

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université -Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département Génie Mécanique



Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Energétique
Thème

Etude Dimensionnelle D'une Installation Photovoltaïque

Présenté Par :

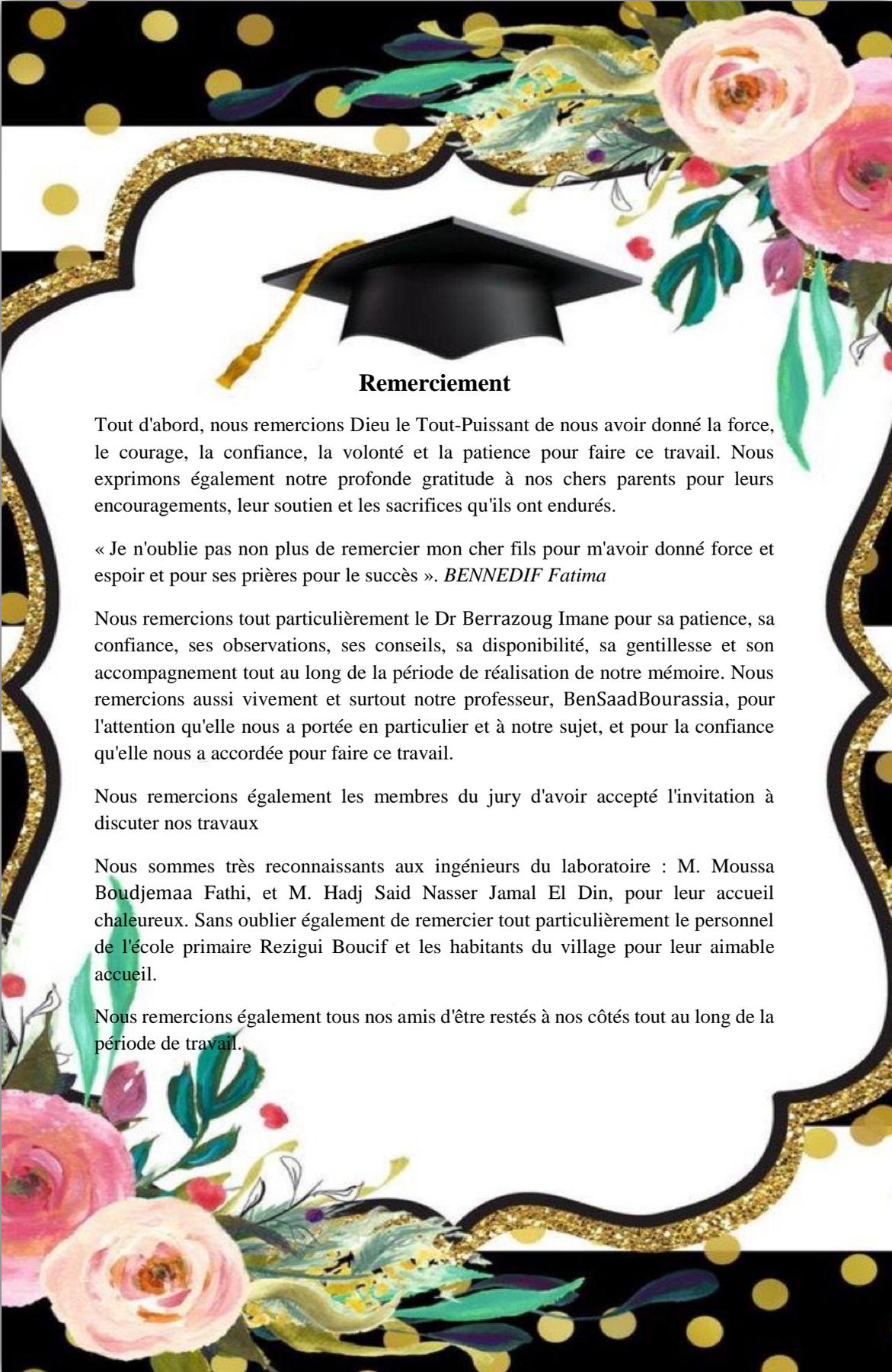
- 1) Mr. BENEDDIF FATIMA ZOHRA
- 2) Melle. BELDJILALI ASSMAA

Devant le jury composé de :

Dr BELHMIANI MOHAMED	MCA	UAT.B.B (Ain-Temouchent)	Président
Dr. NEHARI TAYAB	MCA	UAT.B.B (Ain-Temouchent)	Examineur
Dr. BERREZOUG IMANE	MCB	UAT.B.B (Ain-Temouchent)	Encadrant
Pr. BENSAAD BOURASIA	Pr	UAT.B.B (Ain-Temouchent)	Co-Encadrante

Année universitaire 2020/2021

وَقَدْ
رَبِّ زَيْنِ عَالِمًا



Remerciement

Tout d'abord, nous remercions Dieu le Tout-Puissant de nous avoir donné la force, le courage, la confiance, la volonté et la patience pour faire ce travail. Nous exprimons également notre profonde gratitude à nos chers parents pour leurs encouragements, leur soutien et les sacrifices qu'ils ont endurés.

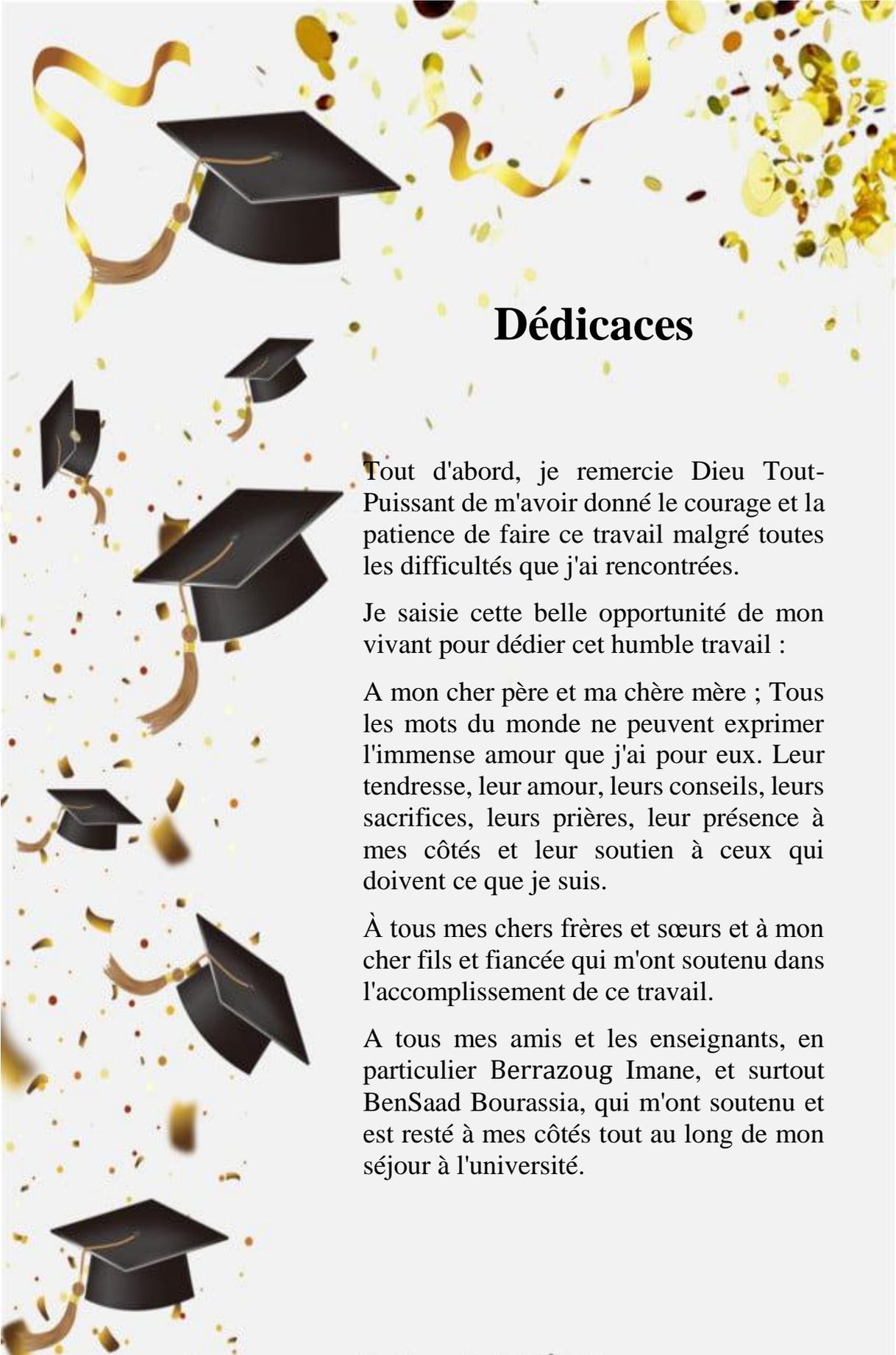
« Je n'oublie pas non plus de remercier mon cher fils pour m'avoir donné force et espoir et pour ses prières pour le succès ». *BENNEDIF Fatima*

Nous remercions tout particulièrement le Dr Berrazoug Imane pour sa patience, sa confiance, ses observations, ses conseils, sa disponibilité, sa gentillesse et son accompagnement tout au long de la période de réalisation de notre mémoire. Nous remercions aussi vivement et surtout notre professeur, BenSaadBourassia, pour l'attention qu'elle nous a portée en particulier et à notre sujet, et pour la confiance qu'elle nous a accordée pour faire ce travail.

Nous remercions également les membres du jury d'avoir accepté l'invitation à discuter nos travaux

Nous sommes très reconnaissants aux ingénieurs du laboratoire : M. Moussa Boudjemaa Fathi, et M. Hadj Said Nasser Jamal El Din, pour leur accueil chaleureux. Sans oublier également de remercier tout particulièrement le personnel de l'école primaire Rezigui Boucif et les habitants du village pour leur aimable accueil.

Nous remercions également tous nos amis d'être restés à nos côtés tout au long de la période de travail.



Dédicaces

Tout d'abord, je remercie Dieu Tout-Puissant de m'avoir donné le courage et la patience de faire ce travail malgré toutes les difficultés que j'ai rencontrées.

Je saisis cette belle opportunité de mon vivant pour dédier cet humble travail :

A mon cher père et ma chère mère ; Tous les mots du monde ne peuvent exprimer l'immense amour que j'ai pour eux. Leur tendresse, leur amour, leurs conseils, leurs sacrifices, leurs prières, leur présence à mes côtés et leur soutien à ceux qui doivent ce que je suis.

À tous mes chers frères et sœurs et à mon cher fils et fiancée qui m'ont soutenu dans l'accomplissement de ce travail.

A tous mes amis et les enseignants, en particulier Berrazoug Imane, et surtout BenSaad Bourassia, qui m'ont soutenu et est resté à mes côtés tout au long de mon séjour à l'université.

Résumé

Notre objectif est d'étudier les dimensions des installations photovoltaïques. Cette étude comprend à la fois les aspects théoriques et pratiques de la technologie des équipements photovoltaïques contrôlés par ordinateur utilisant SCADA (EESFC).

Dans ce travail, nous avons présenté une étude comportant le côté théorique et le côté pratique sur la technologie des équipements photovoltaïques qui sont contrôlés par ordinateur en utilisant SCADA (EESFC). En parallèle et afin de mettre en application les connaissances acquises nous avons procédé à la réadaptation de l'installation existante aux besoins actuels de l'école.

Nos résultats montrent que le courant de court-circuit est directement proportionnel à l'intensité du rayonnement et cela s'applique également à la tension du circuit. L'augmentation de l'énergie se fait en augmentant le rayonnement. De plus, l'éclairage et la température sont des facteurs clés qui modifient les caractéristiques d'un générateur photovoltaïque.

Enfin, pour une étude technico-économique de maintenance d'installations photovoltaïques pour produire l'énergie électrique nécessaire à l'alimentation d'une école primaire. Nos résultats ont conduit au fait que l'installation de systèmes photovoltaïques nécessite une étude minutieuse de la taille et de l'installation, qui ne se limite pas à la seule estimation, afin de ne pas commettre d'erreurs qui conduisent à des dysfonctionnements.

Abstract

Our objective is to study the dimensions of photovoltaic installations. This study included both theoretical and practical aspects of computer-controlled photovoltaic equipment technology using SCADA (EESFC), we conducted a research and a sizing and maintenance study of photovoltaic installations for an already existing primary school, and in order to correct errors that occur during installation.

The most important issue we have addressed is whether the installation of PV systems depends on an estimate or depends on the dimensionality of a PV installation.

In order to solve the problem and answer all questions, the study included five chapters, through which we discussed: The general idea of renewable energies, including solar thermal and photovoltaic energy. Then we highlighted the study of the photovoltaic solar system and the operating principle of cells.

We have also in traduced the different concepts that go into the composition of the PV assembly system, more precisely the stand-alone system.

Our calculations were obtained with the technology of computer-controlled solar photovoltaic equipment using SCADA (EESFC).

Our results show that the short circuit current is directly proportional to the intensity of the radiation and this also applies to the circuit voltage. The increase in energy is done by increasing the radiation.

In addition, lighting and temperature are key factors that modify the characteristics of a photovoltaic generator.

Finally, for a technical-economic study of the maintenance of photovoltaic installations to produce the electrical energy necessary to supply a primary school. Our results have led to the fact that the installation of photovoltaic systems requires a careful study of the size and the installation, which is not limited to the only estimate, in order not to make mistakes that lead to malfunctions, and therefore the impossibility of supplying the product.

التلخيص

هدفنا هو دراسة أبعاد التركيبات الكهروضوئية. تتضمن هذه الدراسة الجوانب النظرية والعملية لتكنولوجيا المعدات الكهروضوئية التي يتم التحكم فيها بواسطة الكمبيوتر باستخدام سكاذا.

في هذا العمل، قدمنا دراسة تضم الجانب النظري والجانب العملي لتقنية المعدات الكهروضوئية التي يتم التحكم فيها بواسطة الكمبيوتر باستخدام سكاذا.

في الوقت نفسه، ومن أجل تطبيق المعرفة المكتسبة، قمنا بإعادة تأهيل المنشأة الحالية لتلبية الاحتياجات الحالية للمدرسة. تظهر نتائجنا أن تيار الدائرة القصيرة يتناسب طردياً مع شدة الإشعاع وهذا ينطبق أيضاً على جهد الدائرة. تتم زيادة الطاقة عن طريق زيادة الإشعاع. بالإضافة إلى ذلك، تعد الإضاءة ودرجة الحرارة من العوامل الرئيسية التي تعمل على تعديل خصائص المولد الكهروضوئي

أخيراً، من أجل دراسة فنية اقتصادية لصيانة التركيبات الكهروضوئية لإنتاج الطاقة الكهربائية اللازمة لتزويد مدرسة ابتدائية. أدت نتائجنا إلى حقيقة أن تركيب الأنظمة الكهروضوئية يتطلب دراسة دقيقة للحجم والتركيب، والتي لا تقتصر على التقدير الوحيد، حتى لا تقع أخطاء تؤدي إلى أعطال.

Tables des matières

Introduction générale.....	23
Chapitre I : Généralité sur l'énergie solaire	26
Introduction :	26
I.1 Les énergies renouvelables	26
I.1.1 L'énergie hydraulique	27
I.1.2 L'énergie éolienne.....	28
I.1.3 L'énergie des courants marins.....	28
I.1.4 La biomasse.....	29
I.1.5 La géothermie.....	29
I.2 L'énergie solaire	31
I.2.1 Le soleil.....	31
I.2.2 Le rayonnement solaire	32
I.2.2.1 Les différents composants du rayonnement solaire.....	33
I.2.2.2 La constante solaire et le nombre masse d'air AM.....	34
I.2.3 L'éclairement et l'irradiation.....	35
I.2.4.1 L'irradiation ou rayonnement.....	35
I.2.4.2 L'éclairement ou irradiance.....	35
I.3 Les types d'exploitation de l'énergie solaire	36
I.3.1 L'énergie solaire sous forme d'énergie thermique.....	36
I.3.1.1 Les différents types de capteur solaire	38
I.3.1.2 Les avantages et les inconvénients	40
I.3.2 L'énergie photovoltaïque	41
I.3.2.1 présentation du photovoltaïque solaire	41
I.3.2.2 Les Avantages et les inconvénients d'énergie photovoltaïque solaire	42
Conclusion.....	42
Chapitre II : Système Photovoltaïque.....	44
Introduction :	44
II.1 L'énergie photovoltaïque dans l'histoire	44
II.2 Conversion photovoltaïque.....	46
II.2.1 La cellule Photovoltaïque	47
II.2.2.1 Le dopage de semi-conducteur.....	48

II.3 Les caractéristiques d'une cellule solaire	51
II.3.1 La tension en circuit-ouvert (V_{co})	51
II.3.2 Le courant de court-circuit (I_{cc})	52
II.3.3 Le point du fonctionnement P_m (V_m, I_m)	52
II.3.4 Le facteur de forme FF	52
II.4 Effet de l'éclairement et de la température sur la caractéristique $I(V)$	53
II.5 Technologie utilisée pour une cellule photovoltaïque	54
II.5.1 Silicium polycristallin	55
II.5.2 Silicium monocristallin	56
II.5.3 Silicium amorphe en couche mince	57
II.6 Le module photovoltaïque	58
II.6.1 Association en série	60
II.6.2 Association en parallèle	61
II.6.3 Association en série parallèle– champ photovoltaïque	61
II.7 Perturbations dans les modules.....	63
II.7.1 Le fonctionnant récepteur d'une cellule solaire	63
II.7.2 Protection par diode	64
II.9 les Systèmes photovoltaïques	65
II.9.1 Système raccordée au réseau	65
II.9.2 Système Photovoltaïque autonome (SPA)	66
II.9.2.1 Les avantages :	67
II.9.2.2 Les inconvénients :	67
II.9.3 Les éléments d'un système photovoltaïque autonome.....	68
II.9.3.1 Générateur PV	68
II.9.3.2 Le régulateur de charge	69
II.9.3.3 L'onduleur	72
II.9.3.4 Les Accumulateurs ou batteries de stockage.....	74
II.9.3.5 Boite de jonction	75
Conclusion :	76
Chapitre III :Dimensionnement d'une installation photovoltaïque.....	78
III.1 Méthode de dimensionnement d'une installation autonome	78
III.1.1 Orientation des modules PV dans une installation photovoltaïque autonome	78
III.1.1.1 la latitude, l'inclinaison et l'orientation optimales des capteurs photovoltaïques	78
III.1.1.2 Ombrage ou repérage des masques	80
III.1.2 Energie de Consommation.....	81
III.1.3 Dimensionnement du générateur photovoltaïque	82

III.1.3.1 Puissance crête d'un générateur photovoltaïque.....	82
III.1.3.2 Tension de fonctionnement du champ photovoltaïque	84
III.1.4 Nombre de panneaux photovoltaïques à utiliser.....	84
III.1.4.1 Nombre de panneaux photovoltaïques en série.....	85
III.1.4.2 Nombre de panneaux photovoltaïques en parallèles.....	87
III.1.5 Dimensionnement du parc de batteries.....	87
III.1.6 Dimensionnement du régulateur de charge	88
III.1.7 Dimensionnement de l'onduleur	90
III.1.8 Le dimensionnement des câbles électriques solaires.....	91
III.2 Maintenance	92
Conclusion.....	92
Chapitre IV :Généralité sur la technologie des équipements d'énergie Solaire Photovoltaïque contrôlée par ordinateur avec SCADA (EESFC).....	94
Introduction	94
IV.1 La technologie des équipements solaires photovoltaïques contrôlés par ordinateur utilisant SCADA (EESFC).....	94
IV.1 présentation de SCADA.....	94
IV.2.1 Spécification techniques complètes.....	96
IV.2.1.1 EQUIPE (EESFC)	96
IV.2.1.2 Boîte d'Interface de Contrôle	100
IV.2.1.3 DAB. Carte d'Acquisition de Données	103
IV.2.1.4 EESFC/CCSOF : « Logiciel de Contrôle, d'Acquisition de Données, de Gestion des Données »	104
IV.2.1.5 Câbles et Accessoires.....	106
IV.2.2 Les fonctions les plus importantes et les résultats possibles de cet appareil.....	106
IV.2.3 Les caractéristiques	107
IV.2.4 Les avantages	108
Conclusion.....	108
Chapitre V : Résultats Expérimentaux	110
Introduction	110
V.1. La Première partie	110
V.1.1 Etude de l'efficacité des panneaux solaires connectés en parallèle et en série	111
V.1.1.1 Objectif.....	111
V.1.1.2 Les deux panneaux solaires connectés en Parallèle	111
V.1.1.3 Les deux panneaux solaires connectés en série.....	114
Conclusion d'expérience 1	118
V.1.2 Etude de l'efficacité des panneaux solaires en fonction de la température	119
V.1.2.1 Objectif.....	119

V.1.2.2 Les deux panneaux solaires connectés en Parallèle	119
V.1.2.2 Panneaux solaires connectés en série	122
V.1.3 La différence entre les panneaux sans ventilateurs et les panneaux avec ventilateurs	126
V.1.3.1 Les deux panneaux solaires connectés en Parallèle avec ventilation.....	126
V.1.3.2 Les deux panneaux solaires connectés en série avec ventilation	126
Conclusion d'expérience 2 :	127
V.2. Deuxième Partie « Etude technico-économique d'une installation photovoltaïque »....	128
V.2.1. L'objectif :	128
V.2.2 Estimation de la charge journalière	128
V.2.3 Calcul du nombre de batteries	130
V.2.4 Calcul du nombre des panneaux solaires	131
V.2.5. Présentation de l'installation photovoltaïque calculée	133
V.2.2 Défaits photovoltaïques et solutions	133
Conclusion :	135
Conclusion générale :	136
Références :	139

Liste des figures

Figure I.1 : L'énergie renouvelable.....	27
Figure I.2: L'énergie hydraulique	27
Figure I.3 : L'énergie éolienne	28
Figure I.4 : L'énergie des courants marins.....	29
Figure I.5 : L'énergie biomasse.....	29
Figure I.6 : L'énergie géothermie.....	30
Figure I.7 : les panneaux solaires photovoltaïques.....	30
Figure I.8 : Pyranomètre permettant de mesure le rayonnement solaire, Tec sol	33
Figure I.9 : Les différents composants du rayonnement solaire	33
Figure I.10 : la constante solaire	34
Figure I.11 : représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5	36
Figure I.12 : L'énergie solaire thermique.....	37
Figure I.13 : Capteur solaire thermique.....	37
Figure I.14 : Capteur non vitré souple.....	38
Figure I.15 : Chauffage de piscine	38
Figure I.16 : Capteur plan vitré	39
Figure I.17 : Coupe d'un capteur vitré	39
Figure I.18 : Capteurs solaires thermiques sous vide.....	40
Figure I.19 : Les capteurs solaire photovoltaïque	41
Figure II.1 : découvreur production l'énergie électrique par l'énergie solaire	45
Figure II.2 : les trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince	45
Figure II.3 : le premier satellite équipé des panneaux solaire.....	46
Figure II.4 : la première voiture alimentée par l'énergie photovoltaïque.....	46
Figure II.5 : Présentation d'une cellule photovoltaïque.	47
Figure II.6 : le semi-conducteur (silicium).....	48
Figure II.7 : dopage de semi-conducteur de type N	49
Figure II.8 : dopage de semi-conducteur de type p	49
Figure II.9 : La jonction p-n.	50
Figure II.10 : différents types de modules PV.....	51
Figure II.11 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V).....	53
Figure II.12 : Influence de la température sur la caractéristique I(V).....	53
Figure II.13 : le silicium.....	55
Figure II.14 : Silicium polycristallin	56
Figure II.15: Silicium monocristallin	57
Figure II.16 : Silicium amorphe en couche mince	58
Figure II.17 : Module photovoltaïque	59
Figure II.18 : Boite de jonction.	60
Figure II.19 : Groupement de cellules en série	61
Figure II.20 : Groupement de cellules en parallèle	62

Figure II.21 : Sous-station photovoltaïque formée d'un groupement de Nms modules série et de Nbp branches parallèles.....	63
Figure II.22 : La courbe caractéristique I(V) d'une cellule PV éclairée et polarisée par une source extérieure.	64
Figure II.23 : Protection par diodes séries et parallèles dans un groupement de modules.....	65
Figure II.24 : Systèmes photovoltaïques connectés au réseau	66
Figure II.25 : système photovoltaïque autonome	67
Figure II.26 : représentation d'un système photovoltaïque autonome	68
Figure II.27 : Groupement de cellules PV.....	69
Figure II.28 : Composants d'un générateur PV.....	69
Figure II.29 : le Régulateur solaire PWM à LED	70
Figure II.30 : le Régulateur solaire PWM avec écran LCD	71
Figure II.31 : Le Régulateur solaire MPPT	71
Figure II.32 : Le Régulateur solaire PWM DUO	72
Figure II.33 : Le Régulateur solaire PWM crépusculaire	72
Figure II.34 : l'onduleur	73
Figure II.35 : Aperçu d'une batterie solaire	75
Figure II.36 : Association de deux batteries en série / en parallèle.....	76
Figure II.37 : Exemple de boîte de jonction.....	76
Figure III.1 : les angles pour un plan incliné : inclinaison β , azimut χ et l'angle d'incidence θ	80
Figure III.2: Schéma de Boîtier de montage avec 3 diodes anti-retours à l'intérieur.....	82
Figure III.3 : le câble solaire	92
Figure IV.1 : Schéma d'Unité d'équipe EESFC	95
Figure IV.2 : Schéma de principe de la technologie des équipements d'énergie Solaire Photovoltaïque contrôlée par ordinateur avec SCADA (EESFC).....	97
Figure IV.3 : le Système de ventilation.....	98
Figure IV.4 : Schéma de Régulateur D	99
Figure IV.5 : Schéma de module de charges CC	100
Figure IV.6 : Capteur de rayonnement solaire	101
Figure IV.7 : Capteur de température.....	101
Figure IV.8 : Schéma d'EESFC/CIB. Boîte d'Interface de Contrôle	102
Figure IV.9 : DAB. Carte d'Acquisition de Données	105
Figure IV.10 : Schéma d'EESFC/CCSOF	106
Figure IV.11 : Schéma de l'écran principal du logiciel	106
Figure V.1 : Courbe caractéristique courant-tension pour deux panneaux connectés en parallèle.	114
Figure V.2 : Courbe caractéristique courant-tension pour deux panneaux connectés en série	117
Figure V.3 : Courbe caractéristique puissance-rayonnement pour deux panneaux connectés en Parallèle et en Série.	119
Figure V.4: courbe caractéristique courant-tension pour deux panneaux connectés en parallèle avec ventilateurs.	122

Figure V.5 : Courbe caractéristique courant-tension pour deux panneaux connectés en série avec ventilateurs. 124

Figure V.6 : Courbe caractéristique courant-tension pour deux panneaux connectés en parallèle avec ventilateurs. 124

Figure V.7 : Caractéristique puissance-rayonnement pour deux panneaux connectés en..... 126

Figure V.8 : Caractéristique puissance-rayonnement pour deux panneaux connectés en..... 127

Liste des tableaux

Tableau I.1: Caractéristiques principales du soleil.....	32
Tableau III.1 : Relation entre la latitude et l'inclinaison des panneaux pour une utilisation annuelle... ..	81
Tableau III.2 : Tension du champ en fonction de sa puissance crête.....	85
Tableau III.3 : le nombre moyen de panneaux posés par Terre Solaire selon la puissance d'installation souhaitée avec une puissance crête d'un panneau $P_{CU} = 375 W_c$	86
Tableau III.4 : La fiche technique d'un l'onduleur indiquant la plage de tension MPPT.....	86
Tableau IV.1: Les composants de DAB. Carte d'Acquisition de Données.	104
Tableau V.1 : l'intensité du rayonnement pour chaque position.....	113
Tableau V.2 : Valeurs du courant maximal et de la tension maximale et la puissance idéale maximal pour deux panneaux connectés en Parallèle	114
Tableau V.3 : Valeurs de courant optimale et tension optimale et la puissance maximal pour deux panneaux connectés en Parallèle	115
Tableau V.4 : Valeurs de courant maximal et tension maximal et la puissance idéale maximal pour deux panneaux connectés en série	116
Tableau V.5 : Valeurs de courant optimale et tension optimale et la puissance maximal pour deux panneaux connectés en série.....	118
Tableau V.6 : Valeurs de P _{MAX} et $W_{r,moy}$ pour deux panneaux connectés en parallèle. ..	118
Tableau V.7 : Valeurs de P _{MAX} et $W_{r,moy}$ pour deux panneaux connectés en série.....	118
Tableau V.8 : Valeurs de courant maximal et tension maximal et la puissance idéale maximal pour deux panneaux connectés en Parallèle	121
Tableau V.9 : Valeurs de courant optimale et tension optimale et la puissance maximal pour deux panneaux connectés en Parallèle.	123
Tableau V.10 : Valeurs de courant maximal et tension maximal et la puissance idéale maximal pour deux panneaux connectés en série	124
Tableau V.11 : Valeurs de courant optimale et tension optimale et puissance maximale pour deux panneaux connectés en série.....	125
Tableau V.12 : Valeurs de P _{MAX} et $W_{r,moy}$ pour deux panneaux connectés en parallèle. 125	125
Tableau V.13 : Valeurs de P _{MAX} et $W_{r,moy}$ pour deux panneaux connectés en série.....	126
Tableau V.14 : Le nombre, la puissance et Durée de fonctionnement des charges	130
Tableau V.15 : la consommation d'énergie par jour	130

Nomenclature

R_{mspp}	La résistance de charge optimale	Ω
EL	'éclairage-irradiant	W/m^2
N_m	Nombre de panneaux solaire nécessaires à l'installation	/
N_s	Le nombre de modules connectés en série	/
V_{ch}	Tension totale du champ	V
V_n	La tension délivrée par un seul panneau photovoltaïque	V
N_p	Le nombre de modules connectés en parallèles	/
C_{ch}	Capacité du champ de batterie	A_h
N	Nombre de jour d'autonomie	/
D	Décharge maximale admissible	/
U	Tension de la batterie	V
$C_{batterie}$	Capacité d'une batterie	V
I_e	Courant d'entrée	A
I_s	Courant de sortie	A
R	La résistance	Ω
P	La résistivité	Ω
L	La longueur du câble	m

Abréviation :

PV:Photovoltaïque

S_i : Silicium

GPV:Générateur photovoltaïque

FF:Facteur de forme

CA: Courant alternatif

DC/DC : Un convertisseur statique continu / continu

DC/AC : Un convertisseur statique continu / alternatif

N: Dopage de type négatif

P: Dopage de type positive

PN: Une jonction PN est l'accolement d'une région dopé positive et d'une région dopée négative.

