

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Electrotechnique

Spécialité : Commandes Electriques

Par : BEKKAL BRIKCI Imane Khadidja et BAHOUSNIA Fatema Zohra

Sujet

Etude de l'influence de l'inclinaison des panneaux sur le rendement des systèmes photovoltaïques

Soutenu publiquement, le 23/06/2022 , devant le jury composé de :

M MERZOUK. SA

M LOUCIF. M

Mme BOURI S

Pr

MCB

MCA

Université de Tlemcen

Université de Tlemcen

Université de Tlemcen

Président

Examineur

Encadreur

Année universitaire : 2021 /2022

Dedicaces 1

Je dédie cet humble travail :

À mon père, mon modèle, mon soutien, ma sécurité et qui a été mon ombre tout au long de mes années scolaires.

À celle qui m'a donné la vie, symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, ma chère mère.

À Mon cher mari Racim, mon compagnon, mon support et mon confident.

Mes frères Issam et Arselane qui sont la source de ma force.

Ma petite sœur Naziha, le rayon de mon bonheur, ma confidente et mon amie et à toute ma famille.

A tous ceux qui ont donné de leur temps pour rechercher la connaissance et à tous ceux qui ont utilisé la science pour le bien et le développement de l'humanité

Imane Khadidja BEKKAL BRIKCI
Tlemcen, le Juin 2022

Dedicaces 2

LA vie n'est qu'un éclair,

Et un jour de réussite est un jour très cher.

Je dédie ce mémoire

À mon cher père, Lakhdar, mon modèle et mon soutien tout au long de ma carrière universitaire

Et ma très chère maman, pour l'éducation et le grand amour que tu m'as donné depuis ma naissance.

Pour leur patience et leur sacrifice.

A mes chers frères : Badro , Miloud,

A mes chères sœurs.

A tous mes amis.

A tous ceux que j'aime.

Fatema Zohra BAHOUSNIA
Tlemcen, le Juin 2022

Remerciements

Avant toute chose, nous remercions ELLAH Tout-Puissant de nous avoir donné la force, le courage et la volonté de mener à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à notre encadrant Dr.BOURI Sihem, d'avoir accepté de diriger ce travail, de nous guider pour passer cette étape précieuse et de nous donner l'opportunité de bénéficier de ses compétences scientifiques, de ses qualités humaines et de sa disponibilité permanente. Merci pour vos précisions, vos conseils et votre patience.

Merci beaucoup : Pr MERZOUG S.M et Dr LOUCIF M d'avoir accepté de représenter ce jury et d'avoir évalué notre travail, c'est un honneur dont nous sommes très fier.

Enfin, nous tenons à remercier ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, et en particulier le Dr. MECHERNENE A, à qui nous avons toute l'appréciation et le respect pour son soutien.

BAHOUSNIA Fatema Zohra BEKKAL BRIKCI Imane Khadidja
Tlemcen, le Juin 2022

CONTENTS

| | |
|--|-----------|
| DEDICACES 1 | i |
| DEDICACES 2 | ii |
| REMERCIEMENTS | iii |
| LISTE DES ACRONYMES | x |
| SYMBOLES | xi |
| INTRODUCTION GÉNÉRALE | 1 |
| I GÉNÉRALITÉ SUR L'ÉNERGIE SOLAIRES | 3 |
| I.1 INTRODUCTION | 4 |
| I.2 LE SOLEIL | 4 |
| I.3 POTENTIEL SOLAIRE | 5 |
| I.3.1 Potentiel solaire extraterrestre | 5 |
| I.3.1-a Rayonnement solaire extraterrestre | 5 |
| I.3.1-b Temps solaire vraie (TSV) | 7 |
| I.3.1-c La position du soleil | 7 |
| I.3.1-d Géométrie d'orientation | 8 |
| I.3.2 Rayonnement solaire | 9 |
| I.3.2-a Spectre solaire | 10 |
| I.4 REPÉRAGE D'UN SITE À LA SURFACE DE LA TERRE | 11 |
| I.5 COORDONNÉES SOLAIRES | 12 |
| I.5.1 Coordonnées équatoriales | 12 |
| I.5.2 Coordonnées horizontales | 13 |
| I.6 CONCLUSION | 14 |
| II GÉNÉRALITÉ SUR LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE | 15 |
| II.1 INTRODUCTION | 16 |
| II.2 L'ÉNERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE | 16 |
| II.3 LES FILIÈRES TECHNOLOGIQUES | 16 |
| II.4 PHOTOVOLTAÏQUE | 17 |
| II.4.1 Cellules photovoltaïques | 17 |
| II.4.2 Les différents types des cellules photovoltaïques | 18 |
| II.4.2-a Les cellules monocristallines | 18 |
| II.4.2-b Les cellules poly-cristallines | 19 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| II.4.2-c | Les cellules amorphes | 19 |
| II.4.3 | Comparaison entre les différentes technologies | 20 |
| II.5 | EFFET PHOTOVOLTAÏQUE | 21 |
| II.5.1 | Semi-conducteur | 21 |
| II.5.1-a | Formation et comportement de la jonction PN | 21 |
| II.5.2 | Principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques | 22 |
| II.6 | COMPOSITION DU GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE (GPV) | 23 |
| II.6.1 | Association parallèle de cellules photovoltaïques | 23 |
| II.6.2 | Association série de cellules photovoltaïques | 24 |
| II.7 | MODÉLISATION DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES | 26 |
| II.7.1 | Modèle idéal de cellule solaire | 26 |
| II.7.2 | Modèle à une seule diode (une seule exponentielle) | 27 |
| II.8 | LES CARACTÉRISTIQUES DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE | 28 |
| II.8.1 | Au point de vue électrique | 28 |
| II.8.1-a | Caractéristiques courant/tension | 28 |
| II.8.1-b | Caractéristiques puissance/tension | 29 |
| II.8.2 | Fonctionnement idéal | 30 |
| II.8.3 | Puissance-crête | 31 |
| II.8.4 | Le facteur de forme FF | 32 |
| II.8.5 | Rendement d'une cellule | 33 |
| II.9 | PROTECTIONS CLASSIQUES D'UN GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE | 33 |
| II.10 | LES AVANTAGES ET LES INCONVÉNIENTS DE L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE | |
| [15] | | 34 |
| II.10.1 | Les avantages | 34 |
| II.10.2 | Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque [16] | 35 |
| II.11 | CONCLUSION | 35 |
| III | LES FACTEURS INFLUENÇANT SUR LES PANNEAUX PV | 36 |
| III.1 | INTRODUCTION | 37 |
| III.2 | L'ORIENTATION | 37 |
| III.2.1 | L'angle d'inclinaison (β) [15] | 37 |
| III.2.2 | L'orientation et les vents | 38 |
| III.2.2-a | l'angle d'orientation | 38 |
| III.2.2-b | La force du vent | 39 |
| III.2.2-c | Mesure de la vitesse du vent | 39 |
| III.2.2-d | L'effet du vent sur le module PV | 39 |
| III.3 | L'INFLUENCE DE L'ANGLE D'INCIDENCE | 40 |
| III.4 | L'INFLUENCE DE L'ENSOLEILLEMENT ET DE LA TEMPÉRATURE SUR LE MODULE PV | 42 |
| III.4.1 | Influence de la température | 42 |
| III.4.2 | Influence de l'éclairement | 43 |
| III.5 | L'EFFET DE LA RÉSISTANCE SUR LE MODULE PV | 44 |
| III.5.1 | L'effet de la résistance parallèle (shunt) | 44 |
| III.5.2 | L'effet de la résistance série | 45 |
| III.6 | L'EFFET DE L'OMBRAJE SUR LE MODULE PV [25] | 47 |

| | |
|---|-----------|
| III.7 L'EFFET DE L'HUMIDITÉ SUR LE MODULE PV | 48 |
| III.8 CONCLUSION | 48 |
| IV ETUDE DE L'INFLUENCE DE L'INCLINAISON DES PANNEAUX (TLEMCCEN) | 49 |
| IV.1 INTRODUCTION | 50 |
| IV.2 LA SITUATION GÉOGRAPHIQUE DE TLEMCCEN [29] | 50 |
| IV.3 LE CLIMAT DE LA WILAYA DE TLEMCCEN [30] | 51 |
| IV.4 L'EMPLACEMENT ET LE CLIMAT DE CHETOUANE TLEMCCEN | 52 |
| IV.5 PARTIE EXPÉRIMENTALE | 53 |
| IV.5.1 Première expérience | 53 |
| IV.5.1-a Pupitre incliné à 40° par rapport au sol | 56 |
| IV.5.1-b Pupitre incliné à 35° par rapport au sol | 56 |
| IV.5.1-c Pupitre incliné à 32° par rapport au sol | 57 |
| IV.5.1-d Pupitre incliné à 30° par rapport au sol | 57 |
| IV.5.1-e Pupitre incliné à 25° par rapport au sol | 57 |
| IV.5.1-f Pupitre incliné à 20° par rapport au sol | 58 |
| IV.5.2 Deuxième expérience | 59 |
| IV.5.3 Résultats et Discussions | 60 |
| IV.6 PARTIE SIMULATION | 71 |
| IV.6.1 les étapes de simulation | 72 |
| IV.6.2 Interprétation | 76 |
| IV.7 CONCLUSION | 77 |
| CONCLUSION GÉNÉRALE | 78 |
| BIBLIOGRAPHIE | 79 |

LIST OF FIGURES

| | | |
|-------|---|----|
| I.1 | Coupe schématique du soleil [3] | 5 |
| I.2 | Géométrie schématique des rapports terre-soleil [4] | 7 |
| I.3 | Position du soleil [3] | 8 |
| I.4 | Position du soleil observé d'après l'origine O [3]. | 9 |
| I.5 | Types de rayonnement solaire reçus au sol[4] | 10 |
| I.6 | Coordonnées terrestres [3] | 11 |
| I.7 | Courbe de déclinaison du soleil [3] | 12 |
| I.8 | Coordonnée solaire selon le repère horizontal [3] | 14 |
| II.1 | Evolution de la production mondiale des différentes technologies de cellules PV [5] | 17 |
| II.2 | Structure de base d'une cellule solaire | 18 |
| II.3 | cellule solaire PV [1] | 18 |
| II.4 | Cellule PV monocristalline | 19 |
| II.5 | Cellule PV polycristalline | 19 |
| II.6 | Cellule PV amorphe | 20 |
| II.7 | différentes technologies [11] | 20 |
| II.8 | Génération de la paire électron-trou [2] | 21 |
| II.9 | La jonction PN [2] | 21 |
| II.10 | Représentation schématique d'une cellule solaire [1] | 22 |
| II.11 | Principe de fonctionnement [1] | 23 |
| II.12 | Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle [2] | 24 |
| II.13 | Caractéristique P-V et I-V cellules PV raccordées en parallèle | 24 |
| II.14 | Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en série. | 25 |
| II.15 | Caractéristique P-V et I-V cellules PV raccordées en série | 25 |
| II.16 | Schéma équivalent d'une cellule idéale [2] | 26 |
| II.17 | schéma équivalent d'une cellule solaire [1] | 27 |
| II.18 | Caractéristiques courant / tension $I = f(U)$ [1] | 29 |
| II.19 | Caractéristiques puissance / tension $P = f(U)$ [1] | 29 |
| II.20 | puissance maximale sur une caractéristique courant - tension | 31 |
| II.21 | courbes de puissances en fonction de la tension sous diverses intensités de rayonnement | 32 |
| II.22 | Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule solaire. | 33 |
| II.23 | Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour [2] | 34 |
| III.1 | angle d'inclinaison | 38 |

| | | |
|--------|---|----|
| III.2 | Orientation et inclinaison | 39 |
| III.3 | Système photovoltaïque sur le toit d'un bâtiment | 40 |
| III.4 | Angle d'incidence sur un module photovoltaïque | 41 |
| III.5 | angle d'incidence sur une surface | 41 |
| III.6 | Graphique représentatif du rendement en fonction de l'angle d'incidence | 42 |
| III.7 | Influence de la température $I = f(U)$ et $P = f(U)$ [20] | 43 |
| III.8 | Influence de l'éclairement $I = f(U)$ | 43 |
| III.9 | Influence de l'éclairement $P = f(U)$ [19] | 44 |
| III.10 | L'influence de la résistance shunt (R_{sh}) sur la caractéristique $I(V)$ [19]. | 44 |
| III.11 | L'influence de la résistance shunt (R_{sh}) sur la caractéristique $P(V)$ | 45 |
| III.12 | Caractéristique I-V de module PV selon la température | 46 |
| III.13 | Caractéristique I-V de module PV selon la température | 46 |
| III.14 | Caractéristique I-V de module PV selon la température | 47 |
| III.15 | L'ombrage temporaire résulte de nuages | 47 |
| IV.1 | situation géographique de la wilaya de Tlemcen | 50 |
| IV.2 | graphique climatique de Tlemcen 1991-2020 | 51 |
| IV.3 | heures d'ensoleillement/ jour (Tlemcen) | 52 |
| IV.4 | localité de Chetouane Tlemcen selon Google earth | 53 |
| IV.5 | panneau photovoltaïque de type $T - 60WJ - 30WF - 50W$ | 54 |
| IV.6 | Rhéostat de 25Ω | 54 |
| IV.7 | Rhéostat de 11Ω | 55 |
| IV.8 | Montage réalisé lors de l'expérience | 55 |
| IV.9 | Inclinaison de 40° | 56 |
| IV.10 | Inclinaison de 35° | 56 |
| IV.11 | Inclinaison de 32° | 57 |
| IV.12 | Inclinaison de 30° | 57 |
| IV.13 | Inclinaison de 25° | 58 |
| IV.14 | Inclinaison de 20° | 58 |
| IV.15 | Le rendement en fonction de l'angle d'inclinaison | 59 |
| IV.16 | Montage réalisé lors de l'expérience | 60 |
| IV.17 | I_V pour 40° | 60 |
| IV.18 | P_V pour 40° | 61 |
| IV.19 | Le rendement en fonction de la tension pour 40° | 61 |
| IV.20 | I_V à 35° | 62 |
| IV.21 | P_V pour 35° | 63 |
| IV.22 | Le rendement en fonction de la tension pour 35° | 63 |
| IV.23 | I_V pour 32° | 64 |
| IV.24 | P_V pour 32° | 64 |
| IV.25 | Le rendement en fonction de la tension pour 32° | 65 |
| IV.26 | I_V pour 30° | 66 |
| IV.27 | P_V pour 30° | 67 |
| IV.28 | Le rendement en fonction de la tension pour 30° | 67 |
| IV.29 | I_V pour 25° | 68 |
| IV.30 | P_V pour 25° | 68 |

| | |
|---|----|
| IV.31Le rendement en fonction de la tension pour 25° | 69 |
| IV.32IV pour 20° | 70 |
| IV.33Montage réalisé lors de l'expérience | 70 |
| IV.34PV pour 20° | 71 |
| IV.35logiciel PVsys7.1 | 72 |
| IV.36Site géographique pour <i>Chetouane_PVGIS_API</i> | 72 |
| IV.37paramètre du site géographique pour <i>Chetouane_PVGIS_API</i> | 73 |
| IV.38Suiveur axe incliné par PV sys7.1 | 73 |
| IV.39données de base et dimensions du panneau solaire par PVsys 7.1 | 74 |
| IV.40données de base et dimensions du panneau solaire par PVsys 7.1 | 74 |
| IV.41données de base et dimensions du panneau solaire par PVsys 7.1 | 75 |
| IV.42données de base et dimensions du panneau solaire par PVsys 7.1 | 75 |
| IV.43données de base et dimensions du panneau solaire par PVsys 7.1 | 76 |
| IV.44données de base et dimensions du panneau solaire par PVsys 7.1 | 76 |

liste des acronymes

CDER : Centre de Développement des Energies Renouvelable.

PV : Photovoltaïque.

GPV : Générateur photovoltaïque.

KWc : Kilo-Watt crête.

E_λ : Distribution du rayonnement de corps noirs.

E : Emittance rgue (éclairage ou ensoleillement).

AM : Masse d'air.

TSL : Temps Standard Local.

TSV : Temps Solaire Vrai.

DC= CC : Courant Continu.

AC=CA : Courant alternatif.

STC : Conditions de tests standard "Standard Test Conditions".

MPP : Point de fonctionnement optimal "Maximum Power Point".

MPPT : Suiveur/Algorithme du Point de fonctionnement optimal.

CMM : Comportement moyen modelant.

Symboles

λ : longueur d'onde en mètre.

T : la température absolue en $^{\circ}K$.

σ : La constante de Stefan-Boltzmann.

E_s : Eclairement de la surface du soleil.

E_o : Eclairement en dehors de l'atmosphère terrestre, appelée constante solaire.

A_s : Surface du soleil.

A_{OT} : Surface de la sphère dont le rayon est l'orbite de la terre/soleil.

λ : Longitude géographique du site ;

λ_{ref} : Longitude de référence du TSL

γ : L'altitude.

ψ : l'azimut.

λ : longitude.

ϕ : latitude.

STC: Le rendement de la cellule photovoltaïque.

P_m : La puissance produite par le générateur PV.

ESTC: L'éclairement absorbé par la cellule.

- $S_{cellule}$: La surface de la cellule [m^2].
- E : L'éclairement absorbé par la cellule.
- E_{ref} : L'éclairement de référence ($1000W/m^2$).
- V_{th} : La tension thermique.
- N : Le facteur d'idéalité de la photopile.
- K : constant de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}J/K$)
- q : La charge de l'électron ($1.6 \cdot 10^{-19}C$).
- I_{pv} : Courant générer par la cellule photovoltaïque.
- I_{ph} : Courant de la cellule PV (Photo-Courant).
- I_d : Le courant circulant dans la diode.
- I_o : Le courant de saturation inverse de la diode.
- T : Température de la jonction des cellules PV [$^{\circ}K$].
- T_n : Température de référence des cellules PV [$^{\circ}K$].
- B ou A : facteur d'idéalité de la jonction.
- E_g : Energie de Gap du matériel de la cellule PV en [ev] .
- V_{pv} : La tension de sortie d'un panneau photovoltaïque.
- I_p : Le courant circulant dans la résistance R_P .
- R_P : Résistance shunt de la cellule PV.
- R_s : Résistance série de la cellule PV.
- $V_{oc} = V_{co}$: Tension du circuit ouvert.
- $I_{sc} = I_{cc}$: Courant de court circuit.
- N_s : Nombres des cellules en série.

N_p : Nombres des cellules en parallèle.

η : Rendement.

K_t : Coefficient de variation de courant I_{cc} selon la température.

A : Facteur d'idéalité de la jonction (cellule PV) p-n

$V_{mpp} = V_m$: Tension d'un module PV au point de puissance maximale [V].

$I_{mpp} = I_m$: Courant d'un module PV au point de puissance maximale [A].

I_{mr} : Courant de référence d'un module PV au point de puissance maximale.

E : Ensoleillement [W/m^2].

E_{ref} : Ensoleillement de référence.

R_L : Résistance de filtres.

L : Inductance de filtres.

FP : Facteur de puissance.

Introduction générale

L'utilisation des énergies renouvelables comme alternative aux énergies fossiles devient de plus en plus nécessaire. La croissance démographique et l'épuisement progressif des ressources fossiles sont des facteurs limitant.

La production d'électricité est un défi de grande importance dans les années à venir. Surtout dans les zones désertiques qui ne sont pas connectées aux réseaux électriques.

L'utilisation de l'énergie solaire est encore limitée, surtout dans les pays du Sud. La capacité technologique à capter et à transformer cette énergie constitue un frein important à sa vulgarisation malgré sa gratuité et sa nature.

Actuellement, une grande partie de la production énergétique mondiale est assurée par l'exploitation d'énergies non renouvelables, mais la consommation de ces sources entraîne des émissions de gaz à effet de serre ce qui implique une augmentation de la pollution.

En 1839, lorsqu'Antoine Becquerel découvrit le processus de conversion de la lumière en électricité, connu sous le nom d'effet photovoltaïque, l'homme attendit près d'un siècle que les scientifiques explorent et exploitent ce phénomène physique.[1]

Et c'est ainsi que L'énergie solaire photovoltaïque devenue un thème au centre de l'actualité et a partir de la prise de conscience mondiale du réchauffement de la planète par effet de serre et de raréfaction des ressources primaires fossiles (pétrole, gaz, uranium). Face à cette crise environnementale et énergétique, les énergies renouvelables (solaire, géothermie, , hydraulique, et biomasse) semblent être des possibilités énergétiques de notre planète puisqu'elles permettent d'éviter les émissions de gaz à effet de serre tout en ne produisant aucun déchet.

En exploitant le rayonnement solaire pour produire de l'électricité, l'énergie photovoltaïque a largement contribué à cette nouvelle politique énergétique favorable à la lutte contre le changement climatique et à la protection des ressources fossiles. [2]

Donc une installation photovoltaïque réussie passe par une conception et une installation rigoureuse avec des composants qui répondent aux besoins et tiennent leurs promesses.

Notre mémoire vise à donner une information pratique et complète des aspects techniques du fonctionnement du photovoltaïque afin de maîtriser la rentabilité d'une installation notamment l'inclinaison des panneaux sur le rendement photovoltaïque.

En commençant d'abord par Le premier chapitre qui couvre les concepts de base du Soleil et l'énergie solaire.

Le second chapitre est consacré à décrire le principe de fonctionnement de la cellule qui compose le système photovoltaïque en expliquant le phénomène des cellules photovoltaïques et les principales caractéristiques de cette cellule, leurs avantages et inconvénients.

