la position 3 :60%

Dans cette expérience, on réduit l'intensité de rayonnement pour obtenir une valeur environ 60%, position 3. (**Voir figure V.3**). Les mêmes procédures expérimentales que la position 1 et 2 mais cette fois ci ; on fixe l'intensité a 60 % (position 3).

Position R (%)	SUN 60% (Position 3)					
	Panneau 01			Panneau 02		
	Imoy (Amp)	Vmoy (Volts)	Wrmoy (w/m ²)	Imoy (Amp)	Vmoy (Volts)	Wrmoy (w/m ²)
0	0,757	0,27	189	0,685	0,2	190,8
10	0,695	11,16	189	0,637	9,9	190,8
20	0,458	16,4	189	0,454	16,06	190,8
30	0,33	16,96	189	0,33	16,83	190,8
40	0,253	17,16	189	0,25	17,13	190,8
50	0,198	17,3	189	0,197	17,3	190,8
60	0,159	17,36	189	0,16	17,36	190,8
70	0,132	17,43	189	0,131	17,4	190,8
80	0,111	17,5	189	0,111	17,4	190,8
90	0,094	17,53	189	0,094	17,5	190,8
100	0,084	17,56	189	0,084	17,5	190,8

Tableau V.5 : Valeurs moyenne de courant et tension pour les deux panneaux 1 et 2 (pour un rayonnement solaire 60%, SUN-1 et SUN-2 ⇒ position 3 :60 %).

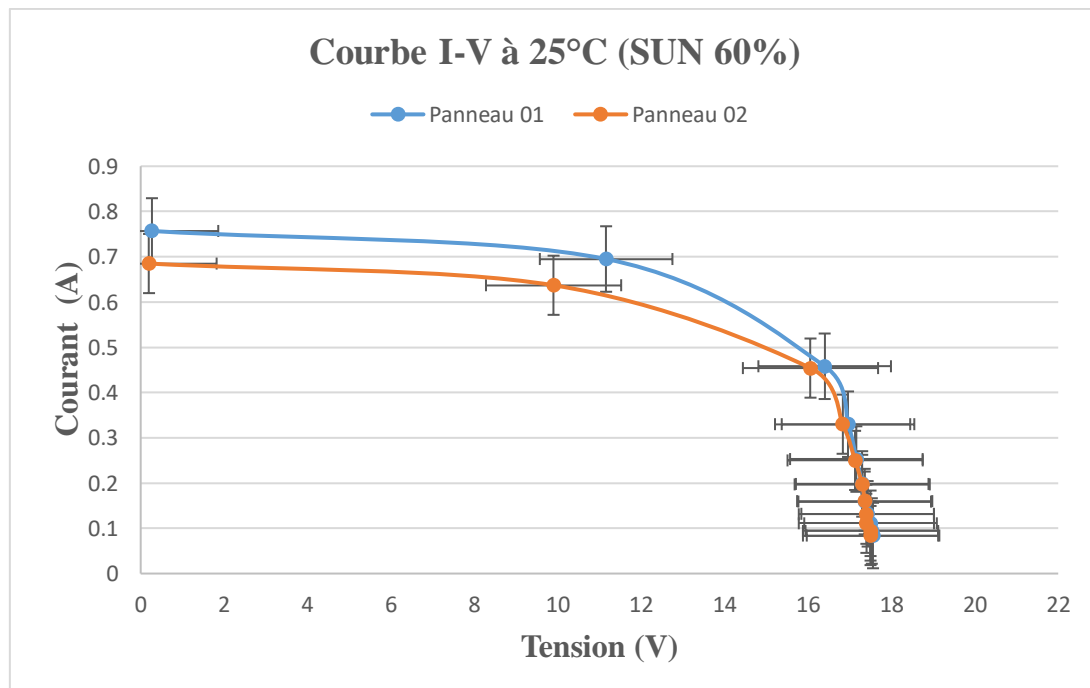


Figure V.7 : Caractéristique courant-tension des panneaux (1) et (2) avec la condition suivante : Rayonnement solaire 60% (Position 3).

Il est clair d'après la figure (V.7), qu'on a obtenu la même allure/ou comportement pour les deux panneaux par rapport aux situations précédentes **position 1 et 2 : 100, 80%**.

La figure (V.7) représente le graphique de la courbe résultante courant-tension des panneaux 1 et 2 avec la condition suivante PANNAU-1 et PANNEAU-2 \Rightarrow position 3 ou l'intensité de rayonnement est environ 60 %. On remarque sur la courbe ci-dessus (figure V.7), l'apparition d'un décalage du courant approximativement 0.5 A entre 0 V et 16 V. **Pour le panneau 1**, on constate courant constant environ 0.75 A dans l'intervalle de tension compris entre 0 V et 11,17 V. Entre 11,18 V et 18 V une chute de courant brusque de 0,7 à 0 A. Concernant **le panneau 2**, le courant est presque constant avec une valeur de 0.64 A dans l'intervalle de tension compris entre 0 V et 10.4 V. Entre 10,45 V et 18 V une chute de courant abrupt de 0,6 à 0 A.

Les valeurs extrêmes de la courbe courant-tension (I-V) (pour panneau-1 et panneau-2 \Rightarrow position 2 : 60 % (figure V.7). sont comme suit :

Pour Panneau 1 :

$$I_{cc_{moy}} \text{ (A)} = 0,757 \text{ A} \quad V_{oc_{moy}} \text{ (V)} = 17,7 \text{ V}$$

$$P_{max,idéale} = I_{cc_{moy}} \cdot V_{oc_{moy}} = 13,399 \text{ W}$$

- **Déterminer le point de puissance maximale PPmax**

$$I_{opt} \text{ (A)} = 0,62 \text{ A}$$

$$V_{opt} \text{ (V)} = 13,5 \text{ V}$$

$$P_{max} = I_{opt} \cdot V_{opt} = 8,37 \text{ W}$$

Pour Panneau 2 :

$$I_{cc_{moy}} \text{ (A)} = 0,685 \text{ A} \quad V_{oc_{moy}} \text{ (V)} = 17,8 \text{ V}$$

$$P_{max,idéale} = I_{cc_{moy}} \cdot V_{oc_{moy}} = 12,193 \text{ W}$$

- **Déterminer le point de puissance maximale PPmax**

$$I_{opt} \text{ (A)} = 0,515 \text{ A}$$

$$V_{opt} \text{ (V)} = 14,5 \text{ V}$$

$$P_{max} = I_{opt} \cdot V_{opt} = 7,468 \text{ W}$$

V.2.1.4.b.3.2 La courbe de la puissance en fonction de la tension pour un rayonnement solaire 60%⇒ position 3 :60 %

Les valeurs de puissance et de la tension dans le tableau (V.6) suivant :

Position R (%)	SUN 60% (Position 3)					
	Panneau 01			Panneau 02		
	Pmoy (W)	Vmoy (Volts)	Wrmoy (w/m ²)	Pmoy (W)	Vmoy (Volts)	Wrmoy (w/m ²)
0	0,204	0,27	189	0,137	0,2	190,8
10	7,756	11,16	189	6,306	9,9	190,8
20	7,511	16,4	189	7,291	16,06	190,8
30	5,597	16,96	189	5,554	16,83	190,8
40	4,341	17,16	189	4,283	17,13	190,8
50	3,425	17,3	189	3,408	17,3	190,8
60	2,76	17,36	189	2,778	17,36	190,8
70	2,301	17,43	189	2,279	17,4	190,8
80	1,943	17,5	189	1,931	17,4	190,8
90	1,648	17,53	189	1,645	17,5	190,8
100	1,475	17,56	189	1,47	17,5	190,8

Tableau V.6 : Valeurs moyenne de puissance et tension pour les deux panneaux 1 et 2 (pour un rayonnement solaire, SUN-1 et SUN-2⇒ position 3 :60 %).

On constate même comportement pour les deux panneaux par rapport aux situations précédentes position 1, 2 : 100%, 80%

Selon la courbe puissance-tension pour les deux panneaux 1 et 2. On peut observer dans la figure (V.8) une dégradation importante de la valeur de la puissance pour les deux panneaux après un l'éclairement environ 60% (position 3). Dans la courbe ci-dessous (figure V.8), on analyse deux régions : On note premièrement une puissance augmente de 0.2W à 7.7W dans l'intervalle de tension compris entre 0.2V et 11.1V (panneau 1) et 0.13W à 6.3W entre 0.2V et 9.9V (panneau 2) jusqu'à atteindre **une valeur maximale (puissance maximale) à valeur de tension optimale**. Une chute puissance brusque de 7.5W à 1.47W entre 16.4V et 17.5V (panneau 1), et diminution de puissance de 6.3 à 1.47W entre 16V et 17.5V pour panneau 2.

La position parfaite du rhéostat pour obtenir la puissance maximale : **Environ 10% - 20%**.

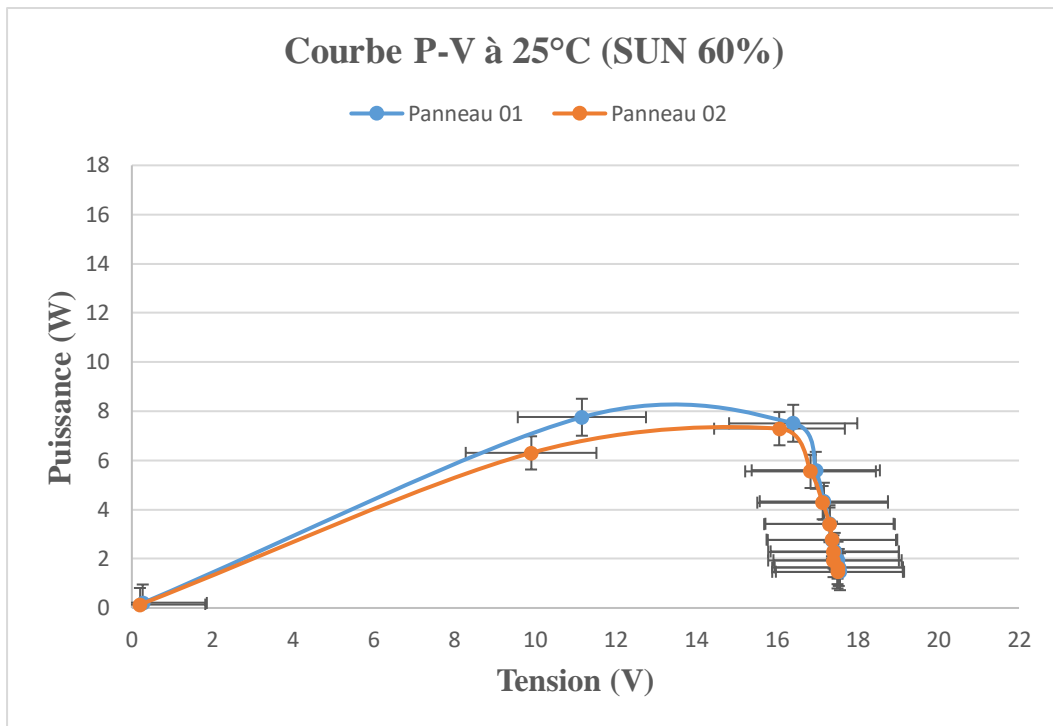


Figure V.8 : Caractéristique puissance-tension des panneaux (1) et (2) avec la condition suivante : *Rayonnement solaire 60% (Position 3)*.

V.2.1.4.b.4 Rayonnement solaire 40% (Position 4)

V.2.1.4.b.4.1 La courbe de courant- tension de panneau-1 et panneau-2 avec SUN-1 et SUN-2 à la position 4 :40%

Pour réaliser cette expérience, on fixe l'intensité de rayonnement à une valeur minimale environ 40 % position 4. Les paramètres sous un éclairage minimal des deux panneaux sont donnés dans le tableau (V.7).

Position R (%)	SUN 40% (Position 4)					
	Panneau 01			Panneau 02		
	Imoy (Amp)	Vmoy (Volts)	Wrmoy (w/m ²)	Imoy (Amp)	Vmoy (Volts)	Wrmoy (w/m ²)
0	0,23	0	63,7	0,216	0	59,8
10	0,225	3,2	63,7	0,201	2,9	59,8
20	0,212	7,7	63,7	0,197	6,7	59,8
30	0,2	10,6	63,7	0,173	9,1	59,8
40	0,175	12,7	63,7	0,159	11,3	59,8
50	0,149	13,9	63,7	0,138	12,7	59,8
60	0,124	14,4	63,7	0,118	13,9	59,8
70	0,102	14,8	63,7	0,101	14,5	59,8
80	0,084	15	63,7	0,084	14,8	59,8
90	0,072	15,2	63,7	0,07	15	59,8
100	0,064	15,3	63,7	0,062	15	59,8

Tableau V.7 : Valeurs moyenne de courant et tension pour les deux panneaux 1 et 2 (pour un rayonnement solaire 40%, SUN-1 et SUN-2 \Rightarrow position 4 :40 %).

On constate le même comportement pour les deux panneaux par rapport aux situations précédentes **position 1, 2 et 3: 100, 80 et 60%, respectivement**. On peut observer dans la figure (V.9) une dégradation importante de la valeur du courant pour les deux panneaux après un l'éclairement faible environ 40 %. Dans la courbe ci-dessous (figure V.9), l'apparition d'un décalage du courant approximativement 0.15 A entre 0 V et 14 V. **Pour le panneau 1**, on constate courant constant environ 0.22 A dans l'intervalle de tension compris entre 0 V et 8,2 V. Entre 8,24 V et 15,4 V une chute de courant brusque de 0,11 à 0 A. **Pour le panneau 2**, le courant est presque constant avec une valeur de 0.20 A dans l'intervalle de tension compris entre 0 V et 6,3 V. Entre 6,33 V et 15,4 V une chute de courant abrupt de 0,1 à 0 A.

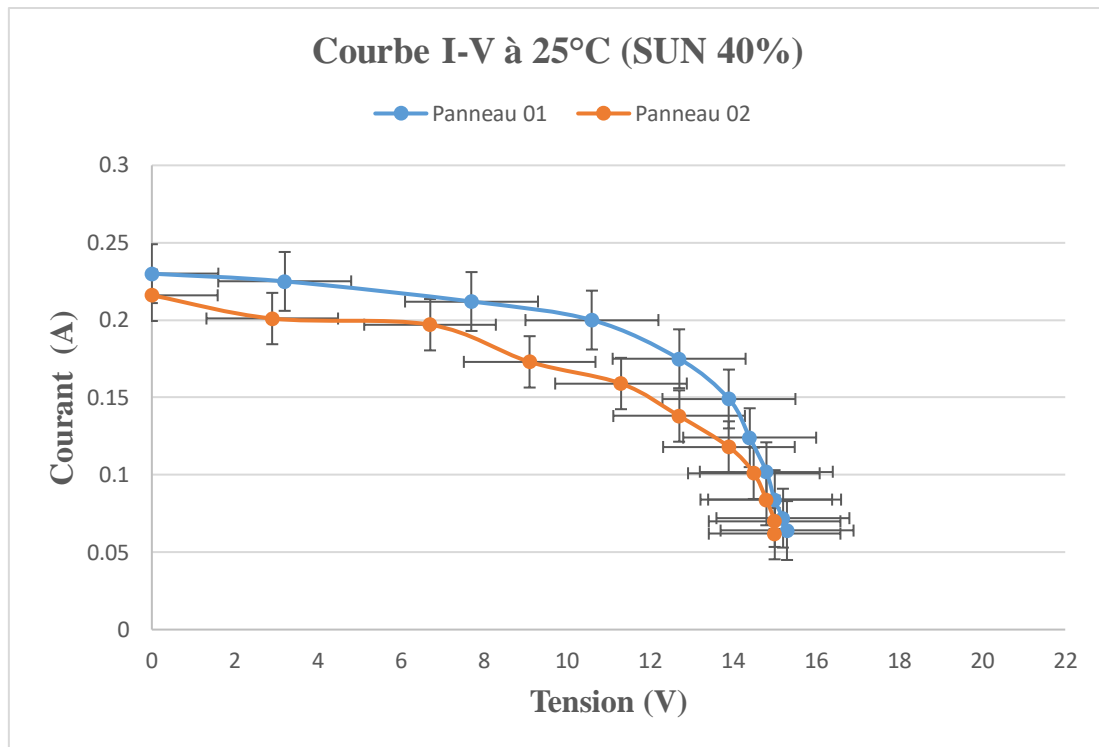


Figure V.9 : Caractéristique courant-tension des panneaux (1) et (2) avec la condition suivante : Rayonnement solaire 40% (Position 4).

Les valeurs extrêmes de la courbe courant-tension (I-V) (pour panneau-1 et panneau-2 ⇒ position 4 : 40 % (figure V.9). sont comme suit :

Pour Panneau 1 :

$$I_{cc_{moy}} \text{ (A)} = 0,23 \text{ A} \quad V_{oc_{moy}} \text{ (V)} = 16,2 \text{ V}$$

$$P_{max, idéale} = I_{cc_{moy}} \cdot V_{oc_{moy}} = 3,726 \text{ W}$$

- **Déterminer le point de puissance maximale PPmax**

$$I_{opt} \text{ (A)} = 0,18 \text{ A}$$

$$V_{opt} \text{ (V)} = 112,8 \text{ V}$$

$$P_{max} = I_{opt} \cdot V_{opt} = 2,304 \text{ W}$$

Pour Panneau 2 :

$$I_{cc_{moy}} \text{ (A)} = 0,216 \text{ A} \quad V_{oc_{moy}} \text{ (V)} = 16,2 \text{ V}$$

$$P_{max, idéale} = I_{cc_{moy}} \cdot V_{oc_{moy}} = 2,21 W$$

- **Déterminer le point de puissance maximale PPmax**

$$I_{opt} (A) = 0,165 A$$

$$V_{opt} (V) = 11,8 V$$

$$P_{max} = I_{opt} \cdot V_{opt} = 1,947 W$$

V.2.1.4.b.4.2 La courbe de la puissance en fonction de la tension pour un rayonnement solaire 40% ⇒ position 4 :40 %

Les valeurs de puissance et de la tension dans le tableau (V.8) suivant :

Position R (%)	SUN 40% (Position 4)					
	Panneau 01			Panneau 02		
	Pmoy (W)	Vmoy (Volts)	Wrmoy (w/m ²)	Pmoy (W)	Vmoy (Volts)	Wrmoy (w/m ²)
0	0	0	63,7	0	0	59,8
10	0,72	3,2	63,7	0,583	2,9	59,8
20	1,632	7,7	63,7	1,32	6,7	59,8
30	2,12	10,6	63,7	1,574	9,1	59,8
40	2,223	12,7	63,7	1,797	11,3	59,8
50	2,071	13,9	63,7	1,753	12,7	59,8
60	1,786	14,4	63,7	1,64	13,9	59,8
70	1,51	14,8	63,7	1,465	14,5	59,8
80	1,26	15	63,7	1,243	14,8	59,8
90	1,094	15,2	63,7	1,05	15	59,8
100	0,979	15,3	63,7	0,93	15	59,8

Tableau V.8 : Valeurs moyenne de puissance et tension pour les deux panneaux 1 et 2 (pour un rayonnement solaire maximal, SUN-1 et SUN-2 ⇒ position 4 :40 %).