B_r : Bohr

EVA : Un polymère (éthylène– vinylacétate)

G:Le rayonnement global

D: Compte seulement du rayonnement direct

LISES : International Solar Energy Society

SI: Système International d'unité

CO₂: Le dioxyde de carbone

H₂O : La vapeur d'eau

O₃ : L'ozone

AM1.5G : Le nom du spectre standard du rayonnement global du soleil sur la surface de la terre.

AM1.5D : Le nom du spectre standard du rayonnement direct du soleil sur la surface de la terre.

ABS : Poly acrylonitrile –butadiène –système, (polyester)

SPA : Système photovoltaïque autonome

MPPT : Maximum power point tracking

BJ : Boîte de jonction

SCADA : Système de contrôle et d'acquisition de données

API : Des automates programmables industriels

IHM : D'interfaces homme-machine

EESFC : Équipement d'Énergie Solaire Photovoltaïque, Contrôlé par Ordinateur

EESFC/CIB : Boîte-Interface de Contrôle.

DAB : Carte d'Acquisition de Données.

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

CC : Sélecteur de charge

ST : Capteur de température.

SRL : Capteur de rayonnement.

MEAS : Sélecteur pour mesurer la tension et le courant avant ou après le régulateur.

FAN : Activation/désactivation du système de ventilation.

I – DC : Capteur de courant continu

V – DC : Capteur de tension continue.

SWDC – 1 : Mesure de la puissance continue.

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).



Introduction

Générale

Introduction générale

Introduction générale

Une influence remarquable pour la première fois par Alexander Edmond Baker en 1839, une première utilisation pratique a été par certains gouvernements en tant qu'investissement dans le domaine des satellites et des engins spatiaux. Une première diffusion s'est faite au Japon et dans les principaux pays européens. Une apogée est atteinte, lorsque la Chine est entrée dans le domaine de son industrie. Une réputation mondiale en général, en Asie et en Amérique en particulier. Ce sont les cellules photovoltaïques et la structure de base d'un système photovoltaïque.

Vu la place qu'occupe la solution photovoltaïque dans les énergies renouvelables et vu l'intérêt particulier que nous portant pour ce domaine, nous avons choisi ce thème pour notre projet de fin d'étude.

Fait intéressant, l'énergie photovoltaïque est une alternative tout à fait adaptée pour des besoins limités. Notre but est d'étudier « le dimensionnement et l'installation de systèmes photovoltaïques ainsi de sa maintenance ».

Pour répondre à cette question nous avons organisé notre manuscrit comme suit :

Dans le premier chapitre nous avons fait un tour d'horizon de l'énergie solaire thermique et photovoltaïque. Ensuite, nous avons présenté une étude sur le système d'énergie solaire photovoltaïque et le principe des cellules photovoltaïques fonctionnant selon le deuxième chapitre. Le troisième chapitre portera sur l'étude de la mise à l'échelle de l'installation de systèmes photovoltaïques. Le quatrième chapitre donne une définition de la technologie des équipements techniques.

Quant au cinquième et le plus important des chapitres, il comprendra le côté pratique de notre recherche, qui se divise en deux parties :

- La première partie contient deux expériences, une concerne l'étude d'efficacité des panneaux solaires connectés en parallèle et en série, et l'autre porte sur l'efficacité de ses panneaux en fonction de la température toujours en parallèle et en série.

Introduction générale

- Dans la deuxième partie on s'intéresse à une étude technico-économique pour la maintenance d'une installation photovoltaïque pour produire l'énergie électrique nécessaire à l'alimentation d'une école primaire.

Notre étude se termine par une conclusion générale.



Chapitre I :
***Généralité sur l'énergie
solaire***

Chapitre I : Généralité sur l'énergie solaire

Introduction :

L'énergie solaire est l'énergie qui, à plus de (150) millions de kilomètre de la terre, reste notre plus grande source d'énergie. Le soleil envoie des radiations à la surface de la terre, soit près de 15000 fois la consommation d'énergie de l'humanité chaque année. Cela correspond à une puissance reçue instantanée de 1kilowatt par mètre de crête (KWc/m²) répartie sur tout le spectre, de L'UV à l'IR. Les déserts de notre planète reçoivent plus d'énergie du soleil en 6 heures que l'humanité n'en consomme en un année.

Depuis très longtemps, l'homme a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil, l'étoile la plus proche de la terre. Cette énergie permet la fabriquer de l'électricité à partir des panneaux photovoltaïques ou des centre solaires thermiques. G Les panneaux solaires permettent de récupérer l'énergie du soleil et de produire de l'électricité, sans pièces tournantes et sans bruit et elle n'émet aucun gaz à effet de serre. L'électricité produite peut être soit stockée dans des batteries pour les installations autonomes, soit injecté dans le réseau.

I.1 Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables se positionnent une solution adaptée à l'épuisement des ressources énergétiques fossiles, qui peut répondre à la demande mondiale en énergie électrique tout en préservant l'environnement. Ces énergies proviennent d'éléments naturels : le soleil, les vents, les cascades, les marées, la chaleur globale, la croissance des plantes ... on les appelle les énergies « de flux », et leur exploitation produit peu ou pas de déchets et d'émissions polluantes. Ce sont les énergies du futur. De là, on peut distinguer plusieurs familles d'énergies renouvelables.[9]



Figure I.1 : L'énergie renouvelable [34]

I.1.1 L'énergie hydraulique

Cette énergie provient de la force de l'eau en mouvement, plusieurs technologies permettent d'exploiter cette énergie, les roues à aubes peuvent la transformer directement en énergie mécanique (moulin à eau), tandis que les turbines et les générateurs électriques la transforment en électricité. [5]



Figure I.2 : L'énergie hydraulique [34]

I.1.2 L'énergie éolienne

Provient de l'énergie cinétique du vent, l'aérogénérateur, terme technique désignant l'éolienne, permet de la transformer en électricité. [5]



Figure I.3 : L'énergie éolienne [34]

I.1.3 L'énergie des courants marins

Elle désigne l'énergie produite par les vagues et les marées, ainsi que l'énergie thermique de l'océan chauffé par les rayons du soleil. Les océans, couvrent presque 70% de la surface du globe, pourraient constituer la source d'énergie renouvelable du futur, même si, pour l'instant, leur exploitation pour produire de l'électricité n'est pas rentable.[5]



Figure I.4 : L'énergie des courants marins [34]

I.1.4 La biomasse

Ce terme désigne la Masse des végétaux ; elle regroupe le bois, la paille, les rafles de maïs, le biogaz et les biocarburants. Le bois issu des déchets de la forêt ou des industries du bois est brûlé pour produire de la chaleur. Il représente 14% de la consommation énergétique mondiale.[5]



Figure I.5 : L'énergie biomasse [34]

Chapitre 1 : Généralité sur l'énergie solaire

I.1.5 La géothermie

Cette énergie utilisant la chaleur du sous-sol, la géothermie permet de chauffer des locaux (avec une température moyenne ou faible), ou de produire de l'électricité par vapeur interposée (avec une température élevée).[5]



Figure I.6 : L'énergie géothermie [34]

I.1.6 L'énergie solaire

C'est l'énergie fournie par la lumière du soleil, de nombreuses technologies convertissent cette énergie en une forme électrique ou thermique. [5]



Figure I.7 : les panneaux solaires photovoltaïques [34]

I.2 L'énergie solaire

L'énergie solaire est une source d'énergie qui dépend du soleil. Plusieurs technologies transforment cette énergie en une forme électrique ou thermique que nous pouvons utiliser directement. Par exemple :

- les cellules photovoltaïques qui transforment la lumière du soleil directement en énergie électrique,
- les collecteurs solaires permettent de chauffer l'eau des maisons par exemple,
- et les concentrateurs solaires qui utilisent des miroirs pour concentrer les rayons du soleil et générer une chaleur intense, transformant l'eau en vapeur et produisant de l'électricité grâce aux turbines à vapeurs.[5]

I.2.1 Le soleil

L'astre soleil est de constitution gazeuse, de forme sphérique de 14×10^5 Km de diamètre (environ 50 fois celui de la terre). 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 [2]. Il est situé à une distance de la terre égale à environ 150 millions de km. Sa luminosité totale est la puissance qu'il émet sous forme d'ondes électromagnétiques. On trouve que 30% de cette puissance est réfléchi vers l'espace, 47% est absorbés et 23% est utilisée comme source d'énergie pour le cycle d'évaporation-précipitation de l'atmosphère. [2]

Les caractéristiques principales du soleil sont regroupées dans le tableau ci-dessous :

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^{47}

Tableau I.1: Caractéristiques principales du soleil. [3]

I.2.2 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 [2]. La terre intercepte une très petite partie de ce rayonnement, qui au bord extérieur de l'atmosphère terrestre est pratiquement invariable lorsque la terre est à une distance moyenne du soleil. Cette constante est de $1350 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ [4]. Toute cette énergie n'est pas récupérée au niveau du sol ; en effet, une partie importante du rayonnement solaire est réfléchi et diffusée par les particules en suspension.[4]

Les satellites peuvent donner l'ensoleillement d'un site sous forme d'image. L'analyse des images initialement destinées à l'observation de la couche nuageuse permet de déterminer avec une bonne précision la quantité d'énergie reçue au sol. Cette méthode permet de connaître l'ensoleillement pour des lieux où les mesure au sol n'existent pas.[4]



Figure I.8 : Pyranomètre permettant de mesure le rayonnement solaire, Tec sol [4]

I.2.2.1 Les différents composants du rayonnement solaire

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol on distingue plusieurs composantes : [6]

- **Le rayonnement solaire direct :** C'est le rayonnement reçu directement du soleil, sans diffusion.
- **Le rayonnement diffus :** Il est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols).
- **L'albédo :** C'est la partie réfléchiée par le sol. Il est déterminé à l'aide d'un appareil albédo mètre et dépend de l'environnement du site.
- **Le rayonnement solaire global :** C'est la somme des différents rayonnements, on le mesure avec un pyranomètre.
- **La durée d'insolation :** Le temps pendant lequel le rayonnement solaire direct est supérieur à un seuil de 120W/m^2 ; elle est exprimée en dixième d'heure.

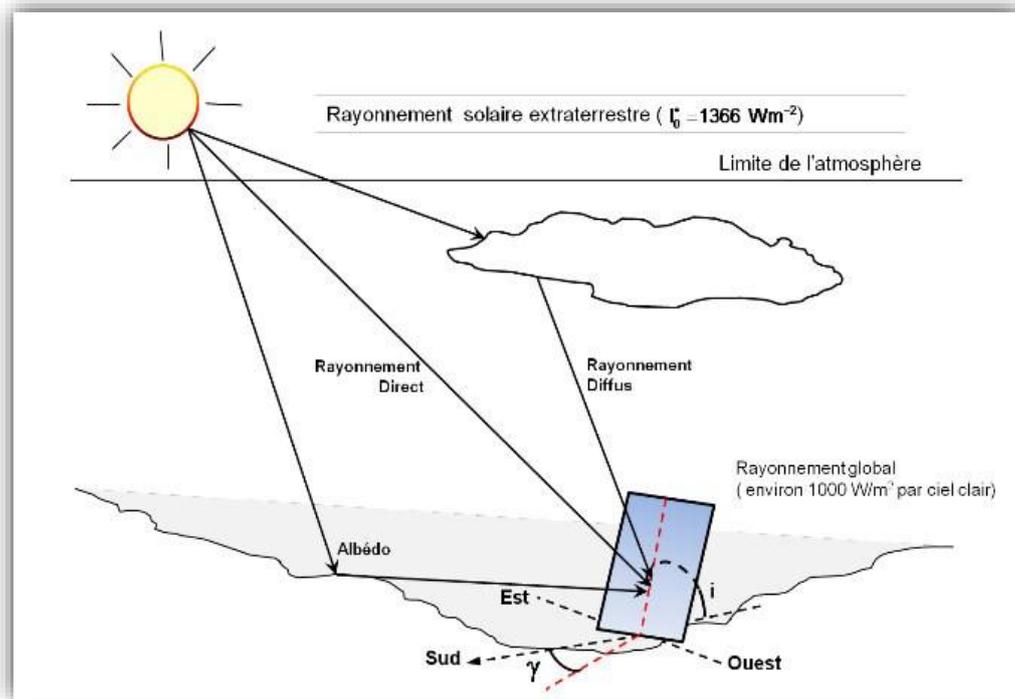


Figure I.9 : Les différents composants du rayonnement solaire [2]

I.2.2.2 La constante solaire et le nombre masse d'air AM

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, c'est ce que l'on appelle la constante solaire égale à 1367 W/m^2 . [8]

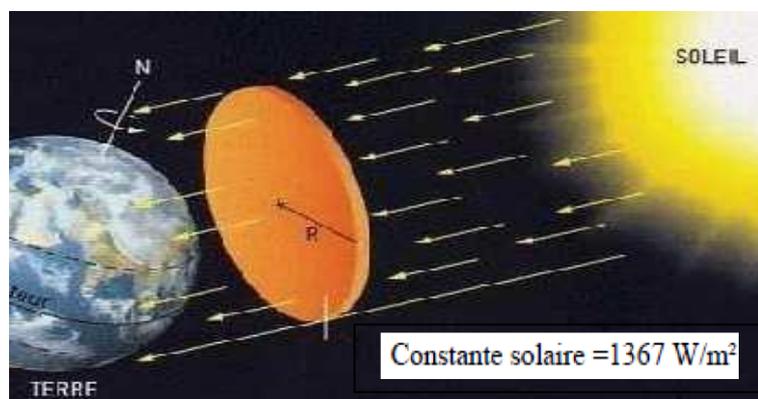


Figure I.10 : la constante solaire [8]

I.2.3 L'éclairement et l'irradiation

I.2.4.1 L'irradiation ou rayonnement

L'irradiation est l'énergie reçue par une surface ; elle s'exprime en $J.m^{-2}$. L'ISES, International Solar Energy Society, recommande le symbole **H**. D'autres unités plus courantes sont le Wh/m^2 bien que ce dernier ne doive pas être utilisé puisque n'appartenant pas au système international d'unités (SI). [8]

I.2.4.2 L'éclairement ou irradiance

L'éclairement est défini comme une puissance reçue par une surface. Il s'exprime en W/m^2 . Le système international d'unités (S.I.) recommande d'utiliser le symbole **G**. [8]. On signale que, outre l'incidence de l'atmosphère, l'irradiation solaire dépend :

- De l'orientation et l'inclinaison de la surface.
- De la latitude du lieu et son degré de pollution.
- De la période de l'année et de l'instant considéré dans la journée.
- De la nature des couches nuageuses.

La terre reçoit chaque année une valeur moyenne de l'éclairement $1.36KW/m^2$, cette irradiance est pondérée par divers facteurs à la surface de la terre : absorption par les molécules des différentes couches de l'atmosphère, conditions climatiques, latitude du lieu d'observation et saison. Afin de comparer et d'unifier les performances des cellules photovoltaïques élaborées dans les différents laboratoires du monde, il a été institué la notion d'Air Mass (AM) [10].

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)}$$

Si le soleil est au zénith du lieu d'observation, $\theta=0^\circ$, $AM=1$: la notation est AM1. AM0 correspond à l'irradiance hors atmosphère [8]. L'intensité G reçue à la surface de la terre peut être calculée grâce à la formule empirique suivante : [11]

$$G = 1.353.(0.7^{AM})^{0.678}$$

Avec G en kW/m^2 , pour une surface perpendiculaire aux rayons incidents. Les spectres AM0 et AM1 sont représentés sur la figure 1.11.

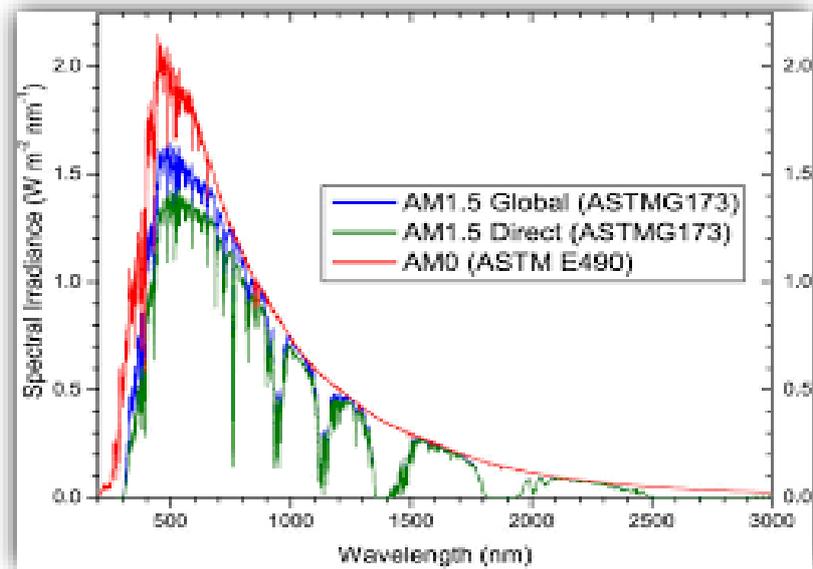


Figure I.11 : représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5 [35]

I.3 Les types d'exploitation de l'énergie solaire

I.3.1 L'énergie solaire sous forme d'énergie thermique

Les capteurs solaire thermique exploite le rayonnement du Soleil afin de le transformer directement en chaleur. Cette énergie est différente de celle du photovoltaïque où l'électricité est générée par l'énergie des photons. Comme exemple le chauffage de l'eau sanitaire à l'aide des capteurs solaire, ou indirectement dans le cas de la production de l'électricité dans une centrale thermodynamique solaire.[1]



Figure I.12 : L'énergie solaire thermique [34]

Les capteurs solaires thermiques constituent le cœur des installations destinées à transformer l'énergie transmise par le soleil en chaleur. Le rayonnement solaire est absorbé par une surface noire « l'absorbeur » qui constitue le capteur thermique, traitée spécialement pour absorber au maximum le rayonnement solaire. Cette dernière est parcourue par un fluide caloporteur, ce fluide chaud rejoint ensuite le ballon de stockage, figure (I.13), dans lequel il réchauffe l'eau chaude sanitaire utilisée dans les robinets, lavabos, douches etc. ... Dans le cas d'un système solaire combiné, le ballon de stockage peut être relié à deux circuits d'eau chaude, l'un pour l'eau chaude sanitaire et le second pour le chauffage alimentant des radiateurs à eau ou un plancher chauffant [4]. Une isolation thermique est disposée à l'arrière et sur la périphérie du capteur pour limiter les déperditions par conduction. [4]

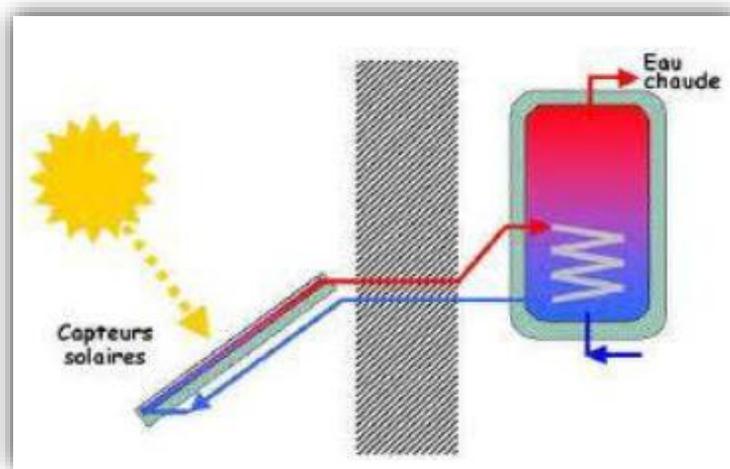


Figure I.13 : Capteur solaire thermique [36]

I.3.1.1 Les différents types de capteur solaire

I.3.1.1.1 Capteur non vitré

C'est le modèle le plus rustique et également le plus économique. [4] Il est généralement constitué d'une simple plaque de métal ou de matière plastique (absorbeur) dans laquelle sont collés plusieurs tubes porteurs de fluide caloporteur. Sans caisse ni vitrage, figure I.14, ce qui simplifie la fabrication et le coût de fabrication. Performant l'été lorsque la température ambiante et le rayonnement solaire sont élevés, il présente une grande sensibilité au vent froid hiver par son absence de vitrage. Il faut prévoir en général, une fois et demi plus de surface de capteur pour égaler la production de capteur plans vitrés. On arrive finalement à un prix de l'installation équivalent avec le capteur vitré.[4]



Figure I.14 : Capteur non vitré souple [36] **Figure I.15 :** Chauffage de piscine [36]

I.3.1.1.2 Capteurs plan vitrés

Les capteurs munis d'une couverture transparente, souvent appelés « capteur vitrés », sont les plus utilisés et très répandus. [4] Ils existent sous formes de capteurs à eau et de capteurs à air. La température d'utilisation est en général inférieure à 70°C. Plus rarement, certains d'entre eux, munis d'un fonctionnement de l'ordre de 100 C°. [4]



Figure I.16 : Captteur plan vitré [36]

Les principaux éléments constituant un capteur plan vitré :[4]

- Le coffre (Boîtier)
- L'isolation thermique
- L'absorbeur
- Vitrage (La couverture transparente)

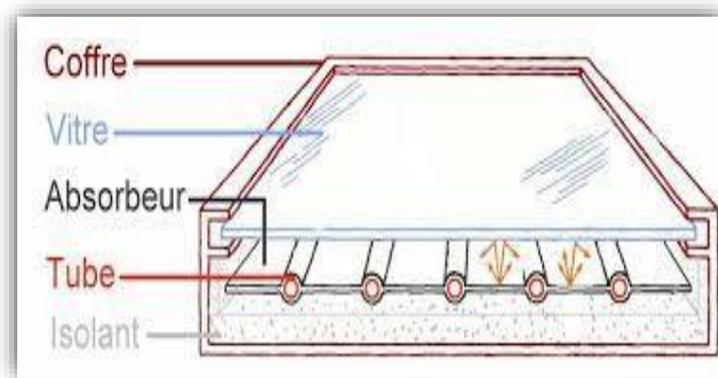


Figure I.17 : Coupe d'un capteur vitré [36]

I.3.1.1.3 Capteur sous vide

Les capteurs solaires "sous vide" sont utilisés lorsque la température de fonctionnement du capteur est très élevée ($>100^{\circ}\text{C}$) ou lorsque la température ambiante est faible (région de montagne). [4] Ces capteurs se présentent sous la forme de tubes série en verre transparents de faible diamètre (jusqu'à une quinzaine de centimètres). Dans chaque tube il y a une plaque

Chapitre 1 : Généralité sur l'énergie solaire

absorbante pour capter le rayonnement solaire et un échangeur pour favoriser le transfert de l'énergie thermique. Les tubes sont mis sous vide pour éviter les déperditions thermiques convectives de la plaque absorbante et la plaque absorbante reçoit un traitement sélectif pour empêcher le rayonnement à se dissiper sous forme de grande longueur d'onde. Ainsi, on peut réaliser des capteurs solaires performants sans une isolation thermique rapportée ou un coffre de protection.



Figure I.18 : Capteurs solaires thermiques sous vide [36]

I.3.1.2 Les avantages et les inconvénients

I.3.1.2.1 Les Avantages

L'énergie solaire thermique représente plusieurs avantages :

- Un toit monté de panneaux solaires peut fournir tous les besoins en eau chaude d'une famille,
- Elle est Facile à installer et à intégrer,
- Elle est une ressource propre, abondante, gratuite et renouvelable,
- Réduire la facture d'eau chaude sanitaire peut diminuer jusqu'à 75%,
- Les systèmes solaires thermiques ont une période de retour sur investissement d'environ 10 ans, cette période tendant à diminuer grâce aux diverses subventions et aides allouées visant à encourager le développement des énergies renouvelables.

Chapitre 1 : Généralité sur l'énergie solaire

I.3.1.2 Inconvénients

C'est une énergie intermittente ; On peut l'obtenir uniquement s'il y a du soleil et en journée. Il faut pouvoir la stocker ou avoir l'appoint d'une autre forme d'énergie pour les périodes climatiques les plus défavorables.

I.3.2 L'énergie photovoltaïque

I.3.2.1 présentation du photovoltaïque solaire

Le photovoltaïque solaire (PV) est la conversion directe de la lumière en électricité grâce à des cellules solaires. Elle constitue une alternative intéressante bien adaptée à des besoins limités. Malgré sa facilité de mise en œuvre, son faible impact environnemental et son faible entretien, le système PV n'est plus compétitif lorsque la demande augmente. Les performances d'un système photovoltaïque dépendent fortement des conditions météorologiques, telles que le rayonnement solaire, la température et la vitesse du vent.

Pour fournir de l'énergie en continu tout au long de l'année, le système PV doit être dimensionné. Cela nécessite une étude assez rigoureuse afin de proposer l'option la meilleure, la plus efficace et la moins chère [7].



Figure I.19 : Les capteurs solaire photovoltaïque [34]

Chapitre 1 : Généralité sur l'énergie solaire

I.3.2.2 Les Avantages et les inconvénients d'énergie photovoltaïque solaire

I.3.2.2.1 Les Avantages

- Aucun rejet de gaz.
- Les panneaux peuvent produire de l'énergie pendant plus de vingt ans.
- 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.

I.3.2.2.2 Les Inconvénients

- Nécessité d'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.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons discuté les énergies renouvelables et identifié leurs familles. Nous avons donné un intérêt particulier à l'énergie solaire. Nous avons donné un aperçu de l'étoile du Soleil et du rayonnement solaire et présenté les types de capteurs solaires thermiques et photovoltaïque. Dans le chapitre suivant, nous présenterons une étude sur le système solaire photovoltaïque et le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques.



Chapitre II :
Systeme
Photovoltaïque

Chapitre II : Système Photovoltaïque

Introduction :

La technologie photovoltaïque convertit la lumière solaire en électricité grâce à des panneaux ou des centrales solaires photovoltaïques. L'énergie photovoltaïque est dite aussi renouvelable, car sa source, le Soleil, est considérée comme inépuisable à l'échelle du temps humain.

L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien français « Edmond Becquerel en 1839 ». Le mot " photovoltaïque " est grec, " photo " signifie lumière et " voltaïque " tire son origine du nom d'un physicien italien « Alessandro Volta (1754 -1827) » qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement la « lumière électricité ».

Les systèmes photovoltaïques sont particulièrement bien adaptés à la production décentralisée d'électricité et des sites isolés : électrification rurale pour les besoins domestiques et les besoins communautaires : centres de santé, écoles, pompage de l'eau, réfrigération, télécommunications ...etc. Ils constituent donc une solution de choix pour les populations rurales qui ne pourront pas être reliées aux réseaux électriques conventionnels, même pour les villes on peut économiser la consommation d'énergie par l'utilisation des panneaux sur le toit ou sur les façades des bâtiments, Compte-tenu du caractère fluctuant du rayonnement solaire, il est nécessaire de mettre en place un parc de batteries assurant la continuité de l'alimentation électrique (notamment la nuit).

II.1 L'énergie photovoltaïque dans l'histoire

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

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.