Le troisième chapitre parle de l'influence de divers facteurs externes sur le rendement photovoltaïque.

Et en ce qui concerne le quatrième chapitre est immédiatement suivi d'une étude sur l'emplacement de la wilaya de Tlemcen et de son climat pour passer au final à faire une simulation sur l'influence de l'inclinaison des panneaux (on choisit un type de panneau) dans la région de Tlemcen.

Chapter I

Généralité sur l'énergie solaires

SOMMAIRE

| | | |
|-------|---|----|
| I.1 | INTRODUCTION | 4 |
| I.2 | LE SOLEIL | 4 |
| I.3 | POTENTIEL SOLAIRE | 5 |
| I.3.1 | Potentiel solaire extraterrestre | 5 |
| I.3.2 | Rayonnement solaire | 9 |
| I.4 | REPÉRAGE D'UN SITE À LA SURFACE DE LA TERRE | 11 |
| I.5 | COORDONNÉES SOLAIRES | 12 |
| I.5.1 | Coordonnées équatoriales | 12 |
| I.5.2 | Coordonnées horizontales | 13 |
| I.6 | CONCLUSION | 14 |

I.1 Introduction

L'énergie solaire est la lumière et la chaleur émises par le soleil, elle est utilisée par l'homme depuis l'Antiquité en utilisant une combinaison de technologies en constante évolution. Les technologies de l'énergie solaire comprennent l'utilisation de l'énergie thermique du soleil, soit pour le chauffage direct, soit dans le cadre d'une conversion mécanique du mouvement ou de l'énergie électrique, soit pour la génération d'électricité par des phénomènes photovoltaïques à l'aide de panneaux photovoltaïques [3].

Pour comprendre le fonctionnement de cette source d'énergie et optimiser son utilisation, nous rappelons brièvement dans ce chapitre de tout ce qui concerne l'énergie solaire et le soleil.

I.2 Le soleil

Le soleil est l'étoile la plus proche de la terre. C'est une sphère gazeuse principalement composée d'hydrogène et d'hélium [3].

Le tableau IV.1 ci-dessous présente quelques-unes des principales caractéristiques du Soleil

Table I.1: Caractéristiques principales du soleil [1]

| Caractéristiques | Valeurs |
|---------------------------|---------------------------|
| Masse | $1.989 \times 10^{30} Kg$ |
| Diamètre | $1.392 \times 10^9 m$ |
| Masse volumique moyenne | $1410 Kg m^{-3}$ |
| Température superficielle | $5770 K$ |
| Puissance rayon | $3.83 \times 10^{26} W$ |

La structure du soleil est représentée sur la figure I.1.

Il existe quatre zones spéciales ; cœur, photosphère, chromosphère et couronne [3] :

- **noyau** : c'est le cœur du soleil, sa température est très élevée ($15 \times 10^6 K$) ainsi que sa pression ($2 \times 10^{11} \text{ bar}$) et sa densité ($\sim 105 Kg m^{-3}$), on remarque que cette dernière augmente avec la distance du centre diminue. L'énergie générée au sein du noyau se propage par diffusion radiative puis par convection turbulente jusqu'à la photosphère, d'où elle s'échappe dans l'espace sous forme de rayonnement électromagnétique.
- **Photosphère** : C'est une couche d'environ 300 km d'épaisseur et d'une température de 5770 K.
- **Chromosphère** : c'est l'atmosphère du soleil. Il a une épaisseur d'environ 8 000 km et une température d'environ 20 000 K.

- **La couronne** : est la couche la plus externe de l'atmosphère solaire et est un plasma, un gaz complètement ionisé [3].

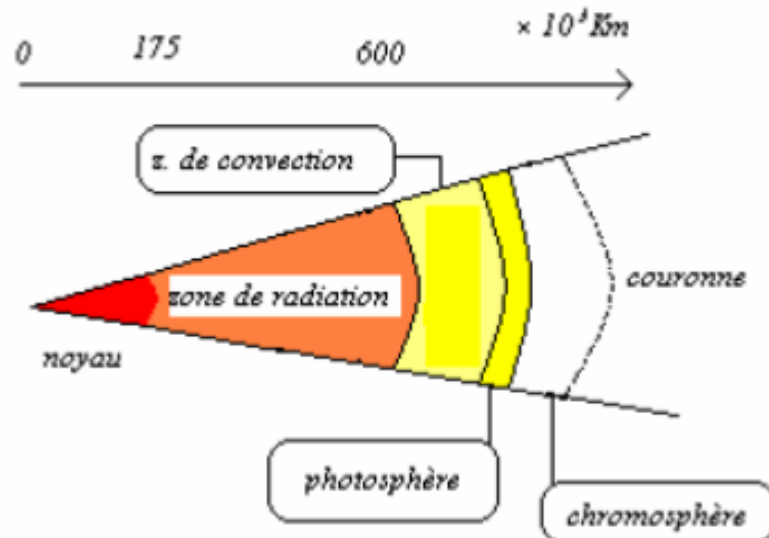


Figure I.1: Coupe schématique du soleil [3]

I.3 Potentiel solaire

I.3.1 Potentiel solaire extraterrestre

I.3.1-a Rayonnement solaire extraterrestre

Pour comprendre le comportement du rayonnement solaire, il faut voir brièvement les propriétés d'un corps noir " Black body ". Donc qu'est-ce qu'un corps noir ?

- **Corps noir** : est un objet idéal, il absorbe et émet un rayonnement électromagnétique avec une efficacité de 100 % à toutes les longueurs d'onde.
- Distribution théorique des longueurs d'onde du rayonnement du corps noir : il s'agit d'un calcul mathématique de l'équation de Planck, qui est décrite comme suit : [4]

$$E_{\lambda} = \frac{A\lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{\beta}{\lambda T}\right) - 1} \quad (\text{I.1})$$

Avec:

$A = 3.74 \times 10^{-16} \text{W/m}^2$; constante de radiation

$\beta = 14.39 \times 10^{-3} \text{m} \cdot \text{K}$;

λ : Longueur d'onde en mètre ;

T : Température absolue en $^{\circ}K$.

La lumière solaire, qui représente le flux d'énergie par unité de temps et par unité de Surface du Soleil, en W/m^2 . Elle est donnée par la loi de Stefan-Boltzmann [4] :

$$E_S = \sigma T^4 \quad (\text{I.2})$$

Où :

$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} (W \cdot m^2 \cdot K^4)$ est la constante de Stefan-Boltzmann ;

T est la température absolue du corps noir.

La quantité de lumière solaire reçue à l'extérieur de l'atmosphère terrestre, appelée constante solaire, si nous supposons que le soleil est un corps noir, il est approximativement dérivé de l'expression II.3 [4] :

$$E_S A_s = E_o A_{oT} \quad (\text{I.3})$$

Avec:

E_S : éclairement solaire de surface ;

E_o : éclairement en dehors de l'atmosphère terrestre, appelé constante solaire ;

A_S : Surface du soleil ;

A_{oT} : Surface de la sphère dont le rayon est l'orbite de la terre/soleil ;

La figure I.2 montre la géométrie schématique des rapports terre-soleil. En substituant E_S dans l'équation II.2 : $E_S = \sigma T^4$ et T à $5762^{\circ}K$, on obtient :

$$E_0 = 1360W/m^2$$

L'orbite terrestre n'étant pas complètement fixe, E_o varie légèrement tout au long du processus, on peut en déduire pour une année entière $1300W/m^2 < E_o < 1390W/m^2$.

Les mesures satellitaires montrent une moyenne de $E_o = 1367W/m^2$ en année.

La lumière solaire extraterrestre E_o à la surface en raison de l'orbite elliptique de la terre étant donné un faisceau perpendiculaire au soleil le nième jour de l'année (n varie de 1 à 365, ce du 01/01 au 31/12) par l'équation suivante [4] :

$$E_o(n) = 1 + 0.033 \frac{2\pi n}{365} E_o \quad (\text{I.4})$$

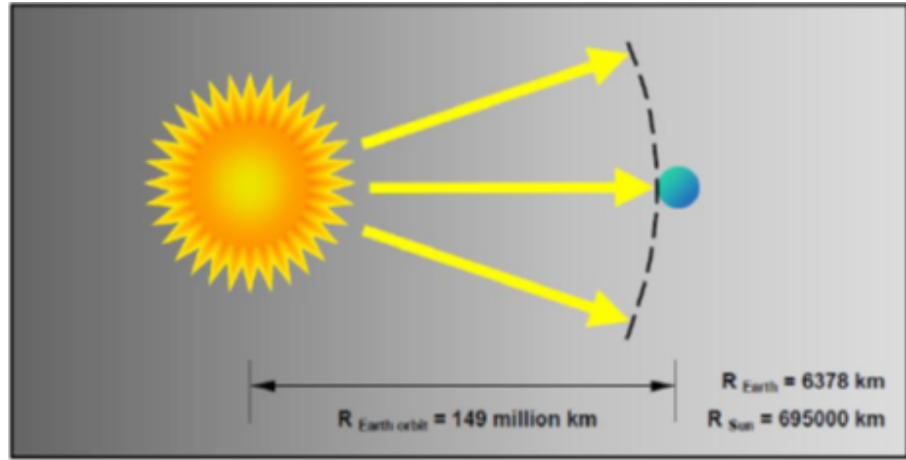


Figure I.2: Géométrie schématique des rapports terre-soleil [4]

I.3.1-b Temps solaire vraie (TSV)

Défini par l'angle horaire ρ entre le plan méridien passant par le centre du soleil et le méridien du site considéré. Comptez 0 à 24 heures à partir de midi vrai lorsque le soleil est à son zénith à un endroit donné [3].

La vitesse de la terre sur son orbite est sujette à des variations, et le vrai jour solaire n'est pas constant. Par conséquent, le temps solaire moyen est retenu comme unité de temps, ce qui définit le jour solaire moyen [3].

$$TSV = 12 + \sigma/15 \quad (\text{I.5})$$

I.3.1-c La position du soleil

La direction du soleil dans le ciel est déterminée par deux angles :

1. **Hauteur angulaire (H)** : C'est l'angle formé par la direction du soleil et le plan horizontal qui détermine la longueur du passage dans l'atmosphère. Sa valeur sera la valeur maximale entre 00 (lever et coucher du soleil) et le zénith (midi en temps solaire vrai) [3].

Lorsque le sinus est négatif, le soleil n'est pas encore levé (la durée du jour varie tout au long de l'année).

Par conséquent, il est nécessaire d'adapter cette variable.

$$\sin(h) = \sin(\psi) \sin(\rho) + \cos(\psi) \cdot \cos(\rho) \cdot \cos(\delta) \quad (\text{I.6})$$

L'angle horaire ρ_s au lever du soleil peut s'écrire $\sin(h) = 0$

$$\cos(\rho_s) = (\tan \psi) \tan(\delta) \quad (\text{I.7})$$

Où :

δ est la déclinaison calculée à partir de l'équation II.7 et la latitude de la position ψ .

2. **Azimut (β):** L'angle formé par la projection de la direction du soleil vers le sud. Cet angle est à l'ouest

$$\sin(\beta) = \frac{\sin(\delta) \cos(\rho)}{\cos(h)} \quad (\text{I.8})$$

Avec:

h : Hauteur angulaire

ψ : l'azimut solaire

ρ : L'angle horaire

δ : L'angle de déclinaison

β : L'angle formé par la projection

Les deux angles β et h sont représentés sur la figure I.3 ci-dessous :

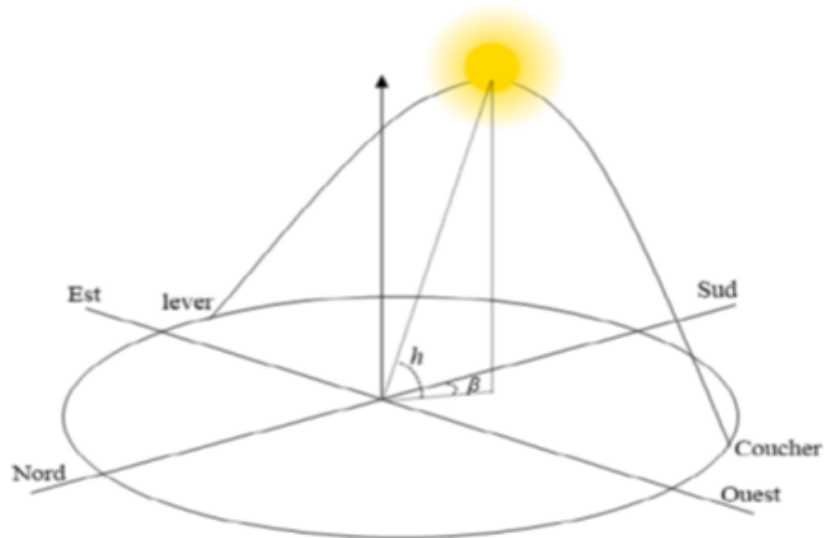


Figure I.3: Position du soleil [3]

I.3.1-d Géométrie d'orientation

La position du soleil par rapport à un collecteur orienté arbitrairement est déterminée par l'angle d'incidence θ_i du diagramme des rayons solaires figure I.4. Pour le plan horizontal,

l'angle d'incidence est égal à l'angle zénithal, équation II.9 [4] :

$$\cos(\theta_i) = \sin(\gamma) \quad (\text{I.9})$$

Pour un collecteur incliné d'angle β et d'azimut α , l'angle d'incidence θ_i est calculé par :

$$\cos(\theta_i) = \sin(\gamma) \cos(\beta) + \cos(\gamma) \sin(\beta) \cos(\alpha - \psi) \quad (\text{I.10})$$

L'azimut α se déplace d'Est en Ouest et est nul pour le sud. La lumière solaire extraterrestre E_o reçue par un collecteur dans n'importe quelle direction est donnée par l'équation II.11 [4] :

$$E_{o\alpha,\beta} = E_o \cos(\theta_i) \quad (\text{I.11})$$

Avec:

h: Hauteur angulaire

ψ : l'azimut solaire

α : l'angle d'azimut

δ : L'angle de déclinaison

β : L'angle formé par la projection

θ_i : l'angle d'incidence)

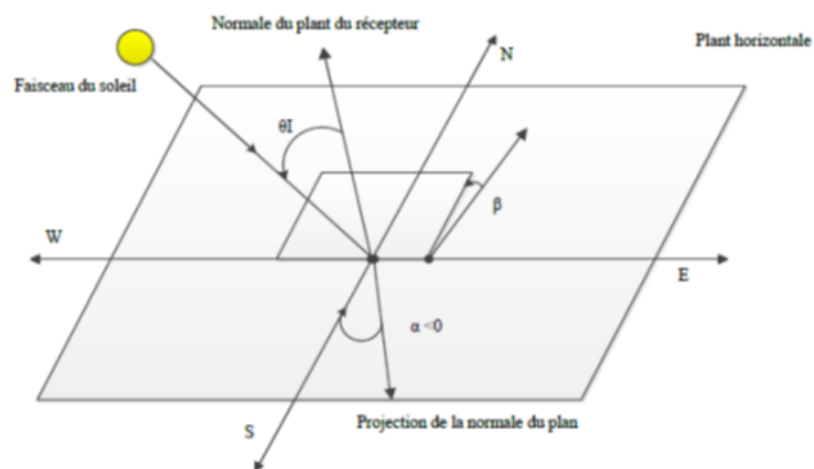


Figure I.4: Position du soleil observé d'après l'origine O [3].

I.3.2 Rayonnement solaire

Malgré la distance considérable entre le soleil et la terre, $150 \cdot 10^6 km$, la couche terrestre reçoit beaucoup d'énergie, $180 \cdot 10^6 GW$, c'est pourquoi l'énergie solaire fonctionne bien

comme substitut aux autres sources d'énergie. Cette énergie quittera sa surface sous forme de rayonnement électromagnétique avec des longueurs de 0.22 à $10\mu m$ [4], et l'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose grossièrement comme suit :

- 9% dans la bande UV ($< 0.4\mu m$).
- 47% dans la bande visible (0.4 à $0.8\mu m$).
- 44% dans la bande infrarouge ($> 0.8\mu m$).

I.3.2-a Spectre solaire

Afin de quantifier l'énergie produite par les générateurs photovoltaïques dans une application donnée, il est nécessaire de connaître le spectre du rayonnement solaire reçu au sol. En fait, il existe quatre types de rayonnement répertoriés dans la littérature :

1. **Rayonnement direct** : Flux solaire sous forme de rayons parallèles du disque solaire, non diffusés par l'atmosphère. [3].
2. **Rayonnement diffus** : il s'agit de la partie du rayonnement solaire qui subit de multiples réflexions (diffusion) dans l'atmosphère. [3].
3. **Rayonnement réfléchi** : C'est la partie de la lumière du soleil qui est réfléchiée par le sol, et ce rayonnement est directement dépendant des propriétés du sol (nuages, sable, etc.). Il est caractérisé par un coefficient spécifique à la propriété du lieu appelé albédo (ε) $0 \leq \varepsilon \leq 1$ [3].
4. **Rayonnement global** : Le rayonnement global est divisé en rayonnement direct, rayonnement diffus et rayonnement réfléchi par le sol) [4]. La figure ci-dessous schématise l'ensemble du rayonnement solaire reçu au sol.

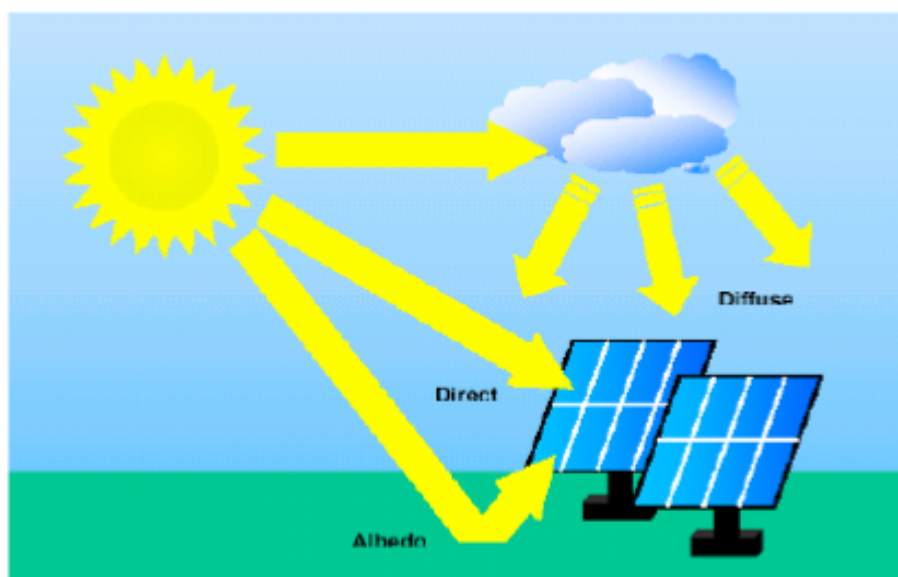


Figure I.5: Types de rayonnement solaire reçus au sol[4]

L'intensité du rayonnement solaire reçu sur n'importe quel plan à un moment donné est appelée irradiante ou éclaircissement (généralement désignée par la lettre G) et est exprimée en watts par mètre carré (W/m^2).

La valeur du rayonnement reçu par la surface du module PV varie en fonction de la position de ce dernier. Le rayonnement solaire atteint son intensité maximale lorsque le plan du module photovoltaïque est perpendiculaire à la lumière [4].

I.4 Repérage d'un site à la surface de la Terre

Pour localiser un emplacement donné sur la surface de la Terre, on définit les grandeurs suivantes [5] :

1. **la Latitude θ** : La latitude d'un lieu à la surface de la Terre est l'angle formé par l'équateur et le rayon de latitude φ , de 0° à $+90^\circ$ vers P_n (nord) et de -90° à P_s (sud). Là où la terre s'exprimait prend en compte la latitude de la ville de Constantine d'environ 360° [3].
2. **L'altitude φ** : C'est la distance verticale, exprimée en mètres, qui sépare le point considéré de la topographie terrestre au niveau de la mer comme surface de référence [5].
3. **La longitude λ** : C'est l'angle φ formé par le méridien de Greenwich avec le méridien du site considéré. La longitude est comprise entre -180 (ouest) et $+180$ (est). Comme la Terre met 24 heures pour tourner (360°), chaque heure représente une différence de longitude de 15° , donc chaque degré de longitude représente 4 minutes [5].

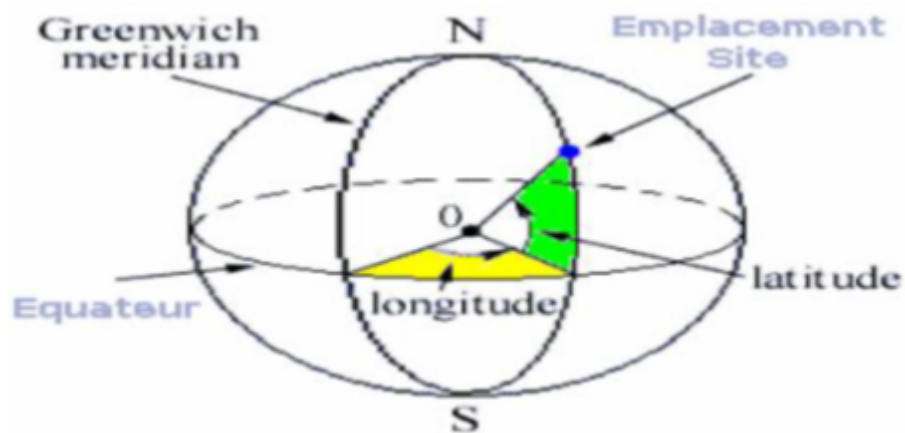


Figure I.6: Coordonnées terrestres [3]

I.5 Coordonnées solaires

La position du soleil dans le ciel à tout moment de la journée est marquée par deux systèmes de coordonnées :

I.5.1 Coordonnées équatoriales

Les coordonnées équatoriales ne sont pas liées à la position de l'observateur sur la terre, mais sont liées au moment de l'observation. La position du soleil est représentée par deux angles :

1. Déclinaison du Soleil δ :

C'est l'angle entre la direction du Soleil et le plan équatorial de la Terre [3], donné en degrés par la relation de Cooper suivante :

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (N + 284) \right] \quad (\text{I.12})$$

Où N est une année Le nombre de jours dans ; N=1 représente le premier jour de janvier.