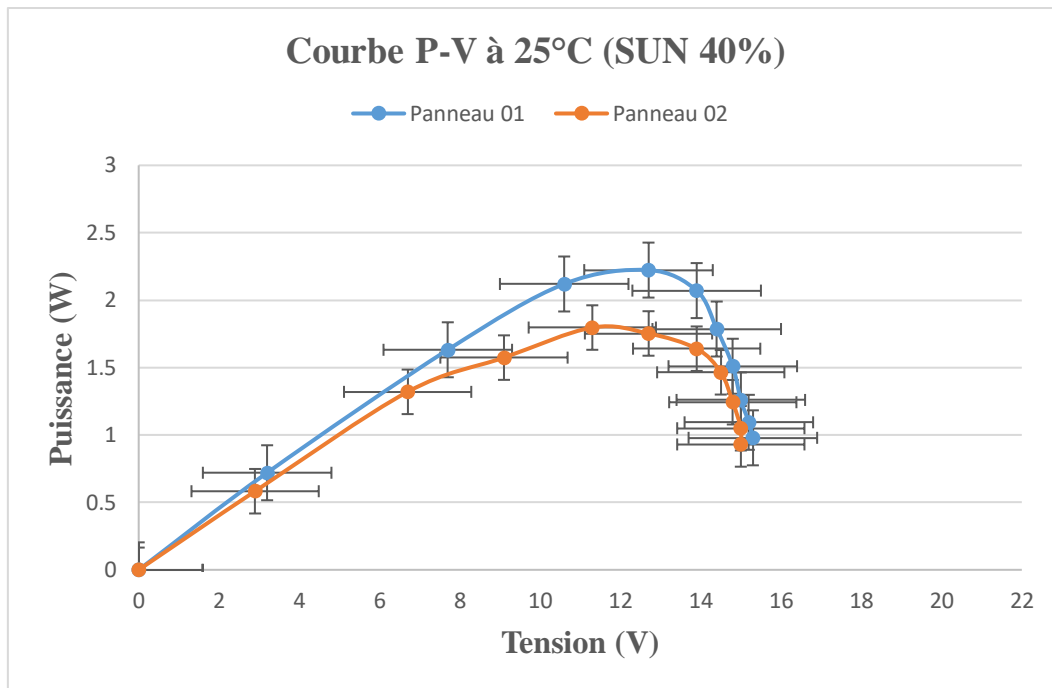


Figure V.10 : Caractéristique puissance-tension des panneaux (1) et (2) avec la condition suivante : *Rayonnement solaire 40% (Position 4)*.

Selon le diagramme caractéristique de la puissance-tension des panneaux 1 et 2 (voir figure ci-dessus V.10), il y a deux régions : la valeur de puissance commence à augmenter de 0W à 2,2W entre 0V et 12.6V pour le panneau (1) et 0W à 1.79W entre 0V et 11.4V pour le panneau (2) jusqu'à atteindre son **pic (puissance maximale)** puis la puissance diminue progressivement de 2W à 0,97W entre 13.9V et 15.3V (panneau 1) et 1.75W à 0.93W entre 12.7V et 15V pour panneau 2.

La position parfaite du rhéostat pour obtenir la puissance maximale : **Environ 40 %**

Remarque

La légère différence dans les courbes I-V et P-V et les valeurs entre les deux panneaux est due à la variation de l'intensité du rayonnement solaire (une différence dans l'intensité des lumières du simulateur solaire), comme le montre le capteur de rayonnement.

V.2.1.4.b.5 Les courbe de courant- tension et puissance-tension de panneau-1 et panneau-2 pour différents niveaux d'éclairément

D'après les données précédentes, on remarque qu'il y a une légère différence entre les deux panneaux, en raison de la différence d'intensité de rayonnement du simulateur solaire. Cela

signifie que les deux panneaux ont les mêmes caractéristiques et puissance. À partir de cela, on étudie un panneau (\Rightarrow panneau 1)

- **Pour panneau 1 :**

Pour montrer et comparer l'influence d'un changement d'éclairement on regroupe les caractéristiques courant-tension et puissance-tension pour les quatre intensités de rayonnement 100, 80, 60 et 40 % dans la figure (V.11).

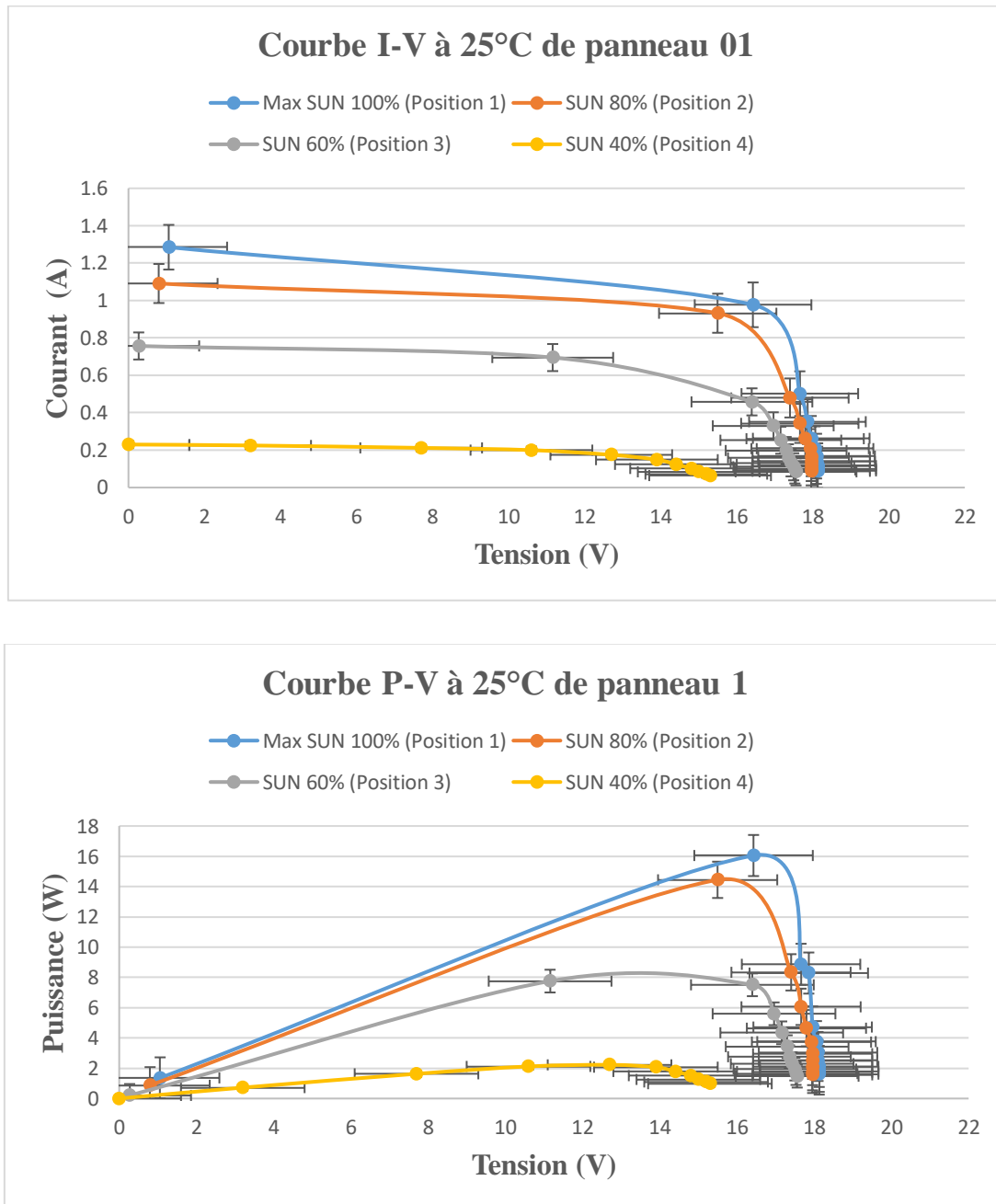


Figure V.11 : Evolution de la caractéristique (I-V) et (P-V) du **panneau 1** pour différents niveaux d'irradiation (100% - 80% - 60% - 40%) à température constante $T=25^{\circ}\text{C}$.

Les caractéristiques des figures (V.11) montrent bien la variation du courant de panneau solaire ainsi que de la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairement. On peut voir aussi sur le graphique, l'existence de maximum sur les courbes de puissance. Ces points correspondent aux points de puissances maximales lorsque l'éclairement varie pour une température donnée. On peut voir que la valeur de tension optimale dans la courbe (I-V) correspond à la courbe (P-V) au point de puissance maximale, pour chaque niveau de rayonnement.

On remarque dans les deux graphiques de figure (V.11) que le courant optimal est très sensible à l'éclairement. Par contre la tension optimale varie très peu avec l'éclairement.

En outre, rhéostat joue un rôle dans l'ajustement de l'efficacité de panneaux (modifier le courant de court-circuit I_{cc}). On peut voir que chaque niveau d'éclairement il y'a une position parfaite du rhéostat pour obtenue une meilleur haute puissance maximale.

V.2.1.4.c Le point de puissance maximal PP_{max} de chaque panneau pour chaque niveau d'éclairement

Dans le tableau ci-dessous (V.9), il y a les valeurs de courant optimale et tension optimale qui détermine le point de puissance maximum :

SUN (%)	Panneau 01			Panneau 02		
	Iopt (Amp)	Vopt (Volts)	Wr moy (w/m ²)	Iopt (Amp)	Vopt (Volts)	Wr moy (w/m ²)
100	0,97	16,6	345,9	0,988	16	354
80	0,91	15,9	319,2	0,92	15,2	321,7
60	0,62	13,5	189	0,515	14,5	190,8
40	0,18	12,8	63,7	0,165	11,8	59,8

Tableau V.9 : Valeurs de courant optimale et tension optimale pour les deux panneaux 1 et 2 (pour différents niveaux d'irradiation).

➔ Les valeurs de puissance maximale

Dans ce tableau (V.10) les valeurs de puissance maximale :

$$P_{max} = I_{opt} \cdot V_{opt}$$

SUN (%)	Panneau 01		Panneau 02	
	Pmax (W)	Wr moy (w/m ²)	Pmax (W)	Wr moy (w/m ²)
100	16,102	345,9	15,808	354
80	14,469	319,2	13,984	321,7
60	8,37	189	7,468	190,8
40	2,304	63,7	1,947	59,8

Tableau V.10 : Valeurs de puissance maximale pour les deux panneaux 1 et 2 (pour différents niveaux d'irradiation).

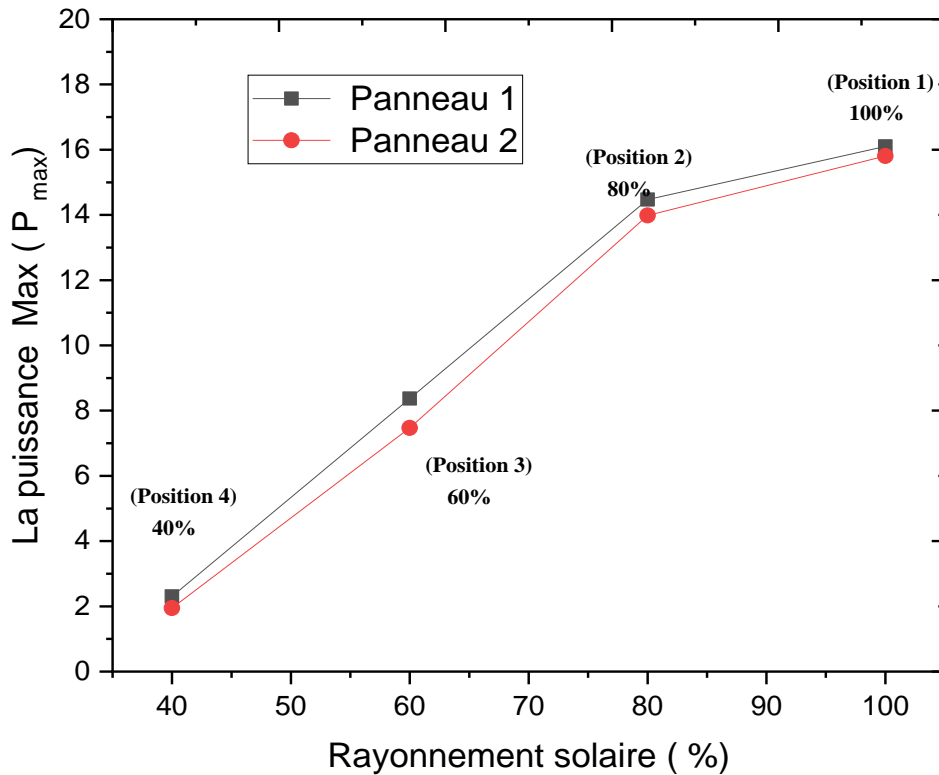


Figure V.12 : Variation de la puissance maximale en fonction de l'intensité de rayonnement.

Après avoir déterminé les valeurs de la puissance maximale pour chaque panneau 1 et 2, Nous avons tracé puissance maximale en fonction de l'intensité de rayonnement figure (V.12) pour montre s'il y a une différence entre les deux panneaux. Les résultats expérimentaux

montrent une similarité entre les deux panneaux. On note également que la valeur de la puissance maximale diminue que l'intensité du rayonnement solaire diminue.

V.2.1.4.d Le facteur de remplissage (Facteur de forme) de chaque panneau avec le rayonnement solaire

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{oc}} = \frac{I_{opt} \cdot V_{opt}}{I_{cc} \cdot V_{oc}}$$

a) Rayonnement solaire 100% (Position 1)

➤ Panneau 01

$$FF = \frac{16,102}{1,285 * 18,4} = \frac{0,97 * 16,6}{1,285 * 18,4} = 0,681$$

➤ Panneau 02

$$FF = \frac{15,808}{1,251 * 18,5} = \frac{0,988 * 16}{1,251 * 18,5} = 0,683$$

b) Rayonnement solaire 80% (Position 2)

➤ Panneau 01

$$FF = \frac{14,469}{1,091 * 18,1} = \frac{0,91 * 15,9}{1,091 * 18,1} = 0,733$$

➤ Panneau 02

$$FF = \frac{13,984}{1,113 * 18} = \frac{0,92 * 15,2}{1,113 * 18} = 0,698$$

c) Rayonnement solaire 60% (Position 3)

➤ Panneau 01

$$FF = \frac{8,37}{0,757 * 17,7} = \frac{0,62 * 13,5}{0,757 * 17,7} = 0,625$$

➤ Panneau 02

$$FF = \frac{7,468}{0,685 * 17,8} = \frac{0,515 * 14,5}{0,685 * 17,8} = 0,612$$

d) Rayonnement solaire 40% (Position 4)

➤ Panneau 01

$$FF = \frac{2,304}{0,23 * 16,2} = \frac{0,18 * 12,8}{0,23 * 16,2} = 0,618$$

➤ Panneau 02

$$FF = \frac{1,947}{0,216 * 16,2} = \frac{0,165 * 11,8}{0,216 * 16,2} = 0,881$$

V.2.1.4.e Le rendement de chaque panneau avec le rayonnement solaire

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_i} = FF \frac{I_{cc} \cdot V_{oc}}{P_i}$$

$$P_i = \text{Eclairement} * \text{Surface}$$

$$\% \text{ rendemant} = \text{rendement} * 100$$

a) Rayonnement solaire 100% (Position 1)

➤ Panneau 01

$$\eta = \frac{16,102}{345,9 * 0,51} = 0,681 \frac{1,285 * 18,4}{345,9 * 0,51} = 0,091$$

$$\% \text{ rendemant} = 0,091 * 100 = 9,1\%$$

➤ Panneau 02

$$\eta = \frac{15,808}{354 * 0,51} = 0,683 \frac{1,251 * 18,5}{354 * 0,51} = 0,088$$

$$\% \text{ rendemant} = 0,088 * 100 = 8,8\%$$

b) Rayonnement solaire 80% (Position 2)

➤ Panneau 01

$$\eta = \frac{14,469}{319,2 * 0,51} = 0,733 \frac{1,091 * 18,1}{302,1 * 0,51} = 0,089$$

$$\% \text{ rendemant} = 0,089 * 100 = 8,9\%$$

➤ Panneau 02

$$\eta = \frac{13,984}{321,7 * 0,51} = 0,698 \frac{1,113 * 18}{321,7 * 0,51} = 0,085$$

$$\% \text{ rendemant} = 0,085 * 100 = 8,5\%$$

c) Rayonnement solaire 60% (Position 3)

➤ Panneau 01

$$\eta = \frac{8,37}{189 * 0,51} = 0,625 \frac{0,757 * 17,7}{189 * 0,51} = 0,087$$

% rendement = 0,121 * 100 = 8,7%

➤ Panneau 02

$$\eta = \frac{7,468}{190,8 * 0,51} = 0,612 \frac{0,685 * 17,8}{190,8 * 0,51} = 0,077$$

% rendement = 0,077 * 100 = 7,7%

d) Rayonnement solaire 40% (Position 4)

➤ Panneau 01

$$\eta = \frac{2,304}{63,7 * 0,51} = 0,618 \frac{0,23 * 16,2}{63,7 * 0,51} = 0,071$$

% rendement = 0,071 * 100 = 7,1%

➤ Panneau 02

$$\eta = \frac{1,947}{59,8 * 0,51} = 0,881 \frac{0,216 * 16,2}{59,8 * 0,51} = 0,064$$

% rendement = 0,064 * 100 = 6,4%

Les paramètres du panneau solaire (fournis par le fabricant) sont dans les conditions suivantes : rayonnement de 0.8 KW / m², température ambiante de 20°C et vitesse du vent de 1 m/s, les paramètres suivants :

Caractéristiques électroniques	A-66P
Puissance (W in test-+8%)	66W
Nombre de cellules en séries	36
Courant au point de puissance maximal (Iopt)	3.7A
Tension au point de puissance maximal (Vopt)	17.80V
Courant de courts circuits (Icc)	4.05A
Tension à vide ou circuit ouvert (Voc)	22.25V
Tension maximal du système	700 V

Caractéristique physiques	
Dimensions (mm)	778 × 659 × 35
Poids (Aprox)	6.20 Kg

Tableau V.11 : *Caractéristique du panneau solaire (fournis par le fabricant).*

- **Déterminez le facteur de remplissage (Facteur de forme) de panneau solaire (fournis par le fabricant) avec le rayonnement solaire 0.8 KW/m²**

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{oc}} = \frac{I_{opt} \cdot V_{opt}}{I_{cc} \cdot V_{oc}}$$

$$FF = \frac{65,86}{4,05 * 22,25} = \frac{3,7 * 17,8}{4,05 * 22,25} = 0,731$$

- **Déterminez l'efficacité maximale (rendement) de panneau solaire (fournis par le fabricant) avec le rayonnement solaire 0.8 KW/m²**

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_i} = FF \frac{I_{cc} \cdot V_{oc}}{P_i}$$

$$P_i = \text{Eclairnement} * \text{Surface}$$

$$\% \text{ rendemant} = \text{rendement} * 100$$

$$\eta = \frac{65,86}{800 * 0,51} = 0,731 \frac{4,05 * 22,25}{800 * 0,51} = 0,161$$

$$\% \text{ rendemant} = 0,161 * 100 = 16,1\%$$

V.2.1.4.f Comparaison de rendement fournis par le fabricant et le rendement obtenue par notre pratique

Dans le tableau ci-dessous (V.12), il y a les valeurs de facteur de remplissage (Facteur de forme) et rendement de chaque panneau avec le rayonnement solaire :

	panneau solaire (fournis par le fabricant)	Panneau 01				Panneau 02			
Eclairage (W/m ²)	800 W/m ²	345,9 W/m ² (100%)	319,2 W/m ² (80%)	189 W/m ² (60%)	63,7 W/m ² (40%)	354 W/m ² (100%)	321,7 W/m ² (80%)	190,8 W/m ² (60%)	59,8 W/m ² (40%)
Facteur de forme FF	0,731	0,681	0,733	0,625	0,618	0,683	0,698	0,612	0,881
Rendement η	0,161	0,091	0,89	0,087	0,071	0,088	0,085	0,077	0,064
Rendement η %	16,1	9,1	8,9	8,7	7,1	8,8	8,5	7,7	6,4

Tableau V.12 : Valeurs de rendement et FF pour panneau (fournis par le fabricant) et les deux panneaux (1) et (2) pour déférente éclairement.