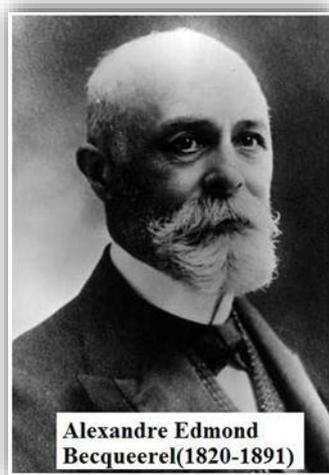


Figure II.1 : découvreur production l'énergie électrique par l'énergie solaire

1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.[31]



Figure II.2 : les trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince

1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

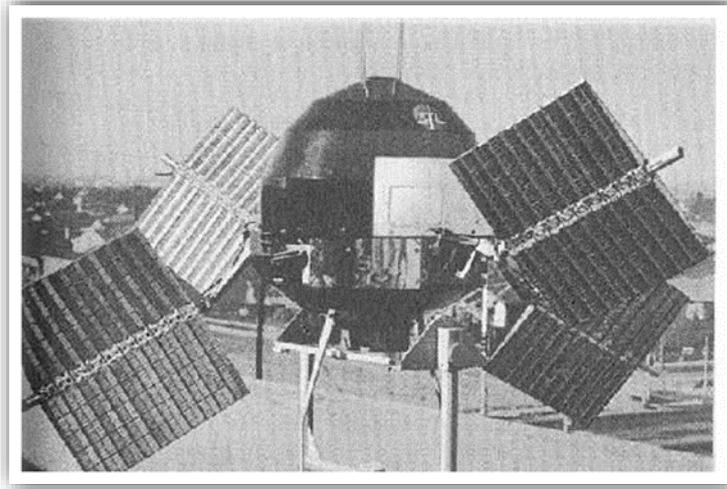


Figure II.3 : le premier satellite équipé des panneaux solaire

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.

1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.[31]



Figure II.4 : la première voiture alimentée par l'énergie photovoltaïque

II.2 Conversion photovoltaïque

La conversion de l'énergie solaire est une opération qui consiste à transformer l'énergie des photons provenant du soleil sous forme d'ondes électromagnétiques en énergie électrique.

Chapitre II : Système photovoltaïque

Pour obtenir cette opération, il est nécessaire de mettre en œuvre des dispositifs optoélectroniques appropriés appelés « cellules solaires » ou « photopiles solaires ».

II.2.1 La cellule Photovoltaïque

La cellule solaire [12] est un dispositif optoélectronique capable de capter et convertir directement l'énergie des rayons lumineux en électricité. Cette conversion est appelée la conversion photovoltaïque. Sa structure est illustrée dans la figure II.5. Elle montre un schéma simplifié d'une cellule solaire typique car l'architecture des dispositifs photovoltaïques modernes se révèle particulièrement complexe. La cellule photovoltaïque est composée de deux couches matériaux semi-conducteurs de silicium, une dopée p (dopée au bore) et l'autre dopée n (Dopée au phosphore) ; 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. Cette cellule produit un courant électrique sous l'effet de photons lumineux. Une cellule PV a une caractéristique $I=f(V)$ non linéaire [13].

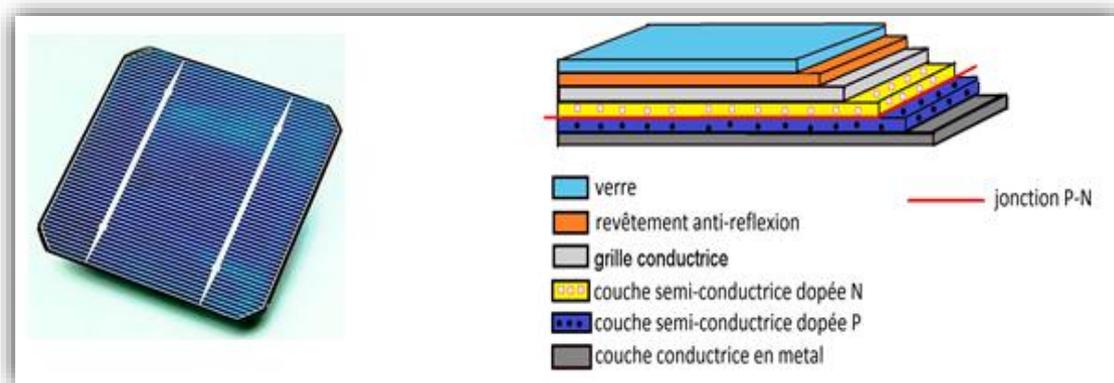


Figure II.5 : Présentation d'une cellule photovoltaïque.

II.2.2 Le mécanisme de la conversion photovoltaïque D'une cellule

Albert Einstein a découvert, en travaillant sur l'effet photoélectrique, que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon est donnée par la relation :

$$E = h \times \nu = \frac{h \times C}{\lambda}$$

Chapitre II : Système photovoltaïque

Où

E : est l'énergie photonique pour une fréquence ν , et une longueur d'onde λ .

λ : est la constante de Planck et C : est la vitesse de la lumière.

Pour fabriquer des cellules photovoltaïques, on utilise des matériaux de propriétés particulières, les semi-conducteurs. Ce sont des matériaux dont la résistivité électrique est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. On les utilise pour deux raisons :

- Ils absorbent facilement la lumière
- Et permettent de générer un champ électrique et une tension électrique.

Ce champ électrique va être obtenue par la superposition de deux couches dopées d'un semi-conducteur en générale d'un silicium. Les quatre électrons de valence du silicium permettent de former quatre liaisons covalentes avec un atome voisin. Dans ce cas, tous les électrons sont utilisés et aucun n'est disponible pour créer un courant électrique.[15]

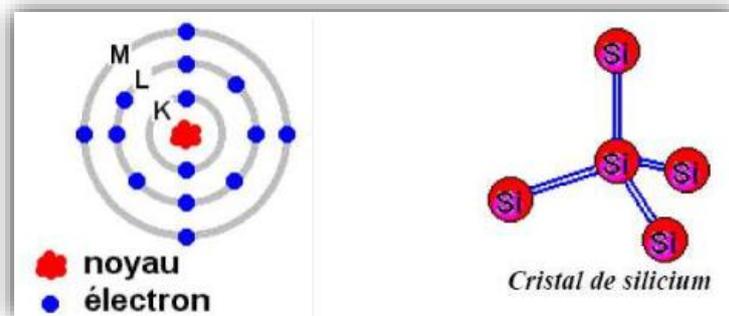


Figure II.6 : le semi-conducteur (silicium).

II.2.2.1 Le dopage de semi-conducteur

Dans cette opération, on introduit dans les semi-conducteurs des éléments perturbateurs appelés « impuretés » qui améliorent la conductivité électrique. Ce procédé est appelé dopage. L'une des couches est dopé type N et l'autre type P, pour former le champ électrique appelé « Jonction électrique ».

Chapitre II : Système photovoltaïque

A) Dopage de type N

On remplace quelques atomes de silicium par des atomes phosphore P (pentavalent). Quatre d'entre eux assurent les liaisons avec les atomes voisins de silicium et le cinquième reste disponible, il sera excité vers la bande de conduction très facilement par l'agitation thermique. D'où le nombre d'électron libre qui va fortement augmenter : dans ce cas le nombre de trou est très inférieur au nombre d'électron libre. On obtient ainsi un cristal dopé N (charge négatif).[18]

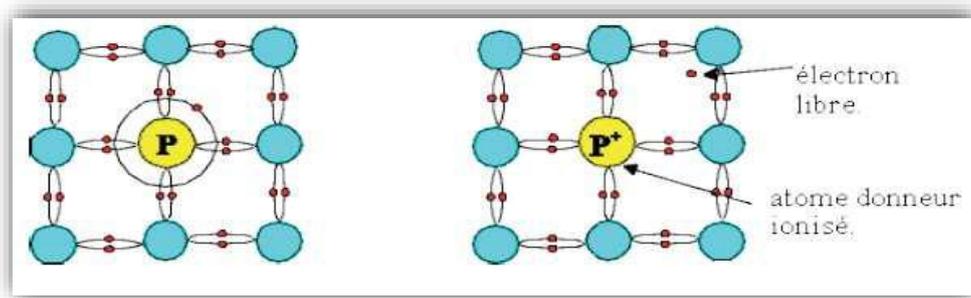


Figure II.7 : dopage de semi-conducteur de type N. [18]

B) Dopage de type P

De la même façon on introduit des atomes trivalents, ses trois électrons vont assurer les liaisons covalentes avec trois atomes voisins mais laisser un trou au quatrième. Ce trou se déplace de proche en proche dans le cristal pour créer un courant. Ici le nombre de trous est très supérieur au nombre d'électrons libres du cristal intrinsèque, On obtient donc un cristal dopé P (charge positif), les impuretés utilisées sont souvent du Bore B. [18]

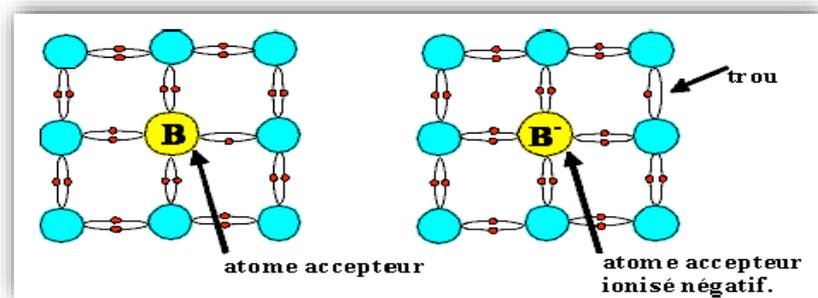


Figure II.8 : dopage de semi-conducteur de type p. [18]

Chapitre II : Système photovoltaïque

C) La Jonction PN

Une jonction PN est l'accolement d'une région dopé P et d'une région dopée N. Lors de cet assemblage les porteurs de charges libres (positive et négative) s'attirent et se recombinent.[18] Ce phénomène produit une zone non neutre électriquement d'atome de phosphore P chargé positivement et une zone non neutre électriquement d'atome de Bohr Br chargé négativement ; On obtient ainsi la zone de Jonction. Il ne reste donc plus que les ions dans cette zone qui vont créer un champ électrique interne au niveau de la Jonction de différent potentiel électrique et qui empêche les charges libres restantes dans chaque zone de traverser la jonction pour se recombiner.

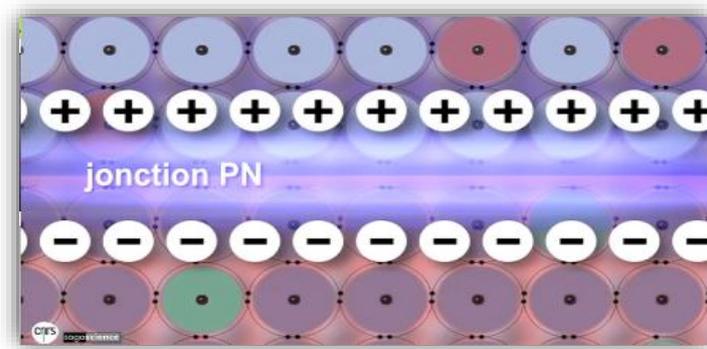


Figure II.9 : La jonction p-n.

Enfin lorsque les rayons du soleil frappent une cellule photovoltaïque sur laquelle on a disposé deux bornes, les photons de la lumière vont transmettre leur énergie aux électrons qui sont arrachés aux atomes dans lesquelles ils laissent des trous. Ces derniers ont tendance à se recombiner mais la zone jonction PN va au contraire contribuer à les séparer, les électrons vont être repoussés dans la zone N et les trous vers la couche P. Les électrons sont alors obligés de circuler par un circuit extérieur pour rejoindre les trous créant ainsi un courant électrique continu qu'on appelle photon-courant.

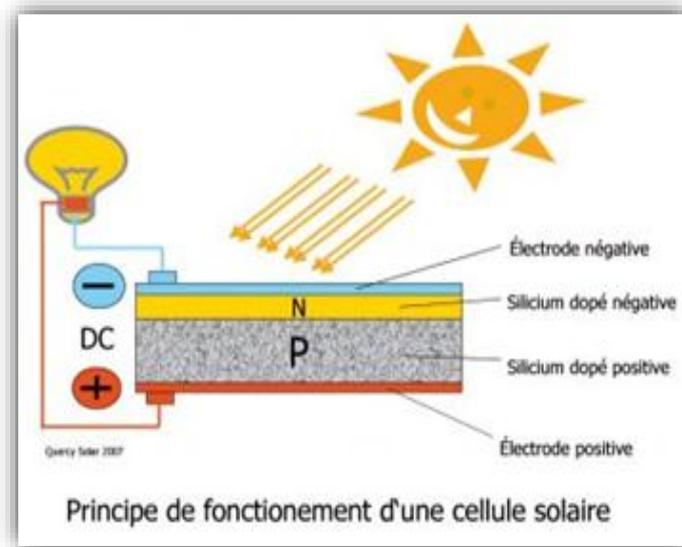


Figure II.10 : différents types de modules PV

II.3 Les caractéristiques d'une cellule solaire

Le comportement d'une cellule solaire peut être étudié à travers quatre principales grandeurs :

II.3.1 La tension en circuit-ouvert (V_{co})

C'est la tension mesurée aux bornes de la cellule et pour laquelle le courant débité par la cellule photovoltaïque est nul. Cette tension mesure généralement entre 0.5 à 0.8 V, elle est donnée par la relation :

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

Où :

I_{ph} : Photo-courant produit.

I_s : le courant de saturation en Ampère (A).

n : Un facteur de non idéalité de la jonction ; sans dimension.

V_{th} : le potentiel thermique en Volt (V).

Chapitre II : Système photovoltaïque

II.3.2 Le courant de court-circuit (I_{cc})

Lorsque les bornes d'une cellule sont court-circuitées, on peut mesurer le courant maximal produit par la cellule PV et on le nomme communément courant de court-circuit (I_{cc}) tandis que la tension aux bornes de cellule est nulle, l'expression approchée du courant de court-circuit est :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{I_{cc} R_s}{n V_{th}} \right) - 1 \right) - \frac{I_{cc} R_s}{R_{sh}}$$

Où :

R_s : La résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexion

R_{sh} : La résistance de shunt (résistance parallèle) caractérisant les courants de fuite entre les deux zones n et p de la jonction.

II.3.3 Le point du fonctionnement P_m (V_m , I_m)

La puissance maximale d'une cellule photovoltaïque éclairée est la grandeur essentielle pour évaluer sa performance ; Ce point de fonctionnement est situé au coude de la caractéristique $I(V)$ et dit point de puissance maximale. Elle est donnée par la relation :

$$P_m = I_m \times V_m$$

Où :

V_m et I_m : sont la tension et le courant maximums respectivement.

II.3.4 Le facteur de forme FF

Le facteur de forme (FF) « en anglais : Fill Factor » est défini comme le rapport entre la puissance maximale et le produit ($I_{cc} \times V_{co}$) [14]. Généralement le facteur de forme prend des valeurs entre 0.6 et 0.85, on l'exprime en %, il est donné par la relation :

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} \times V_{co}} = \frac{I_m \times V_m}{I_{cc} \times V_{co}}$$

Chapitre II : Système photovoltaïque

On note que ces quatre grandeurs caractéristiques sont sommables dans un seul paramètre ; c'est le rendement η . Il est défini comme le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule et la puissance du rayonnement solaire qui est reçu par la cellule. Si S est la surface de la cellule (m^2) et E est l'éclairement-irradiant (W/m^2), le rendement énergétique s'écrit :

$$\eta = \frac{P_m}{S \times E} = \frac{FF \times I_{cc} \times V_{co}}{S \times E}$$

II.4 Effet de l'éclairement et de la température sur la caractéristique I (V)

L'éclairement et la température modifient la caractéristique I(V) de la cellule solaire, comme le montrent les figures (II.11 et II.12), pas dans sa forme générale mais pour les valeurs I_{cc} , I_m et V_{co}

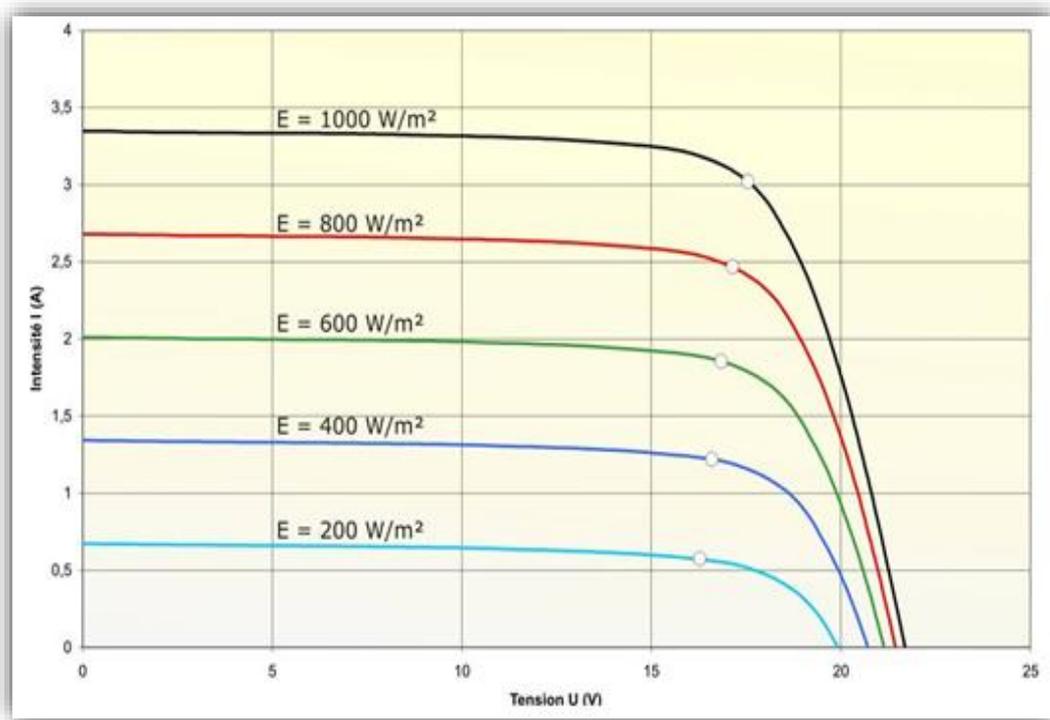


Figure II.11: Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V)

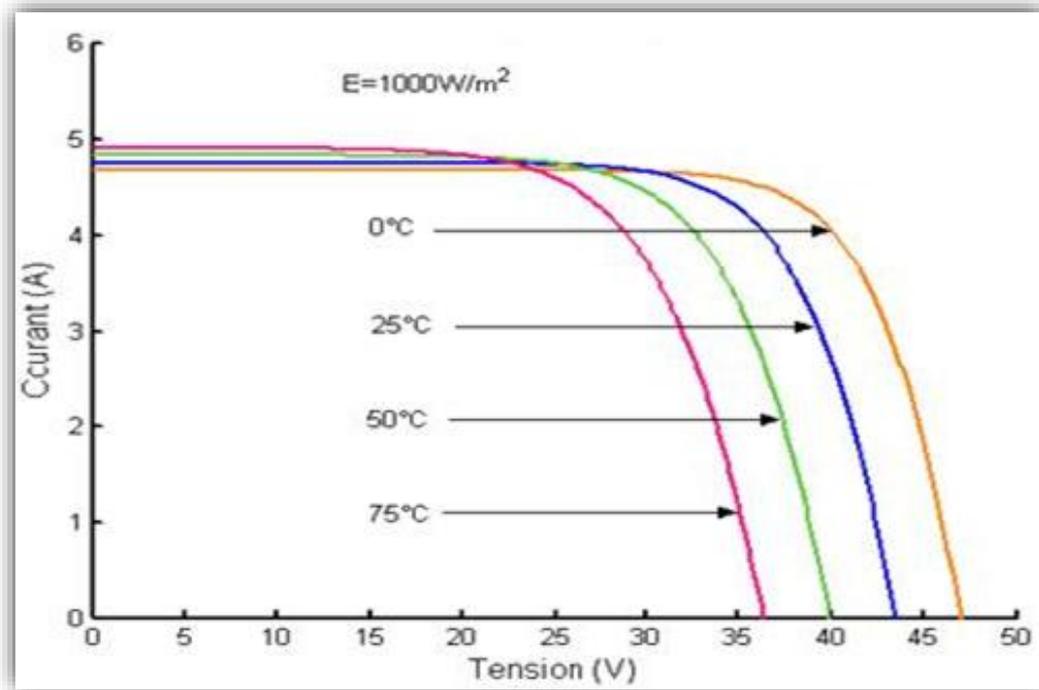


Figure II.12 : Influence de la température sur la caractéristique I(V)

Les caractéristiques courant-tension d'une cellule monocristalline typique de (10×10) cm² pour plusieurs intensités du rayonnement solaire, montre que le courant du court-circuit I_{cc} est directement proportionnel à l'intensité lumineuse incidente ; D'autre part, l'accroissement de l'éclairement provoque une légère augmentation de la tension de circuit ouvert V_{co} .

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires puisqu'elles sont exposées au rayonnement solaire. L'influence de la température sur la caractéristique I(V) démontre que l'augmentation de la température provoque une augmentation du courant de court-circuit (I_{cc}), en même temps on assiste à une diminution nette de la tension en circuit-ouvert (V_{co}). L'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension (V_m) et un léger accroissement du courant (I_m) et par la suite une baisse relative de la puissance maximale (P_m).

II.5 Technologie utilisée pour une cellule photovoltaïque

Plusieurs technologies sont actuellement développées pour réaliser des cellules photovoltaïques dont les degrés de maturité, de performance et de durée de vie sont très différents. Les principales technologies industrialisées en série à ce jour sont le silicium mono

Chapitre II : Système photovoltaïque

ou polycristallin et le silicium en couche mince. Le silicium est fabriqué à partir de sable quartzueux (dioxyde de silicium). [17]



Figure II.13 : le silicium

On peut distinguer deux grandes familles de matériaux photovoltaïques :

- Les matériaux solides cristallisés
- Les couches minces

Ces couches minces sont également solides, mais d'épaisseur nettement plus faible, de l'ordre du micron et en deca, et déposées sur un support. Alors que les photopiles cristallines sont massives et épaisses de 0,15-0,4mm. [17].

Pour que le silicium fonctionne, il doit d'abord subir une série de traitements :

- Un procédé de raffinage qui permet de réduire le silicium, procédé appelé procédé de minage pour le rendre pur à 90 % ;
- Suivi d'une seconde purification chimique pour lui conférer toutes les propriétés électroniques nécessaires.

II.5.1 Silicium polycristallin

Le wafer est scié dans un barreau de silicium dont le refroidissement forcé a créé une structure polycristalline. [19]. Ce sont des monocristaux juxtaposés dans différentes orientations donnant à la cellule un aspect mosaïque. Le silicium polycristallin est la technologie la plus répandue sur le marché mondial en raison de son bon rendement (13%) pour des coûts de fabrication maîtrisés. Il offre actuellement un bon rapport qualité/prix.

Chapitre II : Système photovoltaïque

L'avantage de ces cellules par rapport à celles en silicium monocristallin réside dans leur prix, puis que leur fabrication, produisant peu de déchets, nécessite de 2 à 3 fois moins d'énergie et est plus rapide. Elles ont les mêmes applications que les cellules en silicium monocristallin.[20]



Figure II.14 : Silicium poly cristalline

Avantage

- Cellule carrée (à coins arrondis dans le cas du Silicium monocristallin).
- Permettant un meilleur foisonnement dans un module.
- Moins chère qu'une cellule monocristalline.

Inconvénient

- Ratio Wc /m^2 moins bon que pour le monocristallin (environ $100 Wc /m^2$).
- Rendement faible sous un faible éclairement.

II.5.2 Silicium monocristallin

Du silicium à l'état brut est fondu pour créer un barreau. Lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un monocristal.[19]. Un wafer (tranche de silicium) est alors découpé dans le barreau de silicium. Le wafer devient cellule après divers traitements : traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction P-N, dépôt de couche antireflet, pose des collecteurs.[19]

Chapitre II : Système photovoltaïque

Ces cellules ont un rendement légèrement supérieur au silicium polycristallin (15 %) ; Cependant, il reste coûteux en raison de ses exigences de pureté élevées et de la grande quantité d'énergie nécessaire à sa fabrication.



Figure II.15 : Silicium monocristallin

Avantage

- Bon ratio Wc/m^2 (environ $150 Wc/m^2$).
- Nombre de fabricants élevé.

Inconvénient

- Coût élevé.
- Rendement faible sous un faible éclaircissement.

II.5.3 Silicium amorphe en couche mince

La technologie (couche mince) désigne un type de cellules (ou module) obtenu par diffusion d'une couche mince de silicium amorphe sur un substrat (verre).[19]. Plusieurs technologies (fonction de l'alliage utilisé) sont industrialisées à ce jour.

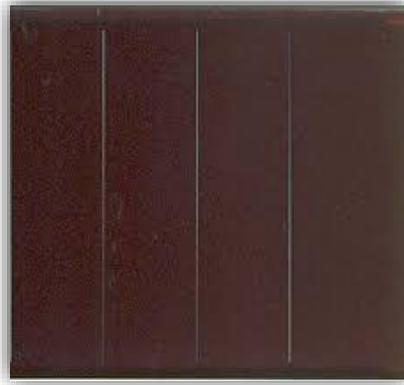


Figure II.16 : Silicium amorphe en couche mince

Avantages

- Fonctionne avec un éclairage faible ou diffus (même par temps couvert).
- Un peu moins chère que les autres technologies.
- Intégration sur supports souples ou rigides.

Inconvénients

- Nécessité de couvrir des surfaces plus importantes que lors de l'utilisation de silicium cristallin (ratio Wc /m^2 plus faible, environ $60 Wc /m^2$).
- Performances qui diminuent avec le temps (environ 7%).

II.6 Le module photovoltaïque

Le module photovoltaïque [4] est par définition un ensemble de photopiles assemblées pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition au rayonnement utile, exemple sur la figure (II.17-a). En effet, une photopile élémentaire ne produit qu'une très faible puissance électrique moins de 3W avec une tension de l'ordre d'un volt (1V) : entre 0,5 et 1,5V selon les technologies. Afin de produire plus de puissance, les Cellules sont assemblées en série et en parallèle pour former un module photovoltaïque. Ces cellules sont :

- Protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène – vinylacétate), voir la figure (II.17-b),

Chapitre II : Système photovoltaïque

- Et protégé sur la surface avant d'un verre trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique,
- Et sur la surface arrière d'une ou de polyéthylène.

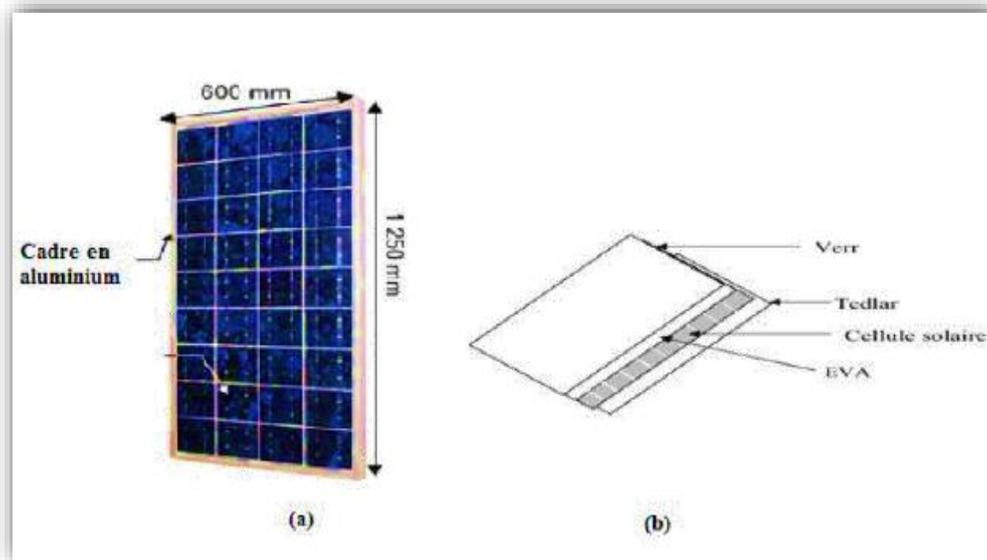


Figure II.17 : Module photovoltaïque

Les modules sont généralement entourés d'un cadre rigide en aluminium anodisé comprenant des trous de fixation. A l'arrière de chaque module se trouve une boîte de jonction contenant 2 diodes antiparallèles comme présenté sur la figure (II.18). Ces diodes antiparallèles permettent d'éviter qu'un module au soleil ne se décharge dans un module à l'ombre.



Figure II.18 : Boîte de jonction.

Chapitre II : Système photovoltaïque

La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin ; le courant de sortie et la puissance seront proportionnelles à la surface du module. Ils ont une efficacité de conversion (énergie électrique produite/énergie solaire incidente) de l'ordre de 10 à 20%. Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation.

II.6.1 Association en série

La caractéristique courant-tension d'un groupement quelconque de cellules sera homothétique de la courbe $I(V)$ d'une cellule de base [16]. Dans un groupement de N_s cellules ou de modules identiques en série, figure (II.19), le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série. La figure (II.19) présente la courbe de puissance du groupement ainsi réalisé. La caractéristique du groupement (G) est obtenue en multipliant point par point et pour un même courant la tension individuelle par N_s . En particulier, l'impédance optimale du groupement sera N_s fois plus grande que celle de la cellule (module) de base. Les résistances série s'ajoutent et les résistances parallèles s'ajoutent également aussi.