La déclinaison varie entre -23.45° le 21 décembre et $+23.45^\circ$ le 21 juin [3].

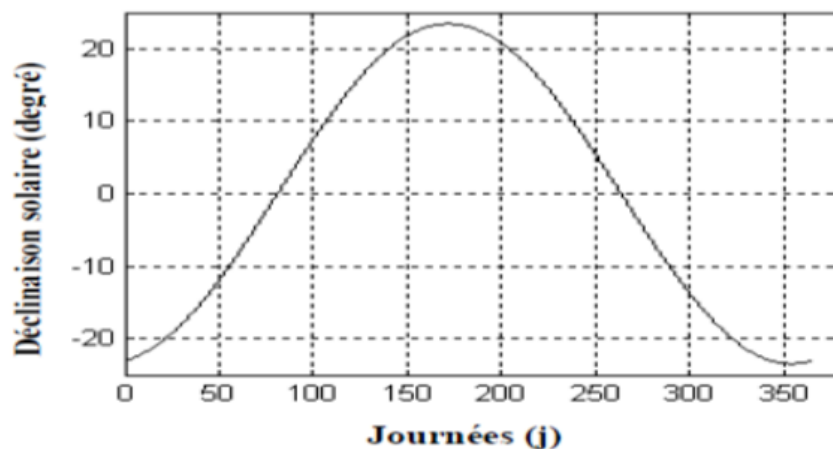


Figure I.7: Courbe de déclinaison du soleil [3]

2. Angle horaire :

C'est l'angle formé par le plan méridien du soleil et le plan méridien local, qui est le méridien local obtenu par le déplacement angulaire du soleil autour par rapport à l'axe polaire lors de son trajet d'est en ouest. La valeur de l'angle est nulle le midi solaire, négative le matin et positive l'après-midi, augmentant de 15 degrés toutes les heures (soit 3600 tours en 24 heures) [3].

$$\rho = 15(TSV - 12) \quad (\text{I.13})$$

Où TSV est le vrai temps solaire.

I.5.2 Coordonnées horizontales

Le soleil est identifié par les grandeurs suivantes :

1. Azimut ψ :

L'azimut est l'angle entre le plan vertical contenant le rayon du soleil et la direction sud.

De 00 à 3600, la direction rétrograde est comptée à partir du sud, et l'expression relationnelle de l'azimut est la suivante [3]

C'est l'angle entre la direction du soleil et le plan horizontal. γ varie de 0° à 90° vers le zénith et de 0° à -90° vers le nadir. L'angle de la hauteur soleil [1]

$$\sin \gamma = \sin \theta \cdot \sin \delta + \cos \theta \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega \quad (\text{I.14})$$

2. distance zénithale z :

C'est l'angle entre la direction du soleil et la direction verticale du lieu (zénith), l'angle z est complémentaire de γ [3]

$$\cos z = \sin \delta \cdot \sin \theta + \cos \delta \cdot \cos \theta \cdot \cos \omega \quad (\text{I.15})$$

Avec:

h : Hauteur angulaire

ψ : l'azimut solaire

α : l'angle d'azimut

δ : L'angle de déclinaison

β : L'angle formé par la projection

θ_i : l'angle d'incidence

ω : l'angle horaire de la hauteur h

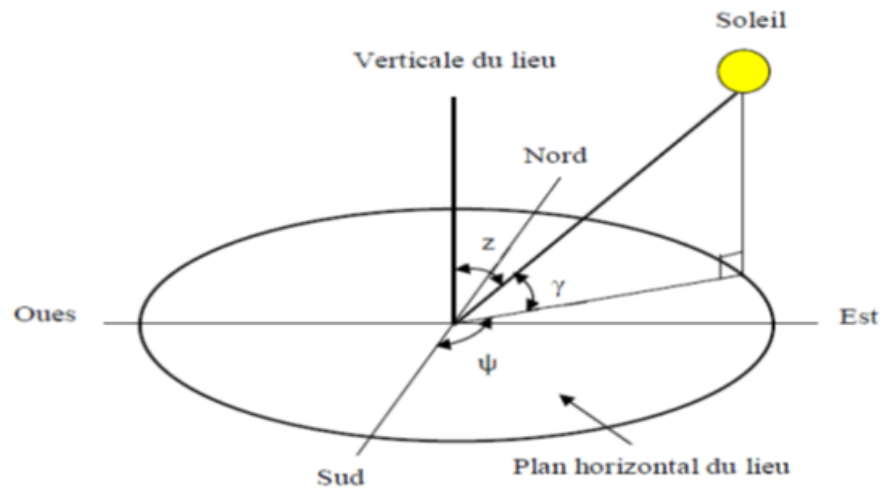


Figure I.8: Coordonnée solaire selon le repère horizontal [3]

I.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné les notions fondamentales du gisement solaire donc on a parlé du rayonnement solaire ainsi que les coordonnées solaires et de nombreuses choses liées à l'énergie solaires [3]

Chapter II

Généralité sur la cellule photovoltaïque

SOMMAIRE

| | |
|---|----|
| II.1 INTRODUCTION | 16 |
| II.2 L'ÉNERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE | 16 |
| II.3 LES FILIÈRES TECHNOLOGIQUES | 16 |
| II.4 PHOTOVOLTAÏQUE | 17 |
| II.4.1 Cellules photovoltaïques | 17 |
| II.4.2 Les différents types des cellules photovoltaïques | 18 |
| II.4.3 Comparaison entre les différentes technologies | 20 |
| II.5 EFFET PHOTOVOLTAÏQUE | 21 |
| II.5.1 Semi-conducteur | 21 |
| II.5.2 Principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques | 22 |
| II.6 COMPOSITION DU GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE (GPV) | 23 |
| II.6.1 Association parallèle de cellules photovoltaïques | 23 |
| II.6.2 Association série de cellules photovoltaïques | 24 |
| II.7 MODÉLISATION DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES | 26 |
| II.7.1 Modèle idéal de cellule solaire | 26 |
| II.7.2 Modèle à une seule diode (une seule exponentielle) | 27 |
| II.8 LES CARACTÉRISTIQUES DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE | 28 |
| II.8.1 Au point de vue électrique | 28 |
| II.8.2 Fonctionnement idéal | 30 |
| II.8.3 Puissance-crête | 31 |
| II.8.4 Le facteur de forme FF | 32 |
| II.8.5 Rendement d'une cellule | 33 |
| II.9 PROTECTIONS CLASSIQUES D'UN GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE | 33 |
| II.10 LES AVANTAGES ET LES INCONVÉNIENTS DE L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE [15] | 34 |
| II.10.1 Les avantages | 34 |
| II.10.2 Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque [16] | 35 |
| II.11 CONCLUSION | 35 |

II.1 Introduction

Les modules photovoltaïques sont affectés par les paramètres météorologiques (éclairage, température ambiante, température du ciel, vent). L'énergie photovoltaïque est la plus jeune source d'énergie renouvelable avec des produits sans pollution, flexibles, fiable [5]. à l'heure actuelle, les scientifiques ont accordé une attention considérable à l'énergie Photovoltaïque. Il faut donc adapter cette énergie à la façon dont on la consomme, En stockant les produits solaires dans des batteries ou tout autre moyen de stockage En cours de développement, ou remettez-le sur le réseau public [7].

Pour comprendre le fonctionnement et l'utilisation de cette source d'énergie, dans ce chapitre nous décrivons tout ce qui touche à l'énergie photovoltaïque et tout ce qui s'y rapporte.

II.2 L'énergie solaire Photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque utilise le soleil comme source de lumière pour convertir l'énergie des photons atteignant la surface de la terre en électricité. La lumière du soleil (photons) transfère son énergie aux électrons contenus dans les semi-conducteurs (constituant les cellules photovoltaïques), et cette conversion (effet photovoltaïque) n'a aucune action mécanique, aucun bruit, aucune pollution, aucun carburant. L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par le physicien français A. Becquerel. Le mot "photovoltaïque" vient du mot "photo" (du mot grec "photos", qui signifie "lumière") et du mot "Volt" (le nom de famille du physicien Alessandro Volta, qui a apporté une contribution très importante à l'électricité recherche) [6].

II.3 Les filières technologiques

Les cellules photovoltaïques peuvent être fabriquées à partir de nombreux semi-conducteurs. En fait, il existe aujourd'hui trois principaux domaines technologiques : le silicium cristallin, les couches minces et les batteries organiques. Comme le montre la figure II.1, ces secteurs ont une part inégale du marché.

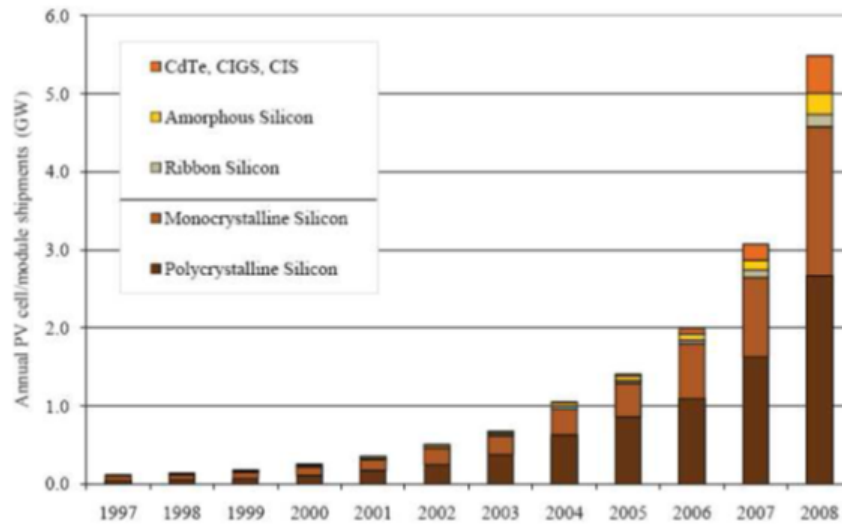


Figure II.1: Evolution de la production mondiale des différentes technologies de cellules PV [5]

Ces technologies ont coexisté sur le marché dans des proportions égales au fil des ans, bien que les prix et les volumes varient considérablement. Les chercheurs se sont particulièrement intéressés à l'augmentation du rendement [6].

II.4 Photovoltaïque

II.4.1 Cellules photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque ou cellule solaire est le plus petit élément d'un dispositif photovoltaïque. Il est composé d'un matériau semi-conducteur et convertit directement l'énergie lumineuse en électricité. Les cellules photovoltaïques comprennent :

- les couches minces semi-conductrices (matériaux à bande interdite qui agissent comme des barrières énergétiques que les électrons ne peuvent franchir sans excitation extérieure, et dont les propriétés électroniques peuvent être modifiées), comme le silicium, qui est un matériau à relativement bonne conductivité électrique,
- couche antireflet pour maximiser la pénétration des rayons du soleil,
- maille conductrice en haut ou cathode et métal conducteur en bas ou anode,
- Les plus récents ont même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissantes sous le semi-conducteur, permettant à la lumière de réfléchir plus long temps pour améliorer les performances (rendement).

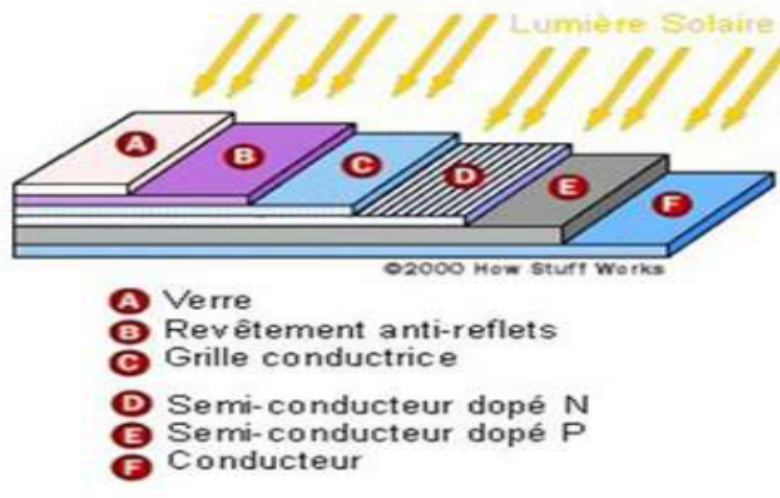


Figure II.2: Structure de base d'une cellule solaire

Les cellules photovoltaïques sont basées sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque, qui consiste à créer une force électromotrice lorsque la surface de la cellule est exposée à la lumière. La tension résultante peut varier entre 0,3 V et 0,7 V, selon les matériaux utilisés et leur disposition, ainsi que la température et le vieillissement de la batterie [8].



Figure II.3: cellule solaire PV [1]

II.4.2 Les différents types des cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques peuvent être réalisées avec différents semi-conducteurs. Actuellement, le matériau semi-conducteur le plus utilisé dans les cellules photovoltaïques est le silicium, ce dernier représentant l'essentiel de la production mondiale de cellules photovoltaïques, qui est un matériau stable et non toxique [8].

II.4.2-a Les cellules monocristallines

Il s'agit de la première cellule solaire fabriquée à partir d'une seule pièce de silicium cristallin. Elles se présentent sous forme de plaques rondes, carrées ou pseudo-

carrées Leur rendement est de 12 % [1]

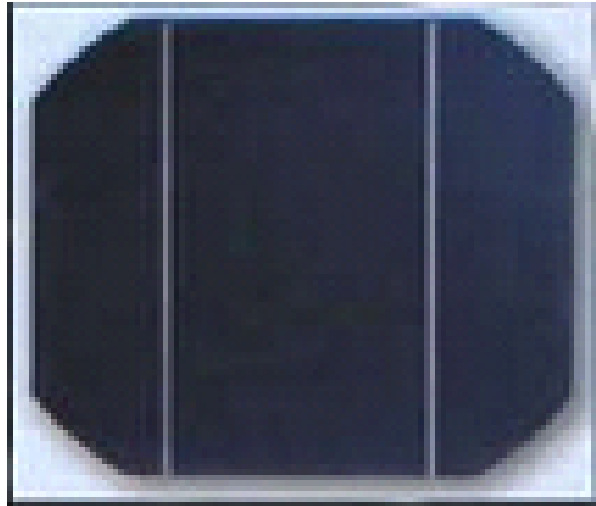


Figure II.4: Cellule PV monocristalline

II.4.2-b Les cellules poly-cristallines

Les panneaux photovoltaïques à cellules poly-cristallines sont constitués d'un silicium cristallisé sous forme poly-cristalline. En regardant de près, on peut voir la direction du cristal (teintes différentes).

Leurs rendements sont de 13 % à 20 %, mais leur coût de production est inférieur à celui des cellules monocristallines [1].

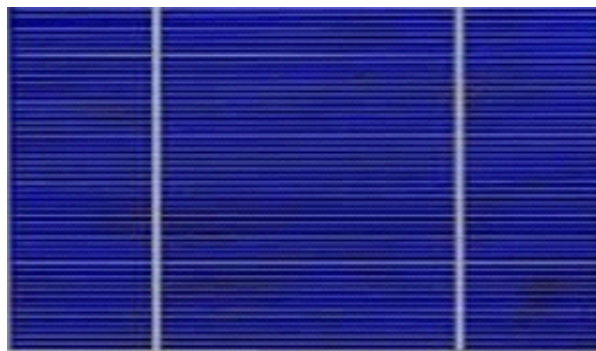


Figure II.5: Cellule PV polycristalline

II.4.2-c Les cellules amorphes

Ces cellules sont constituées de supports en verre ou en matière synthétique, sur lesquels est disposée une fine couche de silicium (l'organisation des atomes ne ressemble plus à celle du cristal). Leur rendement est d'environ 5 à 10 % inférieur à celui des cellules cristallines, mais elles sont actuellement produites à un prix relativement bon marché.

Elles sont appliquées dans les petits produits de consommation (figure II.6) [1].



Figure II.6: Cellule PV amorphe

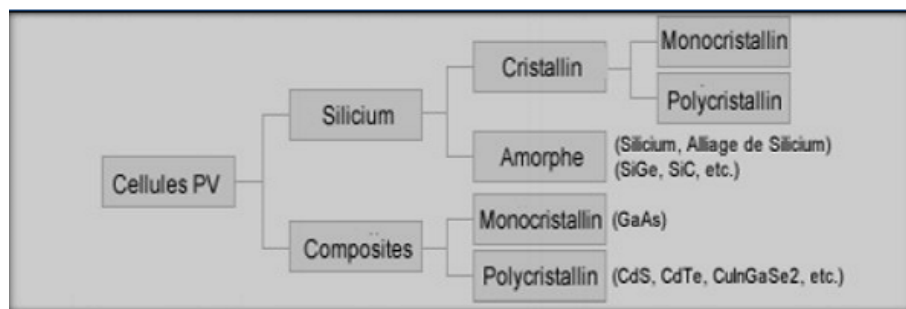


Figure II.7: différentes technologies [11]

II.4.3 Comparaison entre les différentes technologies

Le tableau suivant fait une comparaison entre les différentes technologies des cellules photovoltaïques [1].

Table II.1: différentes technologies [1]

| Technologie | Cellules Poly cristallin | Cellules amorphes | Cellule monocristallin |
|---|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Rendement dans les conditions standard | Très bon 14 – 16% | Bon 7 - 8% | Très bon 14 – 16% |
| Surface de panneau pour 1kwc | 8m ² | 16m ² | 27m ² |
| Electricité générée en un an (modules orientés sud, inclinée à 30°) | 750 KWc /kWh | 900 KWc /kWh | 750 kWc /kWh |
| Energie produite en un an par m ² | 90 – 95KWh/m ² | 55 – 60kwh/m ² | 125 – 135KWh/m ² |

II.5 Effet photovoltaïque

II.5.1 Semi-conducteur

Le secteur le plus avancé technologiquement et industriellement est celui de la production de batteries à base de silicium. Ce dernier est l'élément semi-conducteur le plus couramment utilisé car il est peu coûteux et abondant sur Terre : il constitue 28 % de la croûte terrestre sous forme de silice, qui est très stable et non toxique [2].

II.5.1-a Formation et comportement de la jonction PN

Comme tous les semi-conducteurs, le silicium possède une bande de valence pleine et une bande de conduction vide. Mais avec un apport d'énergie suffisant, les électrons peuvent passer de la bande de valence (BV) à la bande de conduction (BC), ce qui donne des électrons libres, comme le montre la figure II.8) [2].

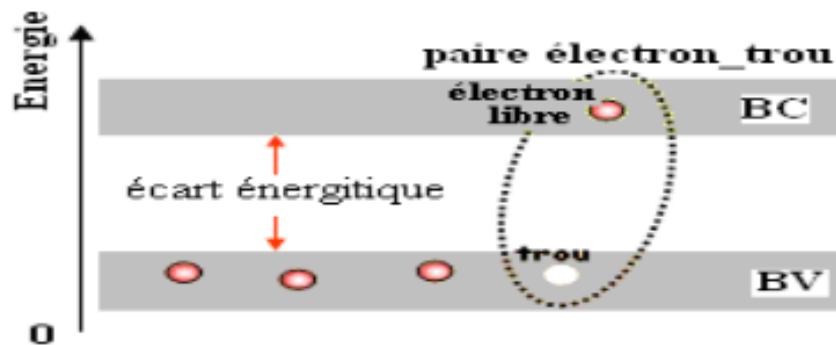


Figure II.8: Génération de la paire électron-trou [2]

La présence d'électrons libres dans la bande de conduction du matériau n'est pas suffisante pour générer du courant : il faut créer une différence de potentiel entre les bornes du générateur de lumière pour entrainer les charges positives et négatives d'un c et de l'autre. Cette opération peut être réalisée par dopage du silicium. Une jonction PN est formée par l'assemblage de deux tiges de silicium de type N et de type P, et l'élément résultant est appelé une diode [2].

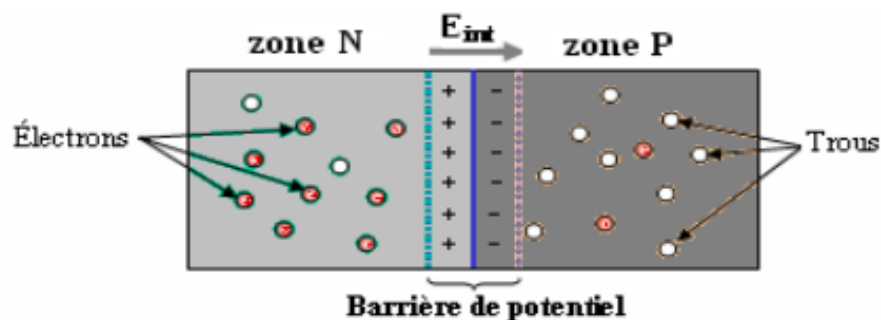


Figure II.9: La jonction PN [2]

Si cette jonction PN est soumise au rayonnement solaire, alors des paires électrons-trous supplémentaires sont créées dans le matériau en fonction du flux lumineux. Ce phénomène, aussi appelé effet photovoltaïque, ne se produit que si l'énergie des photons est supérieure ou égale à l'énergie de la bande interdite du matériau E_g . La différence de potentiel qui en résulte aux bornes de la structure caractérise l'effet photovoltaïque et se situe, selon les matériaux et la structure de la jonction [4].