On remarque une fluctuation des valeurs de FF (l'augmentation et une diminution) en fonction du rayonnement, due aux différentes valeurs de Pmax, Icc et Voc pour déterminé la qualité d'un panneau. On constate que le pourcentage d'efficacité maximale (rendement) diminue lorsque en diminuant l'éclairement.

Une comparaison entre notre résultat et les donnes fournis par le fabricant (voir tableau 11), on constate qu'on a presque les mêmes caractéristiques (I-V), (P-V) et efficacité, mais seulement le rendement de chacun d'entre eux varie en fonction d'intensité du rayonnement solaire, et donc la raison de cette variation de puissance et d'efficacité maximale (rendement) produite par les panneaux est à cause de niveau d'irradiation.

La valeur d'efficacité de la cellule peut être augmentée en fonction de l'augmentant la tension de circuit ouvert Voc, le facteur de remplissage et le courant de court-circuit.

V.2.1.5 Conclusion pour l'exercice 1

- Le courant Icc Varie directement avec le rayonnement lumineux (la relation est Proportionnelle), la tension restant relativement constante \Rightarrow le courant optimal est très sensible à l'éclairement. Par contre la tension optimale varie très peu avec l'éclairement.

- L'intensité du rayonnement est responsable de l'efficacité de puissance produite par les panneaux (l'influence d'éclairement).
- Si l'intensité rayonnement solaire est trop faible, la valeur maximale de son puissance correspondante diminuera, ainsi que la position de rhéostat changé.
- Pour chaque **niveau d'éclairage**, il y a une **position idéale du rhéostat** pour obtenir **une valeur maximale de puissance**
- Pour augmenter le rendement, on augmente l'intensité de courant \Rightarrow panneau en parallèle (Le rendement varie directement avec l'éclairement)
- Exercice 1 donne une carte d'identité de chaque panneau (1 et 2).
- Les panneaux utilisés ont les mêmes caractéristiques que les panneaux (fournis par le fabricant).

Exercice 2

V.2.2 Détermination l'efficacité (puissance maximal) et la relation entre la puissance générée et la puissance du rayonnement solaire

V.2.2.1 Objectif

Le but de cet exercice pratique est premièrement d'obtenir le point de performance maximale (P_{max}) des panneaux solaires à différents niveaux de rayonnement solaire (Rhéostat on position idéale). Et deuxièmement d'étudier l'efficacité des panneaux solaires, en fonction du rayonnement solaire, lorsqu'ils fournissent une charge constante qui ne coïncide pas avec le point P_{max} (Position rhéostat n'est pas parfaite).

V.2.2.2 Détermination l'efficacité (puissance maximal)

V.2.2.2.a Matériel nécessaire

- Unité solaire photovoltaïque. (Plus de détails dans le chapitre III et IV)

V.2.2.2.b Procédure pratique

- Les mêmes étapes du premier exercice, mais lentement modifiez la position du rhéostat de charge de 100% à 0%, en recherchant le point approximatif où la valeur de puissance

la plus élevée ($V \times I$) est obtenue (ou nous pouvons suivre la courbe IV et déterminer le point maximum à partir de la courbe).

- Notez les valeurs mesurées de la puissance maximale (P_{max}) et du rayonnement SRL (W_r) pour le panneau-1. Répétez cette étape avec une diminution relativement proportionnelle de SUN-1, de manière à pouvoir obtenir 10 points de mesure entre les valeurs maximale et minimale du rayonnement solaire.

Note : N'oubliez pas de ne pas laisser le rhéostat à la position de résistance minimale (court-circuit) trop longtemps. Cela provoque une chaleur excessive qui peut endommager l'équipement.

- Pour obtenir les paramètres de panneau2, vous devez effectuer le même exercice pratique et répétez même étapes précédentes avec panneau-2 au lieu de panneau 1 et en ajustant les valeurs SUN-2.
- À la fin de l'expérience, mettez le module et la console électronique hors tension. Ensuite, débranchez l'alimentation triphasée. Enfin, placez le disjoncteur triphasé (situé sur le panneau arrière de la console électronique) en position OFF.

V.2.2.2.c Résultats et tableaux

V.2.2.2.c.1 Les valeurs de puissance maximale et rayonnement des deux panneaux à position du rhéostat de charge pour obtenir le point approximatif de puissance maximale

Le programme SCADA vous donne un aperçu de toutes les données mesurées, ainsi que de la puissance de votre centrale solaire (diagramme de flux de puissance). Il nous permet également de prendre les valeurs de puissance et de rayonnement solaire sans prendre les valeurs de courant et de tension et de tracer la courbe (I-V) (gain de temps et d'efforts).

Comme mentionné précédemment, on branche les panneaux (1) et (2) en parallèle et modifier la position de rhéostat pour obtenir la valeur de puissance la plus élevée et changer l'intensité du rayonnement. Après ça étudier les paramètres de chaque panneau seul. Les valeurs de la puissance (W) et le rayonnement solaire (W/m^2) sont affichées sur l'écran de programme SCADA pour chaque panneau (1) et (2), on obtenue des données dans le tableau (V.13).

Il faut noter que les valeurs du tableau (V.13), telles que la puissance (W) et le rayonnement solaire (W/m^2) sont des valeurs moyennes car chaque expérience a été répétée trois fois pour faire une étude statistique.

SUN-1 et SUN-2	Panneau 01		Panneau 02	
	Pmax moy (W)	Wr moy (w/m^2)	Pmax moy (W)	Wr moy (w/m^2)
Maximum (100%)	17,43	357,8	15,67	342,7
90%	17,04	347,7	15,45	338,5
80%	15,42	325,7	13,75	311,8
70%	11,67	276,9	10,6	265,6
60%	7,25	214,8	6,34	196,7
50%	3,29	143,4	2,83	129,3
40%	0,88	74,2	0,72	63,9
30%	0,06	27,2	0,03	21,2
20%	0	4,6	0	2,8
10%	0	0	0	0
Minimum (0%)	0	0	0	0

Tableau V.13 : Valeurs moyenne de puissance et rayonnement solaire pour les deux panneaux (1) et (2).

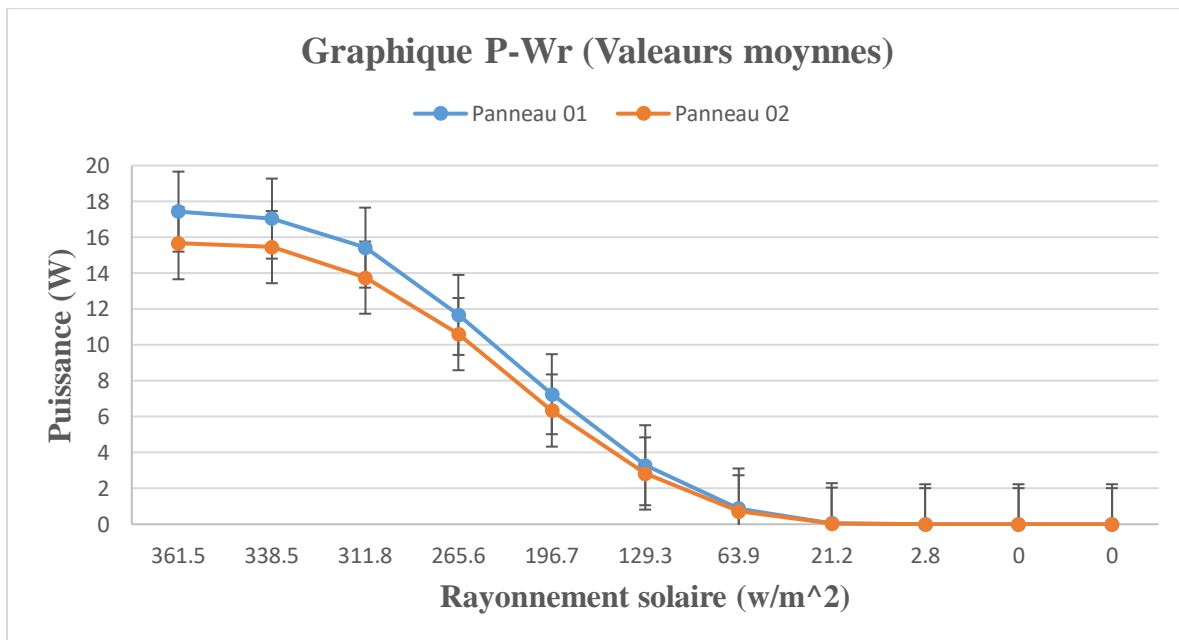


Figure V.13 : Caractéristique de puissance et rayonnement solaire pour les deux panneaux 1-2.

Selon le graphe caractéristique puissance- rayonnement solaire pour les deux panneaux 1 et 2 (voir la figure ci-dessus V.13). Premièrement il y a une légère diminution de la valeur puissance maximale de 17.4W à 15.4W appréciée à 2W entre rayonnement 357,8W/m² et 325,7W/m² pour le panneau 1.

Pour le panneau 2, la valeur de la diminution est appréciée à 1,9 de 15,6W à 13,7W de 342,7W/m² et 311,8W/m². Deuxièmement, il y a une chute (une diminution significative) de puissance maximale de 15,3W à 3,29W estimée à 12W dans l'intervalle de rayonnement entre 310W/m² et 143,8W/m² pour panneau 1 et dans le panneau 2, l'énergie diminue fortement de 13,5W à 2,83W estimée à 10,6W entre 306W/m² et 129,3W/m². Troisièmement, la puissance est nulle à faible intensité lumineuse pour les deux panneaux.

On trouve la meilleure position du rhéostat pour obtenir le point approximatif où la valeur de puissance la plus élevée avec rayonnement solaire maximale : Environ **position 10%**.

Par expérience, on constate que les deux panneaux ont la même efficacité et la légère différence de la puissance entre elle est due à l'intensité d'éclairement mesuré par capteur de rayonnement solaire. Finalement, on remarque que la valeur de la puissance maximale diminue lorsqu'il l'intensité du rayonnement solaire diminue.

V.2.2.3 La relation entre la puissance générée et la puissance du rayonnement solaire

V.2.2.3.a Matériel nécessaire

- Unité solaire photovoltaïque. (Plus de détails dans le chapitre III et IV)

V.2.2.3.b Procédure pratique

- 1) Les mêmes étapes du premier exercice, mais fixez la position du rhéostat de charge à environ 50%.
- 2) Faites glissez SUN-1 (panneau 1) sur la position maximale pour obtenir le rayonnement maximal. Notez les valeurs mesurées du courant continu (I), de la tension continue (V) et du rayonnement SRL (Wr).
- 3) Répétez le point 2 avec une diminution relativement proportionnelle de la commande SUN-1, de manière à pouvoir obtenir 10 points de mesure entre les valeurs maximale et minimale du rayonnement solaire.

- 4) Pour obtenir les paramètres de panneau-2, effectuez le même exercice pratique en répétant les étapes 1 à 3 avec panneau-2 au lieu de panneau -1 et en ajustant les valeurs SUN-2.
- 5) À la fin de l'expérience, mettez le module et la console électronique hors tension. Ensuite, débranchez l'alimentation triphasée. Enfin, placez le disjoncteur triphasé (situé sur le panneau arrière de la console électronique) en position OFF.

V.2.2.3.c Résultats et tableaux

V.2.2.3.c.1 Les valeurs de courant et tension des deux panneaux à Rhéostat 50%

Dans cette exercice on fixe le Rhéostat à 50% et varier la puissance du rayonnement solaire. Les points mesurés sont données par le tableau (V.14), et à figure (V.14) on représente le graphique de la courbe résultante :

SUN-1 et SUN-2	Panneau 01			Panneau 02		
	Imoy (Amp)	Vmoy (Volts)	Wrmoy (w/m ²)	Imoy (Amp)	Vmoy (Volts)	Wrmoy (w/m ²)
Maximum (100%)	0,213	18,7	349,7	0,213	18,7	353,8
90%	0,211	18,5	338,6	0,211	18,6	341,7
80%	0,208	18,3	316,2	0,209	18,3	317,5
70%	0,204	18	265,9	0,205	18	268,9
60%	0,198	17,5	210,5	0,198	17,5	208,7
50%	0,185	16,5	140,7	0,185	16,5	136,8
40%	0,155	14,3	73,7	0,146	13,5	67,9
30%	0,056	7,4	26,5	0,043	6,5	23,2
20%	0	1,2	0	0	0,7	0
10%	0	0	0	0	0	0
Minimum (0%)	0	0	0	0	0	0

Tableau V.14 : Valeurs de courant et tension des deux panneaux à position du rhéostat 50%.

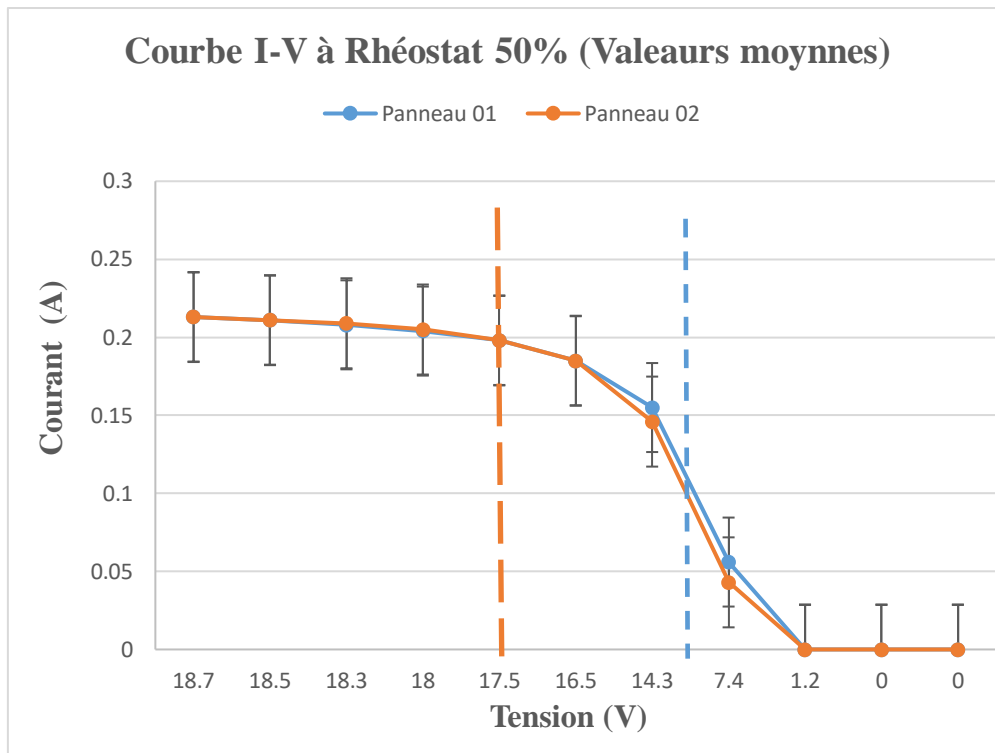


Figure V.14 : Caractéristique courant-tension des deux panneaux à position du rhéostat 50%.

La figure (V.14) donne les valeurs caractéristique courant-tension des deux panneaux lorsque on fixe Rhéostat a 50 %. On distingue trois zones : une zone comprise entre 18,7 V à 17,5 V ou le courant constante environ 0,213 A. La deuxième zone entre 17,4 V à 7,4 V, il y a une chute soudaine et rapide du courant de 0,2 A à 0,05 A. La troisième zone entre 7,4V à 0V l'intensité de courant est nulle. On note aussi sur la figure (V.14) que courant est quasi-constant dans un intervalle très réduit (de 18,7 V à 17,4 V). La valeur de la tension maximale est environ 18,7 V et le courant généré par les deux panneaux ne dépasse pas les 0,23 A.

V.2.2.3.c.2 Les valeurs de la puissance générée par rapport au rayonnement solaire pour les deux panneaux solaires à Rhéostat 50%

Dans le tableau (V.15) les valeurs de la puissance générée par rapport au rayonnement solaire. On détermine la valeur de la puissance par la relation

$$P_{moy} = I_{moy} \cdot V_{moy}$$

SUN-1 et SUN-2	Panneau 01		Panneau 02	
	Pmax moy (W)	Wr moy (w/m ²)	Pmax moy (W)	Wr moy (w/m ²)
Maximum (100%)	3,976	349,7	3,981	353,8
90%	3,897	338,6	3,923	341,7
80%	3,819	316,2	3,818	317,5
70%	3,671	265,9	3,683	268,9
60%	3,458	210,5	3,452	208,7
50%	3,064	140,7	3,046	136,8
40%	2,211	73,7	1,975	67,9
30%	0,421	26,5	0,283	23,2
20%	0	0	0	0
10%	0	0	0	0
Minimum (0%)	0	0	0	0

Tableau V.15 : Valeurs de la puissance générée par rapport au rayonnement solaire) pour les deux panneaux solaires.