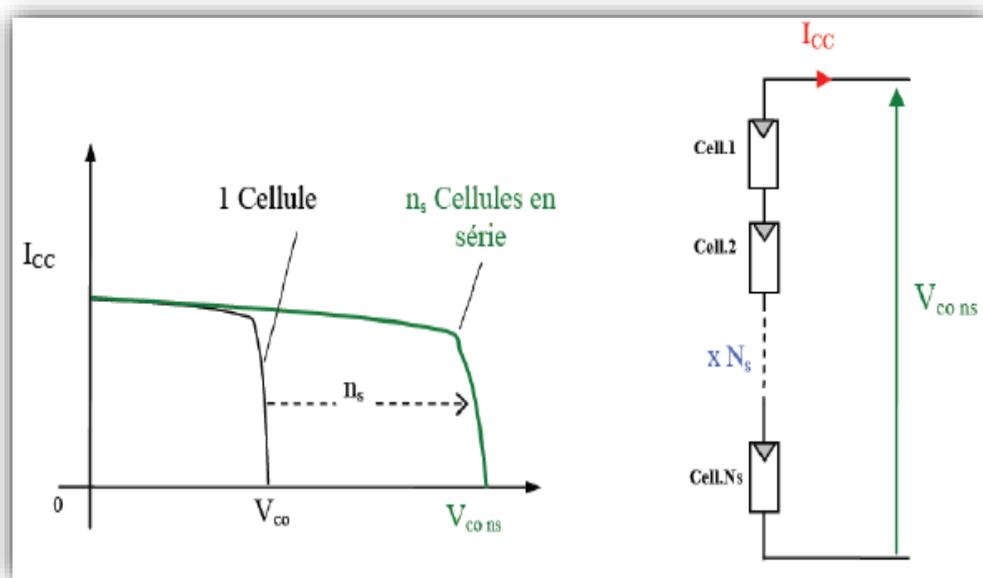


Figure II.19: Groupement de cellules en série

II.6.2 Association en parallèle

La figure (II.20) présente la courbe de puissance de N_p cellules (ou de modules) en parallèles. Cette fois-ci, c'est la tension de chacun des éléments qui doit être identique, les courants s'ajoutant, la nouvelle courbe est obtenue en multipliant point par point et pour chaque valeur de tension, le courant de la cellule élémentaire par N_p . L'impédance optimale du groupement sera N_p fois plus faible que celle de l'élément de base. Ce sont les inverses des résistances série qui s'ajoutent, ainsi que les conductances shunts.

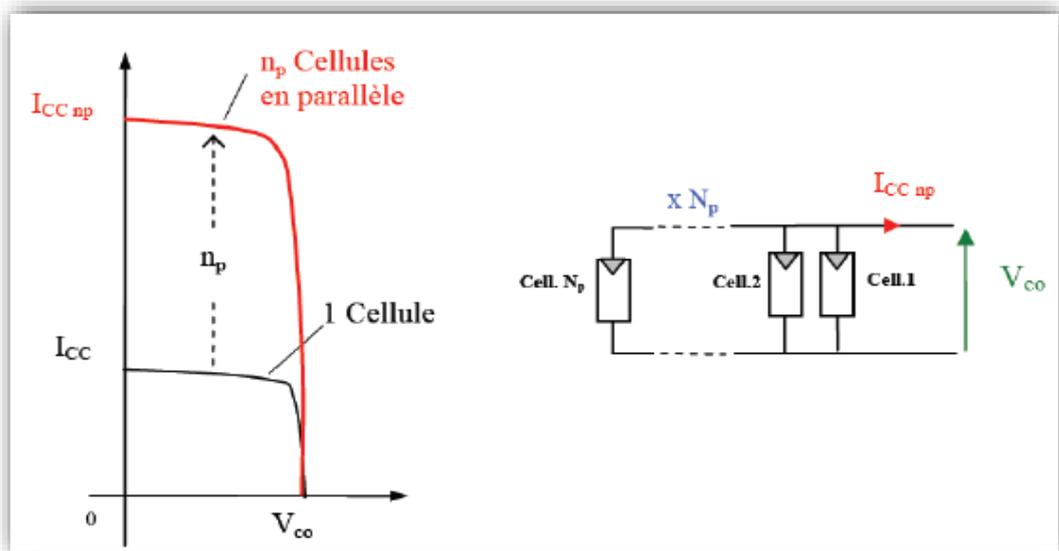


Figure II.20 : Groupement de cellules en parallèle

II.6.3 Association en série parallèle– champ photovoltaïque

La connexion en série de plusieurs cellules forme une branche de cellules où on a une augmentation de tension pour le même courant ; un assemblage de plusieurs branches de cellules en parallèle forme un module où on a un accroissement du courant et une conservation de tension. Une association de plusieurs modules dans un même plan s'appelle un panneau et le montage de plusieurs panneaux en rangées de panneaux série et parallèle forme un champ photovoltaïque ; ce que l'on appelle parfois une sous-station photovoltaïque. Une association série-parallèle de panneaux photovoltaïques aura une caractéristique $I(V)$ théorique en tout

Chapitre II : Système photovoltaïque

point homothétique à celle des modules de base et obtenue en modifiant les échelles sur les deux axes.

La figure (II.21) présente un groupement de N_{ms} module en série dans une branche et N_{bp} branches en parallèle. Si P_m , V_m , I_m et R_m sont les caractéristiques du module de base ; la puissance crête, la tension du fonctionnement – tension maximale-, courant du fonctionnement– courant maximal- et la résistance de charge optimale respectivement, les caractéristiques correspondantes de la sous-station seront :

- **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/m^2).

$$P_c = N_{ms} \times N_{bp} \times P_m$$

- **La tension maximale V_{mssp}**

$$V_{mssp} = N_{ms} \times V_m$$

- **Le courant maximal I_{mssp}**

$$I_{mssp} = N_{bp} \times I_m$$

- **La résistance de charge optimale R_{mssp}**

$$R_{mssp} = \left(\frac{N_{ms}}{N_{bp}}\right) \times R_m$$

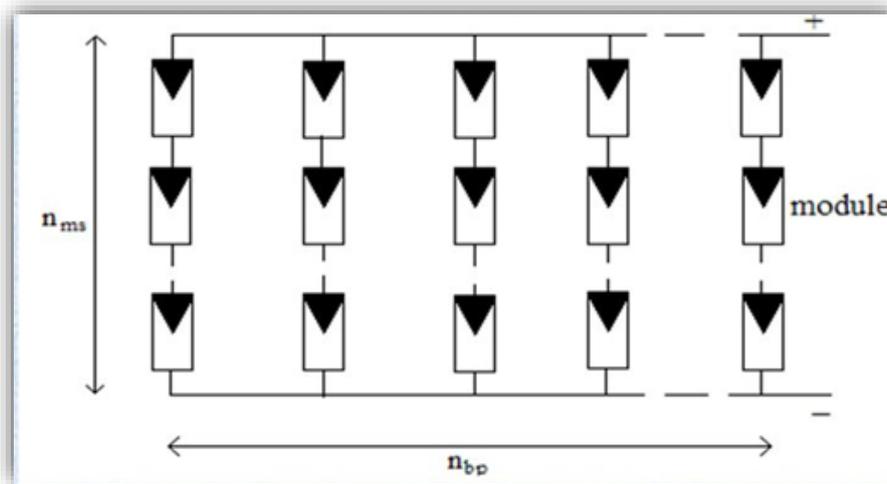


Figure II.21 : Sous-station photovoltaïque formée d'un groupement de N_{ms} modules série et de N_{bp} branches parallèles

II.7 Perturbations dans les modules

En pratique, sous l'effet d'ombrage, les modules dans un panneau PV sont soumis à des éclairagements et à des températures différentes, ceci engendre des caractéristiques électriques des modules qui ne sont pas identiques. Ce qui implique un déséquilibre dans le groupement des modules.

Aussi bien qu'en réalité, les conditions idéales ne sont jamais atteintes malgré un tri soigneux des cellules et des modules, il arrive de trouver quelques disparités intrinsèques dans les caractéristiques électriques des modules. Comme exemple, l'occultation partielle ou totale d'une cellule par une feuille morte la transforme immédiatement en un récepteur, qui au lieu de générer de l'énergie va en recevoir de la part des autres cellules bien éclairées. On peut donc s'attendre à des dégradations redoutables qui peuvent aller jusqu'à l'incendie si des précautions ne sont pas prises au niveau des installations.

II.7.1 Le fonctionnant récepteur d'une cellule solaire

La Figure II.22 montre la caractéristique complète d'une cellule sous illumination. Le quadrant 1 ($I > 0$, $V > 0$) correspond au fonctionnement en générateur. Si la tension aux bornes de la cellule est en raison du circuit extérieur, amenée à dépasser V_{co} (quadrant 2), la cellule travaille alors en récepteur de très faible impédance, comme une diode polarisée en direct. Si

Chapitre II : Système photovoltaïque

c'est le courant qui traverse la cellule qui, en raison du circuit extérieur, est amené à dépasser la valeur du courant de court-circuit, la cellule va à nouveau travailler en récepteur.

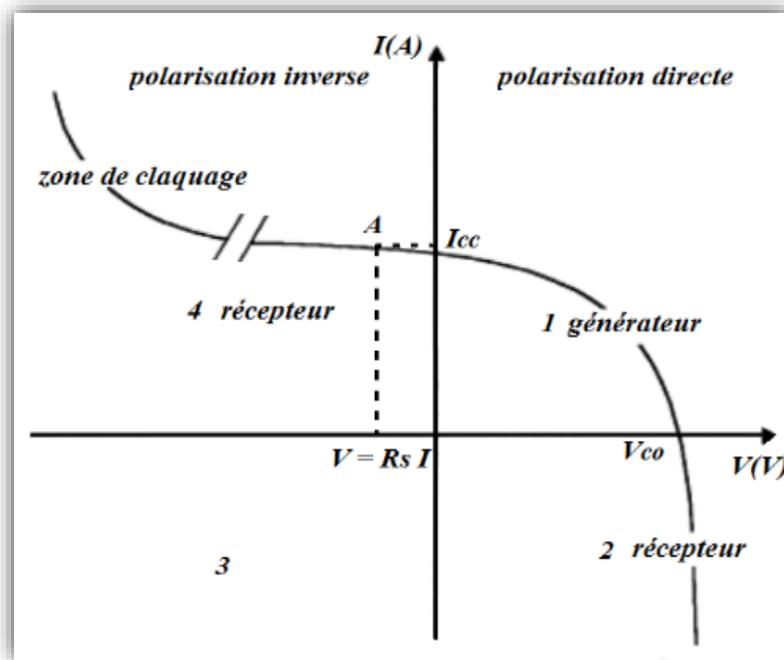


Figure II.22: La courbe caractéristique I(V) d'une cellule PV éclairée et polarisée par une source extérieure.

II.7.2 Protection par diode

Une cellule occultée dans une branche de N_s cellules en séries est polarisée en inverse dans le cas de circuit ouvert par une tension $V = N_s \cdot V_i$ (V_i : la tension d'une seule cellule) qui peut dépasser la tension de claquage.

Si l'on monte une diode en parallèle tête-bêche figure II.23, sur un module, la cellule occultée ne peut alors être polarisée que par un nombre bien défini de cellules. En cas de déséquilibre, il faut bien sûr que la diode puisse laisser passer le courant des modules qui se trouvent dans la branche. En fonctionnement normal la diode de protection doit pouvoir être polarisée avec une tension inverse égale à la tension de travail du module. Moyennant ces précautions dans le choix de la diode de "by-pass", on peut être assuré que les modules ainsi protégés ne subiront pas de "hotspot" à cause d'un déséquilibre d'éclairement ou de réseau. Par contre, dans le cas de N_p branche en parallèles et pour éviter qu'une branche de cellules connectées en série ne reçoive de l'énergie d'autres branches connectées en parallèle, il faut installer dans chacune des branches

Chapitre II : Système photovoltaïque

des diodes anti retour de puissance adéquate en sortie de chaque série de module, comme indiqué dans la figure II.23. En fonctionnement normal, ces diodes séries devront induire une chute de tension dans la branche [16].

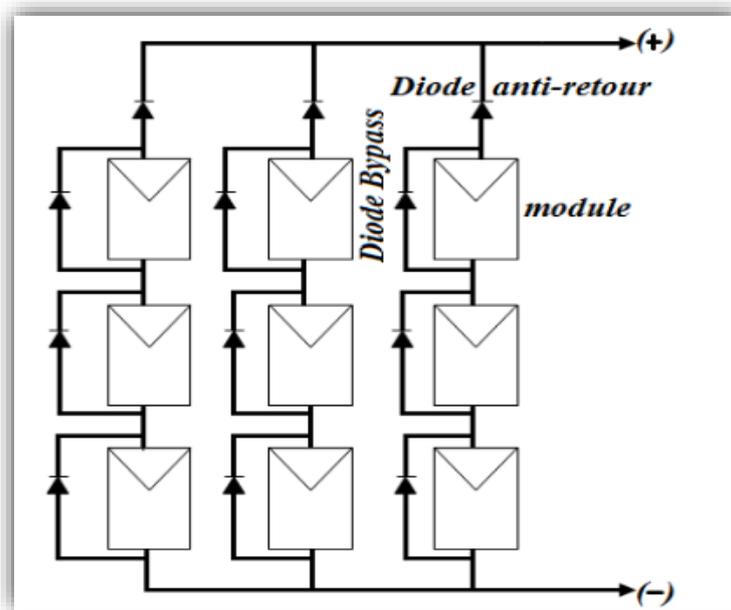


Figure II.23: Protection par diodes séries et parallèles dans un groupement de modules.

II.8 les Systèmes photovoltaïques

Un système photovoltaïque est le regroupement de plusieurs composants (panneaux, convertisseurs, câbles, protections, etc.) assurant la conversion et l'acheminement de l'énergie solaire sous forme d'électricité continu ou alternatif jusqu'aux points d'utilisation ou de stockage. L'élément de base d'un système photovoltaïque est la cellule photovoltaïque.[23]

II.8.1 Système raccordée au réseau

Le champ photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur continu/alternatif (DC/AC), exemple sur la figure II.24. Etant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires à moins qu'on veuille une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité. L'énergie produite est consommée sur place ; le surplus étant injecté dans le réseau, qui alimente les maisons de nuit ou pendant les jours sans soleil [20].

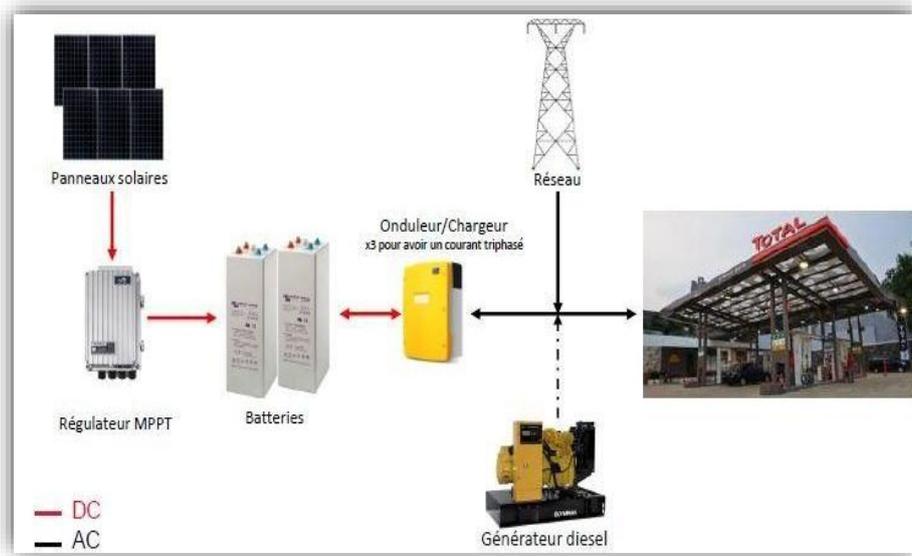


Figure II.24 : Systèmes photovoltaïques connectés au réseau.[23]

II.8.2 Système Photovoltaïque autonome (SPA)

C'est un système photovoltaïque complètement indépendant d'autre source d'énergie, qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique, exemple sur la figure II.25. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries pour stocker l'énergie.[20]

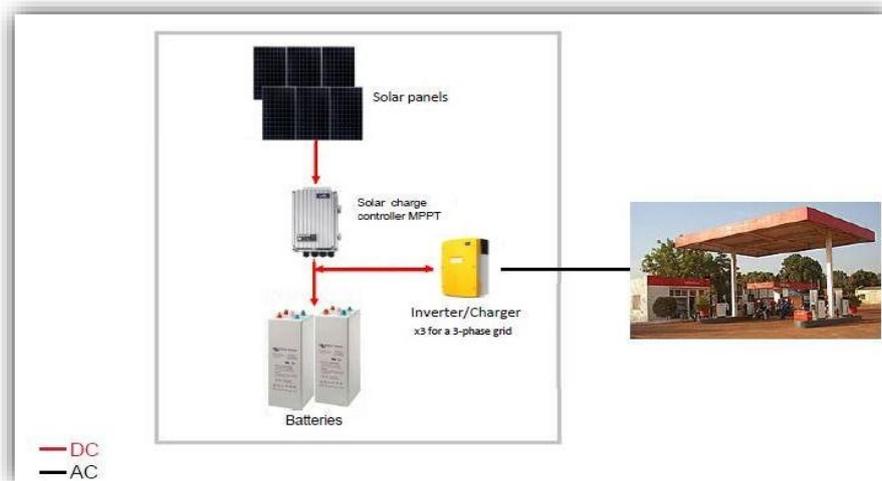


Figure II.24 : système photovoltaïque autonome [23]

Chapitre II : Système photovoltaïque

II.8.2.1 Les avantages :

Les principaux avantages des systèmes autonomes sont entre autres :

- Adapter pour les sites isolés
- Réalisation simple.
- Alimentation directe des charges continues
- Economie sur l'utilisation d'un groupe électrogène dans le cas des sites isolés

II.8.2.2 Les inconvénients :

Parmi les inconvénients des systèmes autonomes on cite :

- Pas d'énergie en absence de soleil, (sauf pour les systèmes autonomes avec batteries)
- Pertes dues à la conversion du courant continu en alternatif pour alimenter les charges alternatives
- Coûts élevés d'entretiens et de remplacement périodiques des batteries de stockage.

La figure II.26 représente un exemple de système PV autonome, la présence d'éléments de stockage est obligatoire pour assurer la fourniture à l'utilisateur continuellement et même en cas d'absence potentielle de la production d'électricité. Généralement une installation photovoltaïque autonome comprend les éléments suivants :

- Un générateur photovoltaïque.
- Un convertisseur statique continu / continu (DC/DC)
- Un convertisseur statique continu / alternatif (DC/AC).
- Un système de régulation et de stockage.

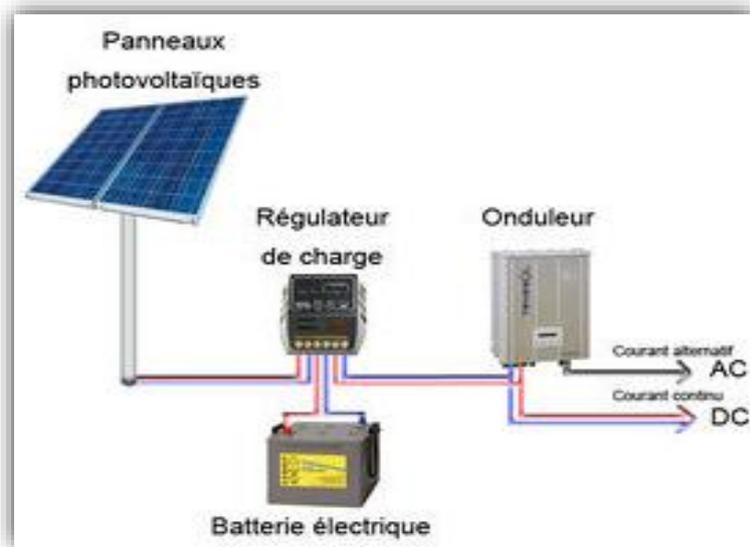


Figure II.26 : représentation d'un système photovoltaïque autonome

II.8.3 Les éléments d'un système photovoltaïque autonome

II.8.3.1 Générateur PV

La cellule photovoltaïque est le plus petit composant d'un générateur photovoltaïque. Pourtant c'est l'élément de base de ce dernier ; elle est responsable de la conversion directe de l'énergie solaire en courant électrique continu. Elle ne génère que de très faibles puissances de quelques watts. Le module photovoltaïque se compose de plusieurs ensembles photovoltaïques et constitue la base d'un groupe de cellules photovoltaïques connectées en série dans le but d'augmenter leur tension. Ces cellules PV sont assemblées en parallèle avec une diode latérale [20], comme le montre la figure II.27.

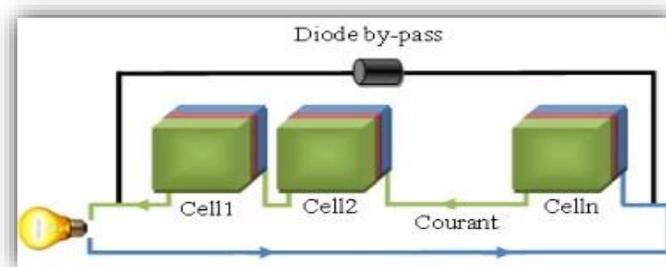


Figure II.27 : Groupement de cellules PV [3].

Chapitre II : Système photovoltaïque

Ensuite ces groupes PV sont raccordés entre eux en parallèle afin d'augmenter le courant ainsi la puissance va être augmentée à des dizaines ou des centaines de watt par module (panneau). Pour une sécurité mécanique optimale du panneau et un meilleur rendement, plusieurs autres composants sont ajoutés tels que : boîte de jonction, verre dur, verre trempé, joint silicone, cadre en aluminium et autres..., comme le montre la figure (II.28)

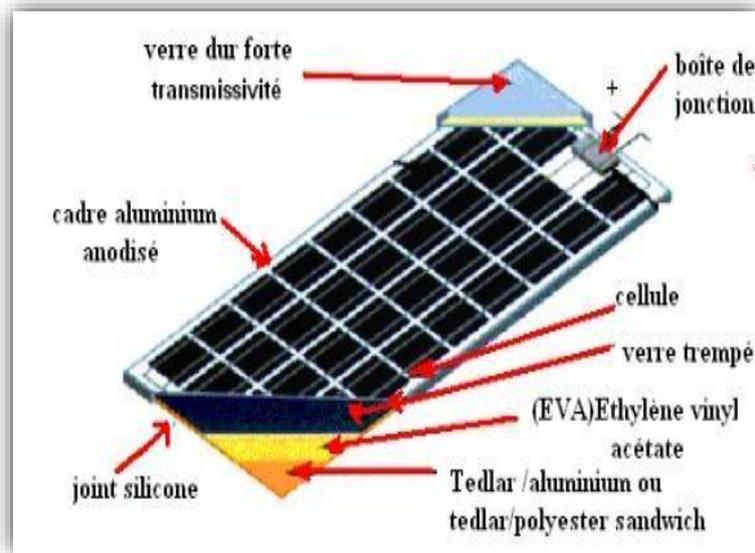


Figure II.28 : Composants d'un générateur PV [3]

II.9.3.2 Le régulateur de charge

Le régulateur de charge est le composant de jonction entre le générateur solaire, la batterie de stockage et la consommation. Il a pour rôle de protéger la batterie contre les surcharges et les décharges profondes et assure de ce fait le mieux possible le bon fonctionnement de la batterie ainsi que la gestion du système solaire PV.[23]

II.9.3.2.1 Les Types de régulateurs

II.9.3.2.1.1 Régulateur solaire PWM à LED

Simple et peu coûteux, des diodes électroluminescentes (LED) renseignent sur l'état de charge des batteries. Il fonctionne avec panneaux 12 ou 24V (36 ou 72 cellules).



Figure II.29 : le Régulateur solaire PWM à LED

II.9.3.2.1.2 Régulateur solaire PWM avec écran LCD

Plus évolué que l’affichage à LED, l’écran LCD permet d’afficher d’avantages d’informations sur l’état de l’installation : puissance, tension, niveaux de charge ... Il fonctionne avec des panneaux 12 ou 24V (36 ou 72 cellules).



Figure II.30 : le Régulateur solaire PWM avec écran LCD

II.9.3.2.1.3 Régulateur solaire MPPT

Un régulateur de charge solaire MPPT modifie régulièrement la tension délivrée aux batteries en fonction de la tension de sortie des panneaux solaires. La technologie MPPT permet

Chapitre II : Système photovoltaïque

d'optimiser le rendement de l'installation en augmentant la production d'énergie. Ce type de régulateur est capable de gérer des tension panneaux supérieures à la tension de la batterie.



Figure II.31 : Le Régulateur solaire MPPT

II.9.3.2.1.4 Régulateur solaire PWM DUO

Permet de charger deux batteries simultanément, une principale et une autre auxiliaire comme sur un camping-car ou un bateau.



Figure II.32 : Le Régulateur solaire PWM DUO

II.9.3.2.1.5 Régulateur solaire PWM crépusculaire

Ce régulateur est utilisé pour la gestion de l'éclairage. Il va détecter le début et la fin de journée pour permettre la programmation de sa sortie.



Figure II.33 : Le Régulateur solaire PWM crépusculaire

II.9.3.3 L'onduleur

L'onduleur est un convertisseur statique DC/AC de haute performance. Il convertit la tension continue en tension alternative contrôlée de façon très précise. Dans une station PV la puissance maximale extraite par le hacheur est convertie en puissance alternative active par l'onduleur. L'onduleur est généralement associé à un redresseur qui réalise la transformation du courant alternatif en courant continu et dont le rôle sera de charger les batteries et d'alimenter le circuit en continu de l'installation en cas de longue période sans soleil.[26]

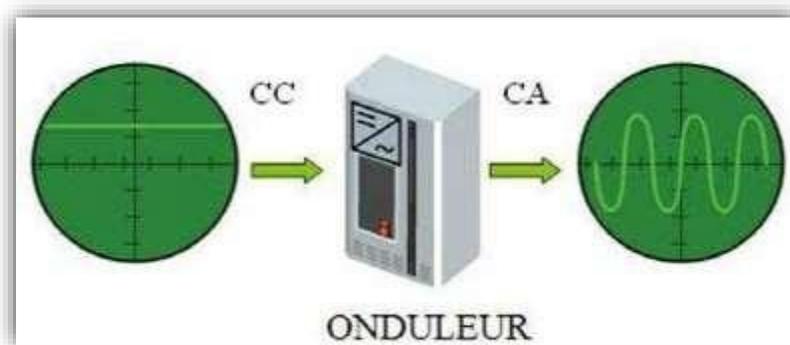


Figure II.34 : l'onduleur. [26]

Il existe différents types de topologies d'onduleurs utilisés selon la nature et l'exigence de l'installation et les plus importants sont :

Chapitre II : Système photovoltaïque

- Onduleurs modulaires (module inverter)
- Onduleurs centralisés (central inverter)
- Onduleurs "String" ou "de Rangée"

Il est important de noter qu'en cas d'ombrage partiel des modules solaires, il n'y a pas de perte, l'emploi de diodes de by-pass est fortement recommandé. Le choix d'un onduleur doit tenir compte d'un certain nombre de critères :

❖ A l'entrée

- La puissance maximale,
- La tension maximale,
- La plage de tension d'entrée,
- Le nombre maximal de string raccordables

❖ A la sortie

- La puissance maximale et la puissance nominale
- La tension nominale et la fréquence nominale le rendement

Il existe deux types d'onduleurs :

II.9.3.3.1 Le convertisseur continu - continu

Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximale. Ce système d'adaptation est couramment appelé MPPT (maximum power point tracking). Son rendement se situe entre 90 et 95%.[27]. Ce système présente deux inconvénients pour un champ PV de faible puissance :

- Prix élevé.
- Le gain énergétique annuel par rapport à un système moins complexe (cas d'une régulation de la tension) n'est pas important.

Chapitre II : Système photovoltaïque

II.9.3.3.2 Le convertisseur continu - alternatif

C'est un dispositif destiné à convertir le courant continu en courant alternatif. La formation de l'ordre de sortie peut être assurée par deux dispositifs :

Rotatif : C'est un moteur à courant continu couplé à un alternateur, son rendement varie de 50% à 60% pour 1KW jusqu'à atteindre 90% pour 50KW.

- Ses avantages sont : simplicité, onde sinusoïdale, bonne fiabilité.
- Ses inconvénients sont : cherté, faible rendement (surtout pour les faibles puissances).[27]

Statique : On l'appelle l'onduleur. C'est un appareil qui utilise des transistors de puissance ou des thyristors. L'onde de sortie, dans le cas le plus simple, présente une forme carrée qui peut s'adapter à certains types de charges, et des pertes à vide importantes surtout pour les puissances plus faibles.

II.9.3.4 Les Accumulateurs ou batteries de stockage

Les batteries sont des composantes importantes pour les systèmes photovoltaïques en site isolé ou hybride. Le choix de la capacité de stockage tient compte du nombre de jours d'autonomie voulu, de la consommation énergétique des charges à alimenter et de la tension du système, ainsi que du rendement des batteries.