II.5.2 Principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques

Les applications photovoltaïques utilisées dans les cellules solaires peuvent convertir l'énergie lumineuse de la lumière du soleil directement en électricité en générant et en transportant des charges positives et négatives dans des matériaux semi-conducteurs sous l'action de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une avec des électrons en excès et l'autre avec des électrons insuffisants, appelées respectivement dopage de type n et dopage de type p.

Lorsque le premier entre en contact avec le second, les électrons supplémentaires de la substance n se dispersent dans la substance p. Les régions initialement dopées n deviennent chargées positivement et les régions dopées p d'origine deviennent chargées négativement. Un champ électrique est ainsi créé entre eux, qui tendent à repousser les électrons dans la région n et les trous vers la région p. La jonction PN s'est formée. [1]

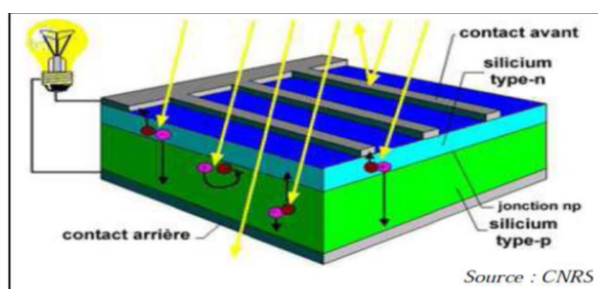


Figure II.10: Représentation schématique d'une cellule solaire [1]

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière solaire, les atomes exposés au rayonnement sont bombardés par les photons qui composent la lumière ; sous l'effet de ce bombardement, les électrons de la couche électronique supérieure (appelés électrons de la couche de valence) tendent à se libérer/découpler : si les électrons reviennent à leur état initial, le matériau est agité par l'agitation des électrons convertis par chauffage. L'énergie cinétique d'un photon est convertie en énergie thermique. Dans les cellules photovoltaïques, en revanche, certains électrons ne reviennent pas à leur état d'origine. Les électrons de "découplage" produisent une faible tension continue. Ainsi, une partie de l'énergie cinétique des photons est directement convertie en électricité : c'est l'effet photovoltaïque. [1]

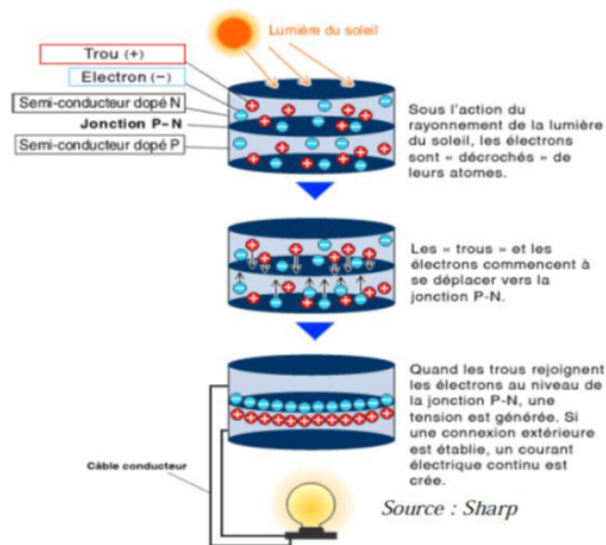


Figure II.11: Principe de fonctionnement [1]

II.6 Composition du Générateur Photovoltaïque (GPV)

L'association série/parallèle de plusieurs cellules photovoltaïques donne Générateur photovoltaïque. Si les cellules sont connectées en série, la tension de chaque cellule Additionnez pour augmenter la tension totale du générateur. En revanche, si les batteries sont connectées en parallèle, l'ampérage augmente comme indiqué sur le schéma ci-dessous [2].

Avec deux variables d'entrée :

G : Eclairement dans le plan de la cellule (W/m^2).

T : température de la cellule (C).

Et deux variables de sortie :

I : intensité de courant fournie par la cellule (A).

V : tension aux bornes de la cellule.

II.6.1 Association parallèle de cellules photovoltaïques

Les caractéristiques de l'association parallèle de cellules sont doubles par rapport à celles de l'association série. Par conséquent, dans un groupe de cellules parallèles exposées à la même tension, les caractéristiques finales du groupe sont obtenues en

sommant les courantes tensions données.

La figure II.13 Montre les propriétés résultantes (I_{pcc}, V_{pco}) En associant (indice p) N_p cellules identiques en parallèle [2] :

$$I_{pcc} = N_p \times I_{cc}$$

et

$$V_{pco} = V_{co}$$

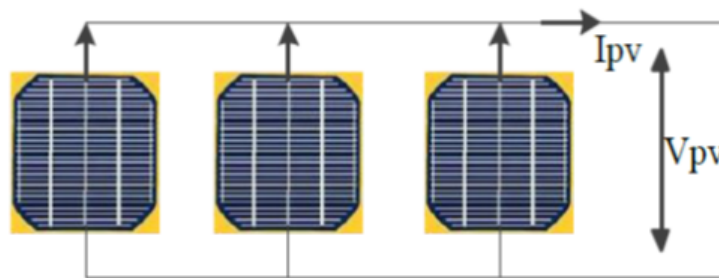


Figure II.12: Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle [2]

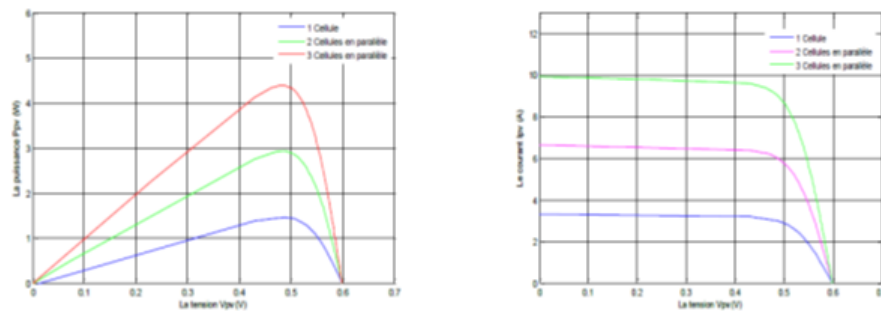


Figure II.13: Caractéristique P-V et I-V cellules PV raccordées en parallèle

II.6.2 Association série de cellules photovoltaïques

Dans le groupement en série, les cellules passent le même courant et Les propriétés finales de l'arrangement en série sont obtenues en ajoutant la tension au courant donné. La figure II.14 montre les propriétés résultantes obtenues par (I_{scc}, V_{sco}) Concaténer (indice s) N_s cellules identiques (I_{cc}, V_{co}) :

$$I_{scc} = I_{cc}$$

et

$$V_{sco} = N_s \times V_{co}$$

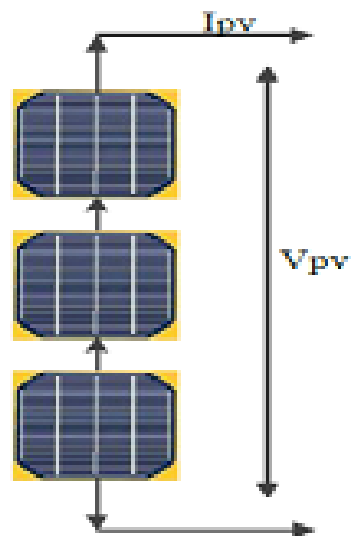


Figure II.14: Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en série.

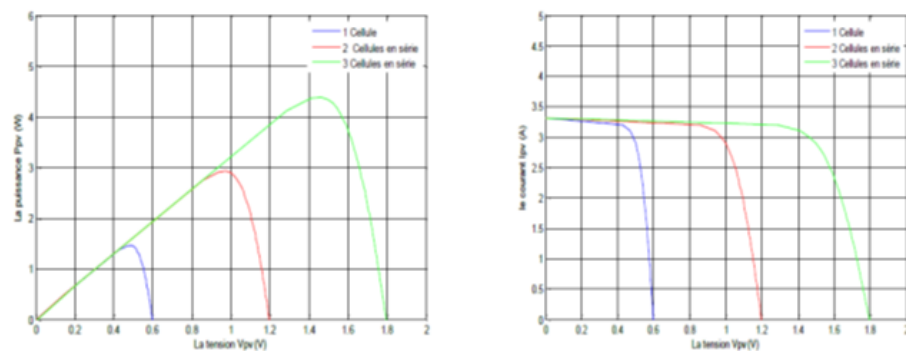


Figure II.15: Caractéristique P-V et I-V cellules PV raccordées en série

La plupart des panneaux photovoltaïques commerciaux sont constitués de sous-groupes. Les batteries sont connectées en série. Chacun de ces sous-réseaux est lui-même composé d'un ensemble de cellules photovoltaïques connectées en série. Le nombre de cellules par sous-réseau est compromis économique entre protection et perte des composants vitaux du générateur. En cas de panne PV partielle [2].

Le passage du module au panneau se fait en ajoutant des diodes de protection, une en série pour éviter le passage du courant inverse, et une en parallèle, appelée diode de dérivation, qui n'intervient qu'en cas de déséquilibre de puissance. Un groupe permet de limiter la tension inverse de cellule aux bornes de ce groupe et de minimiser les pertes de production associées [4] Vérif.

II.7 Modélisation des cellules photovoltaïques

La modélisation des cellules photovoltaïques nécessite nécessairement des choix judicieux. Afin de développer un circuit équivalent de cellule photovoltaïque précis, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments cellulaires et les propriétés électriques de chaque élément, plus ou moins détaillées. Selon cette philosophie, on a développé plusieurs modèles mathématiques pour représenter le comportement non linéaire fort, résultant des résultats de jonction semi-conductrice, qui est le fondement de leurs réalisations. Ces modèles diffèrent procéduralement les uns des autres, et le nombre de paramètres impliqués dans le calcul de la tension et le courant du module photovoltaïque [4].

Deux circuits équivalent d'une cellule solaire

- Modèle idéal de cellule solaire
- Modèle réelle de cellule solaire

II.7.1 Modèle idéal de cellule solaire

Afin de développer un circuit équivalent de cellule photovoltaïque précis, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments cellulaires et les caractéristiques électriques de chaque composant. Sur la base de ce concept, de nombreux modèles électriques ont été proposés pour représenter les cellules photovoltaïques. Une cellule solaire est un élément semi-conducteur qui délivre du courant en l'excitant avec des photons, donc en première approximation nous avons une source de courant, qui est court-circuitée par des diodes (puisque les cellules solaires sont des jonctions p-n) [1].

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connectée à une charge peut être schématisée par un générateur de courant I_{ph} en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la figure II.16, qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale [2].

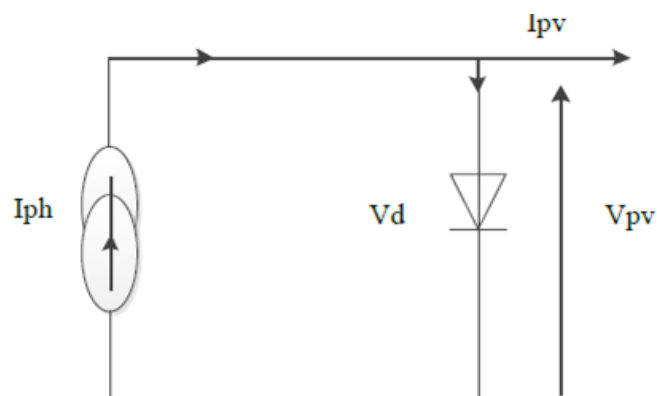


Figure II.16: Schéma équivalent d'une cellule idéale [2]

Les équations retenues de ce modèle sont:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (\text{II.1})$$

Le courant I_{ph} est assimilé au courant I_{sc} avec $V_{pv} = 0$, courant de court-circuit obtenu en court circuitant la charge.

$$I_{ph} = I_{sc} = \frac{E}{E_{ref}} \quad (\text{II.2})$$

E : L'éclairement absorbé par la cellule ;

E_{ref} : L'éclairement de référence (1000 w/m²) ;

$$I_d = I_o \left(e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \quad (\text{II.3})$$

I_o : Courant de saturation inverse de la diode

$$V_t = \frac{NKT}{q} \quad (\text{II.4})$$

V_t : Tension thermique ;

N : Facteur d'idéalité de la photopile ;

K : Constant de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23} J/K$) ;

q : Charge de l'électron ($1.6 \cdot 10^{-19} C$).

II.7.2 Modèle à une seule diode (une seule exponentielle)

En effet, la résistance parasitaire a de multiples effets en production L'énergie électrique, alors que les cellules photovoltaïques sont généralement représentées par un schéma Suivant :

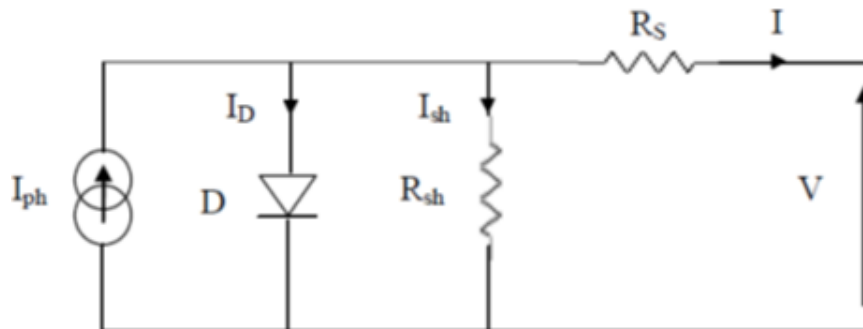


Figure II.17: schéma équivalent d'une cellule solaire [1]

Cellules solaires C'est le modèle le plus classique de la littérature et il s'agit d'un générateur Courant utilisé pour simuler le flux lumineux incident, diodes pour les phénomènes Physique de polarisation et deux résistances (série et shunt) [1].

Ces résistances peuvent avoir un certain effet sur les caractéristiques de la cellule solaire :

- La résistance série est la résistance interne de la batterie, principalement la résistance des semi-conducteurs utilisés, la résistance de contact des grilles du collecteur et la résistivité de ces grilles.
- La résistance de shunt est due au courant de fuite au niveau de la jonction ; elle dépend Comment c'est fait [1].

Le courant de diode est donné par :

$$I_D = I_o \left[e^{\frac{q(V+R_s I)}{A \cdot K \cdot T}} - 1 \right] \quad (\text{II.5})$$

Le courant produit par une cellule photovoltaïque est donné par la loi des mailles

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (\text{II.6})$$

$$I = I_{ph} - I_o \left[e^{\frac{q(V+R_s I)}{A \cdot K \cdot T}} - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.7})$$

R_s : Résistance série

R_{sh} : Les diverses résistances de contacts et de connexions [1].

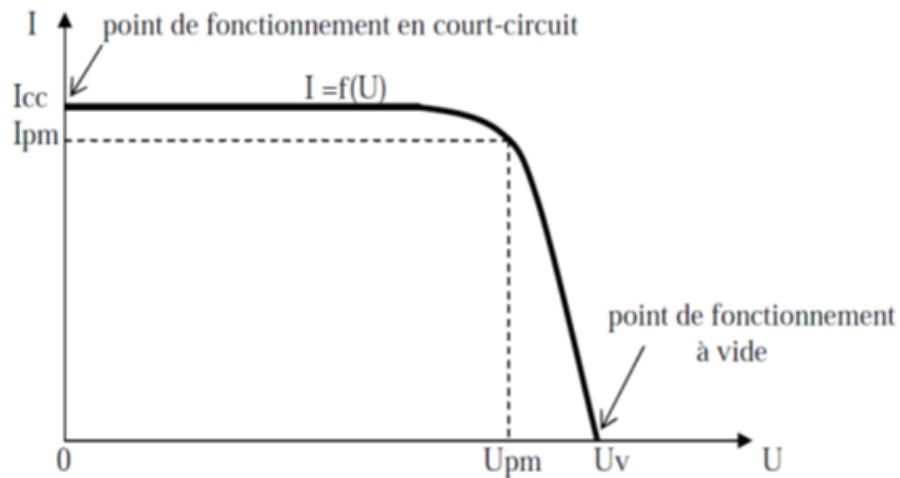
II.8 Les caractéristiques de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque se caractérise :

II.8.1 Au point de vue électrique

II.8.1-a Caractéristiques courant/tension

Dans des conditions de température et d'éclairage fixes, les caractéristiques courant/tension de la cellule sont les suivantes :

Figure II.18: Caractéristiques courant / tension $I = f(U)$ [1]

Sur cette courbe, on trouve [1] :

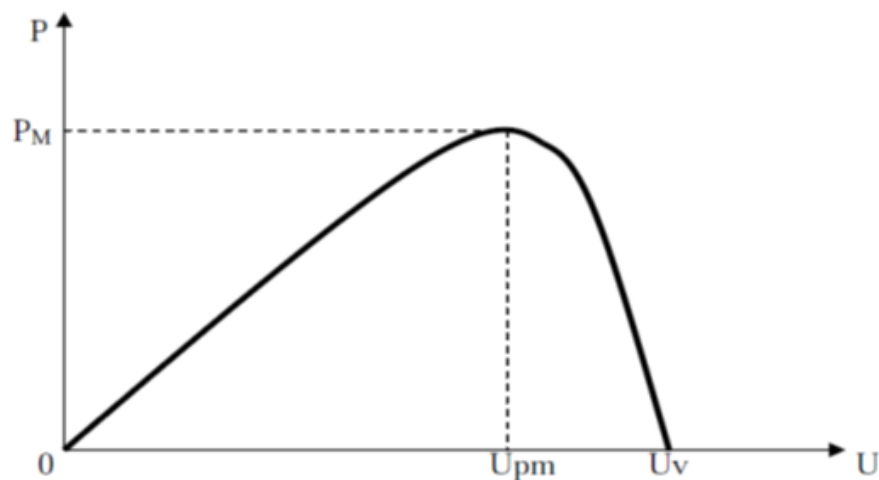
- Point de fonctionnement à vide : U_v pour $I = 0$ (A)
- Point de fonctionnement en court-circuit : I_{cc} pour $U = 0$ (V) Pour une cellule monocristalline de $10 \times 10 \text{ cm}$, les valeurs caractéristiques sont : $I_{cc} = 3$ (A) et $U_v = 0.57$ (V) ($G = 1000 \text{ W/m}^2$ et $T = 25^\circ \text{ C}$).

II.8.1-b Caractéristiques puissance/tension

La puissance fournie par la cellule a l'expression suivante :

$$P = U \cdot I \quad (\text{II.8})$$

Pour chaque point de la courbe précédente, on peut calculer la puissance P et tracer la courbe $P = f(U)$.

Figure II.19: Caractéristiques puissance / tension $P = f(U)$ [1]

La courbe ressemble à ceci : La courbe passe par la puissance maximale (PM).

La tension U_{pm} et le courant I_{pm} correspondant à cette puissance sont également repérables sur la courbe $I = f(U)$.

Pour une cellule monocristalline de $10 \times 10 \text{cm}$, les valeurs caractéristiques sont :

$$PM = 1.24W, U_{pm} = 0.45V, I_{pm} = 2.75A (G = 1000W/m^2 \text{ et } T = 25^\circ C) [1]$$

II.8.2 Fonctionnement idéal

Deux points de fonctionnement idéaux (CC et CO) sont à distinguer:

- (a) le courant de court-circuit I_{cc} , correspondant au courant débité par la cellule quand la tension a ses bornes est nul (en pratique, ce courant est très proche de la photo courant I_{ph}) ; il est proportionnel à l'énergie rayonnante re, c'est-à-dire l'éclairement (W/m^2).