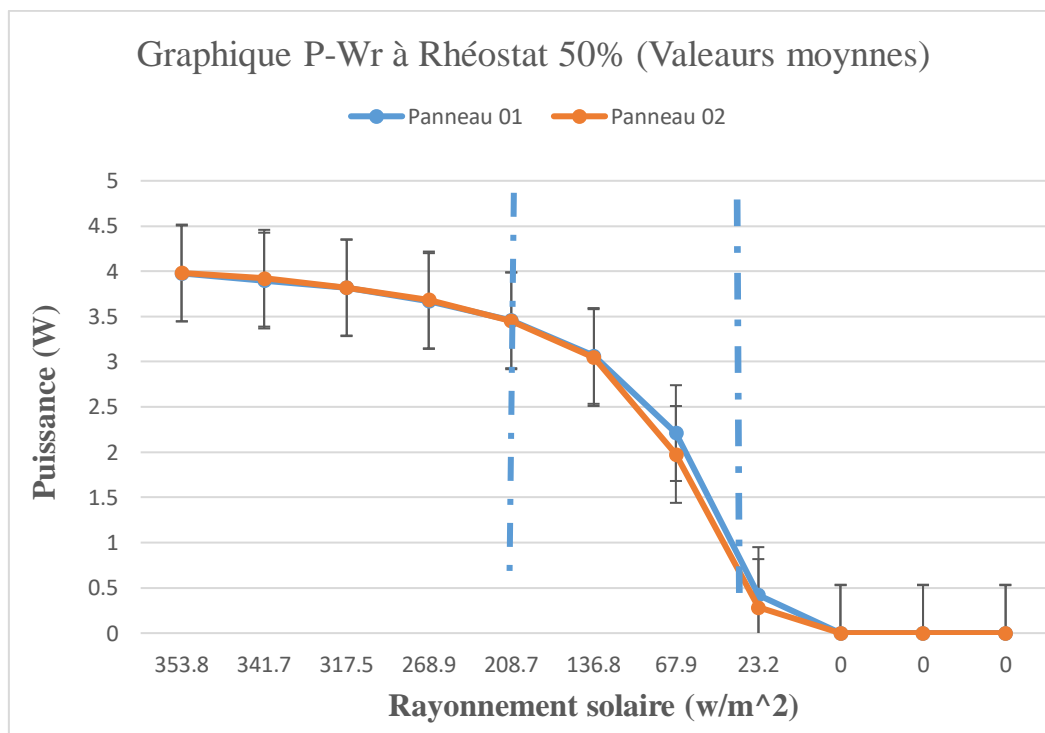


Figure V.15 : Graphique de puissance générée par rapport au rayonnement solaire pour les deux panneaux PVs.

La figure (V.15) représente le graphique de résultante puissance-rayonnement des panneaux (1) et (2) pour différents niveaux d'éclairage. On analyse trois régions comme la courbe précédente (**Figure V.14**). Première zone une légère diminution de la valeur puissance de 3.9W à 3.4W entre 353 W/m².8 et 208.7 W/m² pour les deux panneaux. Deuxième zone, une chute soudaine et rapide de puissance de 3.3W à 2.2W entre 200W/m² et 23.2W/m². Troisième zone, la puissance est nulle à faible éclairage.

On note que pour chaque niveau d'éclairage, il existe une certaine valeur pour la puissance maximale qui correspond à une position spécifique du rhéostat (position idéale).

Il existe une relation directe entre la puissance maximale et le rayonnement solaire, car la valeur de puissance maximale augmente avec l'augmentation de l'éclairage.

A une charge constante qui ne correspond pas au point Pmax (Position du rhéostat n'est pas parfaite), la valeur de puissance générée diminue à que le niveau d'éclairage diminue.

Quand rayonnement solaire augmente, l'intensité du courant augmente, les courbes I-V se décalent vers les valeurs croissantes permettant au panneau PV de produire une puissance électrique plus élevée.

V.2.2.4 Conclusion pour l'exercice 2

- On note que le rayonnement solaire augmente, la valeur de la puissance maximale augmente.
- Dans un éclairage très faible, il n'y a pas de puissance donc le module photovoltaïque ne fait pas le phénomène photoélectrique.
- A certain niveau d'éclairage, il y a une position du rhéostat (position idéale), où les panneaux photovoltaïques génèrent la plus haute efficacité (puissance maximale).
- Dans cet appareil, pour obtenir la valeur de puissance maximale, elle peut être trouvée à partir de la courbe (I-V) ou en tournant le rhéostat pour obtenir le point approximatif de puissance maximale.
- Rhéostat amplifie et réduit la puissance pour les deux panneaux (1 et 2)
- Il existe une relation directe entre la puissance maximale et le rayonnement solaire, car la valeur de puissance maximale augmente avec l'augmentation de l'éclairage.

- A une charge constante qui ne correspond pas au point P_{max} (Position du rhéostat n'est pas parfaite), la valeur de puissance générée diminue lorsque que le niveau d'éclairement est minimal.

Exercice 3

V.2.3 Etude de l'efficacité des panneaux solaires connectés en Parallèle et en Série

V.2.3.1 Objectif

Le but cet exercice pratique est d'étudier les performances du système de génération solaire photovoltaïque avec des panneaux solaires connectés en parallèle et connectés en série.

V.2.3.2 Panneaux solaires connectés en Parallèle

V.2.3.2.a Procédure pratique

- 1) Les mêmes étapes du premier exercice, mais branchez deux panneaux solaires en parallèle. Réglez les commandes SUN-1 et SUN-2 au maximum pour obtenir le maximum de rayonnement. Notez les valeurs mesurées du courant continu (I), de la tension continue (V) et du rayonnement SRL (W_r).
- 2) Modifiez la position du rhéostat de charge à environ 90% et notez les valeurs des paramètres obtenus.
- 3) Répétez l'étape 2 avec des diminutions incrémentielles d'environ 10% de la valeur du rhéostat de charge jusqu'à atteindre 0%, qui est le point de court-circuit du système. Faites tourner le rhéostat dans le sens inverse des aiguilles d'une montre jusqu'à la position de résistance maximale.
- 4) Répétez les points 1 à 3 avec des diminutions relativement proportionnelles des valeurs SUN-1 et SUN-2, de manière à pouvoir obtenir trois courbes I-V pour trois valeurs d'éclairage solaire.

- 5) À la fin de l'expérience, mettez le module et la console électronique hors tension. Ensuite, débranchez l'alimentation triphasée. Enfin, placez le disjoncteur triphasé (situé sur le panneau arrière de la console électronique) en position OFF.

V.2.3.2.b Résultats et tableaux

V.2.3.2.b.1 Courbe I-V des panneaux solaires connectés en Parallèle pour différents niveaux de rayonnement

Comme nous l'avons déjà mentionné précédemment, on connecte les deux panneaux 1 et 2 en parallèle. On fait trois expériences avec trois niveaux de rayonnement différents (Position 1 : 100% - position 2 : 80% - position 3 : 60%) pour obtenir trois courbes I-V. Une fois notées les valeurs du courant I (Amp) et V (Volts) détectées sur l'afficheur (programme SCADA) pour les deux panneaux. On procède avec l'acquisition des données au tableau (V.16).

Il faut noter que les valeurs présentées dans le tableau (V.16) tel que le courant (I) et la tension (V) sont des valeurs moyennes car on répète chaque expérience trois fois pour faire une étude statistique.

Deux panneaux PVs connectés en parallèle									
	Max SUN 100% (Position 1)			SUN 80% (Position 2)			SUN 60% (Position 3)		
Position R (%)	Imoy (Amp)	Vmoy (Volts)	Wrmoy (w/m ²)	Imoy (Amp)	Vmoy (Volts)	Wrmoy (w/m ²)	Imoy (Amp)	Vmoy (Volts)	Wrmoy (w/m ²)
0	2,1	2	320,5	1,746	1,5	288,1	1,166	0,8	178,9
10	1,363	18	320,5	1,252	17,3	288,1	0,995	15,5	178,9
20	0,557	18,6	320,5	0,514	18,5	288,1	0,539	18	178,9
30	0,383	18,8	320,5	0,367	18,6	288,1	0,368	18,3	178,9
40	0,278	18,9	320,5	0,276	18,8	288,1	0,277	18,5	178,9
50	0,219	18,9	320,5	0,218	18,8	288,1	0,215	18,6	178,9
60	0,177	18,9	320,5	0,177	18,9	288,1	0,174	18,6	178,9
70	0,146	19	320,5	0,147	18,9	288,1	0,145	18,7	178,9
80	0,126	19	320,5	0,125	18,9	288,1	0,123	18,7	178,9
90	0,106	19	320,5	0,105	18,9	288,1	0,104	18,7	178,9
100	0,095	19	320,5	0,095	18,9	288,1	0,094	18,7	178,9

Tableau V.16 : Valeurs moyennes de courant et tension pour deux panneaux connectés en Parallèle (pour trois niveaux d'éclairements différents : 100% - 80% - 60%).

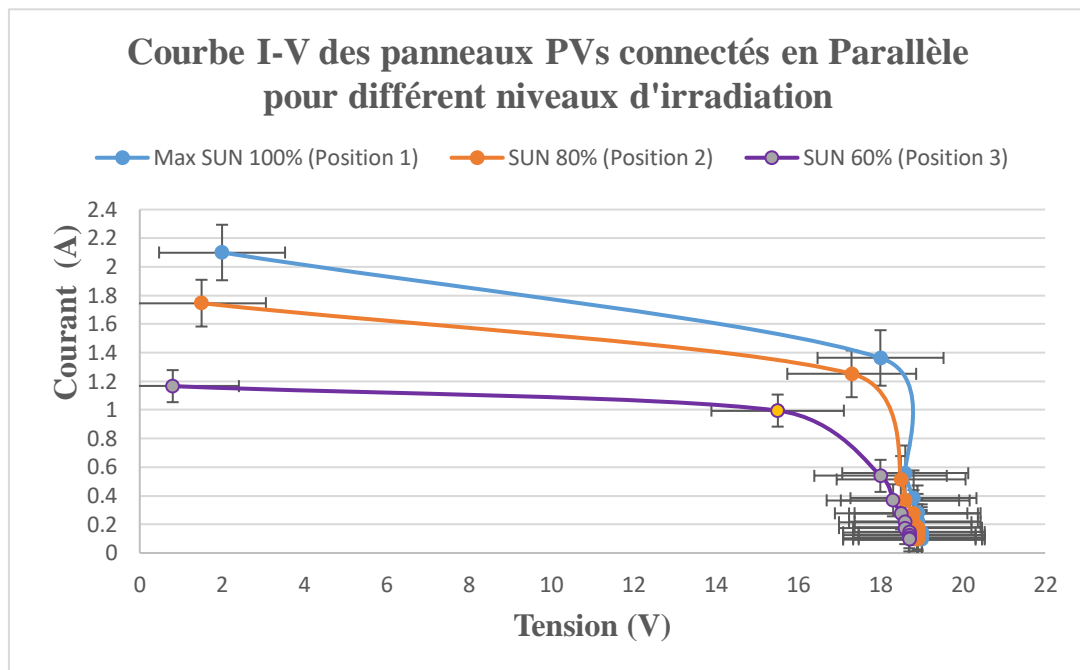


Figure V.16 : Caractéristique courant-tension pour deux panneaux connectés en parallèle avec la condition suivante : *Trois niveaux d'éclairéments différents : 100% - 80% - 60%*.

La figure (V.16) illustre la caractéristique (I-V) des deux panneaux connectés en Parallèle pour différent niveaux d'irradiation (SUN-1 et SUN-2 \Rightarrow position 1 : 100%, position 2 : 80%, position 3 : 60%). Cette figure (V.16) montre que la tension est gardée la même allure que le cas précédent (**Exercice 1**), et la valeur du courant augmente presque deux fois par rapport au courant d'un seul panneau PV (figure V.3) (cette résultat coïncide avec les études théoriques et expérimentales voire le chapitre III). L'apparition d'un décalage du courant approximativement 0.8 A entre 1 V et 18 V. On distingue deux régions : Une légère diminution de courant de 2.1A à 1.36A dans l'intervalle de tension entre 2V et 18V. On constate une chute de courant brusque de 1.1A à 0.095A entre 18.2V et 19V \Rightarrow pour rayonnement 100% (position 1). Une légère diminution de courant de 1.74A à 1.25A entre 1.5V et 17.3V, une chute de courant brusque de 1A à 0.095A entre 17.6V et 18.9V \Rightarrow pour rayonnement 80% (position 2). Une légère diminution de courant de 1.16A à 0.99A entre 0.8V et 15.5V, une chute de courant brusque de 0.8A à 0.094A entre 15.9V et 18.7V \Rightarrow pour rayonnement 60% (position 3).

On remarque que lorsque le rayonnement diminue, le courant est diminué, mais la valeur de la tension reste la même à tous les niveaux d'éclairage.

En fin, On perçoit sur la figure (V.16) que les valeurs extrêmes de la courbe courant-tension (I-V) pour chaque niveau d'éclairage sont comme suit :

1) Pour rayonnement solaire 100% (Position 1)

- Détermination de : I_{CC} (A), V_{OC} (V)

$$I_{cc_{moy}} \text{ (A)} = 2,1 \text{ A} \quad V_{oc_{moy}} \text{ (V)} = 19,1 \text{ V}$$

$$P_{max,idéale} = I_{cc_{moy}} \cdot V_{oc_{moy}} = 40,11 \text{ W}$$

- Déterminer le point de puissance maximale PPmax

$$I_{opt} \text{ (A)} = 1,355 \text{ A}$$

$$V_{opt} \text{ (V)} = 18,3 \text{ V}$$

$$P_{max} = I_{opt} \cdot V_{opt} = 24,8 \text{ W}$$

2) Pour rayonnement solaire 80% (Position 2)

- Détermination de : I_{CC} (A), V_{OC} (V)

$$I_{cc_{moy}} \text{ (A)} = 1,746 \text{ A} \quad V_{oc_{moy}} \text{ (V)} = 19 \text{ V}$$

$$P_{max,idéale} = I_{cc_{moy}} \cdot V_{oc_{moy}} = 33,174 \text{ W}$$

- Déterminer le point de puissance maximale PPmax

$$I_{opt} \text{ (A)} = 1,251 \text{ A}$$

$$V_{opt} \text{ (V)} = 17,5 \text{ V}$$

$$P_{max} = I_{opt} \cdot V_{opt} = 21,9 \text{ W}$$

3) Pour rayonnement solaire 60% (Position 3)

- Détermination de : I_{CC} (A), V_{OC} (V)

$$I_{cc_{moy}} \text{ (A)} = 1,166 \text{ A} \quad V_{oc_{moy}} \text{ (V)} = 18,8 \text{ V}$$

$$P_{max,idéale} = I_{cc_{moy}} \cdot V_{oc_{moy}} = 21,92 \text{ W}$$

- Déterminer le point de puissance maximale PPmax

$$I_{opt} \text{ (A)} = 0,981 \text{ A}$$

$$V_{opt} \text{ (V)} = 15,8 \text{ V}$$

$$P_{max} = I_{opt} \cdot V_{opt} = 15,5 \text{ W}$$

V.2.3.2.b.2 Courbe de la puissance en fonction de la tension des panneaux solaires connectés en Parallèle pour différents niveaux de rayonnement

Grâce aux données précédentes (tableau V.16).on calculer les valeurs de puissance et noter les données obtenues dans le tableau (V.17).

Position R (%)	Deux panneaux PVs connectés en parallèle								
	Max SUN 100% (Position 1)			SUN 80% (Position 2)			SUN 60% (Position 3)		
	Pmoy (W)	Vmoy (Volts)	Wrmoy (w/m ²)	Pmoy (W)	Vmoy (Volts)	Wrmoy (w/m ²)	Pmoy (W)	Vmoy (Volts)	Wrmoy (w/m ²)
0	4,2	2	320,5	2,619	1,5	288,1	0,933	0,8	178,9
10	24,534	18	320,5	21,66	17,3	288,1	15,423	15,5	178,9
20	10,36	18,6	320,5	9,509	18,5	288,1	9,702	18	178,9
30	7,2	18,8	320,5	6,826	18,6	288,1	6,734	18,3	178,9
40	5,254	18,9	320,5	5,189	18,8	288,1	5,125	18,5	178,9
50	4,139	18,9	320,5	4,098	18,8	288,1	3,999	18,6	178,9
60	3,345	18,9	320,5	3,345	18,9	288,1	3,236	18,6	178,9
70	2,774	19	320,5	2,778	18,9	288,1	2,712	18,7	178,9
80	2,394	19	320,5	2,363	18,9	288,1	2,3	18,7	178,9
90	2,014	19	320,5	1,985	18,9	288,1	1,945	18,7	178,9
100	1,805	19	320,5	1,796	18,9	288,1	1,758	18,7	178,9

Tableau V.17 : Valeurs moyenne de puissance et tension pour deux panneaux connectés en Parallèle (pour trois niveaux d'éclairéments différents : 100% - 80% - 60%).