En outre la disposition des batteries de stockage tient compte de la tension et le courant recherché à la sortie. C'est ainsi donc que les batteries seront disposées soit en série ou en parallèle selon le fonctionnement voulu.[23]



Figure II.35 : Aperçu d'une batterie solaire

Chapitre II : Système photovoltaïque

Dans un système photovoltaïque, la batterie remplit trois fonctions importantes : [27]

- A) **Autonomie** : Une batterie permet de répondre aux besoins de la charge en tout temps, même la nuit ou par temps nuageux.
- B) **Courant de surcharge** : Une batterie permet de fournir un courant de surcharge pendant quelques instants, c'est-à-dire un courant plus élevé que celui que peut fournir le champ PV. Ceci est nécessaire pour faire démarrer les moteurs et les autres appareils requérant un courant de démarrage de 3 à 5 fois supérieur au courant d'utilisation.
- C) **Stabilisation de la tension** : Une batterie permet de fournir une tension constante, en éliminant les écarts de tension du champ PV et en permettant aux appareils un fonctionnement à une tension optimisée.

On associe des batteries en série pour obtenir des tensions multiples de (12V,24V et 48V) et en parallèle pour augmenter la capacité. [24]

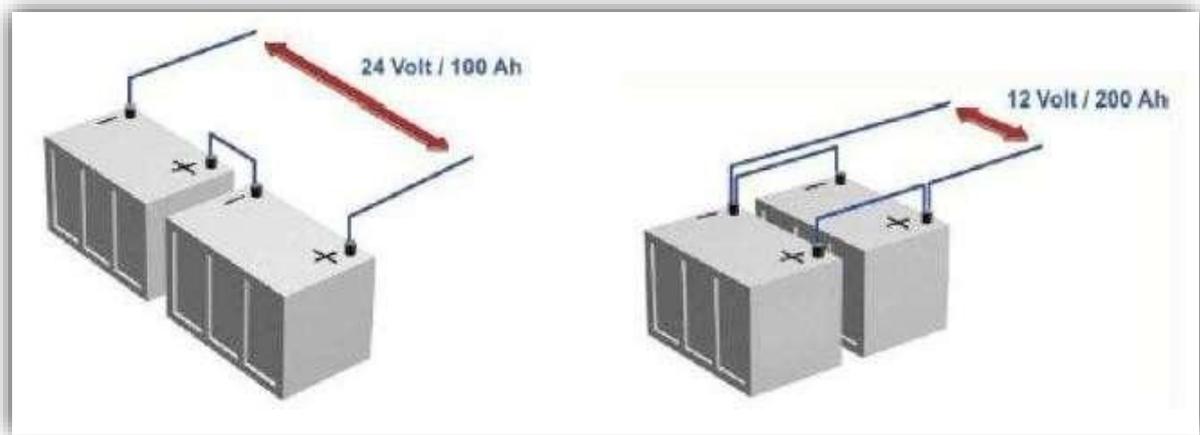


Figure II.36 : Association de deux batteries en série / en parallèle. [24]

II.9.3.5 Boîte de jonction

En électricité, une boîte de jonction (BJ) est une boîte électrique située en aval d'un panneau électrique. Elle est située le plus près possible des luminaires à l'étage et permet de focaliser les départs sur divers appareils électriques. Cette boîte de jonction doit être mise à la terre (si métallique) pour éviter le risque de choc électrique en cas de dysfonctionnement.

Chapitre II : Système photovoltaïque

Un couvercle doit être mis en place pour éviter de toucher accidentellement les connecteurs. Les connexions s'effectuent à l'aide de capuchons de connexion ou de borniers. Les fils entrant dans la boîte peuvent être dans des câbles ou dans des conduits. Ils sont attachés à la boîte avec des connecteurs.[27]

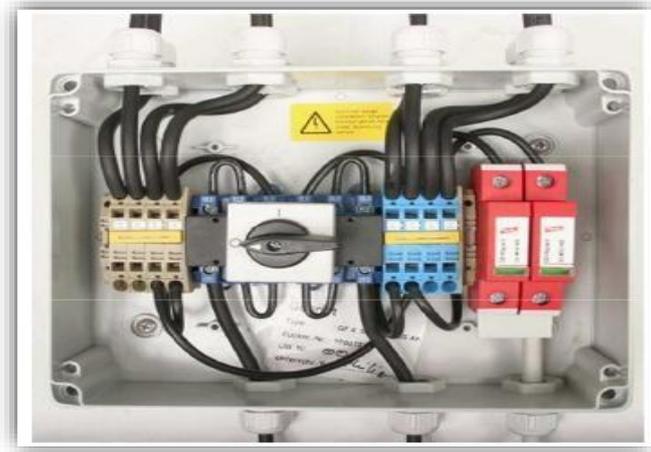
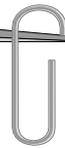


Figure II..37 : Exemple de boîte de jonction

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons décrit les systèmes photovoltaïques, leur caractéristique $I(V)$, leur circuit électrique équivalent et leurs principales grandeurs caractéristiques, le mécanisme de la conversion photovoltaïque ainsi que l'étude de l'influence de l'éclairement et la température sur leur caractéristique. Dans le chapitre suivant, nous aborderons l'installation et le dimensionnement des systèmes photovoltaïques.



Chapitre III :

***Dimensionnement d'une
installation
photovoltaïque***

Chapitre III : Dimensionnement d'une installation photovoltaïque

Introduction

Tout système photovoltaïque nécessite une étude de dimensionnement avant installation. La méthode de mise à l'échelle consiste d'abord à déterminer la puissance crête du panneau photovoltaïque qui fournit l'énergie électrique nécessaire pendant la journée. Elle consiste à déterminer la période de besoin en électricité et la consommation requise.

En plus de la puissance du transformateur, en tenant compte des conditions d'ensoleillement, de la demande en énergie et du coût des composants, dans ce chapitre, nous expliquerons la méthode de redimensionnement d'une installation photovoltaïque.

III.1 Méthode Dimensionnement d'une installation photovoltaïque

III.1.1 Orientation des modules PV dans une installation photovoltaïque autonome

La conception des systèmes photovoltaïques nécessite la connaissance du rayonnement solaire utile sur le site d'installation. Cette connaissance est l'un des Paramètres essentiels de l'étude préalable. Pour un besoin électrique donné, plus l'énergie solaire reçue est grande, moins est le nombre de panneaux solaires à installer et inversement.

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire absorbé est diffusé au sol. L'influence de l'atmosphère provoque la diffusion et l'absorption d'une partie du rayonnement incident. Avant de s'intéresser au rendement de conversion (rayonnement solaire → électricité) des cellules photovoltaïques, il convient de savoir évaluer le gisement solaire local.

III.1.1.1 la latitude, l'inclinaison et l'orientation optimales des capteurs photovoltaïques

La latitude est une coordonnée géographique représentée par une valeur angulaire, expression de la position d'un point sur Terre, au nord ou au sud de l'équateur qui est le plan de référence. La latitude est une mesure angulaire ; elle varie entre la valeur 0° à l'équateur et 90° aux pôles. La latitude est utilisée en combinaison avec la longitude pour indiquer la position précise d'un élément sur Terre. Lorsqu'ils sont reliés entre eux, tous les endroits de la Terre

Chapitre III : Dimensionnement d'une installation photovoltaïque

ayant une même latitude forment un cercle dont le plan est parallèle à celui de l'équateur, d'où l'autre terme « parallèle » permettant de nommer une latitude.[30]

L'énergie fournie par les capteurs photovoltaïques est directement proportionnelle à l'ensoleillement. Afin d'optimiser au mieux l'installation solaire il faut donc tenir compte de ce facteur, qui dépend à son tour du lieu de l'installation, de l'orientation et de l'inclinaison de ces capteurs.[27]. Un plan incliné est caractérisé par son inclinaison β (par rapport à l'horizontale), et son orientation ou azimut Ψ par rapport au sud.[27]

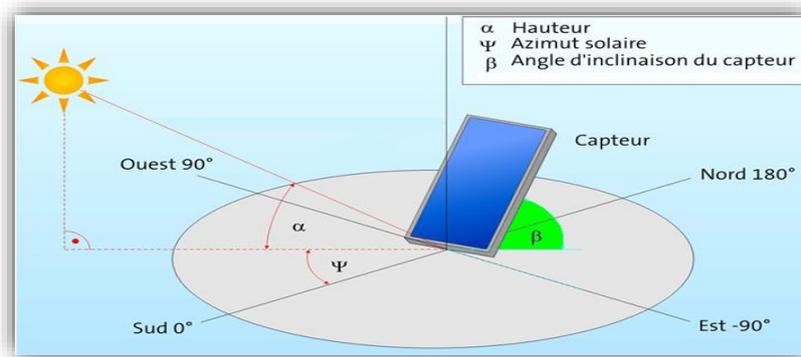


Figure III.1 : les angles pour un plan incliné : inclinaison β , azimut χ et l'angle d'incidence θ .

Plus les rayons sont proches de la perpendiculaire au plan des panneaux ($\cos \theta \approx 1$), plus la quantité d'énergie disponible est importante.[27]. Idéalement, ils doivent être orientés en plein Sud dans l'hémisphère Nord et en plein Nord dans l'hémisphère Sud, à l'écart des zones ombragées, et inclinés d'un angle qui permet l'optimisation de l'énergie récupérée. En première approximation, l'inclinaison optimale peut se calculer par la formule : latitude du lieu + 10°.

En France, la latitude variant de +41° (Sud du corse) à +51° (nord de la France), l'inclinaison optimale du champ photovoltaïque se situe donc entre 50° et 60°. Et si l'orientation n'est pas plein sud, on pourra utiliser la formule approchée suivante :

$$\text{Inclinaison optimale} = (\text{latitude du lieu} + 10^\circ) \times (1 - \text{Orientation}/180^\circ)$$

Par exemple, soit une installation dans la région de Nantes (latitude = 47°). Les modules sont orientés à 30° vers l'est, alors l'inclinaison optimale serait égale à :

$$(47^\circ + 10^\circ) \times (1 - 30^\circ/180^\circ) = 47.5^\circ.$$

Chapitre III : Dimensionnement d'une installation photovoltaïque

Le tableau suivant donne les valeurs de l'inclinaison recommandée des capteurs Photovoltaïques pour une utilisation annuelle constante en fonction de la latitude.[21]

Latitude φ (°)	Inclinaison β (°)
$\varphi < 10^\circ$	10°
$10^\circ < \varphi < 30^\circ$	φ
$30^\circ < \varphi < 40^\circ$	$\varphi + 10^\circ$
$\varphi > 40^\circ$	$\varphi + 15^\circ$

Tableau (III.1) : Relation entre la latitude et l'inclinaison des panneaux pour une utilisation annuelle.[21]

III.1.1.2 Ombrage ou repérage des masques

Il arrive que les modules soient placés face à un type d'obstacle comme les bâtiments, montagnes, arbres...etc. qui masqueront le soleil. Ces effets d'ombrage sur le rayonnement reçu sont très difficiles à estimer intuitivement ; cependant, il faut faire attention aux ombrages partiels et même ponctuels puisqu'ils influent sur la production d'énergie et provoque un déficit de production important dont il faut tenir compte.[27]

Il faut noter que lorsqu'une cellule est ombrée, c'est le courant de toute la chaîne des cellules en série qui est limité et cela peut avoir de graves conséquences si les panneaux ne sont pas équipés de diodes anti-retours[27].Ce dernier réduit le taux de perte de productivité des panneaux solaires dans le cas où une partie du panneau est exposée à des ombres et plus il y a de diodes anti-retours, mieux c'est de même, lorsqu'une partie du panneau ne génère pas d'électricité comme elle le devrait en raison de l'ombrage, de la saleté et des dommages, le reste du système peut voir cette partie du circuit comme une charge. Cela entraîne la circulation du courant électrique vers cette partie, ce qui peut entraîner une surchauffe et endommager les panneaux solaires, d'où l'importance des vannes qui empêchent la circulation du courant électrique en sens inverse. La plupart des types de panneaux solaires disponibles dans le commerce contiennent 3 diodes anti-retours comme indiqué sur la figure III.16.



Figure III.2 : Schéma de Boîtier de montage avec 3 diodes anti-retours à l'intérieur

III.1.2 Energie de Consommation

Comme un système photovoltaïque bien adapté nécessite l'évaluation de la puissance électrique des applications à alimenter donc il doit fournir son énergie durant une journée entière, il est naturel de prendre la période de 24 heures comme unité de temps.

L'énergie consommée en (AC) ou (DC) E_c , exprimée en Watt- heure par jour (Wh/j). Cette énergie représente le produit de la puissance par le temp, pour calculer la consommation énergétique en (AC) ou (DC) d'une installation. On calcule d'abord l'énergie Électrique consommée en 24heures par chaque équipement ou chaque fonction électrique et ensuite on les additionne :

$$E_c = \sum P_i \times T_i$$

Où :

E_c : énergie consommée en (AC) ou (DC)

P_i : Puissance électrique d'un appareil « i » exprimée en Watt (W).

T_i : Durée d'utilisation de cet appareil « i » en heure par jour (h/j).

Chapitre III : Dimensionnement d'une installation photovoltaïque

Comme cette installation dépendra de batterie et onduleur, il est nécessaire de tenir compte de leurs rendements pour avoir l'énergie totale journalière réelle E_t qui s'exprime comme suit :

$$E_T = \frac{E_{DC}}{\eta_{Bat}} + \frac{E_{AC}}{\eta_{Bat} \times \eta_{Ond}}$$

Où :

η_{BAT} : Rendement de batterie (0.95).

η_{Ond} : Rendement de l'onduleur (0.90).

III.1.3 Dimensionnement du générateur photovoltaïque

Suite à l'évaluation des besoins électriques et du gisement solaire, il est à présent possible de dimensionner le champ photovoltaïque. Cette opération consiste simplement à calculer la puissance crête nécessaire au bon fonctionnement de l'installation.

III.1.3.1 Puissance crête d'un générateur photovoltaïque

Dans une installation photovoltaïque autonome, la seule source d'énergie disponible provient du champ photovoltaïque. La règle de dimensionnement du champ photovoltaïque c'est que l'énergie électrique journalière produite par le champ photovoltaïque (E_{Elec}) doit être au minimum égale à l'énergie journalière consommée par les appareils électriques (E_c) :

$$E_{Elec} \geq E_c$$

Ne pas respecter cette règle signifie qu'on consomme plus d'énergie qu'on en produit, l'installation photovoltaïque est décadente. Par ailleurs, l'énergie électrique E_{Elec} se calcule par la formule suivante :

$$E_{Elec} = \frac{P_{ch}}{P_i \times E_i \times K}$$

Chapitre III : Dimensionnement d'une installation photovoltaïque

Avec :

E_{Elec}: l'énergie électrique journalière potentiellement produite par l'installation photovoltaïque, exprimée en kWh/jour.

E_i: L'irradiation solaire journalière, exprimée en kWh/m²/jour, reçue par le champ photovoltaïque.

P_{ch} : La puissance crête du champ photovoltaïque.

P_i : La puissance radiative dans les conditions standard de test (conditions STC), exprimée en kW/m². Donc, P_i = 1 kW/m².

E_i: est l'irradiation solaire journalière reçue par une surface unitaire (1 m²) du champ photovoltaïque, en prenant en compte l'orientation et l'inclinaison de celui-ci.

K : est le ratio de performance de l'installation photovoltaïque

Ainsi, la règle se formalise mathématiquement par :

$$\frac{P_{ch}}{P_i \times E_i \times K} \geq E_T$$

L'objectif étant de calculer la puissance crête P_c de l'installation photovoltaïque, on exprime P_c en fonction des autres paramètres selon la formule suivante :[22]

$$P_{ch} = \frac{E_T \times P_i}{E_i \times K}$$

P_{ch}: Puissance crête de champs photovoltaïques en Watt crête (W_c)

E_c: Energie consommée par jour (Wh/jour)

E_i: Energie solaire journalière (Wh/m² /jour) (irradiation)

P_i: puissance d'éclairement aux condition STC (P_i =1000W/m²)

Chapitre III : Dimensionnement d'une installation photovoltaïque

K : Ratio de performance (Facteur de correction globale (Entre 65 et 90) (%)), ce coefficient tient compte :

- De l'incertitude météorologique.
- De l'inclinaison non corrigée des modules suivant la saison.
- Du point de fonctionnement des modules.
- Du rendement moyen charge/décharge de la batterie (90%).
- Du rendement de régulateur (95%).
- Des pertes dans les câbles et connexions pour les systèmes avec batterie.

La valeur souvent utilisée dans les calculs du système avec batterie est de 0,65.

III.1.3.2 Tension de fonctionnement du champ photovoltaïque

On choisit la tension de fonctionnement en fonction de la puissance crête du champ photovoltaïque en watt. De façon générale :[27]

Puissance crête (WC)	Moins de 500WC	De 501WC à 2000WC	De 2001WC à 10000WC	Plus de 10000WC
Tension de champ (V)	12	24	48	96

Tableau (III.2) : Tension du champ en fonction de sa puissance crête

III.1.4 Nombre de panneaux photovoltaïques à utiliser

A partir de la puissance crête des panneaux on peut déterminer le nombre de Panneaux solaire nécessaires à l'installation, il suffit de diviser la puissance totale souhaitée par la puissance unitaire d'un seul panneau solaire :

$$N_m = \frac{P_{ch}}{\text{Puissance crête unitaire panneau}}$$

Par exemple le tableau ci-dessous montre le nombre moyen de panneaux posés par Terre Solaire selon la puissance d'installation souhaitée avec une puissance crête d'un panneau $P_{CU} = 375 W_c$

Chapitre III : Dimensionnement d'une installation photovoltaïque

Puissance D'installation (KWc)	Nombre de panneaux
3 KWc	8 panneaux
6 KWc	16 panneaux
9 KWc	24 panneaux
36 KWc	96 panneaux

Tableau III.3 : le nombre moyen de panneaux posés par Terre Solaire selon la puissance d'installation souhaitée avec une puissance crête d'un panneau $P_{CU} = 375 W_c$

III.1.4.1 Nombre de panneaux photovoltaïques en série

L'organisation du champ PV se fait toujours en fonction de l'onduleur, son calcul se fait par aller-retour entre les caractéristiques des modules et celles de l'onduleur jusqu'à trouver la configuration optimale. Connecter les panneaux en série augmentera le niveau de tension et maintiendra l'ampérage de la même manière (voir chapitre II). Il faut donc s'assurer que la tension délivrée par le groupe photovoltaïque soit comprise dans la plage de tension MPPT de l'onduleur auquel il est connecté. La plage de tension MPPT est indiquée sur la fiche technique d'un l'onduleur. Par exemple, la plage de tension MPPT de l'onduleur SB 4000 TL de la marque SMA est comprise entre 125 V et 440 V :

Caractéristiques techniques SUNNY BOY 4000TL / 5000TL		
	SB 4000TL-20	SB 5000TL-20
Entrée (DC)		
Puissance DC max.	4200 W	5300 W
Tension DC max.	550 V	550 V
Plage de tension photovoltaïque, MPPT	125 V - 440 V	125 V - 440 V
Plage recommandée à puissance nominale	175 V - 440 V	175 V - 440 V
Courant d'entrée max.	2 x 15 A	2 x 15 A
Nombre de MPP trackers	2	2
Nombre max. d'entrées (en parallèle)	2 x 2	2 x 2
Sortie (AC)		

Tableau III.4 : La fiche technique d'un l'onduleur indiquant la plage de tension MPPT

On cherchera idéalement à obtenir une tension délivrée par le groupe photovoltaïque comprise dans la plage MPPT, et ce quel que soit la température des modules. Pour calculer le nombre de module en série nécessaires afin que la chaîne photovoltaïque délivre une tension

Chapitre III : Dimensionnement d'une installation photovoltaïque

comprise dans la plage de tension MPPT de l'onduleur, on pourra considérer les deux critères suivants :

- La tension V_{MPP} délivrée par la chaîne photovoltaïque, à la température minimale du site et sous une irradiation de 1000 W/m^2 , doit être inférieure à la valeur maximale de la plage de tension MPPT de l'onduleur. Cela permet de déterminer le nombre maximum de modules photovoltaïques en série.
- La tension V_{MPP} délivrée par la chaîne photovoltaïque, à une température des modules de 70 °C et sous une irradiation de 1000 W/m^2 , doit être supérieure à la valeur minimale de la plage de tension MPPT de l'onduleur. Cela permet de déterminer le nombre minimum de modules photovoltaïques en série.

Le nombre minimum et le nombre maximum de modules photovoltaïques en série se calculent par la formule simple suivante :

- Nombre minimal de modules en série = $E_+ \left[\frac{V_{MPPT,MIN}}{V_{MPP} \times 0.85} \right]$
- Nombre maximal de modules en série = $E_- \left[\frac{V_{MPPT,MAX}}{V_{MPP} \times K} \right]$

Avec :

- $E_-[X]$: La partie entière inférieure du nombre X. Par exemple, $E_-[10.6] = 10$.
- $E_+[X]$: La partie entière supérieure du nombre X. Par exemple, $E_+[10.6] = 11$.
- $V_{MPPT,MIN}$: La valeur minimale de la tension pour laquelle le tracker (MPPT) fonctionne
- $V_{MPPT,MAX}$: La valeur maximale de la tension pour laquelle le tracker (MPPT) fonctionne
- V_{MPP} La tension de puissance maximale des modules photovoltaïques.

Le coefficient k est un coefficient de sécurité imposé par le guide de l'UTE C15-712-1, et qui prend en compte l'élévation de la tension délivrée par les modules lorsque la température des cellules diminue généralement 1.15. Le coefficient 0.85 est un coefficient de minoration permettant de calculer la tension MPP à 70 °C .

Chapitre III : Dimensionnement d'une installation photovoltaïque

III.1.4.2 Nombre de panneaux photovoltaïques en parallèles

Les connexions strictement parallèles sont principalement utilisées dans des systèmes plus petits et plus fondamentaux, et généralement avec des régulateurs PWM, bien qu'il s'agisse d'exceptions. Connecter les panneaux en parallèle augmentera les ampères et maintiendra la même tension (voir chapitre II). Le nombre de modules photovoltaïques en parallèles se calculent en divisant le nombre des panneaux photovoltaïques total par le nombre des panneaux photovoltaïques en série comme suite :

$$N_p = \frac{N_m}{N_s}$$

Avec :

N_m : nombre total de panneaux photovoltaïque

N_s : nombre de panneaux connectés en série

III.1.5 Dimensionnement du parc de batteries

Pour réaliser le dimensionnement des batteries, on procède de la façon suivante :[27]

- On calcule l'énergie consommée (E_c par les différents récepteurs)
- On détermine le nombre de jours d'autonomie nécessaires.
- On détermine la profondeur de décharge acceptable pour le type de batterie utilisé. (Pour que vos batteries aient une meilleure durée de vie, et donc une plus grande fiabilité, il est important de ne pas les décharger complètement. **Il est primordial de fixer une profondeur maximale de décharge.**)
- On calcule la capacité (C) de la batterie en appliquant la formule ci-dessous :

$$C_{ch} = \frac{E_c \times N}{D \times V}$$

C_{ch} Capacité du champ de batterie en ampère. Heure (Ah)

E_c : Consommée par jour (Wh/j)

Chapitre III : Dimensionnement d'une installation photovoltaïque

N : nombre de jour d'autonomie

D : décharge maximale admissible (0,8 pour les batteries au plomb)

V : tension de champ photovoltaïque (V)

❖ Nombre de batteries en séries :

$$N_s = \frac{V_{ch}}{V_{batterie}}$$

V_{ch} Tension du champ

V_{batterie} : La tension de la batterie

❖ Nombre de batterie en parallèles :

$$N_p = \frac{C_{ch}}{C_{batterie}}$$

Avec :

C_{ch}: Capacité totale du champ de batteries associées à toute l'installation photovoltaïque.

C_{batterie} : Capacité d'une batterie. (La tension des batteries est en général de 12V ;

La capacité des batteries est quant à elle comprise entre 50 et 200 Ah.). La durée de vie en d'une batterie décroît rapidement lorsque la profondeur de décharge augmente. En général, on essaie de limiter la profondeur de décharge à 50%, c'est-à-dire que l'on n'utilisera que la moitié de la capacité de batteries.

III.1.6 Dimensionnement du régulateur de charge

Le choix d'un régulateur de charge repose sur deux paramètres principaux :[27]

- ❖ La tension entre les panneaux et les batteries : le régulateur doit pouvoir accepter cette tension (en général 12V, 24V, 48V).

Chapitre III : Dimensionnement d'une installation photovoltaïque

- ❖ L'intensité maximale du régulateur : l'intensité du régulateur doit être supérieure à l'intensité de court-circuit des modules solaires auxquels il est relié.

Ce qui fait que, le régulateur de charge doit être compatible avec les panneaux solaires et la batterie.

1/ Pour la ou les batteries : Il suffit de connaître la tension du parc complet, 12V, 24V, 36V ou 48V.

2/ Pour le ou les panneaux : Il y a plusieurs cas possibles.

- **Panneaux 36 cellules (12V) ou 72 cellules (24V) :**

- ❖ **Avec un régulateur classique type "PWM",**

La tension panneau doit être la même que celle de la batterie. Dans le cas d'une batterie 12V, on doit avoir un panneau 12V ou plusieurs mais branchés en parallèle pour ne pas modifier la tension. On ne pourra pas utiliser un panneau 24V ou deux panneaux 12V branchés en série qui donnerais du 24V.

- ❖ **Avec un régulateur MPPT,**

La tension panneau doit être supérieure à celle de la batterie pour qu'il fonctionne correctement. 5V de plus pour démarrer la charge puis 1V une fois lancé. Pour une batterie 24V, c'est un peu différent, le minimum sera un panneau 24V soit 72 cellules.

- **Panneaux 54 / 60 cellules et autres :**

On ne pourra utiliser qu'uniquement un régulateur MPPT car la tension panneau ne correspond pas à une tension batterie standard. On s'assurera toutefois d'avoir toujours une tension supérieure à celle de la batterie.

3/ Régulateur MPPT

Il est limité en tension d'entrée côté panneau solaire, 75V, 100V, 150V ou plus. Pour savoir si le régulateur est compatible avec les panneaux qu'on cherchera à brancher en série

Chapitre III : Dimensionnement d'une installation photovoltaïque

pour obtenir la tension la plus élevée possible, on additionne les tensions à vide (V_{oc}) puis on ajoute un coefficient de 20% pour tenir compte de l'influence de la température ambiante.

Tension nominale : Elle doit être celle du champ photovoltaïque.

Courant d'entrée I_e : C'est le courant de charge maximal que les modules sont susceptibles de débiter. Il doit être supporté sans problème par le régulateur. Pour estimer ce courant, le plus sûr est de prendre 1,5 fois le courant maximal.[25]

Courant de sortie I_s : L'intensité du courant de sortie du régulateur doit être supérieure à la valeur maximale que peuvent tirer les récepteurs simultanément. Elle peut être déterminée par la formule suivante :[22]

$$I_{ms} = \frac{P_{ch}}{V}$$

P_{CH} : La puissance crête du champ de photovoltaïque qui es calculé comme suit :

V : la tension nominale du champ photovoltaïque.

$$P_{ch} = P_c \times N_p \times N_s$$

N_s : nombre de panneaux en série

N_p : nombre de panneaux en parallèle

III.1.7 Dimensionnement de l'onduleur

Le convertisseur de courant se dimensionne en fonction de plusieurs critères :

- **La tension d'entrée** : c'est la même que la tension des batteries ou du régulateur (12, 24 ou 48V DC).
- **La tension de sortie** : en Algérie on utilise du 220/230 V, 50Hz.
- **La puissance nominale** : c'est la puissance que les appareils consomment en électricité pour fonctionner de façon "normale". Pour connaître cette puissance nominale, il suffit de faire la somme des puissances des appareils électriques susceptible d'être utilisés en

Chapitre III : Dimensionnement d'une installation photovoltaïque

même temps Il faut toujours choisir un convertisseur dont la puissance est légèrement supérieure à celle des appareils.

- **La puissance maximale :** l'onduleur doit être capable de fournir une grande puissance (généralement 2 ou 3 fois la puissance nominale). Cette particularité est utile pour les appareils qui possèdent un moteur (réfrigérateur, micro-onde, lave-linge, ...), car leur consommation augmente très fortement lors du démarrage. En général, si on a correctement dimensionné la puissance nominale, la puissance maximale est prévue par ces onduleurs est suffisante.
- **Le rendement :** Une partie de l'électricité transformée est consommée par le convertisseur de courant (entre 80 et 95% de l'énergie est restituée). Il est important de contrôler ce rendement, sachant qu'un bon produit se situe autour de 90%.