A la température ambiante, la vitesse de circulation de l'air ambiant ; il est aussi une fonction directe de la succession des surfaces (série);

- (b) la tension du circuit U_{co} , correspondant à la tension qui apparait aux bornes de la cellule quand le courant débité est nul ; elle est fonction des caractéristiques de la jonction électronique et des ; pour l'augmenter, il suffit de monter plusieurs cellules en série. [2]

Exemple :

Les cellules photovoltaïques au silicium délivrent une tension U_{co} comprise entre 0.4 et $0.6V$ et un courant I_{cc} de l'ordre de $12mA/cm^2$ pour des conditions de test standard (STC). Pour une cellule solaire idéale, on obtient :

$$P_{maxid\acute{e}ale} = U_{co} \times I_{cc}$$

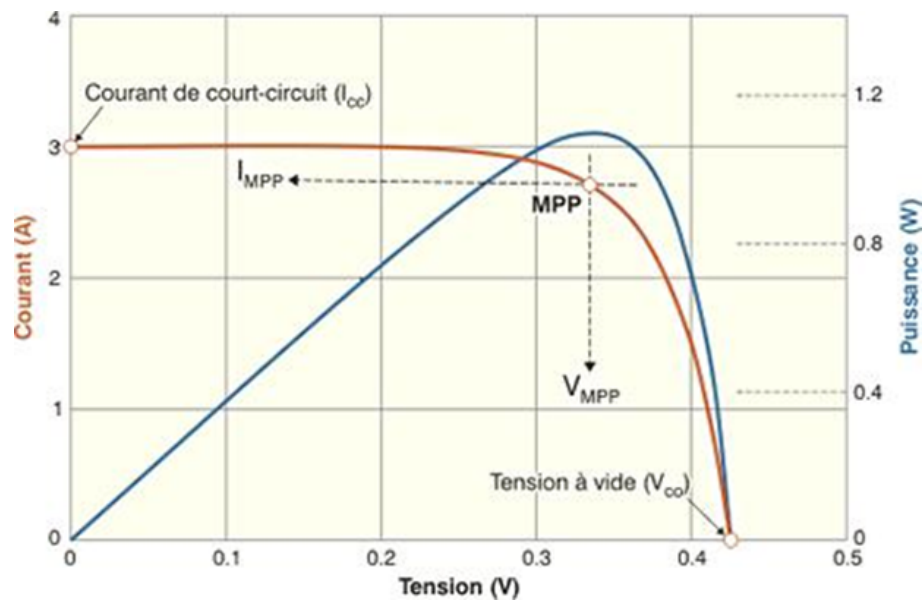


Figure II.20: puissance maximale sur une caractéristique courant - tension

II.8.3 Puissance-crête

Représente la puissance électrique maximale délivrée dans les conditions suivantes dites standard [2] :

- (a) ensoleillement de $1000W/m^2$;
- (b) température de $25^{\circ}C$;
- (c) spectre AM 1.5.

Comme le courant elle dépend directement de l'intensité de flux lumineux (figure II.21)

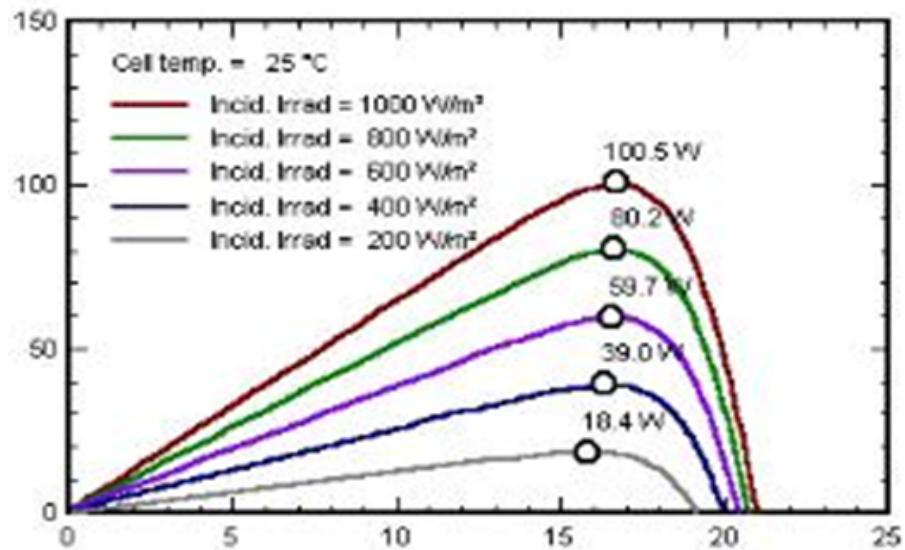


Figure II.21: courbes de puissances en fonction de la tension sous diverses intensités de rayonnement

P_m : puissance maximale ;

U_{co} : tension de circuit ouvert ;

I_{cc} : courant de court-circuit.

Il est compris entre 0 et 1 ou exprimé en pourcentage. Plus le rapport est proche de 1, meilleur est le rendement de la cellule.

En général, le facteur de forme pour un (assemblage de cellule) est compris entre 0,60 et 0,85 en raison des pertes inévitables (résistance et fables fuites de courant, etc.) [2].

II.8.4 Le facteur de forme FF

On appelle facteur de forme FF, le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule P_{max} , dans des conditions d'éclairement, de température et de vitesse de circulation de l'air ambiant donnés, et le produit du courant de court-circuit I_{cc} par la tension de circuit ouvert V_{co} (c'est à dire la puissance maximale d'une cellule idéale)[8] :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (\text{II.9})$$

$$FF = \frac{V_m \times I_m}{V_{co} \times I_{cc}} \quad (\text{II.10})$$

FF : Facteur de forme ;

P_{max} : Puissance maximale aux bornes de la cellule PV ;

V_{co} : Tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV.

II.8.5 Rendement d'une cellule

Le rendement, des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente. [2]

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF \times V_{co} \times I_{cc}}{P_{in}} \quad (\text{II.11})$$

P_{in} : la puissance incidente de la lumière est égale à la puissance solaire $P_{solaire}$ ($P_{solaire} = 100mW/cm^2$).

A température et éclairage constants, le rendement d'une cellule solaire dépend de la charge dans le circuit électrique. En circuit ouvert ($R_c = \infty, I = 0, V = V_{co}$) ou en court-circuit.

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

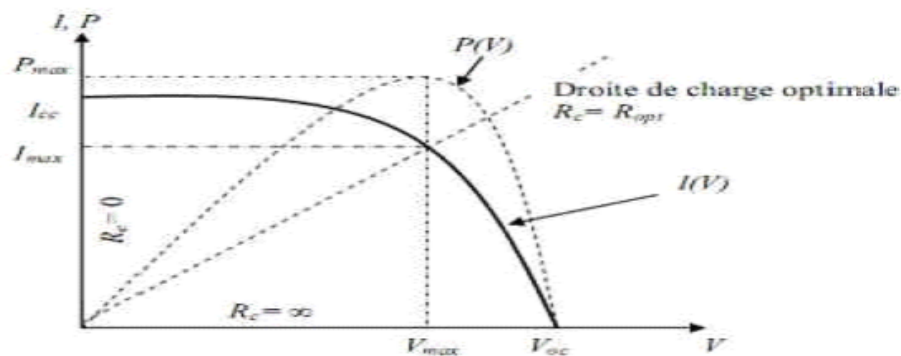


Figure II.22: Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule solaire.

II.9 Protections classiques d'un générateur photovoltaïque

Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage. Pour cela, deux types de protections sont classiquement utilisés dans les installations actuelles [2] :

- la protection en cas de connexion en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour).
- la protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la cha (diode by-pass) et éviter les points chauds [2].

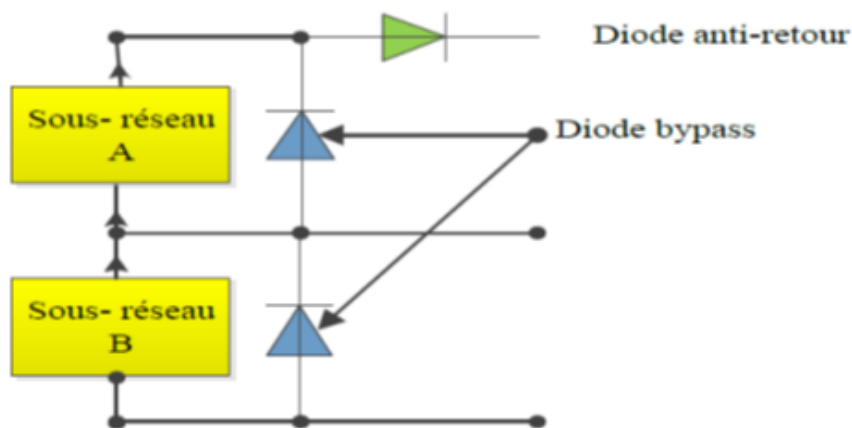


Figure II.23: Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour [2]

II.10 Les avantages et Les inconvénients de l'énergie Photovoltaïque [15]

II.10.1 Les avantages

- Le photovoltaïque est une énergie propre contrairement aux énergies fossiles, les cellules photovoltaïques n'émettent pas de CO_2 et ne contribuent donc pas au réchauffement climatique. De plus, gr aux matériaux recyclables qui composent les panneaux solaires, l'impact environnemental des cellules photovoltaïques est minime.
- Le photovoltaïque utilise une énergie renouvelable et inépuisable :
- Le soleil qui n'est heureusement pas prêt de s'en aller.
- Une énergie de moins en moins chère
- L'énergie photovoltaïque est au premier rang des énergies renouvelables avec un coût d'installation de panneaux solaires en forte baisse depuis une dizaine d'années.
- L'énergie que nous pouvons revendre.
- Nous permettant l'installation des panneaux photovoltaïques de produire localement de l'électricité durable. Nous pouvons alors choisir de revendre la totalité de

notre énergie ou opter pour l'autoconsommation et revendre le surplus de notre production. Dans les deux cas, la production nous permettra d'obtenir un revenu supplémentaire, à un prix garanti pendant 20 ans.

- Le PV est particulièrement attractif pour les sites urbains, en raison de sa petite taille et de son fonctionnement silencieux

II.10.2 Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque [16]

- Production intermittente liée à la présence du soleil (absent la nuit).
- La production est plus faible en hiver lorsque la consommation est plus élevée.
- L'électricité est encore très chère et nécessite des aides publiques pour devenir une énergie "compétitive".
- Si l'énergie doit être stockée par des batteries, le coût d'installation augmente.[1]
- Pollution à la fabrication.[1]

Malgré ces inconvénients, le marché du photovoltaïque continue de trouver des applications et de se développer. De plus, la technologie PV est en cours de maturation car les inconvénients peuvent être atténués, notamment en ce qui concerne les coûts de fabrication [17]. De nombreux appareils vendus sur le marché fonctionnent de 220 à 230 volts en alternance. Cependant, la puissance du générateur photovoltaïque est unidirectionnelle et a une basse tension ($< 30V$) elle doit donc être transférée via un onduleur [18].

II.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit les concepts de base pour les cellules photovoltaïques. On a étudié le principe de fonctionnement, les caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque, ainsi comment protéger un générateur photovoltaïque.

Chapter III

Les facteurs influençant sur les panneaux PV

SOMMAIRE

| | |
|---|----|
| III.1 INTRODUCTION | 37 |
| III.2 L'ORIENTATION | 37 |
| III.2.1 L'angle d'inclinaison (β) [15] | 37 |
| III.2.2 L'orientation et les vents | 38 |
| III.3 L'INFLUENCE DE L'ANGLE D'INCIDENCE | 40 |
| III.4 L'INFLUENCE DE L'ENSOLEILLEMENT ET DE LA TEMPÉRATURE SUR LE MODULE PV | 42 |
| III.4.1 Influence de la température | 42 |
| III.4.2 Influence de l'éclairement | 43 |
| III.5 L'EFFET DE LA RÉSISTANCE SUR LE MODULE PV | 44 |
| III.5.1 L'effet de la résistance parallèle (shunt) | 44 |
| III.5.2 L'effet de la résistance série | 45 |
| III.6 L'EFFET DE L'OMBRAGE SUR LE MODULE PV [25] | 47 |
| III.7 L'EFFET DE L'HUMIDITÉ SUR LE MODULE PV | 48 |
| III.8 CONCLUSION | 48 |

III.1 Introduction

Les panneaux solaires photovoltaïques sont disponibles en plusieurs puissances. En effet, plus le modèle est puissant, plus il réussira à répondre aux besoins en électricité.

Notez que tous les modèles ne promettent pas les mêmes performances. De plus, ce dernier peut être affecté par de nombreux paramètres, qui diffèrent dans la production d'énergie solaire. Dans ce chapitre nous parlerons en particulier des paramètres qui influencent sur la production des cellules photovoltaïques et nous pouvons les exprimer par les étapes suivantes :

- L'orientation et l'inclinaison
- L'influence de l'angle d'incidence
- L'influence de l'ensoleillement et de la température sur le module PV
- L'effet de la résistance sur le module PV
- L'effet d'ombrage
- L'effet de l'humidité

III.2 L'orientation

Choisir la bonne orientation des panneaux solaires est important. En fait, plus ils captent de lumière solaire, plus ils peuvent produire d'électricité. En choisissant la meilleure direction possible, nous améliorerons ainsi notre capacité à produire de l'électricité, et si nous inclinons ces panneaux solaires dans le bon sens, cela contribuera à augmenter la production d'énergie et ainsi profiter de plus en plus.[14]

III.2.1 L'angle d'inclinaison (β) [15]

C'est l'angle que fait la surface avec le plan horizontal. L'inclinaison de La surface est notée par la variable β , choisie telle que :

- $\beta = 0$ pour une surface horizontale
- $\beta = 90^\circ$ par rapport à un plan vertical

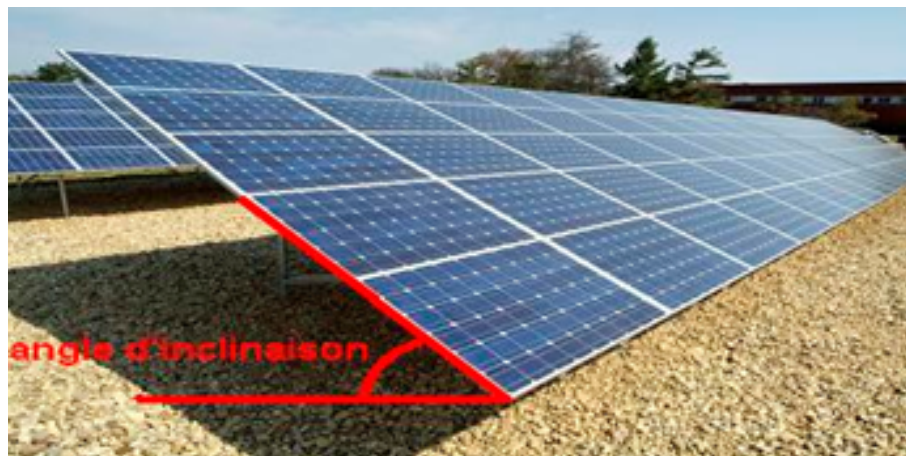


Figure III.1: angle d'inclinaison

III.2.2 L'orientation et les vents

III.2.2-a l'angle d'orientation

L'orientation est l'angle entre le panneau solaire et l'axe plein sud. A 0° , l'angle de direction correspond à une plaque tournée vers le sud ou 90° est ou ouest, 180° nord.

Pour une installation fixe, il faudra privilégier l'orientation des plaques vers le sud. C'est la direction qui reçoit le plus d'énergie solaire pendant la journée, toute l'année.

Si le toit n'est pas orienté plein sud, cela ne veut pas dire qu'on ne peut pas bénéficier d'une installation solaire rentable.

En effet, bien que l'orientation de la toiture soit un critère important, il est tout à fait possible d'installer les panneaux photovoltaïques vers l'est, le sud-est, l'ouest ou le sud-ouest.[16]

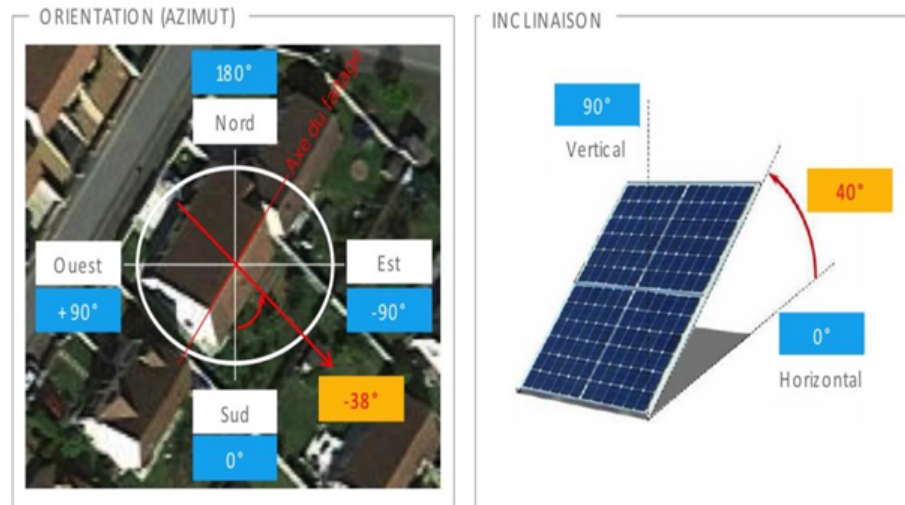


Figure III.2: Orientation et inclinaison

III.2.2-b La force du vent

La force du vent est causée par le soleil. Lorsque le soleil réchauffe une zone de la Terre, une partie de cette chaleur est absorbée par l'air autour de cette zone. A partir d'une certaine température, cet air chaud commence à monter très rapidement car le volume d'air chaud est plus léger que le même volume d'air froid. [17]

III.2.2-c Mesure de la vitesse du vent

La mesure de la vitesse du vent doit être effectuée à proximité de la plate-forme et à une hauteur correspondant à la hauteur des modules PV. La précision de l'instrument de mesure doit être meilleure que 0.5m/s pour des vitesses de vent inférieures à 5m/s et meilleure que 10 % pour des valeurs supérieures à 5m/s .

La direction des vents ainsi générés est généralement fortement modifiée par la force de Coriolis générée par la rotation de la Terre. [18]

III.2.2-d L'effet du vent sur le module PV

Les systèmes photovoltaïques à grande échelle sont souvent installés sur des toits plats.

La tolérance à la vitesse du vent est le principal critère de conception de tels systèmes. Cependant, lors de l'installation du système, les clous ne doivent pas être placés dans le toit plat afin de ne pas affecter l'étanchéité du toit. C'est pourquoi des structures de support de poutres horizontales sont utilisées pour supporter les forces latérales au bord du toit. D'autre part, des atouts. Les arbres de levage ne peuvent être compensés que par leur propre poids. Cependant, le système ne peut pas être équipé de "jambes en béton" de tout poids, sinon la structure du toit sera surchargée. En outre, les investissements

doivent être maintenus aussi bas que possible afin que l'électricité puisse être produite à des coûts compétitifs. Par conséquent, la tâche principale est de concevoir le système de manière à ce qu'il ne monte pas sous l'influence du vent et ne permette pas non plus au vent de changer la direction des panneaux.

Comme solution La charge de vent doit tenir compte de la vitesse maximale des vents fréquents et non des vitesses moyennes.[19]



Figure III.3: Système photovoltaïque sur le toit d'un bâtiment

III.3 l'influence de l'angle d'incidence

L'angle d'incidence correspond au plan formé entre le panneau photovoltaïque et les rayons lumineux (Figure III.4).

- **L'angle d'incidence optimal** : correspond à un angle de 90° . A chaque fois que cet angle diminue ou augmente, la surface mètre carré du panneau solaire exposée aux rayons lumineux diminue, donc partant de l'énergie des panneaux solaires, le rendement diminue également. [21]
- **L'angle d'incidence du soleil par rapport au plan incliné** : joue un rôle important dans la détermination de la quantité d'énergie transmise à travers le verre et absorbée par le panneau. Comme cet angle varie tout au long de la journée, les performances journalières varient simultanément.
- De plus, cet angle est fonction de différents angles qui déterminent la position du soleil, d'où la dépendance directe de l'énergie absorbée en fonction de l'angle d'incidence modifié qui permet de déterminer l'efficacité du capteur tout au long de la journée. [22]

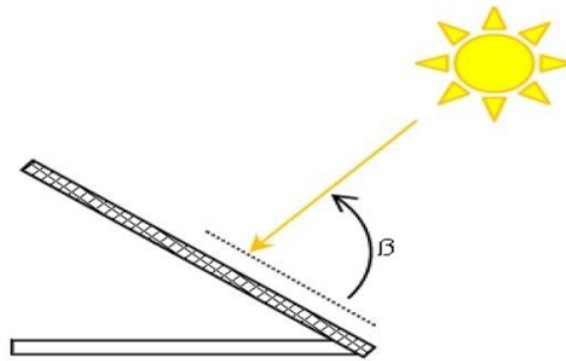


Figure III.4: Angle d'incidence sur un module photovoltaïque

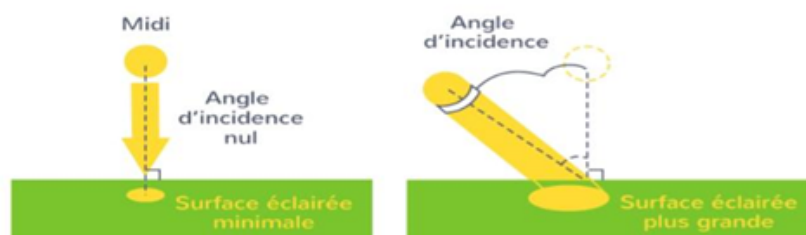


Figure III.5: angle d'incidence sur une surface

L'angle d'incidence a un rôle important dans le rendement des panneaux. Il est défini selon l'équation suivante : [23]

$$\eta = \sin \beta \times 100 \quad (\text{III.1})$$

Avec :

η : le rendement du panneau en % ;

β : l'angle d'incidence

Ainsi, les performances du panneau sont optimales lorsque les rayons du soleil arrivent perpendiculairement au panneau :

$$\eta = \sin 90 \times 100 = 100\%$$

Cependant, l'efficacité du panneau solaire est réduite de moitié lorsque l'angle d'incidence est de 30° , par exemple :

$$\eta = \sin 30 \times 100 = 50\%$$

Cette performance est due à l'orientation des panneaux solaires et non à la qualité du produit.