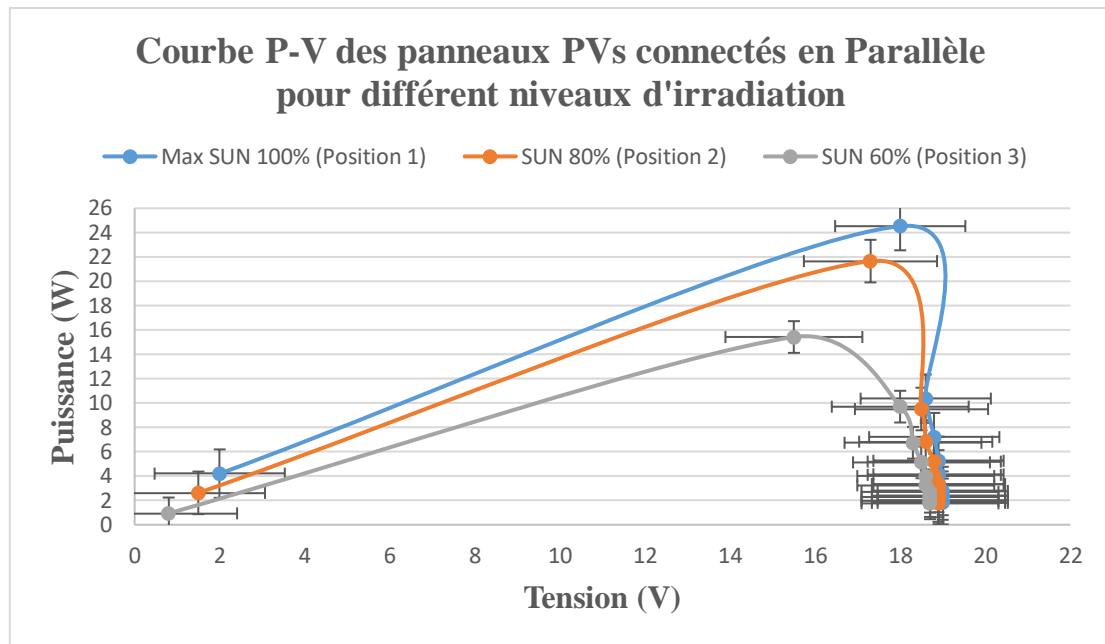


Figure V.17 : Caractéristique puissance-tension pour deux panneaux connectés en parallèle avec la condition suivante : *Trois niveaux d'éclairagements différents : 100% - 80% - 60%.*

La figure (V.17) représente le graphique de la courbe puissance-tension des deux panneaux connectés en Parallèle pour différents niveaux d'irradiation (SUN-1 et SUN-2 \Rightarrow position 1 : 100%, position 2 : 80%, position 3 : 60%). On remarque sur la courbe ci-dessus (figure V.17), il y'a deux régions pour chaque niveau d'éclairage : [Augmentation de puissance de 4.2W à 24.5W entre 2V et 18V pour rayonnement 100% (position 1), Augmentation de puissance de 2.6W à 21.6W entre 1.5V et 17.3V pour rayonnement 80% (position 2), Augmentation de puissance de 0.9W à 15.4W entre 0.8V et 15.5V pour rayonnement 60% (position 3)] jusqu'à atteindre **une valeur maximale (puissance maximale)** à une **valeur de tension optimale**. Ensuite, Une chute puissance brusque de 23W à 1.8W entre 18.5V et 19V pour rayonnement 100% (position 1), Diminution de puissance de 20W à 1.7W entre 17.7V et 18.9V (rayonnement 80% (position 2)). Une chute puissance brusque de 14W à 1.7W entre 16V et 18.7V pour rayonnement 60% (position 3).

La position parfaite du rhéostat pour obtenir la puissance maximale pour les trois niveaux d'éclairagements 100% - 80% - 60% : **Environ 10 %**

V.2.3.2.b.3 Détermination le point de la puissance maximale de chacune des courbes obtenues

Les valeurs de courant optimale et tension optimale pour chaque niveau d'éclairement dans le tableau ci-dessous (V.18) :

SUN (%)	PAN-1 et PAN-2 en parallèle		
	I _{opt} (Amp)	V _{opt} (Volts)	W _{rmoy} (w/m ²)
100	1,355	18,3	320,5
80	1,251	17,5	288,1
60	0,981	15,8	178,9

Tableau V.18 : Valeurs de courant optimale et tension optimale pour deux panneaux connectés en Parallèle (pour trois niveaux d'éclairements différents : 100% - 80% - 60%).

➤ **Les valeurs de puissance maximale**

Après avoir trouvé les valeurs de courant optimale et tension optimale pour deux panneaux, on peut calculer les valeurs de puissance maximale. Les valeurs de puissance maximale sont données dans le tableau (V.19).

SUN (%)	PAN-1 et PAN-2 en parallèle	
	P _{max} (W)	W _{rmoy} (w/m ²)
100	24,8	320,5
80	21,9	288,1
60	15,5	178,9

Tableau V.19 : Valeurs de puissance maximale pour deux panneaux connectés en Parallèle (pour trois niveaux d'éclairements différents : 100% - 80% - 60%).

⇒ On entame dans la partie suivante la configuration série.

V.2.3.3 Panneaux solaires connectés en Série

V.2.3.3.a Procédure pratique

- 1) Les mêmes étapes de l'expérience précédente ci-dessus, mais Connectez les panneaux solaires en série en déplaçant le sélecteur «Série parallèle» en position «Série». Réglez les commandes SUN-1 et SUN-2 au maximum pour obtenir le maximum de rayonnement. Notez les valeurs mesurées du courant continu (I), de la tension continue (V) et du rayonnement SRL (W_r).
- 2) Modifiez la position du rhéostat de charge à environ 90% et notez les valeurs des paramètres obtenus.
- 3) Répétez l'étape 2 avec des diminutions incrémentielles d'environ 10% de la valeur du rhéostat de charge jusqu'à atteindre 0%, qui est le point de court-circuit du système. Faites tourner le rhéostat dans le sens inverse des aiguilles d'une montre jusqu'à la position de résistance maximale.
- 4) Répétez les points 1 à 3 avec des diminutions relativement proportionnelles des valeurs SUN-1 et SUN-2, de manière à pouvoir obtenir trois courbes I-V pour trois valeurs d'éclairage solaire.
- 5) À la fin de l'expérience, mettez le module et la console électronique hors tension. Ensuite, débranchez l'alimentation triphasée. Enfin, placez le disjoncteur triphasé (situé sur le panneau arrière de la console électronique) en position OFF.

V.2.3.3.b Résultats et tableaux

V.2.3.3.b.1 Courbe I-V des panneaux solaires connectés en Série pour différents niveaux de rayonnement

Cette fois ci on branche les deux panneaux 1 et 2 en série .On fait trois expériences avec trois niveaux rayonnement différente (Pposition1 : 100% - position 2 : 80% - position3 : 60%) pour obtenir trois courbes I-V. Il faut note que les valeurs présentées dans le tableau (V.20) tel que courant (I) et tension (V) sont des valeurs moyenne car on a répète chaque expérience trois fois pour faire une étude statistique. On procède avec l'acquisition des données au tableau (V.20).

Deux panneaux PVs connectés en série									
Position R (%)	Max SUN 100% (Position 1)			SUN 80% (Position 2)			SUN 60% (Position 3)		
	Imoy (Amp)	Vmoy (Volts)	Wrmoy (w/m ²)	Imoy (Amp)	Vmoy (Volts)	Wrmoy (w/m ²)	Imoy (Amp)	Vmoy (Volts)	Wrmoy (w/m ²)
0	1,192	0,7	318,77	1,038	0,5	283,9	0,652	0	179,8
10	0,962	15,5	318,77	0,872	15	283,9	0,594	9,9	179,8
20	0,749	25,8	318,77	0,725	22,5	283,9	0,482	16,8	179,8
30	0,639	30,8	318,77	0,592	29,2	283,9	0,422	20,8	179,8
40	0,539	37,1	318,77	0,506	35,1	283,9	0,383	26,1	179,8
50	0,433	37,8	318,77	0,416	36,2	283,9	0,352	30,7	179,8
60	0,36	38,1	318,77	0,346	36,6	283,9	0,32	33,8	179,8
70	0,314	38,3	318,77	0,301	36,8	283,9	0,282	34,5	179,8
80	0,28	38,4	318,77	0,27	37	283,9	0,25	34,8	179,8
90	0,244	38,5	318,77	0,238	37,1	283,9	0,223	35	179,8
100	0,231	38,6	318,77	0,222	37,2	283,9	0,208	35,1	179,8

Tableau V.20 : Valeurs moyenne de courant et tension pour deux panneaux connectés en Série (pour trois niveaux d'éclairéments différents : 100% - 80% - 60%).

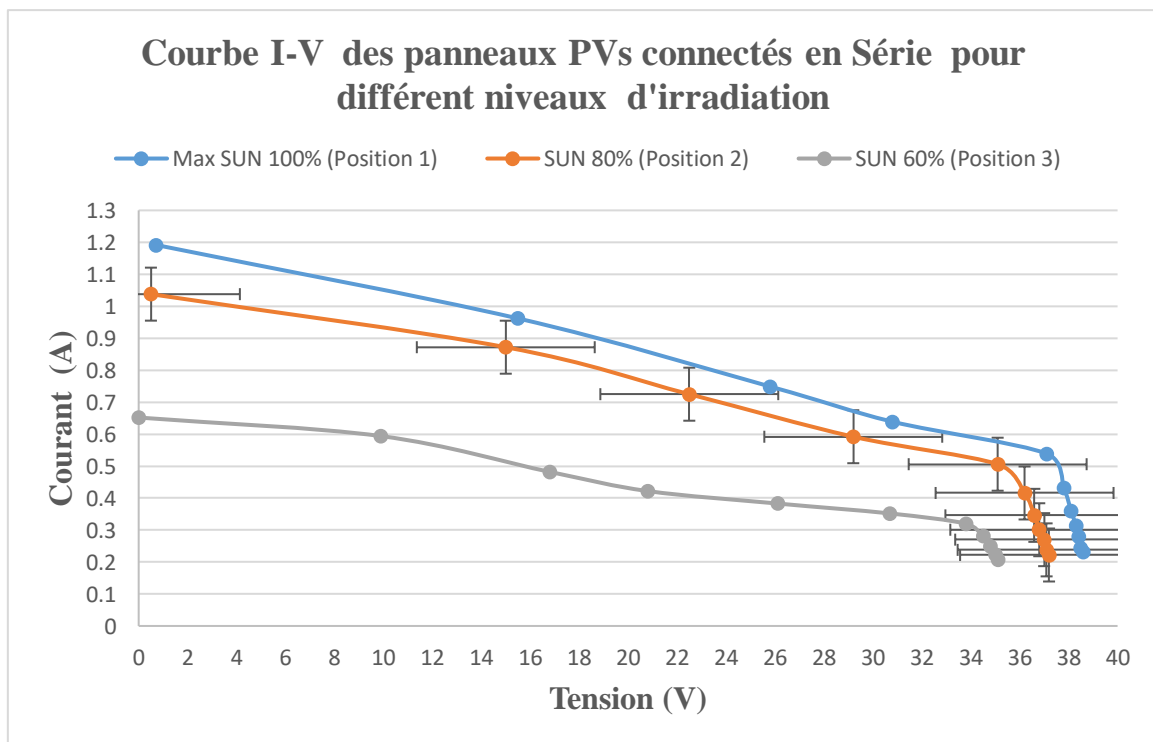


Figure V.18 : Caractéristique courant-tension pour deux panneaux connectés en série avec la condition suivante : Trois niveaux d'éclairéments différents : 100% - 80% - 60%.

La figure (V.18) présente le graphe caractéristique courant-tension des deux panneaux branchés en série pour différents niveaux d'irradiation (SUN-1 et SUN-2 \Rightarrow position 1 : 100%, position 2 : 80%, position 3 : 60%)

On observe le même comportement que celui de la courbe de la caractéristique courant-tension d'un seul panneau PV (figure V.18), sauf que la valeur de la tension est presque deux fois plus grande que celle de la caractéristique courant-tension d'un seul panneau PV (figure V.3) (Ce résultat coïncide avec les études théoriques et expérimentales voir le chapitre III)

L'apparition d'un décalage du courant approximativement [0.6A et 0.4A] entre 0V et 33V. On remarque sur la courbe ci-dessus (figure V.18), il y a deux régions : Une diminution de courant de 1.19A à 0.53A dans l'intervalle de tension entre 0.7V et 37.1V, jusqu'à **un point (point de puissance maximale PPM)**, après on observe une chute de courant brusque de 0.51A à 0.23A entre 37.6V et 38.6V \Rightarrow pour rayonnement 100% (position 1). Une diminution de courant de 1.03A à 0.5A entre 0.5V et 35.1V, une chute de courant brusque de 0.49A à 0.22A entre 35.5V et 37.2V \Rightarrow pour rayonnement 80% (position 2). Une diminution de courant de 0.652A à 0.31A entre 0V et 33.7V, jusqu'à **un point (point de puissance maximale PPM)**, après on note une chute de courant brusque de 0.31A à 0.2A entre 34.1V et 35.1V \Rightarrow pour rayonnement 60% (position 3).

On perçoit sur la figure (V.18) que les valeurs extrêmes de la courbe courant-tension (I-V) pour chaque niveau d'éclairement sont comme suit :

a) Pour rayonnement solaire 100% (Position 1)

- Détermination de : I_{CC} (A), V_{OC} (V)

$$I_{CC_{moy}} \text{ (A)} = 1,192 \text{ A} \quad V_{OC_{moy}} \text{ (V)} = 39,1 \text{ V}$$

$$P_{max, idéale} = I_{CC_{moy}} \cdot V_{OC_{moy}} = 46,61 \text{ W}$$

- Déterminer le point de puissance maximale PP_{max}

$$I_{opt} \text{ (A)} = 0,538 \text{ A}$$

$$V_{opt} \text{ (V)} = 37,2 \text{ V}$$

$$P_{max} = I_{opt} \cdot V_{opt} = 20,01 \text{ W}$$

b) Pour rayonnement solaire 80% (Position 2)

- Détermination de : I_{CC} (A), V_{OC} (V)

$$I_{cc_{moy}} \text{ (A)} = 1,038 \text{ A} \quad V_{oc_{moy}} \text{ (V)} = 38,1 \text{ V}$$

$$P_{max, idéale} = I_{cc_{moy}} \cdot V_{oc_{moy}} = 39,55 \text{ W}$$

- **Déterminer le point de puissance maximale PPmax**

$$I_{opt} \text{ (A)} = 0,515 \text{ A}$$

$$V_{opt} \text{ (V)} = 35,1 \text{ V}$$

$$P_{max} = I_{opt} \cdot V_{opt} = 18,1 \text{ W}$$

c) Pour rayonnement solaire 60% (Position 3)

- Détermination de : I_{CC} (A), V_{OC} (V)

$$I_{cc_{moy}} \text{ (A)} = 0,652 \text{ A} \quad V_{oc_{moy}} \text{ (V)} = 36,5 \text{ V}$$

$$P_{max, idéale} = I_{cc_{moy}} \cdot V_{oc_{moy}} = 23,80 \text{ W}$$

- Déterminer le point de puissance maximale PPmax

$$I_{opt} \text{ (A)} = 0,322 \text{ A}$$

$$V_{opt} \text{ (V)} = 33,9 \text{ V}$$

$$P_{max} = I_{opt} \cdot V_{opt} = 15,5 \text{ W}$$

V.2.3.3.b.2 Courbe de la puissance en fonction de la tension des panneaux solaires connectés en Série pour différents niveaux de rayonnement

Grâce aux données précédentes (tableau V.20).on calculer les valeurs de puissance et noter les données obtenues dans le tableau (V.21).

Deux panneaux PVs connectés en série									
Position R (%)	Max SUN 100% (Position 1)			SUN 80% (Position 2)			SUN 60% (Position 3)		
	Pmoy (W)	Vmoy (Volts)	Wrmoy (w/m ²)	Pmoy (W)	Vmoy (Volts)	Wrmoy (w/m ²)	Pmoy (W)	Vmoy (Volts)	Wrmoy (w/m ²)
0	0,834	0,7	318,77	0,519	0,5	283,9	0	0	179,8
10	14,911	15,5	318,77	13,08	15	283,9	5,881	9,9	179,8
20	19,324	25,8	318,77	16,312	22,5	283,9	8,098	16,8	179,8
30	19,681	30,9	318,77	17,286	29,2	283,9	8,778	20,8	179,8
40	19,997	37,1	318,77	17,761	35,1	283,9	9,996	26,1	179,8
50	16,367	37,8	318,77	15,059	36,2	283,9	10,806	30,7	179,8
60	13,716	38,1	318,77	12,664	36,6	283,9	10,816	33,8	179,8
70	12,026	38,3	318,77	11,077	36,8	283,9	9,729	34,5	179,8
80	10,752	38,4	318,77	9,99	37	283,9	8,7	34,8	179,8
90	9,394	38,5	318,77	8,83	37,1	283,9	7,805	35	179,8
100	8,917	38,6	318,77	8,258	37,2	283,9	7,301	35,1	179,8

Tableau V.21 : Valeurs moyenne de puissance et tension pour deux panneaux connectés en Série (pour trois niveaux d'éclairéments différents : 100% - 80% - 60%).

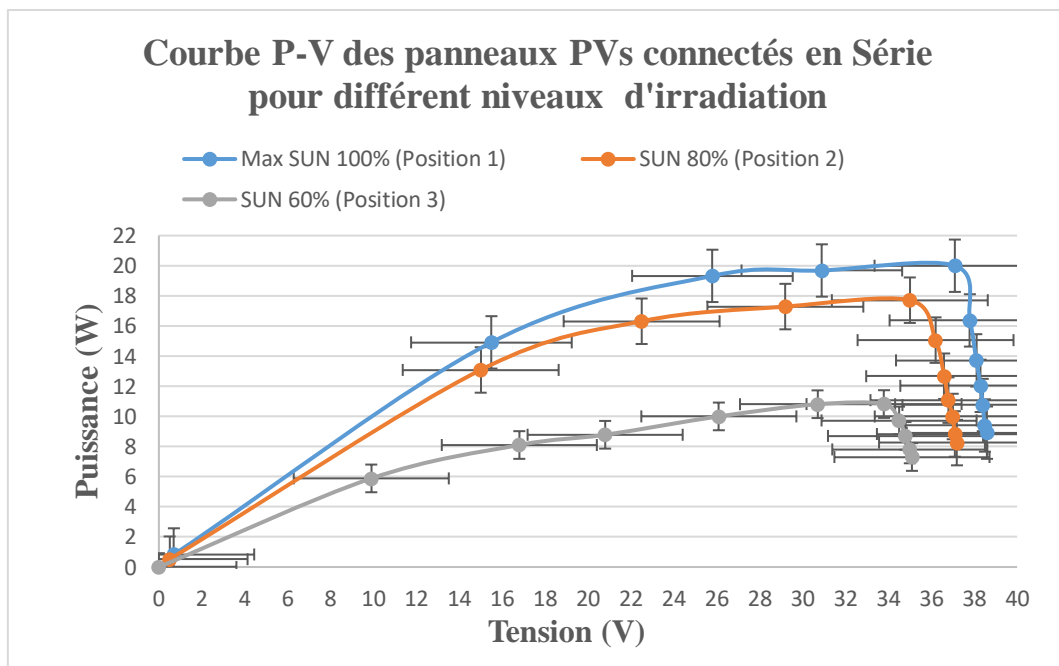


Figure V.19 : Caractéristique puissance-tension pour deux panneaux connectés en Série avec la condition suivante : Trois niveaux d'éclairéments différents : 100% - 80% - 60%.

La figure (V.19) illustre la caractéristique de courbe la puissance en fonction des deux panneaux connectés en Série pour différent niveaux d'irradiation (SUN-1 et SUN-2 ⇒ position

1 : 100%, position 2 :80%, position 3 : 60%). On distingue deux régions : [Augmentation de puissance de 0.8W à 19.9W entre 0.7V et 37.1V pour rayonnement 100% (position 1), Augmentation de puissance de 0.5W à 17.7W entre 0.5V et 35.1V pour rayonnement 80% (position 2), Augmentation de puissance de 0W à 10.8W entre 0V et 33.8V pour rayonnement 60% (position 3)] jusqu'à atteindre **une valeur maximale (puissance maximale) à valeur de tension optimale**. Après, Une chute puissance brusque de 19W à 8.9W entre 37.4V et 38.6V pour rayonnement 100% (position 1), Diminution de puissance de 17.8W à 8.2W entre 35.5V et 37.2V (rayonnement 80% (position 2)). Une chute puissance brusque de 10W à 7.3W entre 34.2V et 35.1V pour rayonnement 60% (position 3).