De plus, la plupart des convertisseurs consomment de l'énergie même lorsqu'ils ne fonctionnent pas (stand-by). Certains sont équipés d'un système de marche/arrêt qui permet de grandes économies dans les petites installations photovoltaïques.[27]

III.1.8 Le dimensionnement des câbles électriques solaires

Pour assurer le transport de l'énergie des modules jusqu'au régulateur de charge, on ne peut pas utiliser n'importe quel câble électrique.[27]. Les câbles solaires sont étudiés pour résister aux conditions liées à leur utilisation. Ils sont les seuls à pouvoir assurer une longue durée de vie (supérieure à 30 ans) tout en minimisant les pertes d'énergie.[27]



Figure (III.3) : le câble solaire

La résistance d'un câble électrique ne dépend ni de la tension ni de l'intensité du courant qui le traverse, mais dépend de la résistivité (ρ) du matériau utilisé (cuivre, argent, fer, ...), de la

Chapitre III : Dimensionnement d'une installation photovoltaïque

longueur du câble, de sa section, et de sa température. Le cuivre est de loin le conducteur le plus utilisé, et sa résistivité oscille entre $16 \times 10^{-9} \Omega \cdot m$ à $0^\circ C$ et $17 \times 10^{-9} \Omega \cdot m$ à $25^\circ C$. L'équation permettant de connaître la résistance est la suivante :

$$R = \frac{\rho \times L}{S}$$

Avec :

R : la résistance en (Ω)

ρ : la résistivité en ($\Omega \cdot m$)

L : la longueur du câble en (m)

S : la section du câble s en (mm^2)

III.2 Maintenance

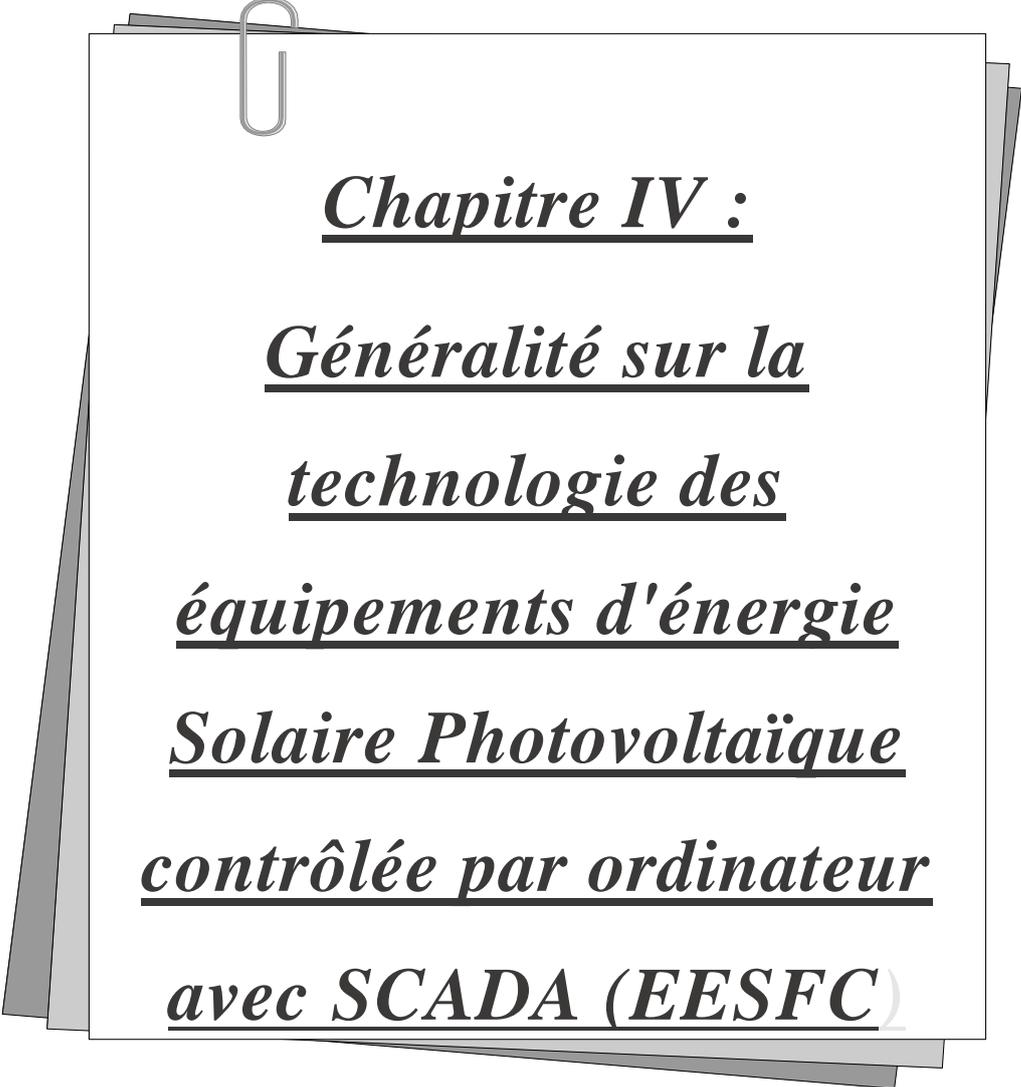
Le régulateur ne nécessite pas de maintenance particulière. Cependant, pour s'assurer du bon fonctionnement, il est conseillé d'effectuer quelques contrôles périodiques :

- Vérifier les connexions, (serrage, absence de corrosion)
- Vérifier l'état général des câbles et de leurs supports.

Conclusion

Afin d'obtenir une meilleure optimisation des installations PV qui reste l'objectif principal de tout installateur de système. Ces installations doivent être conformes aux caractéristiques de leur indépendance de dimension afin de fournir de l'énergie dans les conditions les plus défavorables.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents concepts qui entrent dans la configuration d'un système d'assemblage photovoltaïque, plus précisément le système autonome. Nous avons exposé des méthodes de dimensionnement des différents composants d'une installation photovoltaïque, qui vont du module photovoltaïque à l'onduleur et aux câbles.



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

Chapitre IV : Généralité sur la technologie des équipements solaires photovoltaïques contrôlés par ordinateur utilisant SCADA (EESFC)

Chapitre IV : Généralité sur la technologie des équipements d'énergie Solaire

Photovoltaïque contrôlée par ordinateur avec SCADA (EESFC)

Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque est le processus de conversion de particules légères en électricité. Dans notre travail, nous présenterons la technologie des équipements solaires photovoltaïques contrôlés par ordinateur utilisant SCADA (EESFC) et ses composants ainsi que leurs caractéristiques et leur maniabilité.

IV.1 La technologie des équipements solaires photovoltaïques contrôlés par ordinateur utilisant 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.[29]



Figure IV.1 : Schéma d'Unité d'équipe EESFC

IV.1présentation de SCADA

Les systèmes SCADA sont des systèmes de contrôle des opérations essentiels pour une grande variété de structures industrielles. Ces systèmes permettent aux organisations de contrôler des actifs de différentes tailles, ainsi que des usines de différents domaines

Chapitre IV : Généralité sur la technologie des équipements solaires photovoltaïques contrôlés par ordinateur utilisant SCADA (EESFC)

d'opération. Avec les systèmes SCADA, on peut facilement obtenir des informations opérationnelles, contrôler ses opérations et prendre des décisions commerciales claires en fonction des données.[32]

SCADA est l'acronyme de « Supervisory Control And Data Acquisition » (système de contrôle et d'acquisition de données), un terme qui décrit les fonctions de base d'un système SCADA. Les entreprises utilisent des systèmes SCADA pour contrôler les équipements sur tous leurs sites, mais aussi pour collecter et enregistrer des données au sujet de leurs opérations.

Un SCADA est généralement fourni sous forme de logiciel combiné à des éléments matériels, tels que des automates programmables industriels (API) et des unités terminales distantes (RTU).L'acquisition des données commence avec les API et RTU, qui communiquent avec l'équipement d'un centre de production, par exemple les machines et les capteurs d'une usine. Les données recueillies à partir de l'équipement sont ensuite envoyées au niveau supérieur, par exemple à une salle de contrôle, où des opérateurs peuvent superviser les contrôles des API et des RTU à l'aide d'interfaces homme-machine (IHM). Les IHM sont un composant essentiel des systèmes SCADA. Il s'agit des écrans que les opérateurs utilisent pour communiquer avec le système SCADA.[33]

Grâce aux systèmes SCADA, les organisations peuvent contrôler leurs processus industriels soit sur place, soit à distance, et interagir directement avec les équipements, tels que les moteurs, les pompes et les capteurs, à tous les niveaux, et ce depuis un emplacement central. Ces systèmes peuvent parfois contrôler automatiquement des équipements sur base des données reçues.[33]

Les systèmes SCADA permettent également aux organisations de surveiller leurs processus, de dresser des rapports à leur sujet basés sur des données en temps réel, et d'archiver ces données afin de les traiter et de les évaluer ultérieurement.[33]

Chapitre IV : Généralité sur la technologie des équipements solaires photovoltaïques contrôlés par ordinateur utilisant SCADA (EESFC)

IV.2.1 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/CCSOFF. Logiciel de Contrôle + Acquisition de Données + Logiciel de Gestion des Données.
- 5 Câbles et Accessoires.

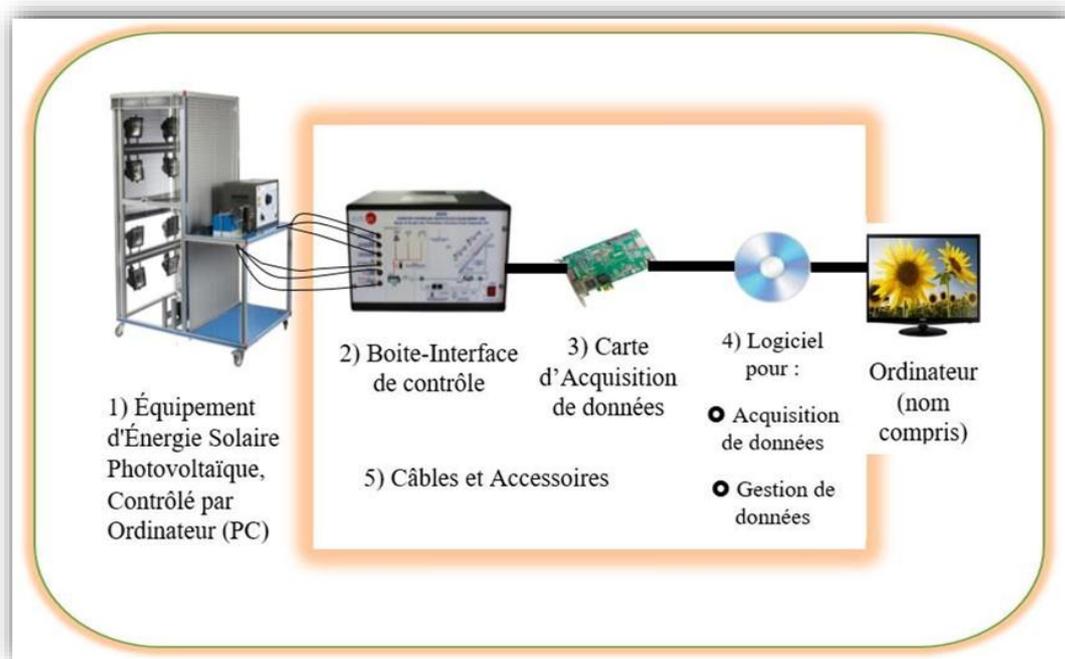


Figure IV.2 : Schéma de principe de la technologie des équipements d'énergie Solaire Photovoltaïque contrôlée par ordinateur avec SCADA (EESFC)

IV.2.1.1 EQUIPE (EESFC)

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

Chapitre IV : Généralité sur la technologie des équipements solaires photovoltaïques contrôlés par ordinateur utilisant SCADA (EESFC)

rayonnement solaire simulée, qui dans ce cas est fournie au moyen d'un panneau avec une source lumineuse très puissante (lampes solaires).[29]

L'équipe se compose de

- Deux panneaux solaires photovoltaïques (poly cristallins)
 - 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.

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

- Système de ventilation, contrôlé par ordinateur (PC)
 - Quatre ventilateurs axiaux compacts avec protections en plastique



Figure IV.3 : le Système de ventilation

Chapitre IV : Généralité sur la technologie des équipements solaires photovoltaïques contrôlés par ordinateur utilisant SCADA (EESFC)

- 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,
- 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.



Figure IV.4 : Schéma de Régulateur D

- 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.
- Module de charges DC
 - Diagramme de boîte métallique sur le panneau avant.

Chapitre IV : Généralité sur la technologie des équipements solaires photovoltaïques contrôlés par ordinateur utilisant SCADA (EESFC)

- 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

- Capteurs

- Capteur de rayonnement solaire pour étudier le comportement des panneaux solaires photovoltaïques.
- Trois sondes de température :
 - ➔ Mesurer la température ambiante (ST-1).
 - ➔ Mesurer la température dans le panneau solaire 02 (ST-2).
 - ➔ Mesurer 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.



Figure IV.6 : Capteur de rayonnement solaire

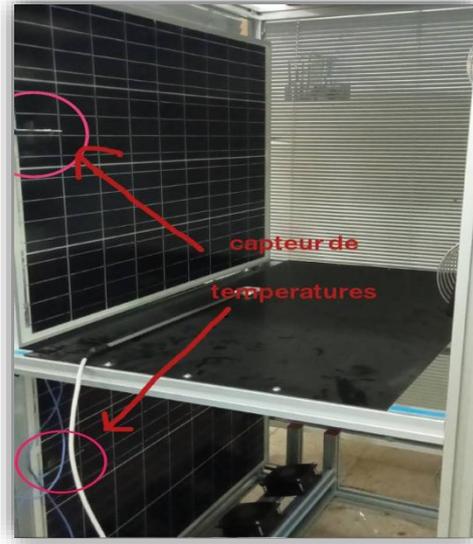


Figure IV.7 : Capteur de température

IV.2.1.2 Boîte d'Interface de Contrôle

Le « 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.[6]

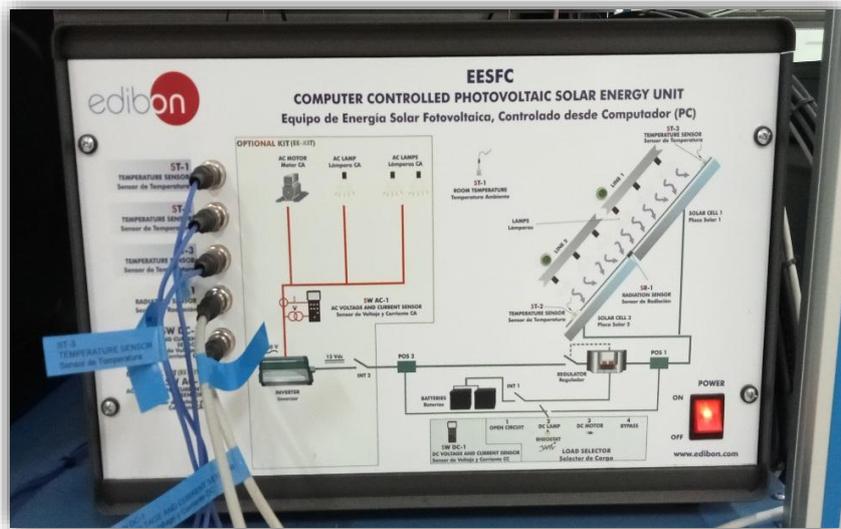


Figure IV.8 : Schéma d'EESFC/CIB. Boîte d'Interface de Contrôle

- Deux panneaux PVs
- Capteur de rayonnement
- Capteur de température :
 - ❖ 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.
- Régulateur pour charges CC et batterie.
- Chargeur de batterie auxiliaire.
- Capteur de courant continu 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.

Chapitre IV : Généralité sur la technologie des équipements solaires photovoltaïques contrôlés par ordinateur utilisant SCADA (EESFC)

- ❖ Position 4 : pour la protection par diode de by-pass (Empêcher la surchauffe des cellules photovoltaïques et ainsi protéger les cellules contre les dommages).

- 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.

IV.2.1.2.1 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.

Chapitre IV : Généralité sur la technologie des équipements solaires photovoltaïques contrôlés par ordinateur utilisant SCADA (EESFC)

- 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.2.1.3 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 : [6]

Entrée analogique	Sortie analogique	Entrée/sortie numérique
<p>Nombre de chaînes= 16 asymétriques ou 8 différentiels.</p> <p>Résolution=16 bits, l'un à 65536. Jusqu'à 250 KS/s (kilo échantillons par seconde).</p> <p>Plage d'entrée(V)=±10V.</p> <p>Transferts de Données = DMA, Interruptions, programmé I/O.</p> <p>DMA chaînes=6</p>	<p>Nombre de chaînes= 2.</p> <p>Résolution=16 bits, l'un à 65536.</p> <p>Débit de sortie maximum jusqu'à 900 KS/s.</p> <p>Plage de sortie(V)=±10V.</p> <p>Transferts de Données=DMA, Interruptions, programmé I/O.</p>	<p>Nombre de chaînes=24 entrées/sorties.</p> <p>D0 ou DI Échantillon</p> <p>Fréquence d'horloge : 0 à 100 MHz.</p> <p>Calendrier : Nombre de compteurs et de chronomètres=4.</p> <p>Résolution :</p> <p>Compteur/temporisateur : 32 bits.</p>

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



Figure IV.9 : DAB. Carte d'Acquisition de Données

IV.2.1.4 EESFC/CCSOFF :« Logiciel de Contrôle, d'Acquisition de Données, de Gestion des Données »

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 :[6]

- ❖ 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.

Chapitre IV : Généralité sur la technologie des équipements solaires photovoltaïques contrôlés par ordinateur utilisant SCADA (EESFC)

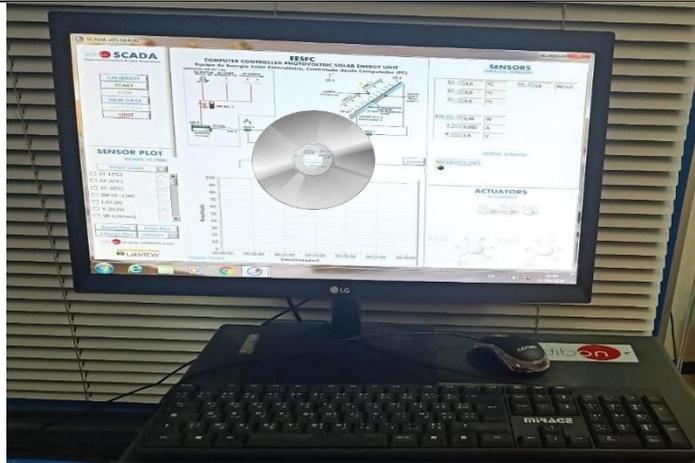


Figure IV.10 : Schéma d'EESFC/CCSOF

IV.2.1.4.1 Ecrans principaux du logiciel

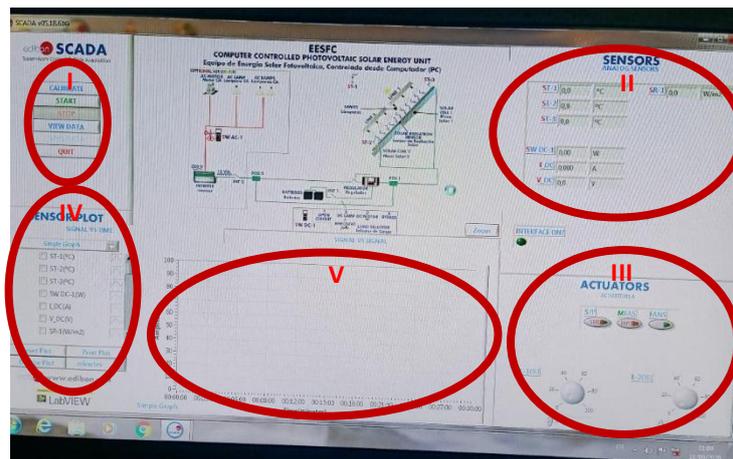


Figure IV.11 : Schéma de l'écran principal du logiciel

- 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.

Chapitre IV : Généralité sur la technologie des équipements solaires photovoltaïques contrôlés par ordinateur utilisant SCADA (EESFC)

III) Commande des actionneurs.

- Serial/Parallèle=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=Systeme 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.2.1.5 Câbles et Accessoires

IV.2.2 Les fonctions les plus importantes et les résultats possibles de 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.

Chapitre IV : Généralité sur la technologie des équipements solaires photovoltaïques contrôlés par ordinateur utilisant SCADA (EESFC)

- 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.2.3 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.

Chapitre IV : Généralité sur la technologie des équipements solaires photovoltaïques contrôlés par ordinateur utilisant SCADA (EESFC)

- 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.

IV.2.4 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.

Conclusion

Nous avons commencé notre travail dans ce chapitre par un aperçu de la technologie des équipements d'énergie Solaire Photovoltaïque contrôlés par ordinateur avec SCADA (EESFC). Ce dernier étant le système de contrôle des opérations essentiels pour une grande variété de structures industrielles, mais dans notre travail, il sera utilisé dans les équipements d'énergie Solaire Photovoltaïque.

Nous avons traité tous les composants et en détail en plus de Les fonctions les plus importantes et les résultats possibles de cet appareil.



Chapitre V :
Résultats
Expérimentaux

Chapitre V : Résultats Expérimentaux

Introduction

Dans ce chapitre on présente une étude des panneaux photovoltaïques utilisant la technologie des équipements solaires photovoltaïques commandés par ordinateur utilisant SCADA (EESFC).

Ce chapitre est organisé comme suit :

Une première partie comportant un travail expérimental réalisé au niveau du laboratoire pédagogique :

- ➔ La première expérience : dont le but est d'étudier l'efficacité des panneaux solaires connectés en parallèle et en série
- ➔ La deuxième expérience : dont le but est d'étudier l'efficacité du panneau solaire en fonction de la température et des connexions des panneaux solaires en parallèle

Une deuxième partie comportant une étude de cas dans laquelle on propose un dimensionnement d'une station photovoltaïque permettant de couvrir les besoins en termes d'énergie électrique d'une école primaire de 110 élèves.

V.1. La Première partie

Dans cette partie on procède à des essais expérimentaux sur un banc d'essai existant au niveau du laboratoire pédagogique. Ces essais se partagent en deux groupes de manipulations :

- ➔ Dans la première expérience notre but est d'étudier l'efficacité des panneaux solaires connectés en parallèle et en série
- ➔ Dans la deuxième expérience notre but est d'étudier l'efficacité du refroidissement panneaux solaires par ventilation.

Chapitre V : Résultats Expérimentaux

V.1.1 Etude de l'efficacité des panneaux solaires connectés en parallèle et en série

V.1.1.1 Objectif

Notre objectif principal est d'étudier les performances du système de génération solaire photovoltaïque avec des panneaux solaires connectés en parallèle et en série.

V.1.1.2 Les deux panneaux solaires connectés en Parallèle

A - Matériel et méthodes

Nous avons utilisé dans cette étude le montage expérimental d'une unité solaire photovoltaïque décrite dans le chapitre précédent.

Protocol expérimentale

On réglage le disjoncteur triphasé situé sur le panneau arrière de la console électronique en position ON. Puis on suit les étapes :

1. Vérifier que le rhéostat de charge CC est à la position de résistance maximale/minimale choisie et que le commutateur manuel du rhéostat soit en position UP/ON.
2. Placer le sélecteur de charge CC en position 2.
3. Déconnecter les lampes à courant continu, qui sont connectées en parallèle avec le rhéostat.
4. Connecter l'alimentation triphasée et après avoir vérifié que tous les capteurs sont correctement connectés, on allume le module et la console électronique.
5. Vérifier la position des commutateur suivants : les ventilateurs sont en position OFF, les panneaux solaires sont disposés en parallèle et les charge CC sont placées AVANT le régulateur de charge.
6. Garder les panneaux solaires connectés en parallèle. Faire glisser les commandes SUN-1 et SUN-2 au maximum pour obtenir le rayonnement maximal. Enregistrer les valeurs mesurées du courant (I), de la tension continue (V) et du rayonnement SRL (Wr).
7. Modifier la position du rhéostat de charge à environ 90% et enregistrer les valeurs des paramètres obtenus.
8. Répéter le point 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 système.

Chapitre V : Résultats Expérimentaux

Remarque : le rhéostat ne doit pas être laissé à la position de résistance minimale (court-circuit) trop longtemps. Cela provoque une chaleur excessive qui peut endommager l'équipement.

9. Faire tourner le rhéostat dans le sens inverse des aiguilles d'une montre jusqu'à la position de résistance maximale.
10. Répéter les points 6 à 9 avec des diminutions relativement proportionnelles des valeurs SUN-1 et SUN-2, de manière à pouvoir obtenir cinq courbes I-V pour cinq valeurs d'éclairage solaire.
11. Pour la dernière expérience, on met le module et la console électronique hors tension. Ensuite, on débranche l'alimentation triphasée.

Enfin, on place le disjoncteur triphasé en position OFF.

B - Résultats discussions

On met les panneaux 1 et 2 en parallèle avec le simulateur solaire en mode max (mode idéal) SUN-1 et SUN-2 en position 1, et on met le rhéostat en position R=100%. On enregistre par la suite la valeur du courant I(Amp) et V(Volts) lues sur l'écran à travers l'interface du programme SCADA. Nous répétons le processus en changeant la position R de 90% à 0%.

Pour chaque position (valeur de l'intensité du rayonnement), l'opération sera répétée intégralement et les valeurs de I et V seront enregistrées ; les courbes seront tracées par la suite.

	Intensité du rayonnement %
Position 1	100
Position 2	80
Position 3	60
Position 4	40
Position 5	25

Tableau V.1 : l'intensité du rayonnement pour chaque position

Chapitre V : Résultats Expérimentaux

Détermination de : I_{cc} (A), V_{oc} (V) et puissance maximale P_{max}

	I_{ccmax} (A)	V_{ocmax} (V)	$P_{max,idéale}$ (W) = $I_{ccmax} \times V_{ocmax}$
MAX SUN 100%	1.624	21.4	34.75
SUN 80%	1.494	20.3	30.32
SUN 60%	1.295	18.5	23.95
SUN 40%	0.467	16.5	7.70
SUN 25%	0.045	9.9	0.445

Tableau V.2 : Valeurs du courant maximal et de la tension maximale et la puissance idéale maximal pour deux panneaux connectés en Parallèle

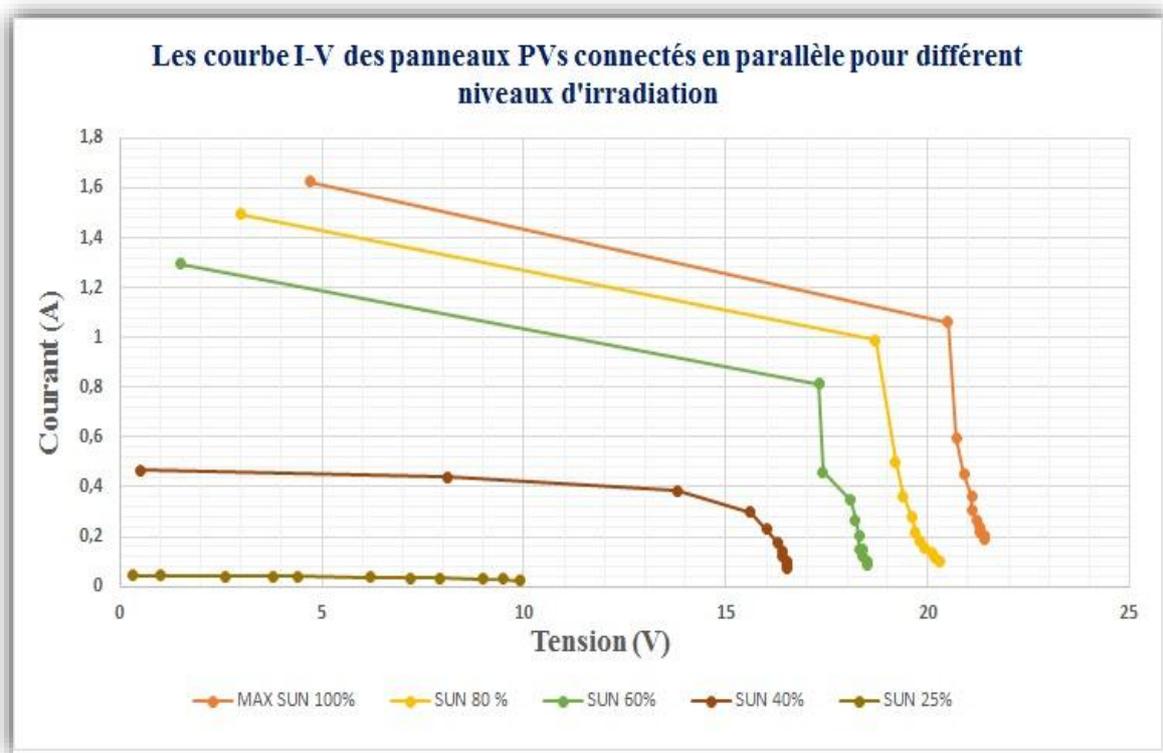


Figure V.1 : Courbe caractéristique courant-tension pour deux panneaux connectés en parallèle.

La figure V.1 représente le diagramme caractéristique courant-tension des panneaux 1 et 2 connectés en parallèle dans le cas de cinq niveaux d'éclairement.