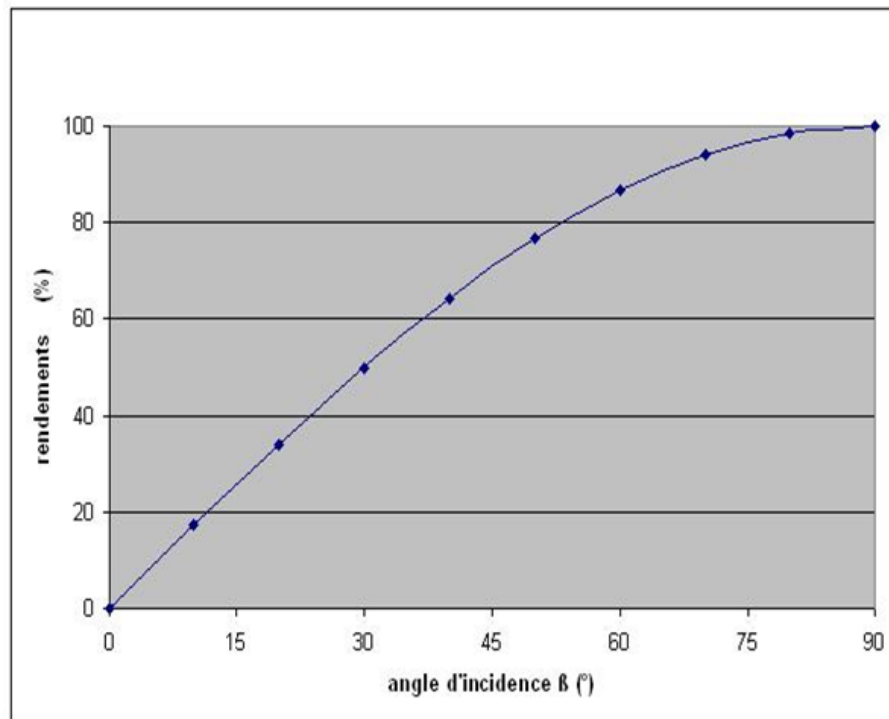


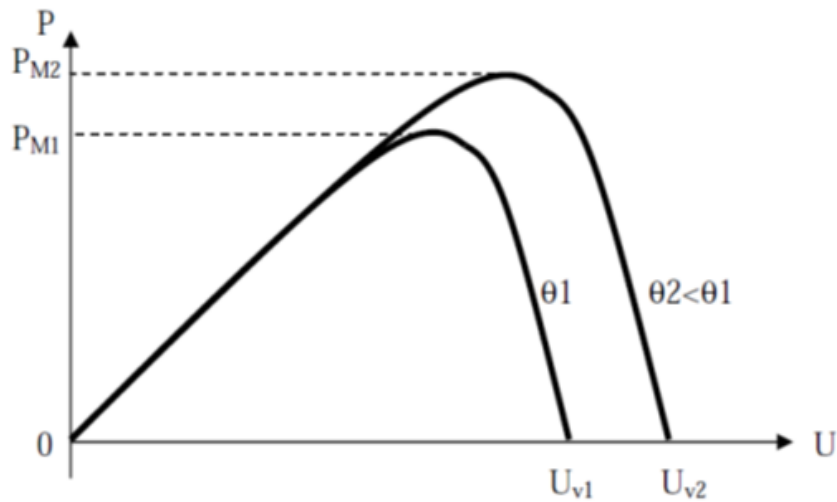
Figure III.6: Graphique représentatif du rendement en fonction de l'angle d'incidence

III.4 l'influence de l'ensoleillement et de la température sur le module PV

L'Algérie dispose d'environ 3200 heures d'ensoleillement par année, bénéficiant d'une situation climatique favorable à l'application des techniques solaires. La conception des installations efficaces et rentables sur la base des modules solaires est particulièrement importante. [23]

III.4.1 Influence de la température

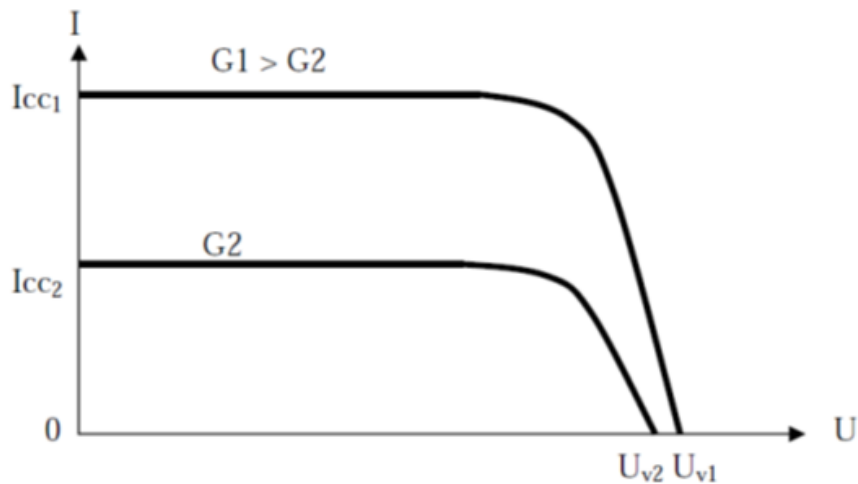
Les fortes chaleurs peuvent perturber le processus de conversion de la lumière en énergie. Plus la température des cellules photovoltaïques augmentent, plus la tension au sein du système photovoltaïque ne diminue. Par conséquent, les panneaux solaires perdent en puissance et produisent moins d'énergie. [24] Pour un éclairage fixe, les propriétés $I = f(U)$ et $P = f(U)$ varient avec la température de la cellule photovoltaïque :

Figure III.7: Influence de la température $I = f(U)$ et $P = f(U)$ [20]

On constate sur ces courbes que lorsque la température augmente, la tension à vide et la puissance maximale diminuent.

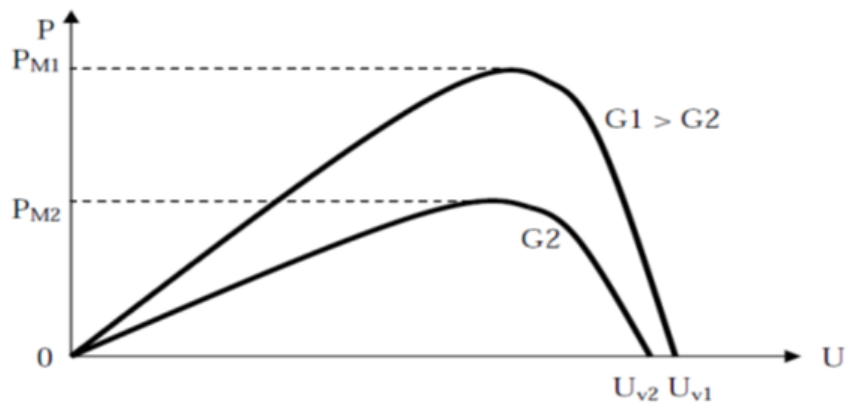
III.4.2 Influence de l'éclairement

A température constante, la propriété $I = f(U)$ dépend fortement de l'éclairement

Figure III.8: Influence de l'éclairement $I = f(U)$

Sur cette courbe, on remarque que le courant de court-circuit augmente avec l'augmentation de l'éclairement, alors que la tension en circuit ouvert ne change pas beaucoup.

A partir de ces courbes, on peut tracer la courbe de puissance $P = f(U)$.

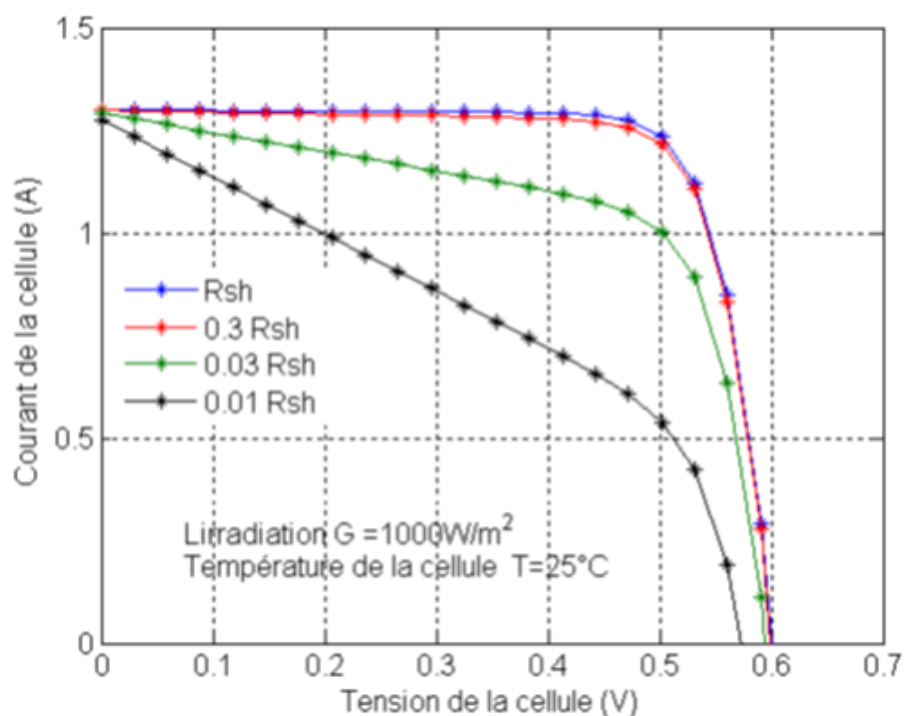
Figure III.9: Influence de l'éclairement $P = f(U)$ [19]

Sur ces courbes, on remarque que la puissance maximale fournie par la batterie augmente avec l'éclairement.

III.5 L'effet de la résistance sur le module PV

III.5.1 L'effet de la résistance parallèle (shunt)

Une résistance shunt est une résistance qui tient compte des fuites inévitables Courant développé entre les bornes d'une cellule solaire. En général, la résistance de shunt est très élevée [20], son effet est particulièrement prononcé dans la section contemporaine.

Figure III.10: L'influence de la résistance shunt (R_{sh}) sur la caractéristique I (V) [19].

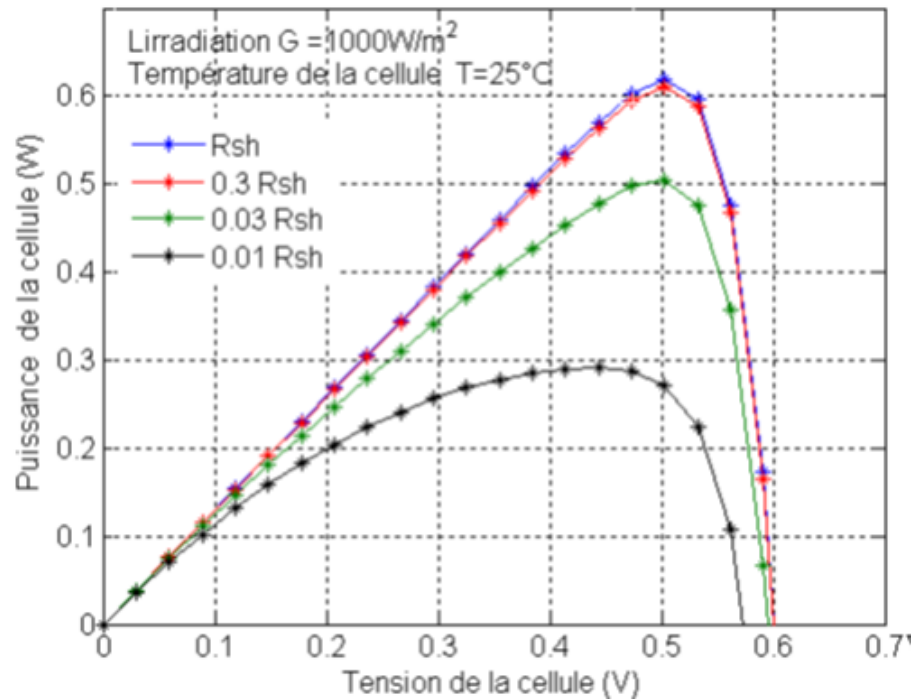


Figure III.11: L'influence de la résistance shunt (R_{sh}) sur la caractéristique P(V)

L'effet de la résistance parallèle (shunt) sur les caractéristiques courant-tension est reflété par une légère baisse de la tension en circuit ouvert et une augmentation de la pente de la courbe I-V de l'armoire dans la zone de fonctionnement correspondante est une source de courant.

En effet, en plus du courant continu, il faut soustraire du photo-courant diode, un courant supplémentaire qui varie linéairement avec la tension.

Cette puissance fournie par une cellule solaire varie avec sa résistance parallèle, qui est plus élevée. Plus la puissance fournie est élevée, plus la résistance est élevée.

III.5.2 L'effet de la résistance série

La figure (III.12) montre l'effet de la résistance série sur les caractéristiques I-V.

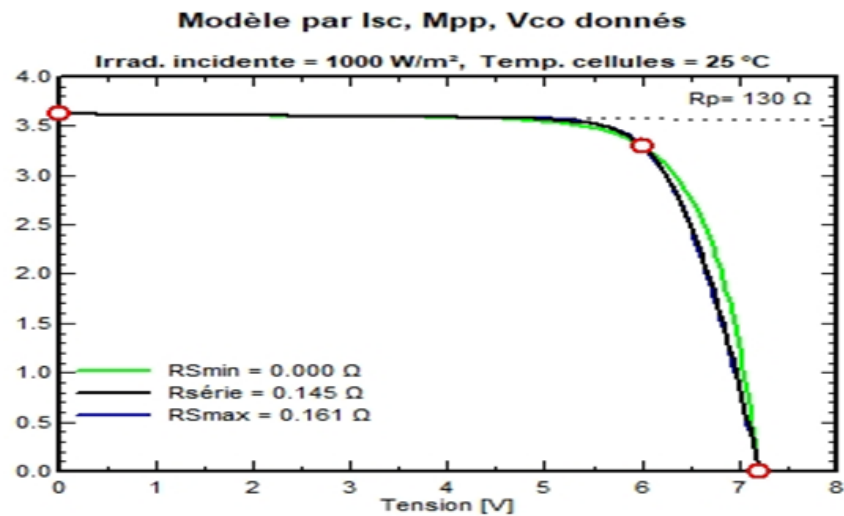


Figure III.12: Caractéristique I-V de module PV selon la température

La figure (III.13) montre l'effet de la résistance série sur les caractéristiques P-V à La batterie est utilisée comme générateur de tension constante.

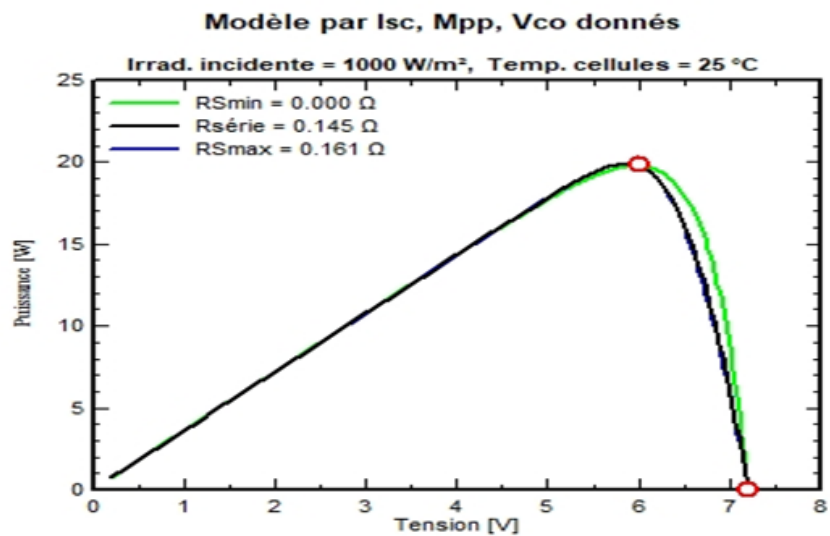


Figure III.13: Caractéristique I-V de module PV selon la température

La figure (III.14) montre un cas plus clair d'influence de la rstance se sur la caractstique PV.

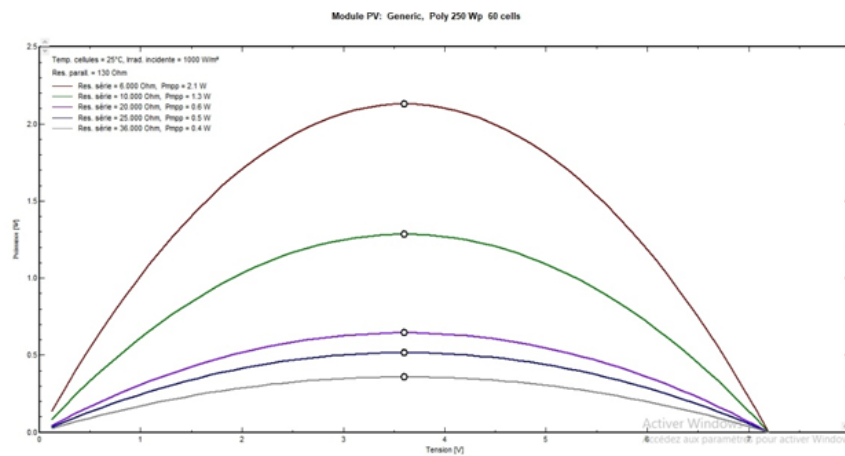


Figure III.14: l'influence de la rstance se sur la caractstique PV

III.6 l'effet de l'ombrage sur le module PV [25]

Un panneau photovoltaïque produit de l'électricité en interagissant avec la lumière du soleil. Plus la plaque est irradiée, plus elle produit d'électricité. Donc, toute ombre doit être évitée.

L'ombre signifie que le masque empêche les photons d'atteindre les cellules photovoltaïques. Si la cellule est à l'ombre, sa production actuelle se détériore.

L'ombre est aussi efficace par temps clair que par temps nuageux. Le nuage filtre la lumière et dévie les rayons du soleil dans plusieurs directions, on parle alors de rayonnement diffus. Les rayons directs sont beaucoup moins puissants. Un masque proche tel qu'une cheminée, un arbre, un bâtiment voisin, etc. bloque les photons des rayons directs.



Figure III.15: L'ombrage temporaire résulte de nuages

III.7 l'effet de l'humidité sur le module PV

L'Algérie est riche en zones humides qui jouent un rôle important dans les processus vitaux, mais en ce qui concerne l'énergie solaire, l'humidité affecte négativement le processus de la production.

Selon les scientifiques, l'air absorbe l'humidité, environ 7 % de plus par température. Alors que la chaleur peut réduire la résistance d'un panneau traditionnel, la corrosion due à l'humidité peut le détériorer et le rendre inefficace.[26]

III.8 Conclusion

L'Algérie a un climat très favorable à l'utilisation de l'énergie solaire. Les performances des panneaux solaires sont fortement influencées par les paramètres climatiques (rayonnement solaire, température, pression, humidité, vitesse du vent, précipitations, etc.). En effet, les panneaux solaires captent un maximum d'énergie lumineuse lorsqu'ils sont perpendiculaires aux rayons du soleil, mais l'angle d'incidence de ces rayons varie au cours de la journée et au cours des saisons. Encore une fois, plus le soleil est brillant, plus d'énergie est produite dans les cellules solaires, donc l'installation photovoltaïque est efficace. Plus la température est basse, plus la tension produite dans les cellules solaires est élevée et plus la puissance électrique est élevée.

Il est également affecté par la résistance, et son effet varie aussi d'une résistance à l'autre.

Parmi ces résistances, on trouve : la résistance série et la résistance parallèle (shunt).

Chapter IV

Etude de l'influence de l'inclinaison des panneaux (Tlemcen)

SOMMAIRE

| | |
|---|----|
| IV.1 INTRODUCTION | 50 |
| IV.2 LA SITUATION GÉOGRAPHIQUE DE TLEMCCEN [29] | 50 |
| IV.3 LE CLIMAT DE LA WILAYA DE TLEMCCEN [30] | 51 |
| IV.4 L'EMPLACEMENT ET LE CLIMAT DE CHETOUANE TLEMCCEN | 52 |
| IV.5 PARTIE EXPÉRIMENTALE | 53 |
| IV.5.1 Première expérience | 53 |
| IV.5.2 Deuxième expérience | 59 |
| IV.5.3 Résultats et Discussions | 60 |
| IV.6 PARTIE SIMULATION | 71 |
| IV.6.1 les étapes de simulation | 72 |
| IV.6.2 Interprétation | 76 |
| IV.7 CONCLUSION | 77 |

IV.1 Introduction

Vouloir utiliser l'énergie solaire est une excellente idée ! Mais comprendre comment fonctionnent les panneaux solaires et être en mesure de s'assurer que leur installation est la meilleure, c'est génial !

Par conséquent, savoir si l'endroit est adapté pour accueillir des panneaux solaires est très nécessaire, surtout connaître la meilleure inclinaison et la meilleure direction de ces panneaux aide à gagner plus d'énergie et donc à consommer plus contrairement à l'été. Donc on va chercher à avoir une inclinaison convenable pour avoir un meilleur rendement [28] .

Dans ce chapitre, nous allons voir l'effet de l'inclinaison des panneaux solaires en faisant en premier lieu une expérimentation en utilisant un panneau photovoltaïque alimentant une charge résistive et en second lieu une simulation en utilisant le logiciel PVsys 7 · 1.

IV.2 La situation géographique de Tlemcen [29]

L'état de Tlemcen est situé sur la côte nord-ouest du pays, avec un littoral de 120 km. C'est un état frontalier avec le Maroc d'une superficie de $9017.69km^2$.