La position parfaite du rhéostat pour obtenir la puissance maximale pour rayonnement 100% (position 1), 80% (position 2 : **Environ 40 %**

La position parfaite du rhéostat pour obtenir la puissance maximale pour rayonnement 60% (position 3) : **Environ 60 %**

V.2.3.3.b.3 Détermination le point de la puissance maximale de chacune des courbes obtenues

Les valeurs de courant optimale et tension optimale pour chaque niveau d'éclairément dans le tableau ci-dessous (V.22) :

SUN (%)	PAN-1 et PAN-2 en série		
	I _{opt} (Amp)	V _{opt} (Volts)	W _{rmoy} (w/m ²)
100	0,538	37,2	318,77
80	0,515	35,1	283,9
60	0,322	33,9	179,8

Tableau V.22 : Valeurs de courant optimale et tension optimale pour deux panneaux connectés en Série (pour trois niveaux d'éclairéments différents : 100% - 80% - 60%).

➤ Les valeurs de puissance maximale

Après avoir trouvé les valeurs de courant optimale et tension optimale pour deux panneaux, on peut calculer les valeurs de puissance maximale. Les valeurs de puissance maximale sont données dans le tableau (V.23).

SUN (%)	PAN-1 et PAN-2 en série	
	Pmax (W)	Wrmoy (w/m ²)
100	20,01	318,77
80	18,08	283,9
60	10,92	179,8

Tableau V.23 : Valeurs de puissance maximale pour deux panneaux connectés en parallèle (pour trois niveaux d'éclairiments différents : 100% - 80% - 60%).

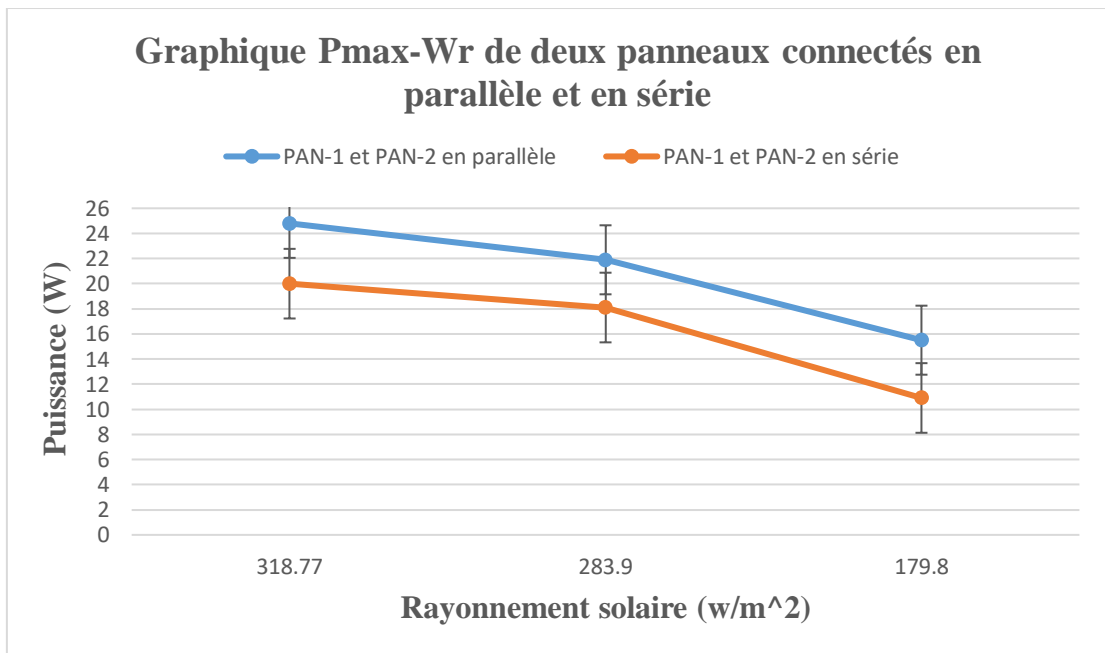


Figure V.20 : Caractéristique puissance-rayonnement pour deux panneaux connectés en Parallèle et en Série avec la condition suivante : (pour trois niveaux d'éclairiments différents : 100% - 80% - 60%).

Suivant le graphe caractéristique puissance-rayonnement pour deux panneaux (1 et 2) connectés en Parallèle et en Série pour trois niveaux d'éclairiments différents : 100% - 80% - 60%) (Figure V.20). L'apparition d'un décalage de la puissance maximale à chaque niveau d'éclairiment est environ 4.4W.

Finalement, On note que la puissance maximale de deux panneaux connectés en Parallèle est plus grande que la puissance maximale de deux panneaux connectés en Série pour chaque niveau d'éclairage.

La puissance maximale diminue lorsque la valeur de rayonnement solaire diminue.

V.2.3.4 La différence entre des courbes I-V des panneaux solaires connectés en parallèle et en série

Pour comparer la différence entre un seul panneau PV et deux panneaux connectés en Parallèle et en Série, on procède aux données des expériences précédentes (tableau V.24). On représente le graphique de la courbe résultante :

Position R (%)	Max SUN 100% (Position 1)								
	Un panneau PV-1			Deux panneaux PVs connectés en parallèle			Deux panneaux PVs connectés en série		
	Imoy (Amp)	Vmoy (Volts)	Wrmoy (w/m ²)	Imoy (Amp)	Vmoy (Volts)	Wrmoy (w/m ²)	Imoy (Amp)	Vmoy (Volts)	Wrmoy (w/m ²)
0	1,285	1,06	345,9	2,1	2	320,5	1,192	0,7	318,77
10	0,977	16,43	345,9	1,363	18	320,5	0,962	15,5	318,77
20	0,502	17,66	345,9	0,557	18,6	320,5	0,749	25,8	318,77
30	0,352	17,86	345,9	0,383	18,8	320,5	0,639	30,8	318,77
40	0,263	17,96	345,9	0,278	18,9	320,5	0,539	37,1	318,77
50	0,208	18,06	345,9	0,219	18,9	320,5	0,433	37,8	318,77
60	0,168	18,1	345,9	0,177	18,9	320,5	0,36	38,1	318,77
70	0,139	18,1	345,9	0,146	19	320,5	0,314	38,3	318,77
80	0,117	18,13	345,9	0,126	19	320,5	0,28	38,4	318,77
90	0,099	18,13	345,9	0,106	19	320,5	0,244	38,5	318,77
100	0,089	18,13	345,9	0,095	19	320,5	0,231	38,6	318,77

Tableau V.24 : Valeurs moyenne de courant et tension pour un seul panneau PV et deux panneaux connectés en Parallèle et en Série (pour trois niveaux d'éclairagements différents : 100% - 80% - 60%).

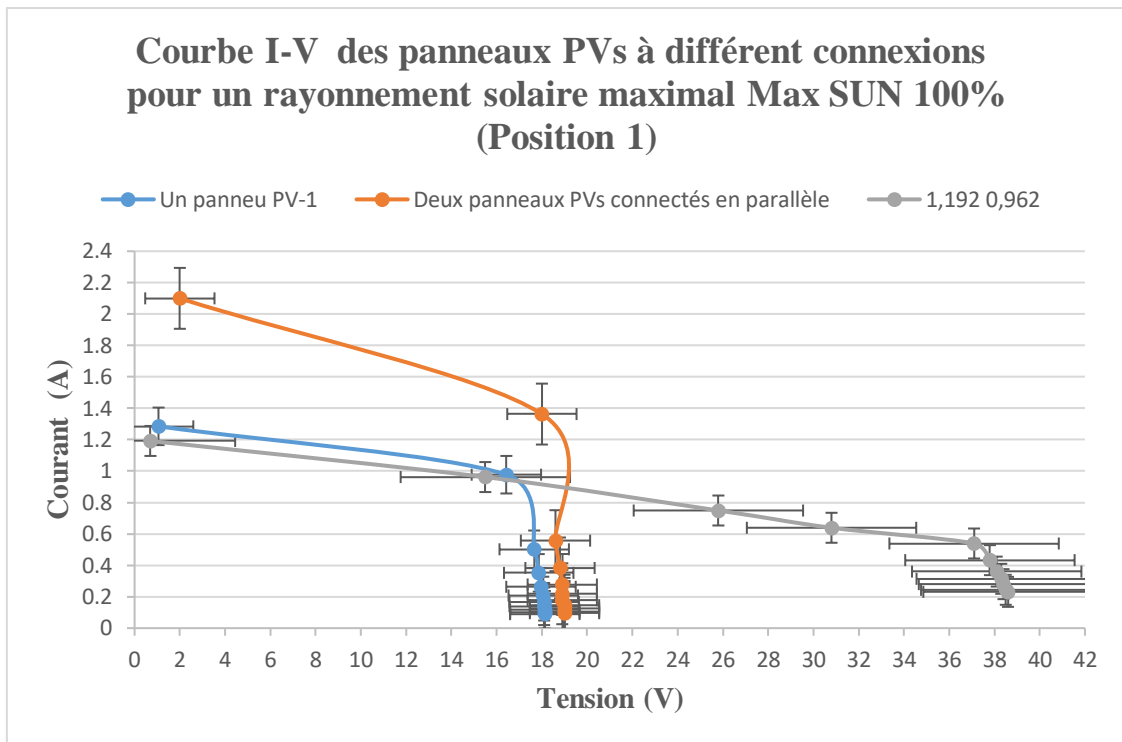


Figure V.21 : Caractéristique courant-tension pour un seul panneau PV et deux panneaux connectés en Parallèle et en Série avec la condition suivante : *Rayonnement solaire maximal (Position 1) 100%*.

La figure (V.21) présente le graphique de la courbe courant-tension pour un seul panneau PV et deux panneaux connectés en Parallèle et en Série avec la condition suivante : Rayonnement solaire maximal (Position 1) 100%. On observe deux cas :

Dans le premier cas ou les deux panneaux connectés en parallèle, les panneaux sont soumis à la courbe de courant-tension. La valeur de la tension reste la même que valeur de la tension pour seul panneau, mais la valeur du courant est environ deux fois supérieure à la valeur du courant de seul panneau. Avec :

$$I_{ccNpp} = N_{pp} \times I_{cc}$$

$$V_{oc} = V_{ocNpp}$$

N_{pp} : Nombre de panneaux PVs en parallèle.

I_{ccNp} (A): La somme des courants de court circuit des (N_{pp}) panneaux en parallèle.

V_{ocNpp} (V): Tension du circuit ouvert des (N_{pp}) panneaux en parallèle.

Dans le deuxième cas ou les deux panneaux connectées en série, la valeur de courant reste la même que valeur de courant pour un seul panneau, mais la valeur de la tension est environ deux fois supérieure à la valeur de la tension d'un seul panneau. Avec :

$$V_{ocNps} = V_{ps} \times V_{oc}$$

$$I_{cc} = I_{ccNps}$$

N_{ps} : Nombre de panneaux PVs en série.

V_{ocNp} (A): La somme des tensions de court circuit des (N_{ps}) panneaux en série.

I_{ccNps} (A): Courant de circuit ouvert des (N_{ps}) panneaux en série.

V.2.3.5 Le facteur de remplissage (Facteur de forme) pour un rayonnement solaire maximal Max SUN 100% (Position 1)

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{oc}} = \frac{I_{opt} \cdot V_{opt}}{I_{cc} \cdot V_{oc}}$$

a) Un panneau PV-1

$$FF = \frac{16,102}{1,285 * 18,4} = \frac{0,97 * 16,6}{1,285 * 18,4} = 0,681$$

b) Deux panneaux PVs connectés en Parallèle

$$FF = \frac{24,8}{2,1 * 19,1} = \frac{1,355 * 18,3}{2,1 * 19,1} = 0,618$$

c) Deux panneaux PVs connectés en Série

$$FF = \frac{20,01}{1,192 * 39,1} = \frac{0,538 * 37,2}{1,192 * 39,1} = 0,430$$

V.2.3.6 Le rendement pour un rayonnement solaire maximal (Position 1)

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_i} = FF \frac{I_{cc} \cdot V_{oc}}{P_i}$$

$$P_i = \text{Eclairement} * \text{Surface}$$

$$\% \text{ rendemant} = \text{rendement} * 100$$

a) Un panneau PV-1

$$\eta = \frac{16,102}{345,9 * 0,51} = 0,681 \frac{1,285 * 18,4}{345,9 * 0,51} = 0,0913$$

$$\% \text{ rendement} = 0,0913 * 100 = 9,13\%$$

b) Deux panneaux PVs connectés en Parallèle

$$\eta = \frac{24,8}{320,5 * 0,51} = 0,618 \frac{2,1 * 19,1}{320,5 * 0,51} = 0,1517$$

$$\% \text{ rendement} = 0,1517 * 100 = 15,17\%$$

c) Deux panneaux PVs connectés en Série

$$\eta = \frac{20,01}{318,77 * 0,51} = 0,430 \frac{1,192 * 39,1}{318,77 * 0,51} = 0,1231$$

$$\% \text{ rendement} = 0,1231 * 100 = 12,31\%$$

À partir des données et des calculs ci-dessus .On note que l'efficacité de la photo-conversion (rendement) du générateur PV augmente dans les deux configurations Parallèles ou en Série.

En fin, on peut noter que le rendement est plus élevé pour les panneaux branchés en Parallèle que les panneaux branchés en Série.

V.2.3.7 Conclusion pour exercice 3

- La valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement.
- La connexion des panneaux en parallèle permet l'augmentation du courant de sortie pour le générateur PV. La tension ne diffère pas (mêmes tensions).
- La connexion des panneaux en série permet d'augmenter la tension du générateur PV. Le courant reste constant
- Pour un meilleur rendement, les panneaux doivent être connectés en parallèle ou en série.

Exercice 4

V.2.4 Etude de l'efficacité de panneau solaire en fonction de la température et des connexions des panneaux solaires

V.2.4.1 Objective

Le but cet exercice pratique est d'étudier l'influence de la température de fonctionnement des panneaux sur l'efficacité de l'ensemble du système de production d'énergie photovoltaïque, les panneaux solaires étant connectés en parallèle.

V.2.4.2 Matériels nécessaires

- Unité solaire photovoltaïque.
- Résultats obtenus dans l'exercice 3 (Deux panneaux solaires connectés en parallèle sans connecter la ventilation).

V.2.4.3 Procédure pratique

- Les mêmes étapes de l'exercice 3 des panneaux solaires en parallèle, mais connectez les panneaux des ventilateurs en sélectionnant la position ON du sélecteur FANS.

V.2.4.4 Résultats et tableaux

V.2.1.4.a Courbe I-V des panneaux solaires connectés en Parallèle avec les ventilateurs «ON» pour différents niveaux de rayonnement

Comme nous l'avons déjà mentionné précédemment, on connecter les deux panneaux 1 et 2 en parallèle, mais on activer le système de ventilation ⇒ connectez les ventilateurs en sélectionnant la position ON du sélecteur FANS. On faire trois expériences avec trois niveaux rayonnement différente (Pposition1 : 100% - position 2 : 80% - position3 : 60%) pour obtenir trois courbes I-V. Une fois note les valeurs du courant I (Amp) et V (Volts) détectée sur l'afficheur (programme SCADA) pour les deux panneaux. On procède avec l'acquisition des données au tableau (V.25).

Il faut note que les valeurs présentées dans le tableau (V.25) tel que courant (I) et tension (V) sont des valeurs moyenne car on a répète chaque expérience trois fois pour faire une étude statistique.

Deux panneaux PVs connectés en parallèle avec ventilateurs									
Position R (%)	Max SUN 100% (Position 1)			SUN 80% (Position 2)			SUN 60% (Position 3)		
	Imoy (Amp)	Vmoy (Volts)	Wrmoy (w/m ²)	Imoy (Amp)	Vmoy (Volts)	Wrmoy (w/m ²)	Imoy (Amp)	Vmoy (Volts)	Wrmoy (w/m ²)
100	2,015	2,1	320,4	1,657	1,6	288,8	1,125	0,9	179,1
90	1,321	18,9	320,4	1,219	17,9	288,8	0,985	15,7	179,1
80	0,557	19,5	320,4	0,536	18,8	288,8	0,519	18,2	179,1
70	0,379	19,6	320,4	0,375	19	288,8	0,362	18,5	179,1
60	0,287	19,7	320,4	0,283	19,1	288,8	0,272	18,6	179,1
50	0,228	19,7	320,4	0,221	19,2	288,8	0,215	18,7	179,1
40	0,184	19,7	320,4	0,177	19,2	288,8	0,174	18,8	179,1
30	0,154	19,7	320,4	0,145	19,2	288,8	0,145	18,9	179,1
20	0,123	19,8	320,4	0,12	19,2	288,8	0,126	18,9	179,1
10	0,112	19,8	320,4	0,107	19,2	288,8	0,101	18,9	179,1
0	0,101	19,8	320,4	0,097	19,2	288,8	0,094	18,9	179,1

Tableau V.25 : Valeurs moyenne de courant et tension pour deux panneaux connectés en parallèle avec ventilateurs (pour trois niveaux d'éclairéments différents : 100% - 80% - 60%)

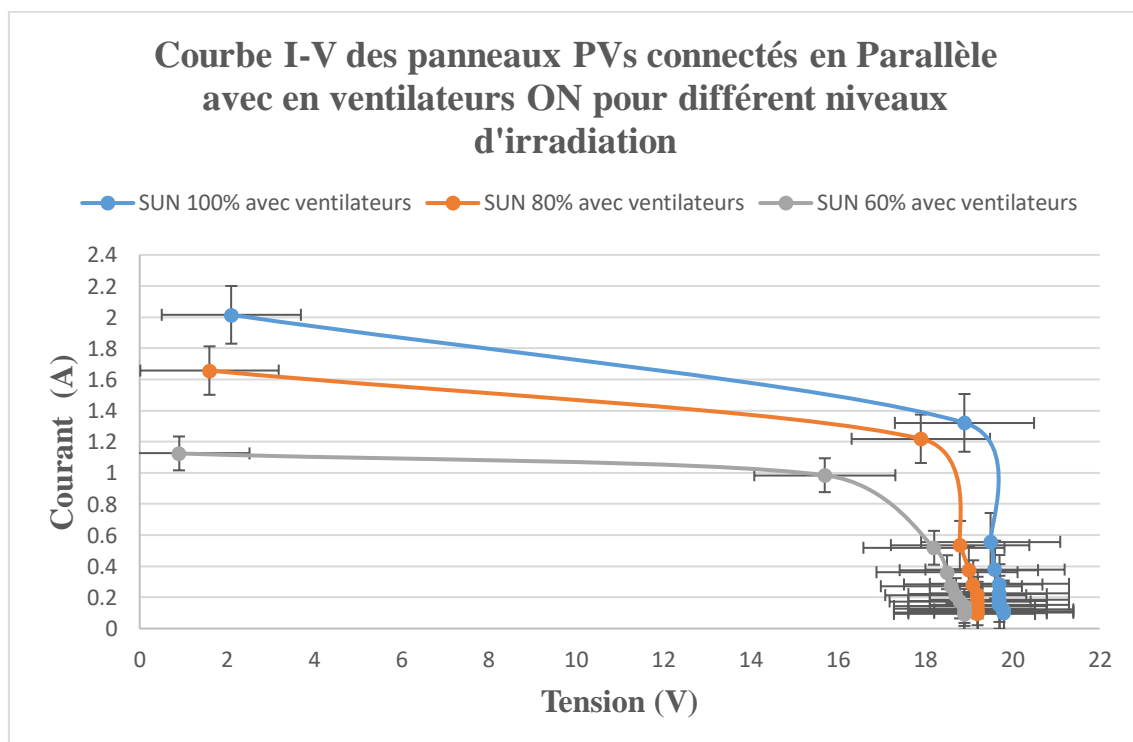


Figure V.22 : Caractéristique courant-tension pour deux panneaux connectés en parallèle avec ventilateurs, avec la condition suivante : Trois niveaux d'éclairéments différents : 100% - 80% - 60%.