Chapitre V : Résultats Expérimentaux

En position 1, on remarque l'existence de deux zones : un courant décroissant dans la plage de tension comprise entre 4.7V et 20.8V. Ensuite au-delà de 20.8V à 21.4V, il y a une chute brutale de courant qui débute à 1.062A et arrive jusqu'au 0.17A. Même comportement pour des pourcentages d'éclairiments faibles, position 2 et 3 respectivement. On remarque également un courant décroissant dans la plage de tension comprise entre 3V et 18.8V et 1.2V et 17.3V respectivement. Au-delà de ses valeurs le courant diminue progressivement de 1A à 0.3A et de 0.814A à 0.1A respectivement.

Quant à la position 4 le courant diminue progressivement pour des valeurs de la tension allant de 0.3V à 13.8V. Et entre 13.9V à 16.5V, on constate une diminution du courant de 0.383A à 0A. Enfin, la position 5 (SUN 25%) où le pourcentage d'éclairiment est assez faible, on constate que la valeur du courant est très faible aussi par rapport aux positions précédentes autour de 0.03 A. Les valeurs maximales de la courbe de tension actuelle (V.1) pour toutes les positions sont indiquées dans le tableau suivant :

Détermination du point de puissance maximale PP_{max} pour chaque niveau d'éclairiment :

	I_{opt}	V_{opt}	$P_{max} = I_{opt} \times V_{opt}$
MAX SUN 100%	1.062 A	20.5V	21.77 W
SUN 80%	0.988 A	18.7V	18.48 W
SUN 60%	0.814 A	17.3V	14.08 W
SUN 40%	0.383 A	13.8V	5.29 W
SUN 25%	0.038A	6.2V	0.236 W

Tableau V.3 : Valeurs de courant optimale et tension optimale et la puissance maximal pour deux panneaux connectés en Parallèle

V.1.1.3 Les deux panneaux solaires connectés en série

A - Matériel et méthodes

Nous avons utilisé dans cette étude le montage expérimental comportant une unité solaire photovoltaïque décrite dans le chapitre précédant.

Chapitre V : Résultats Expérimentaux

Protocol expérimentale

- ➔ On change le disjoncteur triphasé (situé sur le panneau arrière de la console électronique) en position ON.
- ➔ Les mêmes étapes que le premier exercice. Mais nous changeons la position des panneaux solaires du mode « en parallèle » au mode « en série ».
- ➔ On relève toutes les valeurs de paramètres obtenues (du courant (I), de la tension continue (V) et du rayonnement SRL (Wr)).

Enfin, on place le disjoncteur triphasés, situé sur le panneau solaire arrière de la console électronique, en position OFF.

B - Résultats et discussions

Dans cette expérience, On met les panneaux 1 et 2 en série avec le simulateur solaire en mode max (mode idéal) SUN-1 et SUN-2 en position 1=100% et on met rhéostat en position R=100%. Ensuite, on enregistre les valeurs du courant I (Amp) et V(Volts) détecté sur l'écran (programme SCADA). Nous répétons le processus en changeant la position R de 90% à 0%.

Pour chaque position du tableau V.1, l'opération sera répétée intégralement et les valeurs de I et V seront enregistrées ; les courbes seront tracées par la suite.

Détermination de : I_{cc} (A), V_{oc} (V) et puissance maximale P_{max}

	I_{ccmax} (A)	V_{ocmax} (V)	$P_{max,idéale}$ (W) = $I_{ccmax} \times V_{ocmax}$
MAX SUN 100%	1.400	40.4	56.56
SUN 80%	1.228	37.1	45.55
SUN 60%	0.760	35.1	26.67
SUN 40%	0.248	28.7	7.11
SUN 25%	0	5.3	0

Tableau V.4 : Valeurs de courant maximal et tension maximal et la puissance idéale maximal pour deux panneaux connectés en série

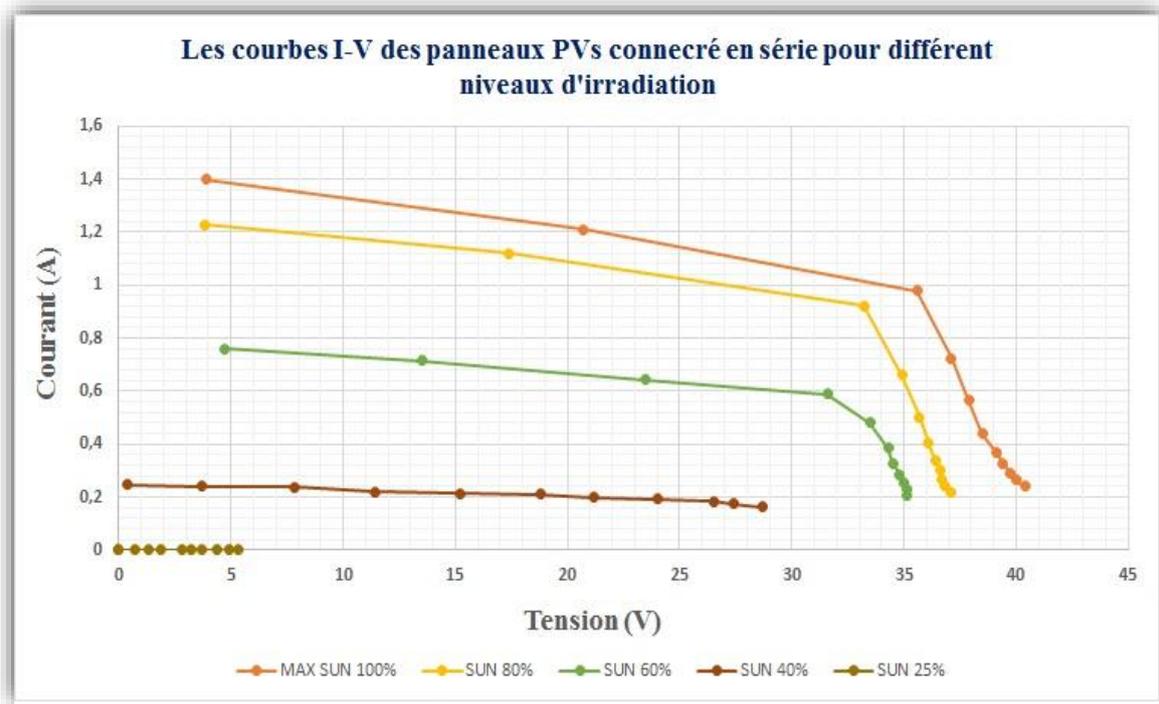


Figure V.2 : Courbe caractéristique courant-tension pour deux panneaux connectés en série

En position 1 maximum d'éclairement, on constate l'existence de deux zones aussi comme le cas du montage en parallèle, mais le courant décroissant est dans la plage de tension comprise entre 4V et 35,6V. à partir de 35,7V jusqu'au 40,54 V, on constate une chute brutale du courant entre 0,980A à 0,2A. Quant à la position 2, on note le même comportement que la position 1.

Pour la position 3, on observe dans la plage (4,7V- 31,6V) un courant quasiment constant de l'ordre de 0,6A à 0,78A. Une diminution du courant, de 0,590A à 0,2A, est constatée entre 31,7V à 35,1V. De plus, le courant est plus faible par rapport aux positions précédentes. Quant à la position 4, on note que le courant se stabilise, puis une légère diminution de 0,237A à 0,17A. A ce niveau d'éclairement, le courant est très faible. Enfin, pour la dernière position 5, le courant est nul.

En comparant les deux graphes correspondant au montage en parallèle et à celui en série, on constate des valeurs de courant qui sont plus élevées pour le premier montage que celles pour le deuxième montage. Inversement, le voltage est plus important en série qu'en parallèle sauf la dernière position ; ceci peut s'expliquer par la différence du courant.

Chapitre V : Résultats Expérimentaux

Les valeurs maximales de la courbe de tension pour toutes les positions sont indiquées dans le tableau V.5.

Détermination du point de puissance maximale P_{\max} pour chaque niveau d'éclairément

	I_{opt}	V_{opt}	$P_{\max} = I_{\text{opt}} \times V_{\text{opt}}$
MAX SUN 100%	0.980 A	35.6 V	34.89 W
SUN 80%	0.921 A	33.2 V	30.56 W
SUN 60%	0.590 A	31.6 V	18.64 W
SUN 40%	0.237 A	7.8 V	1.85 W
SUN 25%	0 A	0 V	0 W

Tableau V.5 : Valeurs de courant optimale et tension optimale et la puissance maximal pour deux panneaux connectés en série.

	Panneaux 1 et 2 connecté en parallèle				
	SUN 100%	SUN 80%	SUN 60%	SUN 40%	SUN 25%
P_{MAX} (W)	21.77	18.48	14.08	5.29	0.236
$W_{r,\text{moy}}$ (W/m²)	460.07	403.36	282.35	77.47	11.86

Tableau V.6 : Valeurs de P_{MAX} et W_r , moy pour deux panneaux connectés en parallèle.

	Panneaux 1 et 2 connecté en série				
	SUN 100%	SUN 80%	SUN 60%	SUN 40%	SUN 25%
P_{MAX} (W)	34.89	30.56	18.64	1.85	0
$W_{r,\text{moy}}$ (W/m²)	470.19	394.27	269.28	79.64	8.80

Tableau V.7 : Valeurs de P_{MAX} et W_r , moy pour deux panneaux connectés en série.

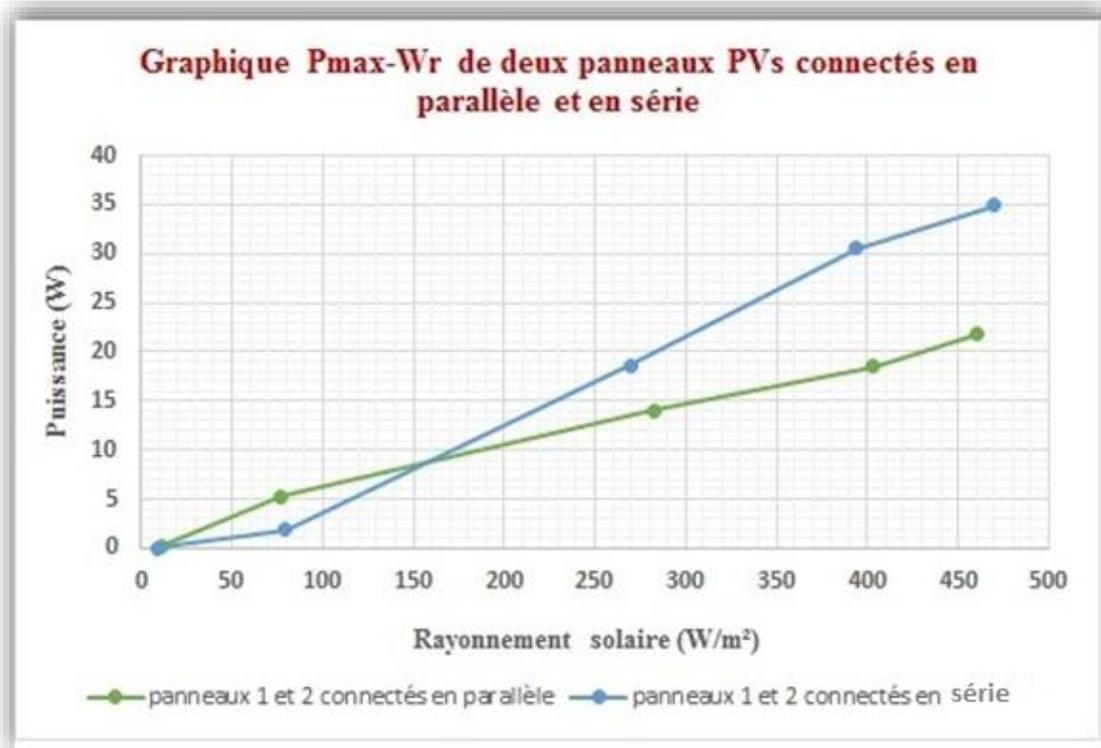


Figure V.3 : Courbe caractéristique puissance-rayonnement pour deux panneaux connectés en Parallèle et en Série.

La figure V.3 présente l'évolution de la puissance en fonction du rayonnement pour deux panneaux connectés en parallèle et en Série. On remarque que dans une plage de rayonnement entre 0 à 150w/m², la puissance des panneaux connectés en série est inférieure à la puissance des panneaux connectés en parallèle. Par contre, au-delà de cette plage (150>w/m²) une augmentation des puissances des panneaux connectés en série (atteint 34.89w) par rapport à ceux connectés en parallèle (atteint 21.77w) ça correspond au cas d'un bon rayonnement solaire.

Conclusion d'expérience 1

La première expérience consiste à étudier l'efficacité des panneaux solaires. Cette expérience est organisée en deux parties ; dans la première partie les panneaux solaires sont connectés en parallèle et dans la deuxième partie les panneaux solaires connectés en série.

À travers cette expérience, on constate que plus le pourcentage d'éclairement est faible, plus le courant est faible ; et cela s'applique également à la tension dans les deux cas (série - parallèle).

Chapitre V : Résultats Expérimentaux

La seule différence relevée entre l'évolution du courant et celle de la tension réside dans le fait que :

- Lorsque les panneaux sont connectés en série la tension est supérieure aux valeurs de tension lorsque les panneaux sont connectés en parallèle.
- Inversement pour le courant qui a des valeurs supérieures lorsque les panneaux sont en parallèle même à faible éclairage on constate une présence d'un minimum de courant ou il est totalement absent dans cette phase pour les panneaux en série.

Donc la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement et cela s'applique également à la tension du circuit. Par conséquent, si on souhaite augmenter la tension c'est la configuration « en série » qui est à envisager ; et si on souhaite augmenter le courant c'est la configuration « en parallèle » qui est favorisée.

On conclut aussi que la puissance augmente avec l'augmentation de rayonnement pour les deux cas (série - parallèle). Cette puissance est plus importante en parallèle qu'en série pour un bon rayonnement, par contre (faible rayonnement) cette puissance est moins importante en parallèle qu'en série

V.1.2 Etude de l'efficacité des panneaux solaires en fonction de la température

V.1.2.1 Objectif

Notre but 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 seront connectés en parallèle et en série.

V.1.2.2 Les deux panneaux solaires connectés en Parallèle

A - Matériel et méthodes

On change le réglage du disjoncteur triphasé en position ON. Ensuite on procède comme suit :

- ➔ On suit les mêmes étapes que la première expérience.

Chapitre V : Résultats Expérimentaux

- Le panneau solaire est branché sur les ventilateurs en sélectionnant la position ON du sélecteur FANS.
- Enregistrement des valeurs de paramètres mesurées du courant (I), de la tension continue (V) et du rayonnement SRL (Wr).

A la fin de l'expérience, le disjoncteur triphasés doit se mettre en position OFF.

B - Résultat et discussion

On met les panneaux 1 et 2 en parallèle avec le simulateur solaire en mode max (mode idéal) SUN-1 et SUN-2 en position 1 et on met rhéostat en position R=100%. Puis enregistre la valeur du courant I (Amp) et celle de la tension V(Volts) lues sur l'écran. On sélectionne la position ON du sélecteur FANS. L'opération est répétée en changeant la position R de 90% à 0%.

Pour chaque position (valeur de l'intensité du rayonnement) du tableau V.1, l'opération sera répétée intégralement et les valeurs de I, de V et de Wr seront enregistrées ; les courbes seront tracées par la suite.

Détermination de : I_{cc} (A), V_{oc} (V) et puissance maximale P_{max}

	I_{ccmax} (A)	V_{ocmax} (V)	$P_{max,idéale}$ (W) = $I_{ccmax} \times V_{ocmax}$
MAX SUN 100%	1.784	20.2	36.03
SUN 80%	1.620	19.1	30.94
SUN 60%	1.479	18.4	27.21
SUN 40%	0.461	17.3	7.97
SUN 25%	0.043	9.5	0.408

Tableau V.8 : Valeurs de courant maximal et tension maximal et la puissance idéale maximal pour deux panneaux connectés en Parallèle

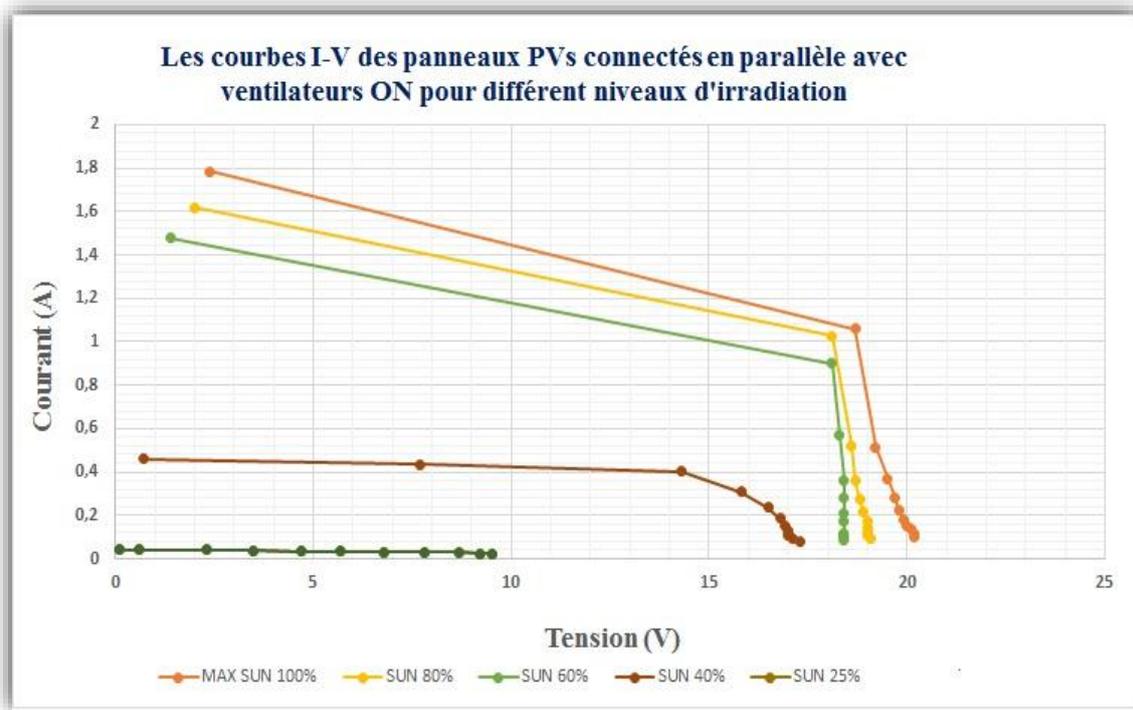


Figure V.4 : Courbe caractéristique courant-tension pour deux panneaux connectés en parallèle avec ventilateurs.

La figure V.4 représente le diagramme caractéristique courant-tension des panneaux 1 et 2 connectés en parallèle avec les ventilateurs pour toutes les positions.

On remarque pour la position 1, un courant décroissant dans la plage de tension comprise entre 2.3V et 18,7V. Ensuite, Entre 18,8 V et 20,2 V une chute brutale du courant de 1,058 A à 0.03A. Même comportement pour les positions 2 et 3, sauf que l'éclairement est faible.

Quant à la position 4, on observe un courant approximativement constant de l'ordre de 0.4 V et 14,3 V. Entre 14,4 V et 17,3 V, il y a une diminution de courant de 0,401 à 0.01 A en plus de cela le courant est faible par rapport aux positions précédentes. Comme pour la position 5, on remarque la stabilité du courant puis sa diminution de 0,029 ampères à 0 A, et en général à ce niveau de courant d'éclairement très faible. Pour pouvoir montrer la fiabilité des données, des mesures ont été effectuées 3 fois pour chaque point. Les valeurs maximales de la courbe de tension de la figure V.4 pour toutes les positions sont indiquées dans le tableau V.6.

Chapitre V : Résultats Expérimentaux

Déterminer le point de puissance maximale PP_{max} pour chaque niveau d'éclairement :

	I_{opt}	V_{opt}	$P_{max} = I_{opt} \times V_{opt}$
MAX SUN 100%	1.058 A	18.7 V	19.78 W
SUN 80%	1.028 A	18.1 V	18.61 W
SUN 60%	0.900 A	18.1 V	16.29 W
SUN 40%	0.401 A	14.3 V	05.73 W
SUN 25%	0.029 A	8.70 V	0.250 W

Tableau V.9 : Valeurs de courant optimale et tension optimale et la puissance maximal pour deux panneaux connectés en Parallèle.

V.1.2.2 Panneaux solaires connectés en série

V.1.2.2.1 Méthode de réalisation du travail expérimental

On change le réglage du disjoncteur triphasé en position ON.

- ➔ On suit les mêmes étapes que les expériences précédentes en changeant le montage des panneaux solaires d'en parallèle à en série.
- ➔ On Connecte les panneaux solaires à des ventilateurs en sélectionnant la position ON de sélecteur FANS.
- ➔ On enregistre toutes les valeurs de paramètres obtenues (mesurées du courant (I), de la tension continue (V) et du rayonnement SRL (W_r).

Enfin, on place le disjoncteur triphasé en position OFF.

V.1.2.2.2 Résultat et tableaux

Dans cette expérience, On monte les panneaux 1 et 2 en série avec le simulateur solaire en mode max (mode idéal) SUN-1, SUN-2 en position 1 et on met rhéostat en position R=100% puis on étudie les informations et on prend la valeur du courant I (Amp) et V (Volts) détecté sur l'écran (programme SCADA). Nous connectons le panneau ventilateur en sélectionnant la position ON du sélecteur FANS. Nous répétons le processus en changeant la position R de 90%-0%.

Chapitre V : Résultats Expérimentaux

Pour chaque position (valeur de l'intensité du rayonnement) du tableau V.1, l'opération sera répétée intégralement et les valeurs de I, de V et de W_r seront enregistrées ; les courbes seront tracées par la suite.

Détermination de : I_{cc} (A), V_{oc} (V) et puissance maximale P_{max}

	I_{ccmax} (A)	V_{ocmax} (V)	$P_{max, idéale}$ (W) = $I_{ccmax} \times V_{ocmax}$
MAX SUN 100%	1.426	41.2	58.75
SUN 80%	1.262	39.1	49.34
SUN 60%	0.782	37.3	29.16
SUN 40%	0.267	29.3	7.82
SUN 25%	0	6	0

Tableau V.10 : Valeurs de courant maximal et tension maximal et la puissance idéale maximal pour deux panneaux connectés en série

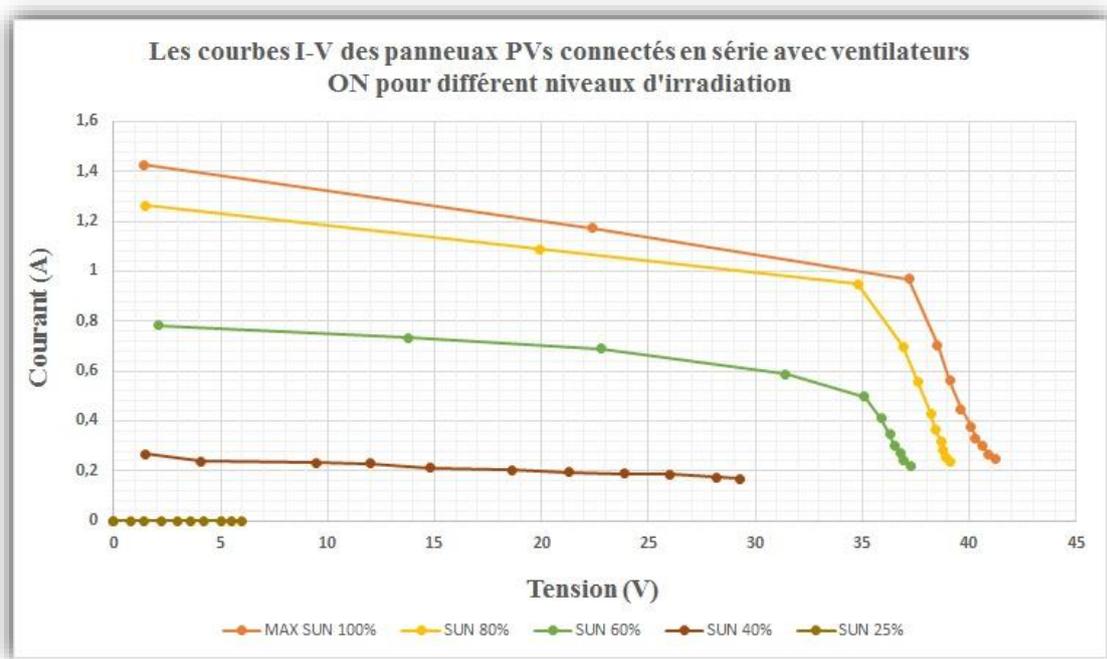


Figure V.5: Courbe caractéristique courant-tension pour deux panneaux connectés en série avec ventilateurs.

La figure V.4 représente le diagramme caractéristique courant-tension des panneaux 1 et 2 connectés en série avec des ventilateurs dans le cas de cinq niveaux d'éclairage. On note

Chapitre V : Résultats Expérimentaux

un courant décroissant dans la plage de tension comprise entre 4.5V et 37,2V. Entre 37,3 V et 41,2V ; il y a une chute brutale du courant de 0,980 A à 0.2 A en position 1. Comme pour la position 2, on note même comportement que la position 1 sauf que l'éclairage est faible. Pour la position 3, on observe un courant approximativement constant de l'ordre de 2V à 35.1V. Alors qu'entre 35.2V et 37.3V, il y a une diminution du courant de 0.498 à 0.2A ; de plus, le courant est plus faible par rapport aux position précédentes. Pour la position 4, on observe une stabilisation du courant puis une légère baisse de 0,229A à 0.19A. A ce niveau d'éclairage, le courant est très faible. Et pour la position 5, le courant est nul. En comparant avec les panneaux connectés en série sans ventilation (voir figure V.2), on remarque une petite augmentation de tension lors de l'utilisation de ventilateur pour toutes les positions.

Les valeurs maximales de la courbe de tension sur la figure V.5 pour toutes les positions sont indiquées dans le tableau V.7 :

Détermination du point de puissance maximale PP_{max} pour chaque niveau d'éclairage :

	I_{opt}	V_{opt}	$P_{max} = I_{opt} \times V_{opt}$
MAX SUN 100%	0.968 A	37.2 V	36.01 W
SUN 80%	0.948 A	34.8 V	33 W
SUN 60%	0.498 A	35.1 V	18.40 W
SUN 40%	0.229 A	12 V	2.75 W
SUN 25%	0 A	0 V	0 W

Tableau V.11 : Valeurs de courant optimale et tension optimale et puissance maximale pour deux panneaux connectés en série.

	Panneaux 1 et 2 connecté en parallèle				
	SUN 100%	SUN 80%	SUN 60%	SUN 40%	SUN 25%
P_{MAX} (W)	19.78	18.61	16.29	5.73	0.25
$W_{r,moy}$ (W/m²)	396.21	380.88	216.88	68.05	6.8

Tableau V.12 : Valeurs de P_{MAX} et W_r , moy pour deux panneaux connectés en parallèle.

	Panneaux 1 et 2 connecté en série				
	SUN 100%	SUN 80%	SUN 60%	SUN 40%	SUN 25%
P_{MAX} (W)	36.01	33	18.40	2.75	0
$W_{r,moy}$ (W/m ²)	372.77	282.20	211.08	80.54	10.07

Tableau V.13 : Valeurs de P_{MAX} et W_r , moy pour deux panneaux connectés en série.

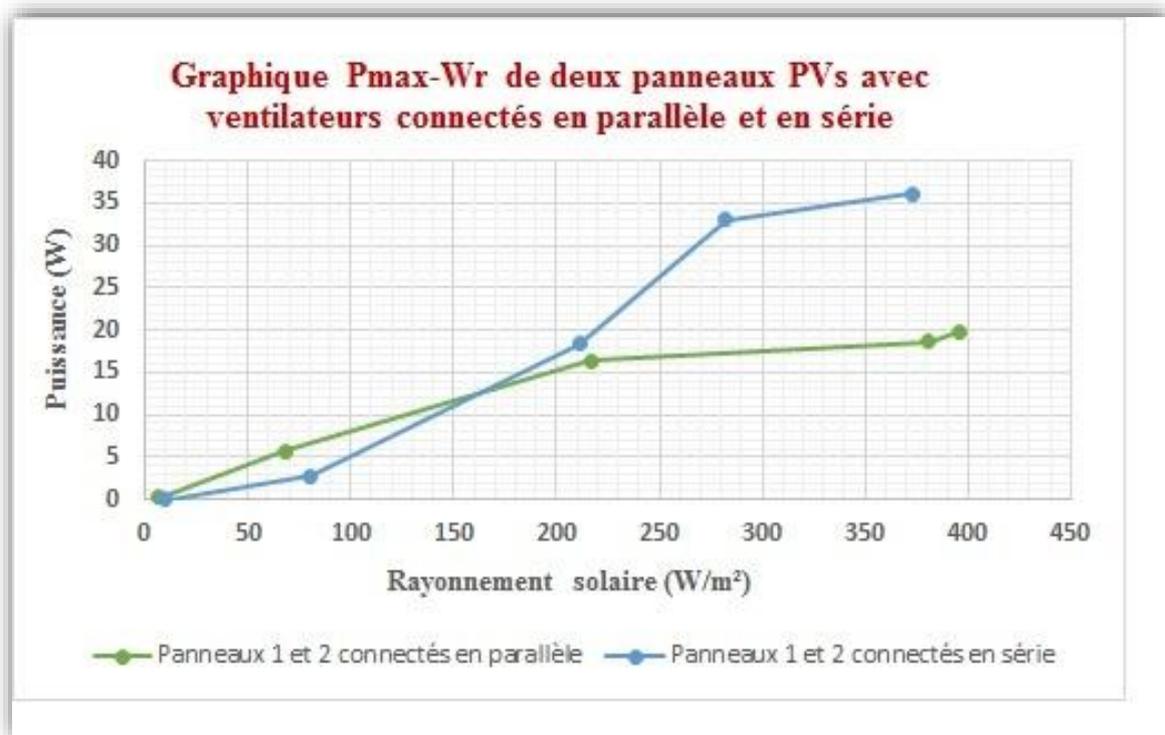


Figure V.6 : Courbe Caractéristique puissance-rayonnement pour deux panneaux avec ventilateurs connectés en Parallèle et en Série

La figure V.6 présente les courbes caractéristiques de la puissance en fonction du rayonnement pour deux panneaux connectés en parallèle et en Série avec ventilation. On constate que la puissance des panneaux connectés en série est supérieure (36.01w au max) à la puissance des panneaux connectés en parallèle (19.78w au max), et c'est dans le cas d'un bon rayonnement solaire de 160W/m² à 400W/m². Par-contre dans le cas de la plage de rayonnement allant de 0-160 w/m², c'est l'inverse qui se produit.