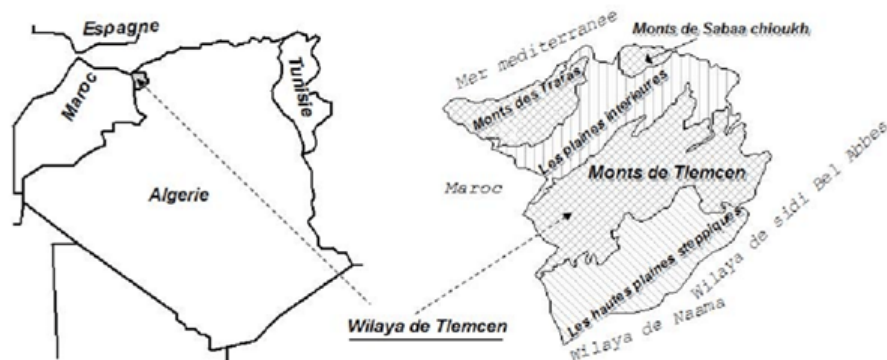


Figure IV.1: situation géographique de la wilaya de Tlemcen

Table IV.1: Relation entre la latitude et l'inclinaison des panneaux pour une utilisation annuelle

| | |
|--------------------------------------|---|
| Coordonnées géographiques de Tlemcen | Latitude: 34.89, Longitude: -1.32 34°53'24" Nord, 1°19'12" Ouest |
| Superficie de Tlemcen | 906 100 hectares 9061,00km ² |
| Altitude de Tlemcen | 715 m |

IV.3 le climat de La wilaya de Tlemcen [30]

Le climat de Tlemcen est un climat méditerranéen de transition, avec quelques caractéristiques continentales, semi-aride. L'hiver est très froid et l'été est très chaud. De plus, en hiver, la ville connaît des vagues de froid et des chutes de neige.

La température moyenne à Tlemcen est de 11.1°C , le mois le plus froid (janvier), tandis que la température moyenne du mois le plus chaud (août) est de 27.0°C . Ci-dessous, nous trouvons les températures moyennes pendant plusieurs années consécutives.

Table IV.2: Relation entre la latitude et l'inclinaison des panneaux pour une utilisation annuelle

| Mois | Min ($^{\circ}\text{C}$) | Max ($^{\circ}\text{C}$) | Moyenne ($^{\circ}\text{C}$) |
|-----------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| Janvier | 5 | 17 | 11.1 |
| Février | 6 | 18 | 11.9 |
| Mars | 8 | 20 | 14 |
| Avril | 10 | 22 | 15.9 |
| Mai | 13 | 26 | 19.2 |
| Juin | 16 | 30 | 23 |
| Juillet | 20 | 33 | 26.3 |
| Août | 20 | 34 | 27 |
| Septembre | 17 | 30 | 23.7 |
| Octobre | 14 | 26 | 20.1 |
| Novembre | 10 | 21 | 15.3 |
| Décembre | 7 | 18 | 12.3 |
| An | 12.1 | 24.6 | 18.3 |

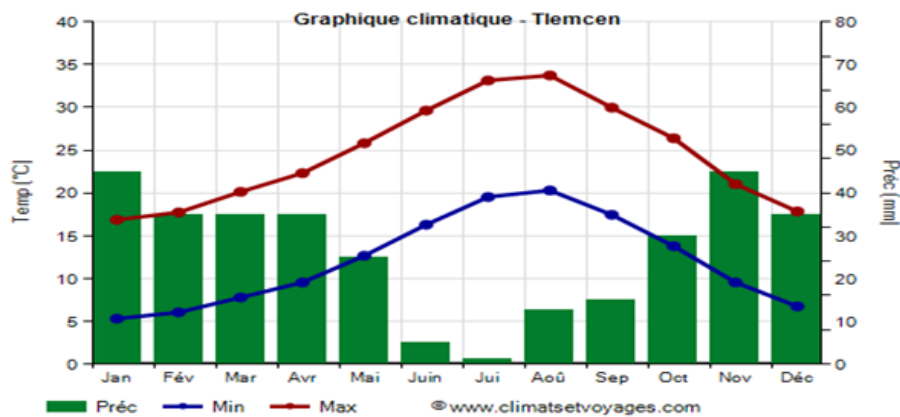


Figure IV.2: graphique climatique de Tlemcen 1991-2020

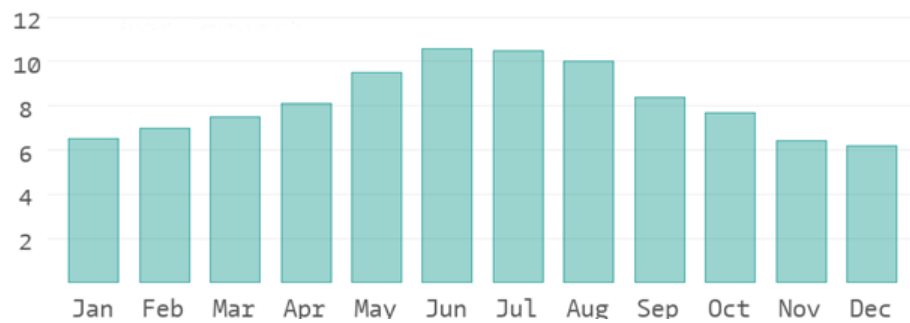


Figure IV.3: heures d'ensoleillement/ jour (Tlemcen)

IV.4 l'emplacement et le climat de Chetouane Tlemcen

étant donné que ce chapitre contient des travaux pratiques à l'Université d'Abou Baker Belkaid à Chetouane, située à Tlemcen, comme informations qui nous aident à bien placer notre panneau solaire, nous avons fait des recherches sur l'emplacement et le climat liés à Chetouane en particulier, et on est arrivé à dire que cette dernière est une commune de la wilaya de Tlemcen en Algérie, a un climat méditerranéen chaud avec des étés secs (Csa) selon la classification de Köppen-Geiger.[4]

Géographiquement [31] :

Son altitude : 34.9203

Longitude : -1.28977

34°55'13" Nord, 1°17'23" Ouest

Superficie de Chetouane : 10 500 hectares , 105km²

Altitude de Chetouane : 574 m

Climat de Chetouane : Climat semi-aride sec et froid (Classification de Köppen : BSk)



Figure IV.4: localité de Chetouane Tlemcen selon Google earth

IV.5 Partie Expérimentale

IV.5.1 Première expérience

Pour valider notre travail, des expériences sont inévitables. Alors pour vous nous avons décidé de faire cette expérience à l'extérieur de la faculté pour connaître la meilleure inclinaison des panneaux solaires par rapport au sol à Tlemcen exactement à Chetouane.

Cette l'expérience cherche à montrer la meilleure inclinaison du pupitre du panneau par rapport au sol. 6 informations sont relevées correspondant à six angles : 40° , 35° , 32° , 30° , 25° , 20° . La valeur de l'intensité et de la tension varie quand on bouge les cellules photovoltaïques.

On installe une direction au sud parce que la meilleure orientation est celle du sud car la puissance électrique est de 0.20W. Cette dernière est donc celle à choisir lors d'une installation pour obtenir le meilleur rendement électrique, car les rayons du soleil frappent pendant une période d'environ de 8h (11h à 17h) de plein face les panneaux solaires orientés au sud.

Pour une meilleure réussite de l'expérience, la période choisie est onze heures du matin car c'est le moment où le soleil est le plus haut dans le ciel.

Le but de cette expérience est la détermination de la meilleure inclinaison à Tlemcen.

Matériel nécessaire à l'expérience :

- un panneau photovoltaïques de type $T - 60WJ - 30WF - 50W$

Figure IV.5: panneau photovoltaïque de type $T - 60WJ - 30WF - 50W$ Table IV.3: Caractéristiques du module solaire $T - 60WJ - 30WF - 50W$

| Caractéristique électrique | |
|---------------------------------------|------------------|
| Puissance maximale $P_{max}(W_c)$ | 22W |
| Courant de court-circuit $I_{cc}(A)$ | 3.62A |
| Tension en circuit ouvert $V_{oc}(V)$ | 7.2V |
| Courant Optimum $I_{op}(A)$ | 3.3A |
| Tension Optimum $V_{op}(V)$ | 6V |
| Caractéristique mécanique | |
| Puissance tolérance | +/- 3% |
| Dimensions | 340 × 350 × 17mm |

- Deux appareils de mesure (voltmètre et ampèremètre).
- Des câbles électriques.
- 2 rhéostats de 25Ω et 11Ω

Figure IV.6: Rhéostat de 25Ω

Figure IV.7: Rhéostat de 11 Ω

- Un pupitre servant de repose accessoire et permettant de mieux visualiser.
- Un système permettant de placer le pupitre au bon angle d'inclinaison (boussole) à l'aide d'un rapporteur et d'un niveau.

Nous avons réalisé le montage suivant et on expose alors le panneau photovoltaïque à la lumière :



Figure IV.8: Montage réalisé lors de l'expérience

IV.5.1-a Pupitre incliné à 40° par rapport au sol

La première inclinaison relevée est celle de 40°, l'intensité est de 1.24 A et la tension de 6.1 V .ces deux facteurs nous donnent une puissance électrique de 7.56 W et un rendement de $7.56/22 = 0.343W/m^2$ soit 34.3%.



Figure IV.9: Inclinaison de 40°

IV.5.1-b Pupitre incliné à 35° par rapport au sol

La second inclinaison relevée est celle de 35°, l'intensité est de 1.23 A et la tension de 6.2V .ces deux facteurs nous donnent une puissance électrique de 7.62 W et un rendement de $7.62/22 = 0.346W/m^2$ soit 34.61 %.

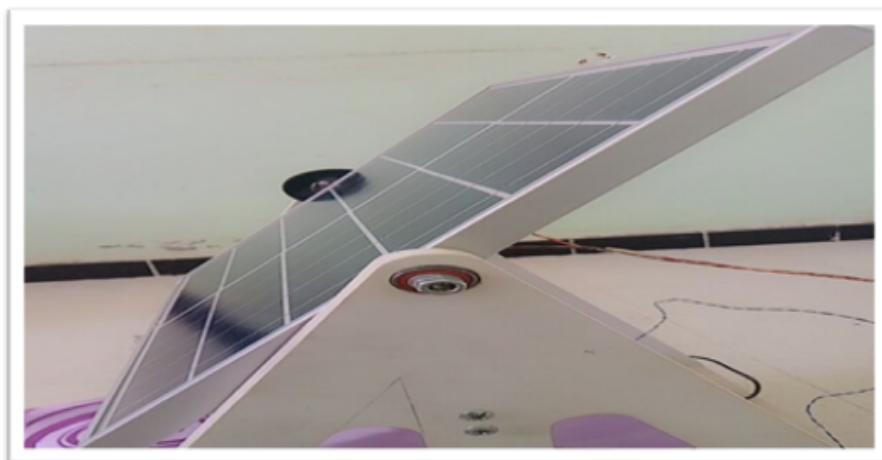


Figure IV.10: Inclinaison de 35°

IV.5.1-c Pupitre incliné à 32° par rapport au sol

La troisième inclinaison relevée est celle de 32°, l'intensité est de 1.24 A et la tension de 6.3 V. Ces deux facteurs nous donnent une puissance électrique de 7.81 W et un rendement de $7.81/22 = 0.355W/m^2$ soit 35.5 %.

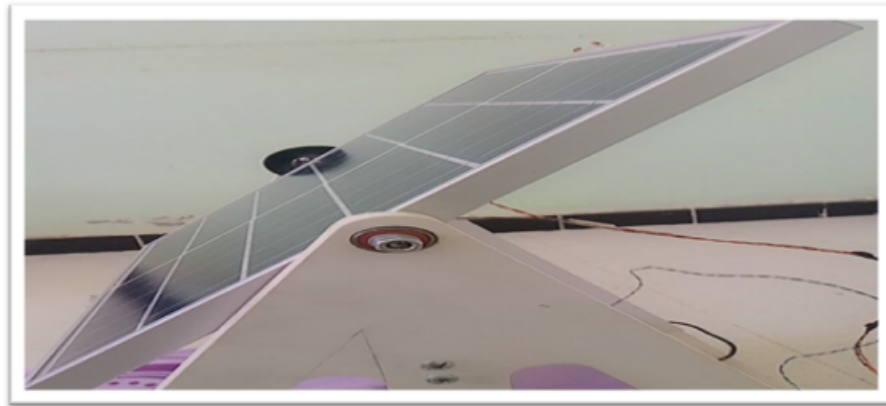


Figure IV.11: Inclinaison de 32°

IV.5.1-d Pupitre incliné à 30° par rapport au sol

Inclinaison numéro 4 est de 30°, l'intensité est de 1.28 A et la tension de 6.4 V. Ces deux facteurs nous donnent une puissance électrique de 8.19 W et un rendement de $8.19/22 = 0.372W/m^2$ soit 37.2 %.



Figure IV.12: Inclinaison de 30°

IV.5.1-e Pupitre incliné à 25° par rapport au sol

Les panneaux photovoltaïques est ensuite incliné 25° par rapport a sol, l'intensité est de 1.28 A et la tension de 6.2 V. Ces deux facteurs nous donnent une puissance électrique de 7.93W et un rendement de $7.93/22 = 0.360W/m^2$ soit 36.0 %.

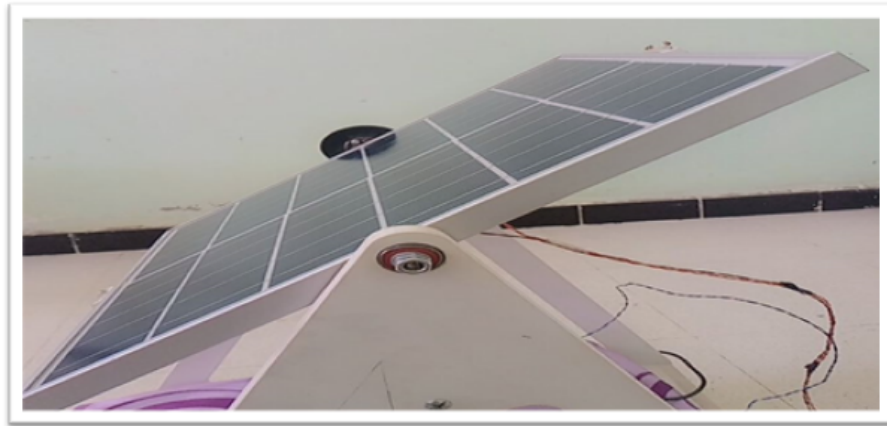


Figure IV.13: Inclinaison de 25°

IV.5.1-f Pupitre incliné à 20° par rapport au sol

La dernière inclinaison relevée est celle de 20°, l'intensité est de 1.29A et la tension de 6.5 W .ces deux facteurs nous donnent une puissance électrique de 8.35 W et un rendement de $8.35/22 = 0.381W/m^2$ soit 38.1 %.

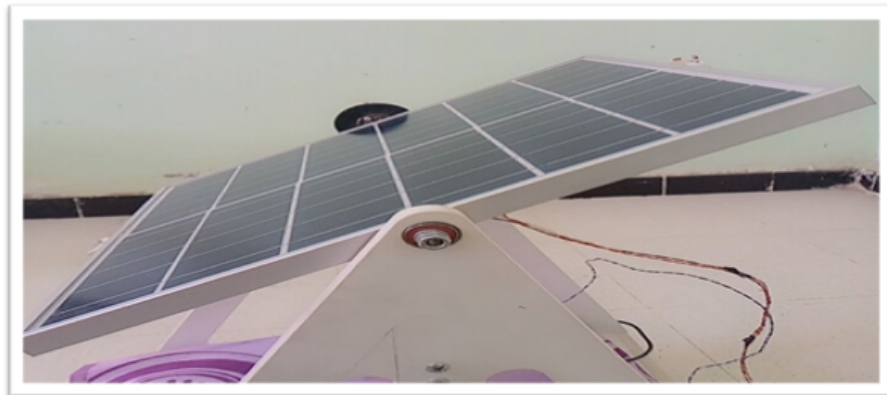


Figure IV.14: Inclinaison de 20°

Les six résultats sont comparés dans un tableau puis dans un graphique :

Table IV.4: les résultats de l'expérience

| Angle d'inclinaison | Intensité (A) | Tension (V) | Puissance électrique (W) | Rendement module (W/m^2) |
|---------------------|---------------|-------------|--------------------------|------------------------------|
| 20° | 1.29 | 6.5 | 8.35 | 3.81 |
| 25° | 1.28 | 6.2 | 7.93 | 3.60 |
| 30° | 1.28 | 6.4 | 8.19 | 3.72 |
| 32° | 1.24 | 6.3 | 7.81 | 3.55 |
| 35° | 1.23 | 6.2 | 7.62 | 3.46 |
| 40° | 1.24 | 6.1 | 7.56 | 3.41 |

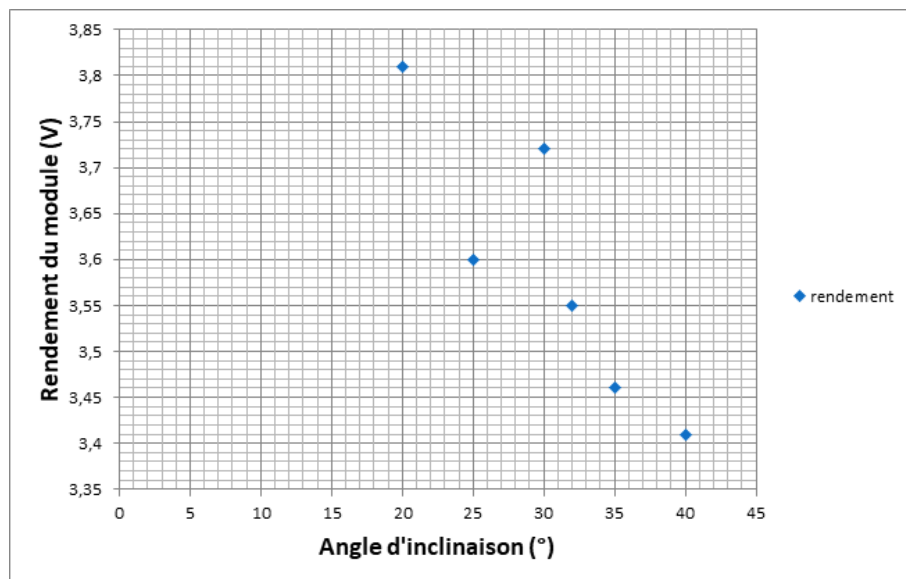


Figure IV.15: Le rendement en fonction de l'angle d'inclinaison

D'après le graphique et le tableau nous sommes amenés à penser que la meilleur inclinaison, pour l'obtention d'un rendement optimum, à Tlemcen et exactement a chetouan est de 20° par rapport au sol car le module, en cette position, produit 6.5V.

IV.5.2 Deuxième expérience

Pour vérifier plus et bien précise que 20° est la meilleure inclinaison, on refait l'expérience, mais on fait plusieurs mesures de tension et de courant et on calcule la puissance et le rendement. On réalise la même expérience avec le même matériel.



Figure IV.16: Montage réalisé lors de l'expérience

IV.5.3 Résultats et Discussions

(a) Inclinaison à 40° :

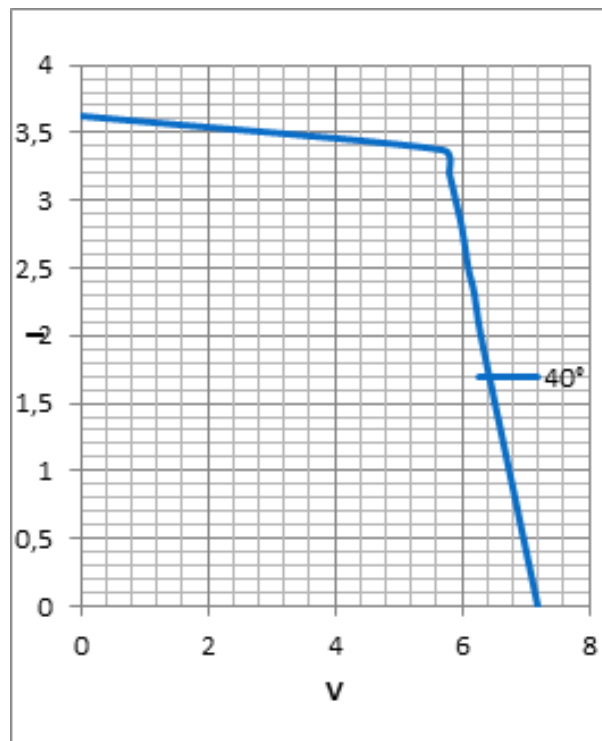
Figure IV.17: IV pour 40°



Figure IV.18: PV pour 40°

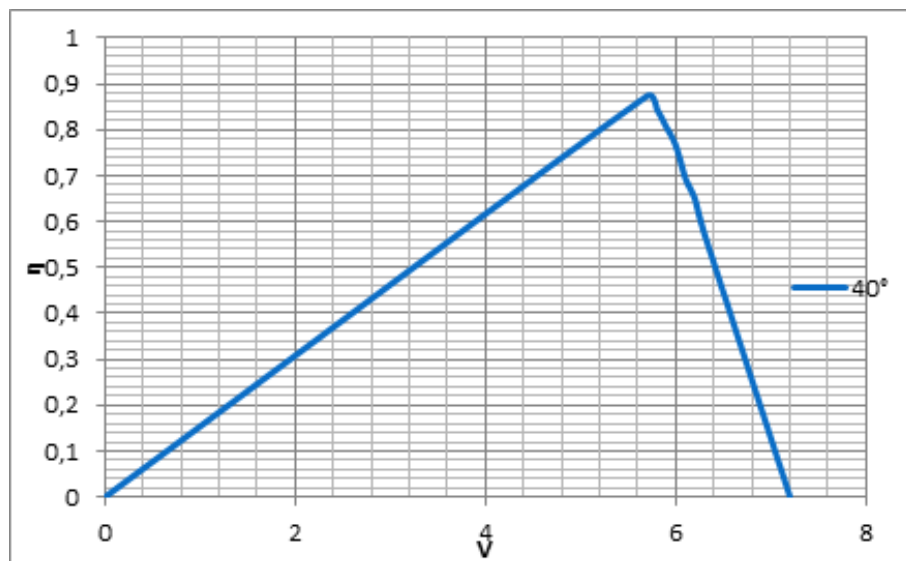


Figure IV.19: Le rendement en fonction de la tension pour 40°

La première valeur de courant 3.62 A est la valeur de court-circuit des panneaux solaires, et elle ne doit pas être dépassée afin de préserver le panneau solaire.