On constate le même comportement pour les deux panneaux connectés en Parallèle sans ventilateurs par rapport aux situations précédentes (les trois niveaux d'éclairiments différents : 100% - 80% - 60%) [Le cas précède (**Exercice 3**)], sauf qu'il existe une légère différence de courant et une augmentation de la valeur de la tension (ce résultat coïncide avec les études théoriques et expérimentales. Voir le chapitre III).

La figure (V.22) donne les valeurs caractéristiques (I-V) des deux panneaux connectés en Parallèle avec Ventilateurs pour différent niveaux d'irradiation (SUN-1 et SUN-2 \Rightarrow position 1 : 100%, position 2 :80%, position 3 : 60%). On distingue deux régions : [Un courant approximativement constant (l'apparition d'un décalage du courant approximativement 0.69A entre 2.1V et 18.9V). On constate une chute de courant brusque de 1.2A à 0.1A entre 19.2V et 19.8V \Rightarrow pour rayonnement 100% (position 1)]. [Un courant approximativement constant (l'apparition d'un décalage du courant approximativement 0.44A entre 1.6V et 17.9V), une chute de courant brusque de 1A à 0.097A entre 18.6V et 19.2V \Rightarrow pour rayonnement 80% (position 2)]. [Un courant approximativement constant (l'apparition d'un décalage du courant approximativement 0.14A entre 0.9 V et 15.7V), une chute de courant brusque de 0.8A à 0.094A entre 17.1 V et 18.9V \Rightarrow pour rayonnement 60% (position 3)].

On remarque que pour chaque rayonnement, il y a une courbe (I-V) qui lui correspond et ça provoque la diminution de rendement du panneau solaire.

La connexion des ventilateurs entraîne une diminution de la température, donc une légère diminution du courant court-circuit I_{cc} , mais la tension du circuit ouvert V_{oc} augmente.

On note que pour chaque rayonnement, il existe une courbe (I-V) qui a une certaine tension, car chaque rayonnement à une température spéciale qui affecte les panneaux PVs.

En fin, On perçoit sur la figure (V.22) que les valeurs extrêmes de la courbe courant-tension (I-V) pour chaque niveau d'éclairiment sont comme suit :

4) Pour rayonnement solaire 100% (Position 1)

- Détermination de : I_{CC} (A), V_{OC} (V)

$$I_{CC_{moy}} \text{ (A)} = 2,02 \text{ A} \quad V_{OC_{moy}} \text{ (V)} = 19,9 \text{ V}$$

$$P_{max,idéale} = I_{CC_{moy}} \cdot V_{OC_{moy}} = 40,2 \text{ W}$$

- Déterminer le point de puissance maximale PPmax

$$I_{opt} (A) = 1,316 A$$

$$V_{opt} (V) = 19V$$

$$P_{max} = I_{opt} \cdot V_{opt} = 25 W$$

5) Pour rayonnement solaire 80% (Position 2)

- Détermination de : I_{CC} (A), V_{OC} (V)

$$I_{CC_{moy}} (A) = 1,66 A \quad V_{OC_{moy}} (V) = 19,5 V$$

$$P_{max, idéale} = I_{CC_{moy}} \cdot V_{OC_{moy}} = 32,37 W$$

- Déterminer le point de puissance maximale PPmax

$$I_{opt} (A) = 1,219 A$$

$$V_{opt} (V) = 18V$$

$$P_{max} = I_{opt} \cdot V_{opt} = 21,94 W$$

6) Pour rayonnement solaire 60% (Position 3)

- Détermination de : I_{CC} (A), V_{OC} (V)

$$I_{CC_{moy}} (A) = 1,13 A \quad V_{OC_{moy}} (V) = 19,2 V$$

$$P_{max, idéale} = I_{CC_{moy}} \cdot V_{OC_{moy}} = 21,70 W$$

- Déterminer le point de puissance maximale PPmax

$$I_{opt} (A) = 0,973 A$$

$$V_{opt} (V) = 16 V$$

$$P_{max} = I_{opt} \cdot V_{opt} = 15,57 W$$

V.2.1.4.b Courbe de la puissance en fonction de la tension des panneaux solaires connectés en Parallèle pour différents niveaux de rayonnement

Grâce aux données précédentes (tableau V.25).on calculer les valeurs de puissance et noter les données obtenues dans le tableau (V.26).

Deux panneaux PVs connectés en parallèle avec ventilateurs									
	Max SUN 100% (Position 1)			SUN 80% (Position 2)			SUN 60% (Position 3)		
Position R (%)	Pmoy (W)	Vmoy (Volts)	Wrmoy (w/m ²)	Pmoy (W)	Vmoy (Volts)	Wrmoy (w/m ²)	Pmoy (W)	Vmoy (Volts)	Wrmoy (w/m ²)
100	4,232	2,1	320,4	2,651	1,6	288,8	1,013	0,9	179,1
90	24,967	18,9	320,4	21,82	17,9	288,8	15,465	15,7	179,1
80	10,862	19,5	320,4	10,077	18,8	288,8	9,446	18,2	179,1
70	7,428	19,6	320,4	7,125	19	288,8	6,697	18,5	179,1
60	5,654	19,7	320,4	5,405	19,1	288,8	5,059	18,6	179,1
50	4,492	19,7	320,4	4,243	19,2	288,8	4,021	18,7	179,1
40	3,625	19,7	320,4	3,398	19,2	288,8	3,271	18,8	179,1
30	3,034	19,7	320,4	2,784	19,2	288,8	2,741	18,9	179,1
20	2,435	19,8	320,4	2,304	19,2	288,8	2,381	18,9	179,1
10	2,218	19,8	320,4	2,054	19,2	288,8	1,909	18,9	179,1
0	1,999	19,8	320,4	1,862	19,2	288,8	1,777	18,9	179,1

Tableau V.26 : Valeurs moyenne de puissance et tension pour deux panneaux connectés en Parallèle avec ventilateurs (pour trois niveaux d'éclairéments différents : 100% - 80% - 60%).

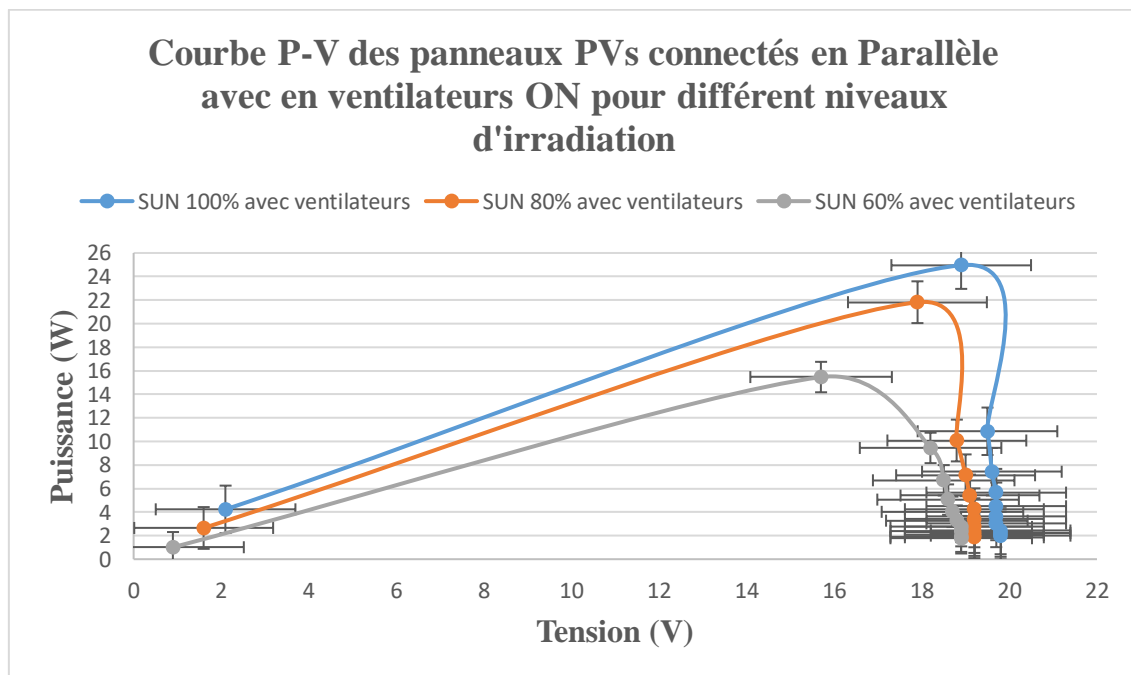


Figure V.23 : Caractéristique puissance-tension pour deux panneaux connectés en parallèle avec ventilateurs, avec la condition suivante : Trois niveaux d'éclairéments différents : 100% - 80% - 60%.

La figure (V.23) illustre la caractéristique (P-V) des deux panneaux connectés en Parallèle avec Ventilateurs pour différent niveaux d'irradiation (SUN-1 et SUN-2 \Rightarrow position 1 : 100%, position 2 :80%, position 3 : 60%). On remarque sur la courbe ci-dessus (figure V.23), il y'a deux régions pour chaque niveau d'éclairage : [Augmentation de puissance de 4.23W à 24.96W entre 2.1V et 18.9V pour rayonnement 100% (position 1), Augmentation de puissance de 2.65W à 21.82W entre 1.6V et 17.9V pour rayonnement 80% (position 2), Augmentation de puissance de 1.01W à 15.46W entre 0.9V et 15.7V pour rayonnement 60% (position 3)] jusqu'à atteindre **une valeur maximale (puissance maximale)** à une **valeur de tension optimale**. Ensuite, Une chute puissance brusque de 24W à 1.99W entre 19.5V et 19.8V pour rayonnement 100% (position 1), Diminution de puissance de 21W à 1.86W entre 18.6V et 19.2V (rayonnement 80% (position 2)). Une chute puissance brusque de 15W à 1.77W entre 16.6V et 18.9V pour rayonnement 60% (position 3).

La position parfaite du rhéostat pour obtenir la puissance maximale pour les trois niveaux d'éclairagements 100% - 80% - 60% : **Environ 10 %**

V.2.1.4.c Détermination le point de la puissance maximale de chacune des courbes obtenues

Les valeurs de courant optimale et tension optimale pour chaque niveau d'éclairément dans le tableau ci-dessous (V.27) :

PAN-1 et PAN-2 en parallèle avec ventilateurs			
SUN (%)	Iopt (Amp)	Vopt (Volts)	Wrmoy (w/m ²)
100	1,316	19	320,4
80	1,219	18	288,8
60	0,973	16	179,1

Tableau V.27 : Valeurs de courant optimale et tension optimale pour deux panneaux connectés en Parallèle avec ventilateurs (pour trois niveaux d'éclairéments différents : 100% - 80% - 60%).

➤ Les valeurs de puissance maximale

Après avoir trouvé les valeurs de courant optimale et tension optimale pour deux panneaux, on peut calculer les valeurs de puissance maximale. Les valeurs de puissance maximale sont données dans le tableau (V.28).

SUN (%)	PAN-1 et PAN-2 en parallèle avec ventilateurs	
	Pmax (W)	Wrmoy (w/m ²)
100	25	320,4
80	21,94	288,8
60	15,57	179,1

Tableau V.28 : Valeurs de puissance maximale pour deux panneaux connectés en Parallèle avec ventilateurs (pour trois niveaux d'éclairéments différents : 100% - 80% - 60%).

V.2.1.4.d La différence entre des courbes I-V et P-V pour les panneaux PVs connectés en parallèle sans ventilateurs et avec ventilateurs

Pour comparer la différence entre les panneaux solaires connectés en parallèle sans ventilateurs et avec ventilateurs. On prenne des données d'expériences antérieures (tableau V.16 - V.17 pour les panneaux sans ventilateurs et tableau V.25 - V.26 pour les panneaux avec ventilateurs). Ensuite, on représenter le graphique des résultats :

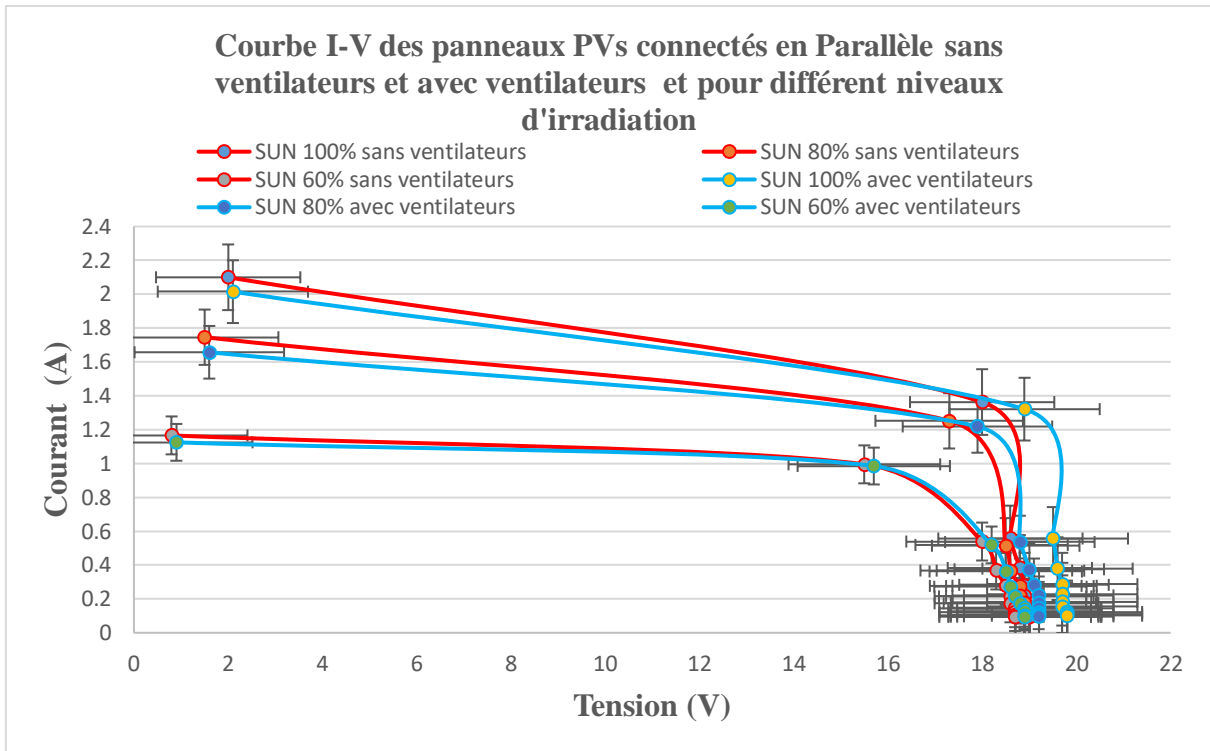


Figure V.24 : Caractéristique courant-tension pour deux panneaux connectés en parallèle sans ventilateurs et avec ventilateurs à condition suivante : Trois niveaux d'éclairéments différents : 100% - 80% - 60%.

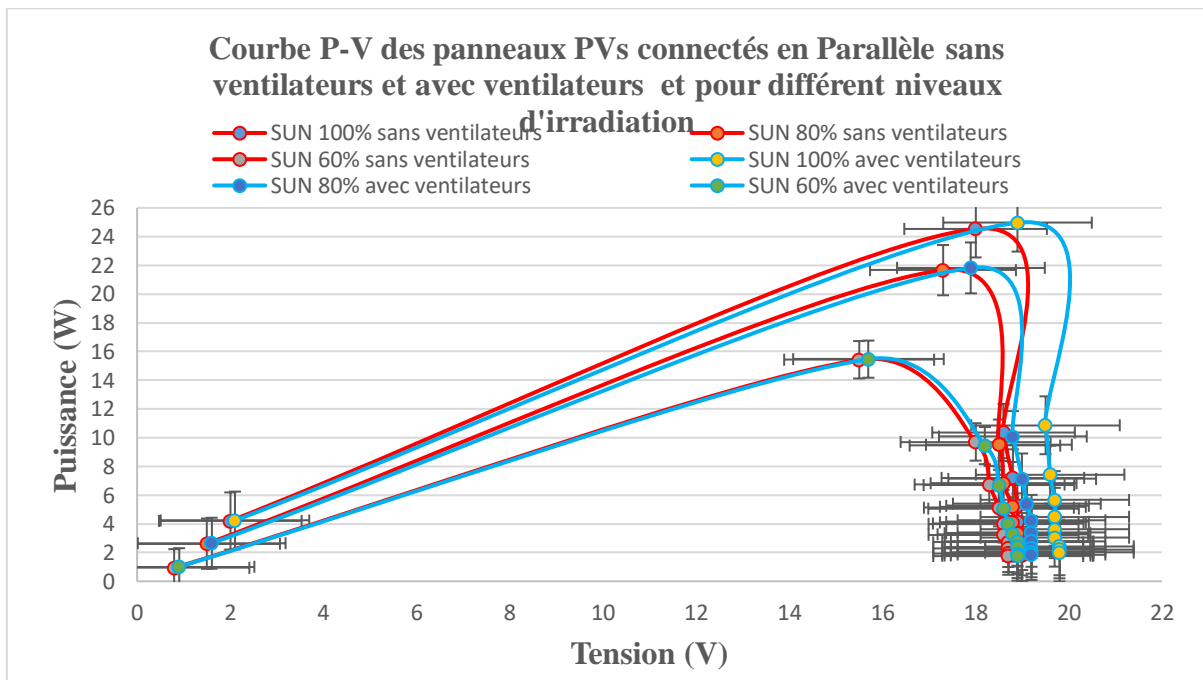


Figure V.25 : Caractéristique puissance-tension pour deux panneaux connectés en parallèle sans ventilateurs et avec ventilateurs à condition suivante : Trois niveaux d'éclairéments différents : 100% - 80% - 60%.