Chapitre V : Résultats Expérimentaux

V.1.3 La différence entre les panneaux sans ventilateurs et les panneaux avec ventilateurs

V.1.3.1 Les deux panneaux solaires connectés en Parallèle avec ventilation

La comparaison des courbes caractéristiques avec et sans ventilation, présentée sur la figure V.5, montre une nette amélioration de la production de l'énergie électrique. Cette amélioration se traduit par une grande différence positive entre la puissance produite avec ventilation et celle produite sans ventilation. En rappelle que cette puissance évolue en fonction de l'intensité du rayonnement. La ventilation permet de diminuer la température de fonctionnement des panneaux PV ce qui entraîne l'amélioration de leur performance.

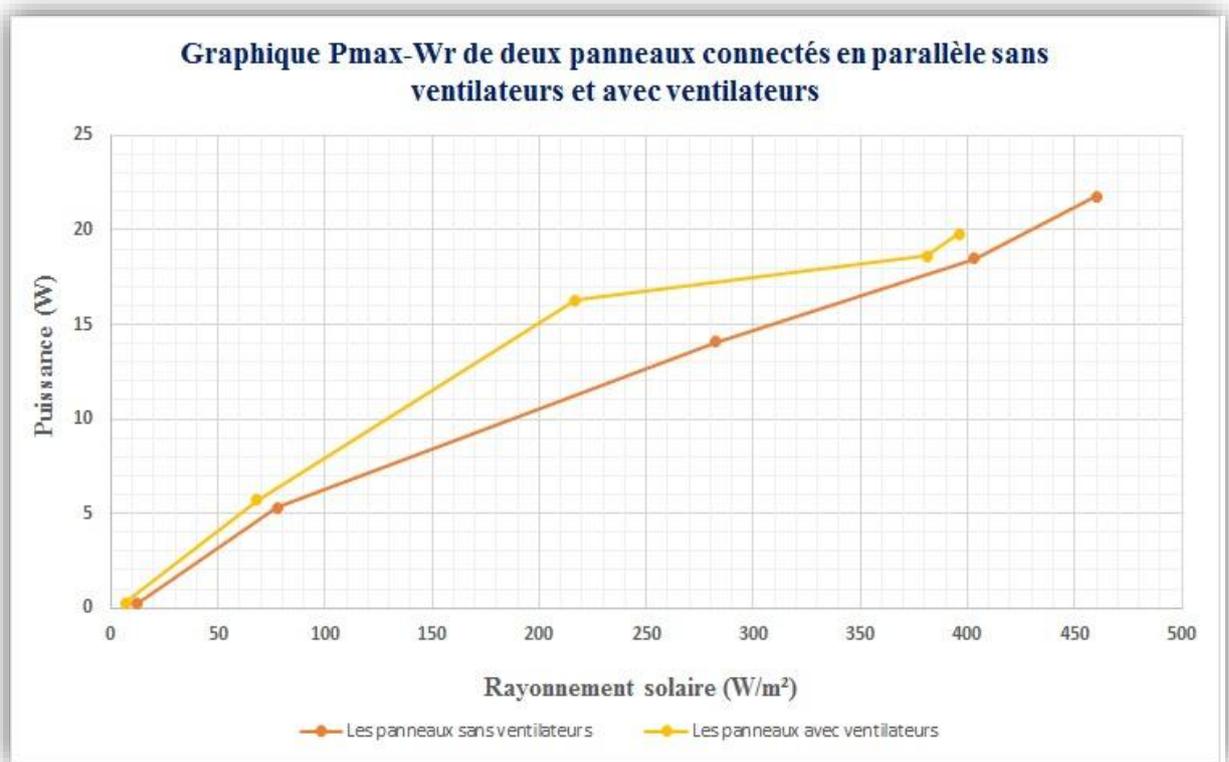


Figure V.7 : Caractéristique puissance-rayonnement pour deux panneaux connectés en Parallèle sans ventilateurs et avec ventilateurs.

V.1.3.2 Les deux panneaux solaires connectés en série avec ventilation

La comparaison des courbes caractéristiques avec et sans ventilation, présentée sur la figure V.8, montre une nette amélioration de la production de l'énergie électrique. Cette amélioration se traduit par une grande différence positive entre la puissance produite avec

Chapitre V : Résultats Expérimentaux

ventilation et celle produite sans ventilation. En rappelle que cette puissance évolue en fonction de l'intensité du rayonnement. La ventilation permet de diminuer la température de fonctionnement des panneaux PV ce qui entraîne l'amélioration de leur performance. On note que les résultats pour le montage en série sont nettement meilleurs que les résultats obtenus pour le montage en parallèle.

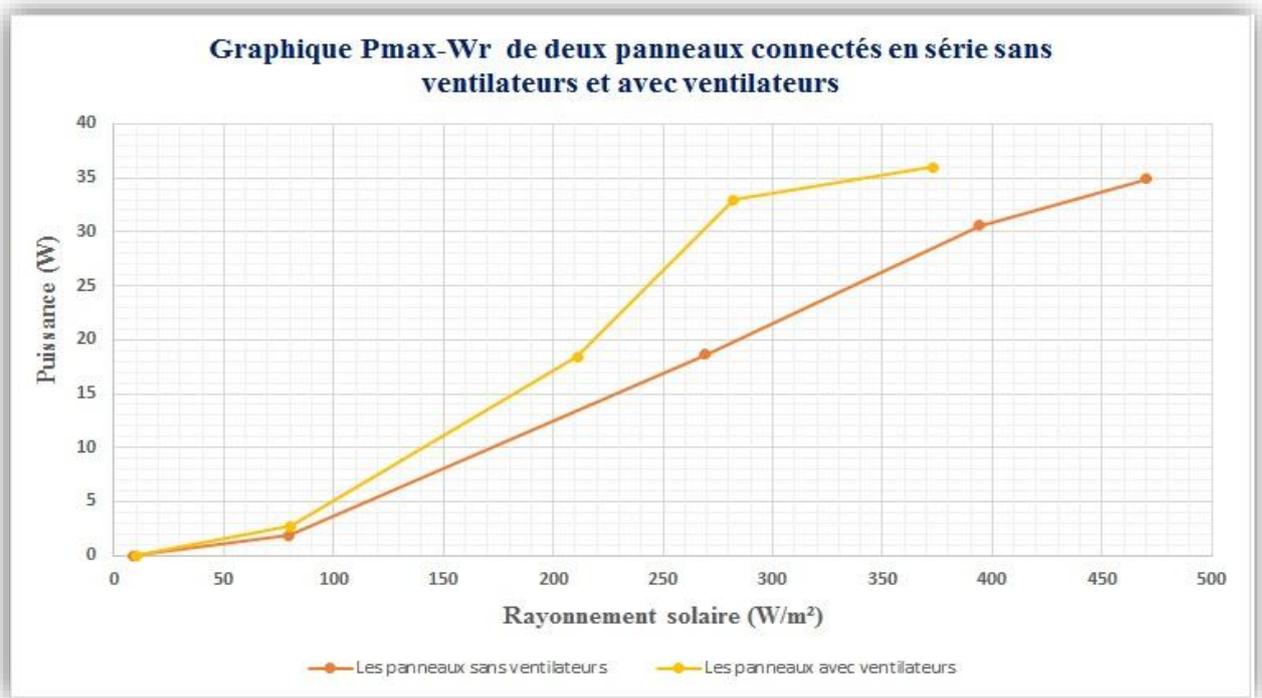


Figure V.8 : Caractéristique puissance-rayonnement pour deux panneaux connectés en Série sans ventilateurs et avec ventilateurs

Conclusion d'expérience 2 :

La deuxième expérience consiste à étudier l'efficacité des panneaux solaires refroidis par ventilation. Dans un premier temps les panneaux solaires sont connectés en parallèle avec et sans ventilateur. Dans un second temps les panneaux solaires connectés en série avec et sans ventilateurs. À travers cette expérience, on constate que la valeur de la tension et du courant de court-circuit sont directement proportionnelles à l'intensité du rayonnement et à la température des panneaux photovoltaïques aussi.

La température des panneaux affecte le rendement photovoltaïque. Les valeurs de l'efficacité augmentent avec la diminution de la température des panneaux. Afin d'augmenter la

Chapitre V : Résultats Expérimentaux

tension et la puissance, il est nécessaire d'abaisser la température pour obtenir de bonnes performances ainsi qu'une température idéale pour obtenir les meilleures performances des panneaux photovoltaïques.

De là on conclut également que l'éclairage et la température sont les principaux facteurs qui modifient les caractéristiques d'un générateur photovoltaïque.

V.2. Deuxième Partie « Etude technico-économique d'une installation photovoltaïque »

V.2.1. L'objectif :

L'objectif de cette partie est de réaliser une étude technico-économique pour la réalisation d'une installation photovoltaïque pour produire l'énergie électrique nécessaire à couvrir l'alimentation d'une école primaire. Cette école primaire Rezigui Boucif se situe dans le village de KHWALED Abdel Hakam, affilié à la commune de Sidi Ben Adda à la wilaya d'Ain-Temouchent. Cette école, projet d'école écologique, a été doté d'une mini-station photovoltaïque qui n'a jamais été mise en marche.

Notre travail se résume comme suit :

- Estimation des besoins en termes d'énergie électrique,
- Le dimensionnement d'une mini-station photovoltaïque permettant de couvrir les besoins définis dans la première étape,
- Mise en marche de la mini-station existante ; apporter des réparations et des modifications pour assurer une production suffisante pour couvrir les besoins de l'école.

V.2.2 Estimation de la charge journalière

Suite à une enquête que nous avons réalisé au niveau du village KHWALED Abdel Hakam, nous avons pu recenser les différents appareils électriques installés au niveau de l'école REZIGUI Boucif. Sur le tableau V.10 on présente l'ensemble des appareils recensés. La consommation totale de chaque appareil est donnée sur le tableau V.11. Il est à signaler que dans un premier temps, les climatiseurs seront séparés du système photovoltaïque ; ils seront branchés sur le réseau.

Chapitre V : Résultats Expérimentaux

Type d'appareil	Le nombre	La puissance (W)	Durée de fonctionnement
Lampe (LED)	25	15 W	7 Heures
Lampe (LED)	2	15 W	2 Heures
Lampe (Néon)	8	18 W	6 Heures
Lampe	10	10 W	2 Heures
PC	1	360 W	5 Heures
Imprimante	1	504 W	3 Heures
Photocopieuse	1	648W	3 Heures
Climatiseur	7	2250W	3 Heures
Réfrigérateur	1	150 W	24 Heures

Tableau V.10 : Le nombre, la puissance et Durée de fonctionnement des charges

Type d'appareil	Puissance * le nombre	EC (P * t)
Lampe (LED)	375 W	2625 Wh
Lampe (LED)	30 W	60 Wh
Lampe (Néon)	144 W	864 Wh
Lampe	100 W	200 Wh
PC	360 W	2520 Wh
Imprimante	504 W	3528 Wh
Photocopieuse	648 W	1944 Wh
Réfrigérateur	150 W	3600 Wh
TOTAL	P*N=2311W	EC=15341Wh

Tableau V. : La consommation d'énergie par jour

Afin d'obtenir l'énergie journalière totale réelle, il est nécessaire de prendre en compte le rendement de la batterie et de l'onduleur qui dépend de l'installation. ; ce rendement est pris égale à 85%. L'énergie à stocker par les batteries est comme suit :

$$E_T = \frac{E_{DC}}{\eta_{Bat}} + \frac{E_{AC}}{\eta_{Bat} \times \eta_{Ond}} = 17942.69 \text{ Wh}$$

Chapitre V : Résultats Expérimentaux

- L'énergie à stocker par jour : 17.9427 KWh
- L'énergie stocker par mois : 538.2807 KWh
- L'énergie stocker par trimestre : 1614.8421 KWh

La charge en 24H :

- L'énergie totale demandée : 17.94269 KWh
- La Tension d'alimentation : 220V
- La puissance crête de la charge : 2311W

En fonction la puissance crête de la charge, nous déterminons la tension du système. Et étant donné que la puissance crête de la charge est entre 2001 et 10000, la tension du système est : 48 V.

Déterminer l'angle d'inclinaison :

Pour calculer la pente optimale nous utilisons la formule : latitude du lieu + 10°.

L'emplacement :

- Longitude : -1.1814
- Latitude φ (°) : 35.3059

Puisque : $30^\circ < \varphi < 40^\circ$

Dans ce cas inclination β (°) : $\varphi + 10^\circ$

Donc : inclination β (°) = 45°

V.2.3 Calcul du nombre de batteries

Pour calculer le nombre de batteries, nous déterminerons la capacité du champ de batteries en ampères et pour cela nous déterminerons la capacité du champ par jour en ampères et le nombre de jours indépendants. Nous avons donc supposé que le nombre moyen de jours indépendants est 3 jours. On note que la température moyenne en Algérie est de 25°C. Selon les standards internationaux, le coefficient de température correspondant à une température de 25°C est de 1. On précise que la profondeur de décharge considérée pour notre étude est de 80%. On signale que la capacité des batteries actuellement utilisées dans l'école est de 200Ah.

Chapitre V : Résultats Expérimentaux

$$C_{ch} = \frac{E_T \times N}{D \times V} = 1402 \text{ Ah}$$

Nombre de batteries en séries :

La tension des batteries actuellement utilisées dans l'école est de 12Volt et la tension du système est de 48Volt. De là, le nombre de batteries connectées en série est :

$$N_s = \frac{48}{12} = 4 \text{ batteries}$$

Nombre de batteries en parallèle :

Si on a le nombre total de batterie plus le nombre de batterie en série donc on peut avoir Le nombre de batterie connecté en parallèle comme suite :

$$N_p = \frac{1402}{200} = 8 \text{ batteries}$$

Nombre de batteries : $N_{batteries} = N_s \times N_p = 32 \text{ batteries}$

V.2.4 Calcul du nombre des panneaux solaires

Pour calculer le nombre de panneaux solaires, nous allons calculer la puissance crête de champs photovoltaïques. On rappelle que l'école contient des panneaux solaires dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Puissance (W) : 280 W
- Nombre de cellules en série : 60
- Courant au point de puissance maximale (I_{mp}) : 9.33 A
- Tension au point de puissance maximale (V_{mp}) : 30 V
- Courant de courts circuit (I_{sc}) : 10.08 A
- Tension à vide ou circuit ouvert (V_{oc}) : 27.20 V
- Coefficient de température du I_{sc} : 2 mA/°C
- Coefficient de température du V_{oc} : -48 mV/°C

Chapitre V : Résultats Expérimentaux

La Puissance crête de champs photovoltaïques :

$$P_{ch} = \frac{E_T \times P_i}{E_i \times K} = 5520.827 \text{ W}$$

Nombre de panneaux :

$$N_m = \frac{P_{ch}}{\text{Puissance crête unitaire par panneau}} = 19.71 \approx 20 \text{ panneaux}$$

Remarque : Toujours pour précaution on ajoute 1 à 2 panneaux supplémentaire donc finalement le nombre total des panneaux sera 22 panneaux

Nombre de panneaux en série :

Pour calculer le nombre de modules PV connectés en série, la tension de ces modules doit être comprise dans la plage de tension MPPT de l'onduleur. Sachant que l'école contient un régulateur de charge intégré à l'onduleur et que ses caractéristiques sont les suivantes :

- Capacité : 3000 W
- Facteur de puissance : 1.0
- Plage de température de fonctionnement : 10-50°C
- Entrée CC : 24VDC, 142A
- Sortie CA : 230VAC, 50/60HZ, 13A
- Puissance nominale : 4000W
- Tension nominale de fonctionnement : 240VDC
- Tension solaire max (VOC) : 500VDC
- Plage de tension MPPT : 120-450VDC

Pour calculer la puissance de l'onduleur, nous devons calculer la somme des capacités de tous les appareils et ajouter le facteur de sécurité qui est, selon les standards internationaux, de 25%. En plus on calcule le courant de démarrage des appareils qui contiennent des moteurs ; au sein de l'école, le réfrigérateur est le seul appareil qui contient un moteur.

$$P_{\text{onduleur}} = 2611 + (2611 \times 25) = 3263.75 \text{ W}$$

- Et l'onduleur disponible à l'école a une Puissance nominale : 4000W

Chapitre V : Résultats Expérimentaux

- Nombre minimal de modules en série $E_+ \left[\frac{V_{MPPT,MIN}}{V_{MPP} \times 0.85} \right] = 5$ panneaux

Nombre maximal de modules en série $E_- \left[\frac{V_{MPPT,MAX}}{V_{MPP} \times K} \right] = 10$ panneaux

$$N_{ms} = \frac{450}{30 \times 1.5} = 10 \text{ panneaux}$$

Remarque : Toujours par précaution on prendra 11 panneaux en série

$$V_{max} = 11 \times 30 = 330 < 450V$$

Nombre de panneaux en parallèle :

$$N_{mp} = \frac{22}{11} = 2 \text{ panneaux}$$

$$I_{max} = 2 \times 9.33 = 18.66 < 142A$$

V.2.5. Présentation de l'installation photovoltaïque calculée

- 11 Panneaux solaire type de 4BB poly cristallin 280W,
- Batterie 12V-200A,
- Régulateur de charge intégré avec onduleur 4000W,
- Boite d'injonction,
- Les câbles.

V.2.2 Défaits photovoltaïques et solutions

L'efficacité de l'installation photovoltaïque dépend de plusieurs facteurs que nous avons mentionnés précédemment. Ces facteurs, dont les défauts, peuvent affecter négativement l'efficacité de l'installation. En effet, les défauts peuvent provoquer des déclenchements et par conséquent l'arrêt de la production, et c'est exactement ce qui s'est passé dans le système photovoltaïque situé dans l'école.

Et parmi les autres facteurs qui ont affecté négativement le système PV existant à l'école, il y a aussi la petite surface sur laquelle se trouve le système photovoltaïque. Cette contrainte ne permet pas de prendre la distance requise entre les panneaux, ce qui provoque la présence

Chapitre V : Résultats Expérimentaux

d'ombres sur les panneaux arrière comme le montre la figure V.7. Ce problème d'ombrage s'aggrave par la présence du palmier. En plus de la présence de poussières et de salissures à l'interface des panneaux, ce qui provoque un déficit de rendement des panneaux.

En plus du manque de panneaux, à travers notre étude, nous avons trouvé que le nombre de panneaux qui permet de couvrir les besoins en électricité de l'école est de 22 panneaux au lieu de 11. Pour les batteries, le système photovoltaïque a besoin au moins de 12 batteries pour une autonomie de 1 jour (ou 32 batteries pour une autonomie de 3 jours) au lieu de 4 batteries.



Figure V.7 : Ombrage causé par la distance insuffisante entre les panneaux et la présence du palmier



Figure V.8 : présence de poussière et de saleté sur le panneau

Conclusion :

Dans cette partie, nous avons mené une étude technico-économique pour le dimensionnement d'une installation photovoltaïque pour produire l'énergie électrique nécessaire à l'alimentation d'une école primaire et la maintenance de l'installation photovoltaïque déjà existante. Ainsi, nous avons déterminé les besoins en électricité de l'école, déterminer l'emplacement, calculer l'angle d'inclinaison des panneaux et déterminé la tension du système. Ensuite, nous avons calculé le nombre de batteries, la capacité du régulateur de charge et de l'onduleur, puis nous avons calculé le nombre de panneaux nécessaires pour couvrir les besoins en termes d'énergie électrique de l'école. Après cela, nous avons discuté des erreurs dans le système photovoltaïque et suggéré des solutions.

Conclusion générale :

Dans ce travail, nous avons présenté une étude comportant le côté théorique et le côté pratique sur la technologie des équipements photovoltaïques qui sont contrôlés par ordinateur en utilisant SCADA (EESFC). En parallèle et afin de mettre en application les connaissances acquises nous avons procédé à la réadaptation de l'installation existante aux besoins actuels de l'école.

Dans l'étude théorique nous avons abordées modes d'exploitation de l'énergie solaire thermique et photovoltaïque. Nous avons aussi introduit le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques et les différents concepts qui entrent dans la composition du système d'assemblage photovoltaïque, plus précisément le système autonome. Enfin nous avons mis la lumière sur principe de calcul des système solaires photovoltaïques.

Dans la partie expérimentale, les manipulations réalisées sur les équipements solaires photovoltaïques contrôlés par ordinateur avec SCADA (EESFC), du laboratoire pédagogique du département de génie mécanique, ont permis de bien se familiariser avec la technologie photovoltaïque et de découvrir les paramètres influençant son efficacité. Les résultats montrent que le courant de court-circuit est directement proportionnel à l'intensité du rayonnement et cela s'applique également à la tension du circuit. L'augmentation de la tension se fait par connexion en série des panneaux, l'augmentation de courant se fait par connexion en parallèle des panneaux quel que soit la température est vrais, et l'augmentation de la puissance se fait par une augmentation de rayonnement pour les deux cas (série - parallèle). Alors que, cette puissance est plus importante en parallèle qu'en série pour un bon rayonnement, et moins importante en parallèle qu'en série pour un faible rayonnement. De plus, l'éclairage et la température sont les principaux facteurs qui modifient les caractéristiques du générateur photovoltaïque. Afin d'augmenter la tension et la puissance, il est nécessaire de baisser la température pour de bonnes performances.

En fin, dans le cadre de l'étude technico-économique pour la réadaptation et la maintenance de l'installation photovoltaïque, nous avons trouvé que pour remettre en marche l'installation existante il faut :

Conclusion générale

- Changer le lieu d'installation des panneaux pour éviter l'ombrage,
- Augmenter la distance entre les panneaux avant et arrière,
- Augmenter le nombre de panneaux utiliser à 22 panneaux au lieu de 11 panneaux,
- Augmenter le nombre de batteries à 11 batteries pour une autonomie de 1 jour et 32 batteries pour une autonomie de 3 jours au lieu de 4 batteries qui existe à l'école.

Références :

- [1] Directeur de Recherche/ Dr Abderrahmane HAMIDAT /Bulletin de recherche n°22 2012
- [2] HALOUANE ASSIA Modélisation du transfert radiatif dans les strates supérieures d'un module photovoltaïque / Mémoire de master / Université M'HAMED BOUGARA BOUMERDES.
- [3] **S. Saadi**, Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan, Mémoire de Magister en physique ; UMC, 2010.
- [4] **André JOFFRE**/Ingénieur Arts et Métiers Président Directeur Général de Tec sol SA/ Énergie solaire thermique dans le bâtiment. Chauffe-eaux solaires
- [5] MEGHELLET HANINE – HOCINE LYNDA Contribution à l'étude d'un système photovoltaïque
- [6] AMAMRA NASREDDIN / Etude de l'énergie solaire photovoltaïque contrôle par ordinateur / mémoire de master / Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent
- [7] Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°3 (2008) 473 – 483
- [8] Production d'énergie électrique : ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE ». **B. Flèche - D. DELAGNES** / juin 07 Approche générale.
- [9] Dr. Sofia BelaidLalouni, « Cours Energie Solaire Photovoltaïque », Université A.MIRA de Bejaia, 2015.
- [10] simulation, fabrication et analyse de cellule photovoltaïque a contact arrière interdigités ». these doctorat **NichiporukOleksy** 2005 l'institut national des sciences appliquées de Lyon.
- [11] développement de cellules photovoltaïques à hétérojonctions silicium contact et en face arrière ». thes doctorat **Thibaut Desruse** 2009 l'institut national des sciences appliquées de Lyon.

[12] S.M.Sze,K.N.Kwok,Physics of Semiconductor Devices,3rdedition, WILEYINTERSCIENCE, New Jersey, 2006.

[13] M. Djedid, N. Hebbir, (2019).

[14] B. Equer, Energie solaire photovoltaïque (volume1: physique et technologie de la conversion photovoltaïque), 1ère édition, ELLIPES, Paris, 1993.

[15]A.Labouret, M. Villoz, Energie solaire photovoltaïque, 3ème édition, DUNOD,Paris,2006

[16] A. Ricaud, Photopiles solaires, 1ère édition, presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1997.

[17] BELMADI MOHAMED-ABID TAHA YACINE/Etude technico-économique d'une installation photovoltaïque autonome/ Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent

[18] C. Lerouge « Recherche & Industrie Photovoltaïque (PV) Etats-Unis » Sciences physique États-Unis, 2006.

[19] Mr. ZIDANE. AMMAR / Etude dimensionnement d'une installation photovoltaïque au niveau d'un puits de gaz / Université Abderrahmane Mira – Bejaia 2012

[20] MEGHELLET HANINE – HOCINE LYNDA Contribution à l'étude d'un système photovoltaïque / Université Colonel Akli Mohand – Oulhadj Bouira 2017-2018

[21] S. Brigand, « **Les principes de l'énergie solaire photovoltaïque** », complément technique, Techniques de construction, www.editiondumoniteur.com,Mars-Avril 2008.

[22] A. Labouret, M. Villoz, « **Energie solaire photovoltaïque** », 3^{ème} édition, Edition Dunod 2005.

[23] Présenté et soutenu publiquement le 18 Janvier 2016 par DOUDOU BOUKARY Ibrahim

[24] BelaicheHacene, Nanouche Yacine « **Etude d'une installation en énergie photovoltaïqueintégrée au bâtiment : cas d'un laboratoire au CDER** ». Mémoire de mastère II,département de génie mécanique, faculté du génie de la construction,

UMMTO2014.

[25] M. J. T. Nkouimi, « **Outil d'aide au dimensionnement des systèmes photovoltaïques domestiques** », Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur de conception, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique de Yaoundé, © Mémoire Online 2000-2010.

[26] Belhadj Mohammed, « **Modélisation d'un Système de Captage Photovoltaïque Autonome** », Mémoire de Magister Centre Universitaire de Bechar, Institut des Sciences Exactes, 2008.

[27] M.R. NEBBALI / Etude dimensionnement d'une installation photovoltaïque / Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou / 2016-2017

[28] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Masse_d%27air_\(%C3%A9nergie_solaire\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Masse_d%27air_(%C3%A9nergie_solaire))

[29] Guide de la technologie des équipements d'énergie Solaire Photovoltaïque contrôlée par ordinateur avec SCADA (EESFC).

[30] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Latitude>

[31] BELMADI Mohamed-ABID Taha Yacine/Etude technique économique d'un installation photovoltaïque autonome/Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent/2016-2017

[32] https://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me_de_contr%C3%B4le_et_d'acquisition_de_donn%C3%A9es#:~:text=Un%20syst%C3%A8me%20de%20contr%C3%B4le%20et,%C3%A0%20distance%20des%20installations%20techniques.

[33] <https://www.copadata.com/fr/produits/zenon-software-platform/visualisation-contrôle/quest-ce-qu-un-scada-supervisory-control-and-data-acquisition-copa-data>

[34] https://www.google.com/search?q=1%27%C3%A9nergie+renouvelable&sxsrf=AOaemvK3Ewd3GbPvKIoP4xKeAasLxDjBeA:1630759490348&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=2ahUKEwj7iovBrOXyAhX7CmMBHRp9CCgQ_AUoAXoECAEQAw&biw=962&bih=488&dpr=1.25

[35] https://www.google.com/search?q=repr%C3%A9sentation+graphique+des+spectres+AM0+et+AM1.5++&tbn=isch&ved=2ahUKEwjY7q3FrOXyAhUC-BoKHbpdDm0Q2-cCegQIABAA&oq=repr%C3%A9sentation+graphique+des+spectres+AM0+et+AM1.5++&gs_lcp=CgNpbWcQA1D90idY_dInYNzdJ2gAcAB4AIABAIgBAJIBAJgBAKABAaoBC2d3cy13aXotaW1nwAEB&sclient=img&ei=S2ozYZidEoLwa7q7uegG&bih=488&biw=962