La figure (V.24) présente le graphe caractéristique courant-tension et la figure (V.25) présente la caractéristique puissance-tension pour des deux panneaux en parallèle sans ventilateurs et avec ventilateurs à condition suivante : Trois niveaux d'éclairements différents : 100% - 80% - 60%. On remarque que les ventilateurs sont allumés, la température diminue. Ainsi, on conclue des courbes d'information suivantes :

Pour chaque d'éclairement, il y a une température spéciale dans le système PV et une courbe spéciale (I-V) des panneaux PVs.

Pour chaque température, il y a des caractéristiques électriques spéciales des panneaux PVs (courant, tension, puissance, rendement).

La température des panneaux PVs augmente considérablement sous l'action du rayonnement solaire.

Lorsque la température diminue, le courant de court-circuit diminue légèrement, tandis que la tension du circuit ouvert Voc augmente.

La puissance générée par les panneaux PVs est affectée par la température, car la valeur de puissance augmente que la température diminue.

V.2.1.4.e La différence entre les panneaux PVs connectés en parallèle sans ventilateurs et avec ventilateurs par apport les caractéristiques électriques

Dans le tableau suivant (V.29), les valeurs de puissance maximale pour deux panneaux connectés en Parallèle sans ventilateurs et avec ventilateurs :

SUN (%)	PAN-1 et PAN-2 en parallèle sans ventilateurs		PAN-1 et PAN-2 en parallèle avec ventilateurs	
	Pmax (W)	Wrmoy (w/m ²)	Pmax (W)	Wrmoy (w/m ²)
100	24,8	320,5	25	320,4
80	21,9	288,1	21,94	288,8
60	15,5	178,9	15,57	179,1

Tableau V.29 : Valeurs de puissance maximale pour deux panneaux connectés en Parallèle sans ventilateurs et avec ventilateurs (pour trois niveaux d'éclairements différents : 100% - 80% - 60%).

➤ **Le facteur de remplissage (Facteur de forme) de chaque rayonnement solaire**

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{oc}} = \frac{I_{opt} \cdot V_{opt}}{I_{cc} \cdot V_{oc}}$$

1) **Rayonnement solaire 100% (Position 1)**

$$FF = \frac{25}{2,02 \cdot 19,9} = \frac{1,316 \cdot 19}{2,02 \cdot 19,9} = 0,622$$

2) **Rayonnement solaire 80% (Position 2)**

$$FF = \frac{21,94}{1,66 \cdot 19,5} = \frac{1,219 \cdot 18}{1,66 \cdot 19,5} = 0,678$$

3) **Rayonnement solaire 60% (Position 3)**

$$FF = \frac{15,57}{1,13 \cdot 19,2} = \frac{0,973 \cdot 16}{1,13 \cdot 19,2} = 0,718$$

➤ **Le rendement de chaque rayonnement solaire**

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_i} = FF \frac{I_{cc} \cdot V_{oc}}{P_i}$$

$$P_i = \text{Eclairement} * \text{Surface}$$

$$\% \text{ rendemant} = \text{rendement} * 100$$

1) **Rayonnement solaire 100% (Position 1)**

$$\eta = \frac{25}{320,4 \cdot 0,51} = 0,622 \frac{2,02 \cdot 19,9}{320,4 \cdot 0,51} = 0,153$$

$$\% \text{ rendemant} = 0,153 * 100 = 15,3\%$$

2) **Rayonnement solaire 80% (Position 2)**

$$\eta = \frac{21,94}{288,8 \cdot 0,51} = 0,678 \frac{1,66 \cdot 19,5}{288,8 \cdot 0,51} = 0,149$$

$$\% \text{ rendemant} = 0,149 * 100 = 14,9\%$$

3) **Rayonnement solaire 60% (Position 3)**

$$\eta = \frac{15,57}{179,1 \cdot 0,51} = 0,718 \frac{1,13 \cdot 19,2}{179,1 \cdot 0,51} = 0,1705$$

$$\% \text{ rendemant} = 0,1705 * 100 = 17,05\%$$

- Dans le tableau suivant (V.30), les valeurs de facteur de forme et de rendement pour deux panneaux connectés en Parallèle sans ventilateurs et avec ventilateurs :

	Deux panneaux PVs connectés en parallèle sans ventilateurs			Deux panneaux PVs connectés en parallèle avec ventilateurs		
Niveau d'éclairage	100%	80%	60%	100%	80%	60%
Facteur de forme	0,618	0,660	0,707	0,622	0,678	0,718
Rendement %	15,17%	14,9%	16,99%	15,3%	14,9%	17,05%

Tableau V.30 : Valeurs de facteur de forme et de rendement pour deux panneaux connectés en Parallèle sans ventilateurs et avec ventilateurs (pour trois niveaux d'éclairagements différents : 100% - 80% - 60%).

À partir des données et des calculs ci-dessus. Grâce au fonctionnement des ventilateurs et au faible refroidissement des panneaux PVs, on constate une légère différence dans la valeur de rendement, mais le rendement des panneaux PVs augmente avec le refroidissement du système (effet de température).

On note quand l'éclairage diminue, le rendement diminue (température de système plus élevé). Mais en cas de mauvais éclairage, la valeur de rendement augmente, en raison de la température plus basse. ⇒ La température idéale augmente le rendement.

En fin, on peut noter que le rendement est plus élevé pour les panneaux avec ventilateurs et pour obtenir meilleur rendement, il faut diminuer la température.

V.2.4.5 Conclusion pour exercice 4

- Le rayonnement solaire affecte la température des panneaux PVs.
- L'éclairement et la température sont les deux principaux paramètres qui modifier la caractéristique d'un générateur PV.
- Quand la température augmente, la tension de court-circuit diminue, mais le courant de court-circuit augmente.
- Le rendement des panneaux PVs est affectée par la température, car la valeur de rendement augmente que la température diminue.
- Pour augmenter la puissance, il faut réduire la température pour obtenir bien rendement.
- Il y a température idéale pour obtenir le meilleur rendement des panneaux PVs.
- L'éclairement influe sur le rendement photovoltaïque mais il n'est pas seul puisque la température aussi est un facteur influant sur le rendement η des panneaux PVs.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

L'effet photovoltaïque c'est la création d'une force électromotrice liée à l'absorption d'énergie lumineuse dans un solide. C'est le seul moyen connu actuellement pour convertir directement la lumière en électricité. La cellule photovoltaïque constitue l'élément de base des panneaux solaires photovoltaïques. Il s'agit d'un dispositif (jonction pn) semi-conducteur à base de silicium. Afin que nous puissions mieux comprendre le principe, le mécanisme et l'avantage derrière les cellules photovoltaïques. Nous avons présenté les Généralités sur la jonction pn et sur les énergies renouvelables.

Dans ce mémoire de fin d'études, on a utilisé des équipements d'énergie Solaire Photovoltaïque contrôlée par ordinateur avec SCADA (EESFC), l'équipement contrôlé par ordinateur (PC), "EESFC", comprend le matériel qui utilise la loi de la photo-conversion, qui convertit directement le rayonnement solaire en électricité. L'énergie absorbée est fournie par le rayonnement solaire simulée, qui dans notre cas est fournie au moyen d'un panneau avec une source lumineuse très puissante (lampes solaires).

Nous avons étudié sous forme des exercices les caractéristiques des deux panneaux photovoltaïques suivant plusieurs configurations individuelles, parallèle et série et suivant plusieurs paramètres tels que rhéostat, intensité d'éclairement...etc. A la fin de ce travail on peut résumer notre travail par les points suivants :

- Le courant I_{cc} varie directement avec le rayonnement, la tension restant relativement constante.
- L'intensité du rayonnement est responsable de l'efficacité de puissance produite par les panneaux
- La valeur maximale de la puissance dépend de la position du rhéostat
- Pour augmenter le rendement, on augmente l'intensité de courant
- Les panneaux utilisés ont les mêmes caractéristiques que les panneaux (fournis par le fabricant).
- A faible éclairement, les panneaux photovoltaïques ne font pas le phénomène photoélectrique.
- Rhéostat amplifie et réduit la puissance pour les deux panneaux (1 et 2)
- Il y a une relation directe entre la puissance maximale et le rayonnement solaire

- La valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement.
- La connexion des panneaux en parallèle permet d'accroître le courant de sortie du générateur PV par addition des courants de chaque panneau tandis que la tension ne diffère pas (mêmes tensions).
- La connexion des panneaux en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque par addition des tensions élémentaires de chaque panneau tandis que le courant reste le même, donc accroître la puissance.
- La température a une influence sur la caractéristique du générateur PV.
- Le courant à circuit ouvert I_{cc} est faiblement sensible à la variation de la température.
- Le courant augmente avec la température, par contre la tension de circuit ouvert diminue.
- L'éclairement influe sur le rendement photovoltaïque mais il n'est pas seul puisque la température aussi est un facteur influant sur le rendement η des panneaux PVs.

Perspectives

Ce travail ouvre de nombreuses perspectives. Cette technologie est utilisée dans le domaine de la recherche scientifique, et de nombreuses études et travaux peuvent être réalisés en laboratoire (voir chapitre IV). Nous pouvons effectuer de nombreuses tâches avancées de base en utilisant cette technologie dans le domaine des industries de l'énergie propre :

- Cette technologie est considérée comme un mini-projet pour de nombreux projets importants et avancés.
- Cette technologie peut être combinée avec les centrales d'énergie solaire pour surveiller tous les appareils de centrale en temps réel, en plus d'ajuster les facteurs naturels et industriels des panneaux PVs (température, éclairage, résistance...), afin d'obtenir les niveaux d'énergie les plus élevés. En plus de maintenir les appareils contre les dommages, grâce à la connaissance des défauts par des alarmes et des indicateurs de surveillance.
- Sans besoin d'énergie fossile ou nucléaire ou même du soleil, nous pouvons produire de l'énergie par nous-mêmes en développant cette technologie avec une grande

puissance rayonnante aux lampes et des conditions favorables (nous l'adaptions en fonction de nos besoins). Nous pouvons produire, stocker et contrôler notre consommation d'énergie.

- Dans le domaine des industries aérospatiales et de la conquête spatiale, on craint d'endommager les panneaux solaires en raison de la chaleur et des rayons nocifs du soleil. Il existe aussi la possibilité d'absence de source lumineuse pour économiser l'énergie. Par conséquent, cette technique peut être utilisée avec quelques améliorations (utilisation de panneaux monocristallins, ventilation et refroidissement des panneaux, améliorer l'efficacité des panneaux en ajustant leurs propriétés physiques et électriques ...).

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUE

Références bibliographiques

INTRODUCTION GENERAL

- [1] Tissot, B. (2003). Sources d'énergie primaires et effet de serre. *Comptes Rendus Geoscience*, 335(6-7), 597-601.
- [2] Louis, D., & Ricaud, J. L. (2018). 2050, la France sans carbone. Fayard.
- [3] Sarlos, G., Haldi, P. A., & Verstraete, P. (2003). *Systèmes énergétiques: Offre et demande d'énergie: méthodes d'analyse (Vol. 21)*. PPUR presses polytechniques.
- [4] Roussel, I. (2015). La production d'électricité photovoltaïque en France. 2268-3798.
- [5] Basse-Normandie, L. PLAN SOLEIL 2000-2006.
- [6] Belgacem, T. (2016). Les ressources de l'Algérie. *Outre-Terre*, (2), 152-164.
- [7] Benelkadi, A. O., Kaabeche, A., & Bakelli, Y. (2018). Etude de faisabilité technico-économique des centrales photovoltaïques en Algérie. *Revue des Energies Renouvelables*, 21(2), 181-198.

CHAPITRE I : Généralité sur la jonction pn

- [1] P.H. Holloway, G.E. McGuire, *Handbook of compound semiconductors: growth, processing, characterization, and devices*, Elsevier, 1996.
- [2] A. Chovet, P. Masson, Ecole Polytechnique–université de Marseille, (2004).
- [3] O. Madelung, *Semiconductors: data handbook*, Springer Science & Business Media, 2012.
- [4] H. Hase, I. Salzmann, Doping in organic semiconductors, in: *Handbook of Organic Materials for Electronic and Photonic Devices*, Elsevier, 2019, pp. 349-383.
- [5] F. Oehler, Mémoire de DEA, ENS-Lyon, 50 (2007).
- [6] J. Perrin Toinin, Étude du dopage et de la formation des contacts pour les technologies germanium, in, Aix-Marseille, 2016.
- [7] H. Katayama-Yoshida, K. Sato, M. Toyoda, V. Dinh, T. Fukushima, H. Kizaki, Computational Materials Design in Semiconductor Nano-spintronics, in: *Handbook of Spintronic Semiconductors*, Jenny Stanford Publishing, 2019, pp. 1-79.
- [8] D. Le Boeuf, Reconstruction de la surface de Fermi dans l'état normal d'un supraconducteur à haute T_c: Une étude du transport électrique en champ magnétique intense, 2009.
- [9] H. Mathieu, H. Fanet, *Physique des semiconducteurs et des composants électroniques-6ème édition: Cours et exercices corrigés*, Dunod, 2009.

- [10] S.S. Srikant, P.K. Chaturvedi, Basic Electronics Engineering: Including Laboratory Manual, Springer Nature, 2020.
- [11] Y. MAROUF, Etude et simulation des cellules solaires multi-jonctions à base de matériaux semi-conducteurs III-V, in, Université Mohamed Khider-Biskra, 2019.
- [12] M. Djedid, N. Hebbir, (2019).

CHAPITRE II : Généralité sur les énergies renouvelables

- [1] F. Meunier, Les énergies renouvelables, Le Cavalier bleu, 2008.
- [2] C. Acket, J. Vaillant, Les énergies renouvelables: état des lieux et perspectives, Editions Technip, 2011.
- [3] P. Mouratoglou, P.-G. Thérond, L'énergie solaire photovoltaïque, in: Annales des Mines-Realites industrielles, Eska, 2009, pp. 61-70.
- [4] M. Rapin, J.M. Noël, Dunod, Paris, (2010).
- [5] M. Rapin, P. Leconte, Eoliennes, Ed. Techniques Ingénieur, 2009.
- [6] K. Ferkous, Mémoire de Magister, Université Mentouri Constantine, (2009).
- [7] A. Labouret, M. Viloz, Energie solaire photovoltaïque, Dunod, 2006.
- [8] D. Lincot, Découverte n0344-345,(2007), 47, 65 (2007).
- [9] S. Brigand, complément technique, Techniques de construction, (2008).
- [10] J. Percebois, Cahier de recherche n, 14 (2014) 107.

CHAPITRE III : Généralité sur les cellules photovoltaïques

- [1] S. Astier, Conversion photovoltaïque: du rayonnement solaire à la cellule, Ed. Techniques Ingénieur2008.
- [2] B. Roger, M. GILBERT, S. MARCEL, Le rayonnement solaire conversion thermique et Applications, Paris Tec et Doc, DOI (1980).
- [3] L. Protin, S. Astier, Convertisseurs photovoltaïques, Techniques de l'ingénieur. Génie électrique, 5 (1997) D3360. 3361-D3360. 3319.
- [4] J.-M. Chassériaux, Conversion thermique du rayonnement solaire, Dunod1984.
- [5] S. Souad, Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan, Université Mentouri De Constantine, 2 (2010) 3.
- [6] B.F.-D. Delagnes, B. Flèche, Energie solaire photovoltaïque. doc, juin, 2007.

- [7] M. Boukadoum, A. Hamidat, N. Ourabia, Le Pompage Photovoltaïque, Revue des Energies Renouvelables, NS Zones Arides, DOI (2002) 69-73.
- [8] A. Labouret, M. Viloz, Installations photovoltaïques-5e éd.: Conception et dimensionnement d'installations raccordées au réseau, Dunod2012.
- [9] L. Sacco, Isthme de Panama: une datation de sa fermeture secoue les géosciences, Article paru dans revue Futura-Sciences: <http://www.futurasciences.com/magazines/terre/infos/actu/d/tectonique-plaques-isthme-panama-datationfermeturesecouegeosciences-57723>, DOI (2015).
- [10] Y. Pankow, Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. Application au générateur photovoltaïque, National School Superior of Art and Trades, Lille, DOI (2004).
- [11] A. Labouret, M. Viloz, Energie solaire photovoltaïque, Dunod2006.
- [12] B. Equer, Energie solaire photovoltaïque, Physique et technologie de la conversion photovoltaïque,(Ellipses, UNESCO, 1993), DOI (1993) 66-137.
- [13] S. Archambeau, P. Destruel, I. Seguy, M. Oukachmih, P. Jolinat, M. Mabilia, H. Bock, Organic photovoltaic cells based on organic discotic materials, 2004 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, IEEE, 2004, pp. 1393-1396.
- [14] A. Luque, S. Hegedus, Handbook of photovoltaic science and engineering, John Wiley & Sons2011.
- [15] J. Zhao, A. Wang, P. Campbell, M.A. Green, A 19.8% efficient honeycomb multicrystalline silicon solar cell with improved light trapping, IEEE Transactions on Electron Devices, 46 (1999) 1978-1983.
- [16] B. Ahlam, C. Imane, Extraction des Paramètres du Module Photovoltaïque, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA, 2019.
- [17] M. Urien, Cellules photovoltaïques organiques à base copolymères à blocs de type rigide-flexible, Bordeau I, Bordeaux, DOI (2008) 234.
- [18] M. Souilah, Étude cristalochimique de semi-conducteurs CIGSe pour cellules photovoltaïques en couches minces, Nantes, 2009.
- [19] A. SLAOUI, Électricité photovoltaïque-Matériaux et marchés, DOI (2019).
- [20] S. BENOTMANE, F. MOUALEK, Etude et simulation des systèmes photovoltaïques connectés à un microgrid.
- [21] M.N.-C.E. MECHALIKH-HAMADA, Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau.
- [22] B.L. Sofia, Cours Energie Solaire Photovoltaïque, Université, 2015.

[23] Z. Souad, Réalisation d'un régulateur solaire à base de microcontrôleur pour le contrôle de l'état de charge et la protection des accumulateurs, Mémoire de Magister en Electrotechnique, DOI (2008).

[24] F. Slama, Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique, 2018.

**CHAPITRE IV : Généralité sur la technologie des équipements d'énergie Solaire
Photovoltaïque contrôlée par ordinateur avec SCADA (EESFC)**

[1] Guide de la technologie des équipements d'énergie Solaire Photovoltaïque contrôlée par ordinateur avec SCADA (EESFC).