On remarque une diminution progressive de la valeur du courant électrique au fur et à mesure que la valeur de la tension électrique augmente jusqu'à ce qu'elle soit absente à 7.2 V (circuit ouvert).

On remarque que la puissance augmente pour atteindre 19.2 W qui représente la valeur maximale obtenue pour une inclinaison 40° puis elle diminue jusqu'à ce qu'elle s'annule.

Alors que la variation du rendement pour la même inclinaison augmente jusqu'à une valeur de 87.2 % et puis ça diminue. Le rendement suit la puissance parce que $P = U \times I$ et le rendement $\eta = P_u / P_{\text{panneau}}$

(b) **Inclinaison à 35° :**

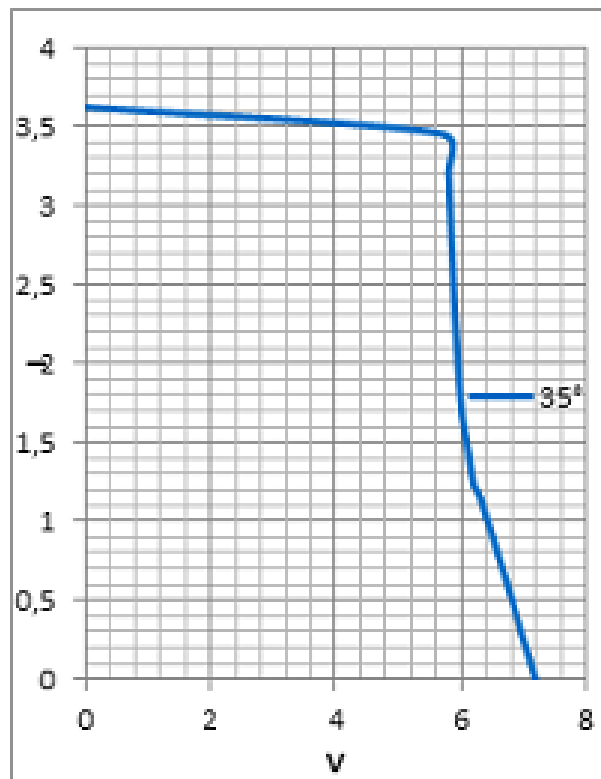


Figure IV.20: IV à 35°

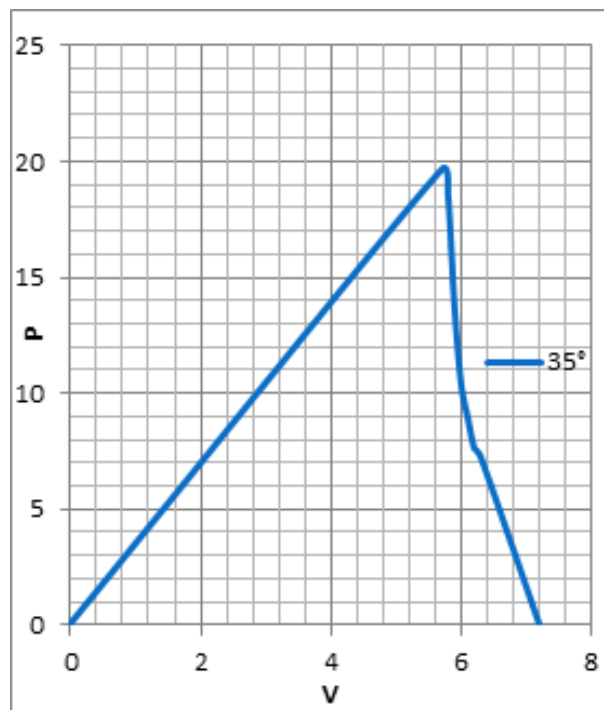


Figure IV.21: PV pour 35°

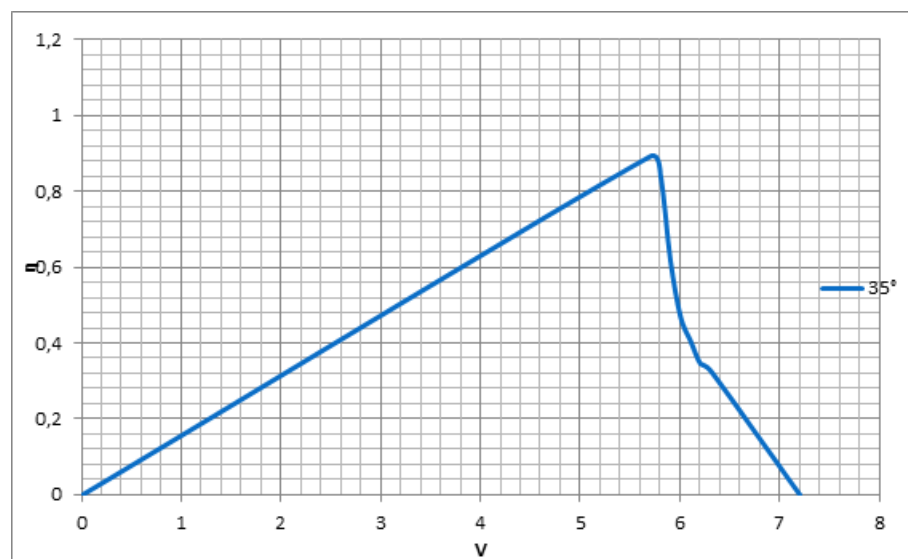


Figure IV.22: Le rendement en fonction de la tension pour 35°

(c) **Inclinaison à 32°:**

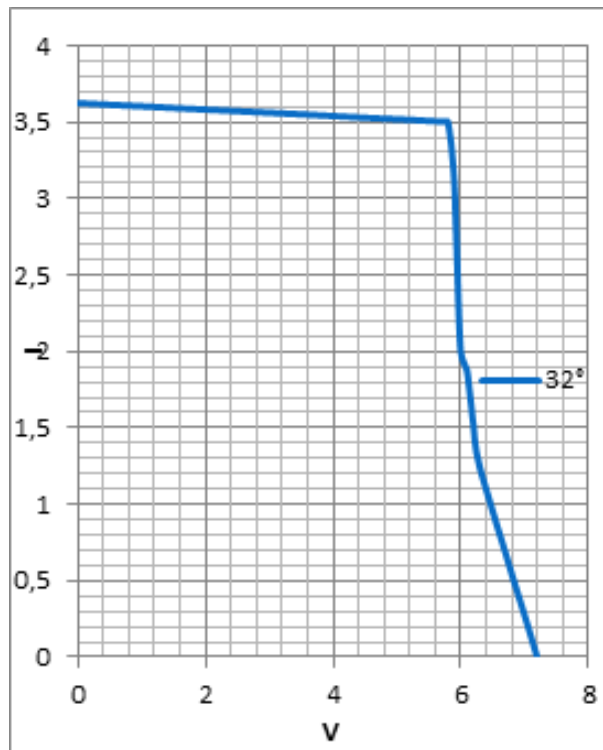


Figure IV.23: IV pour 32°

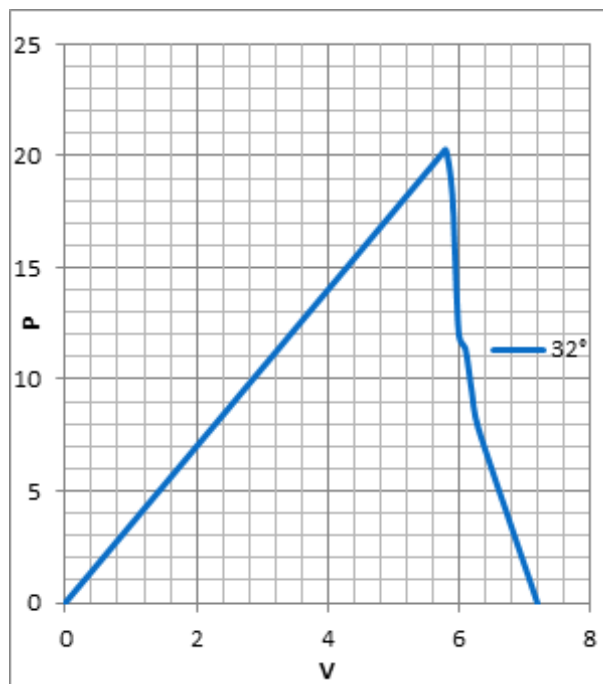


Figure IV.24: PV pour 32°

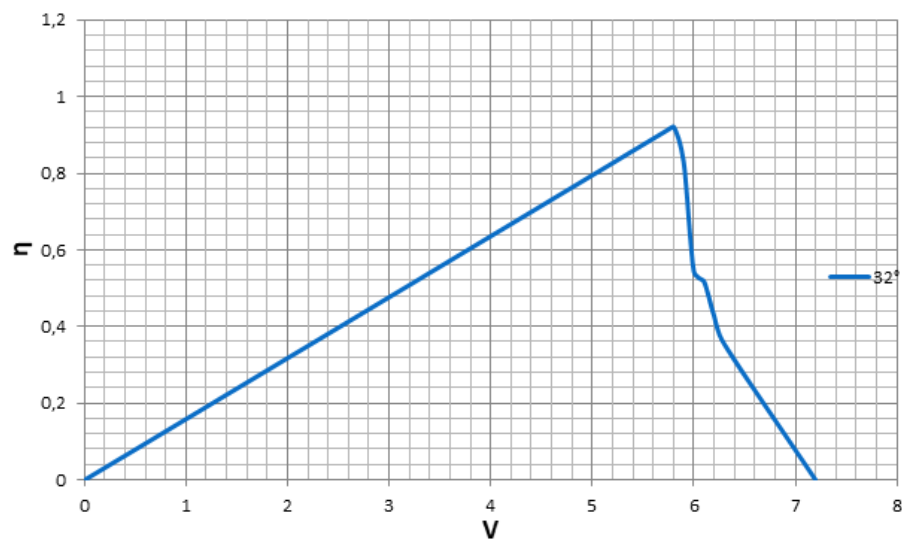


Figure IV.25: Le rendement en fonction de la tension pour 32°

On constate une diminution de la valeur du courant électrique à partir 3.5A jusqu'à ce qu'il soit nul, tandis que la valeur de la tension augmente jusqu'à atteindre 7.2V.

Pour l'inclinaison 32° , on a constaté que la puissance augmente jusqu'à la valeur 19.95 W et après elle diminue parce que la tension augmente jusqu'à atteindre la valeur du circuit ouvert, alors que le rendement pour la même inclinaison n'a pas dépassé la valeur 90.6 %.

(d) **Inclinaison à 30° :**

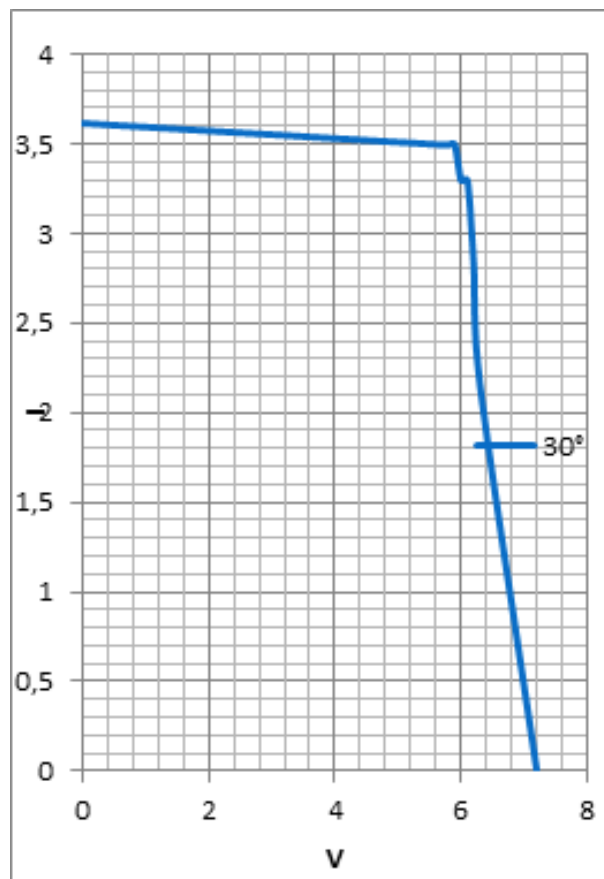


Figure IV.26: IV pour 30°

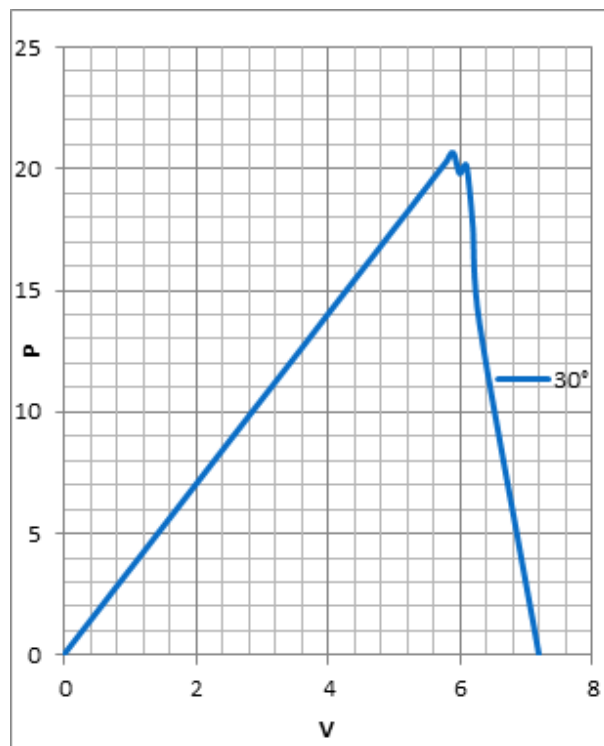


Figure IV.27: PV pour 30°

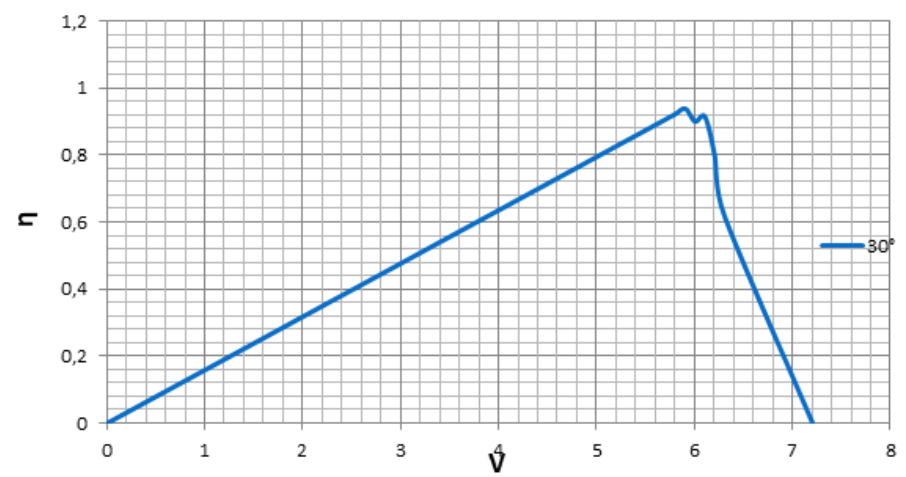


Figure IV.28: Le rendement en fonction de la tension pour 30°

(e) **Inclinaison à 25°:**

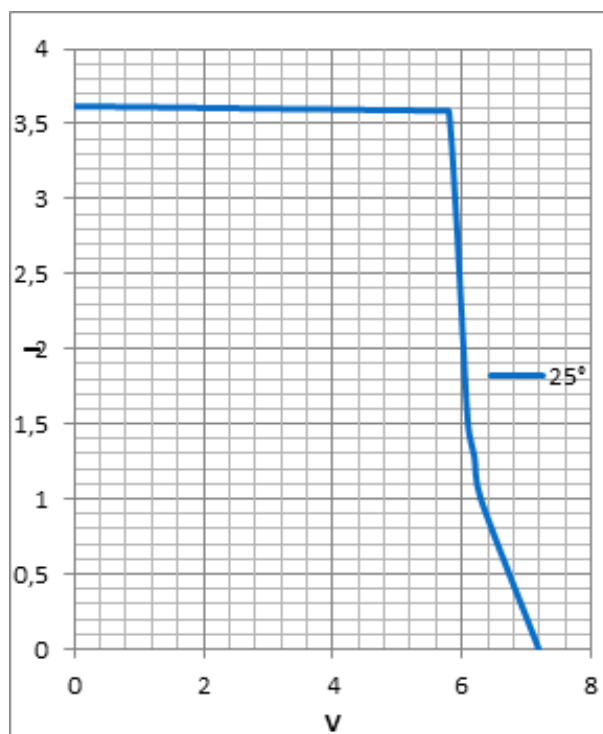


Figure IV.29: IV pour 25°

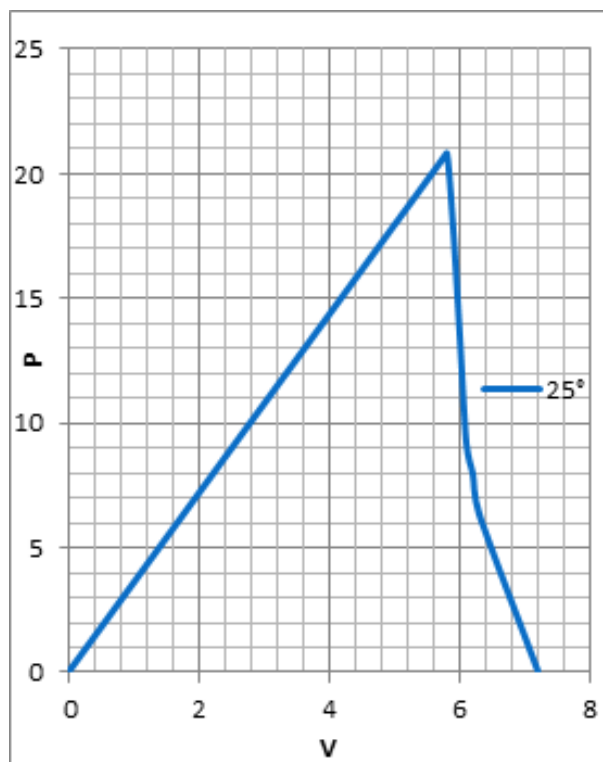


Figure IV.30: PV pour 25°

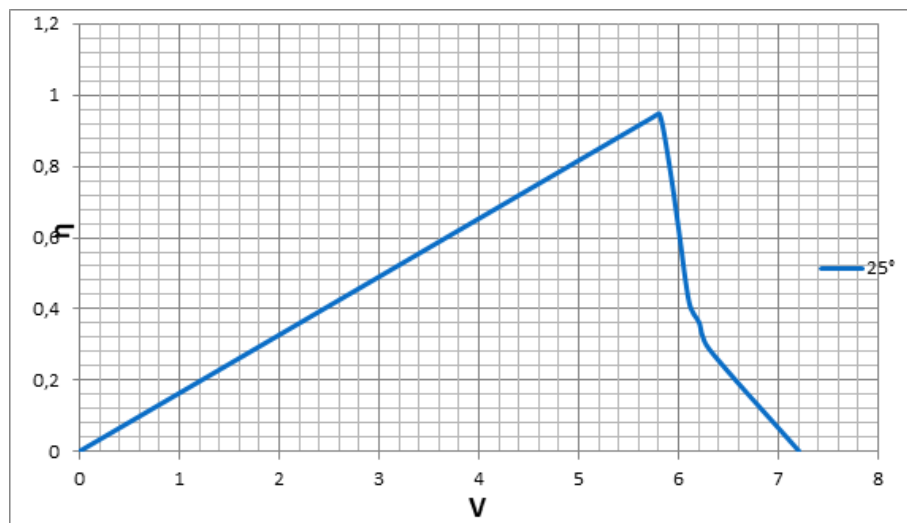


Figure IV.31: Le rendement en fonction de la tension pour 25°

On remarque une stabilité temporaire du courant électrique à une valeur 3.59 A avec une légère augmentation de tension puis une diminution progressive du courant jusqu'à ce qu'il s'annule à une valeur de tension de 7.2V et cela est dû à une augmentation de la résistance.

On remarque que la puissance augmente pour atteindre la valeur 20.82 W, cette valeur présente la valeur maximale obtenue pour une inclinaison 25° alors que la variation du rendement pour la même inclinaison augmente jusqu' à une valeur de 94.6 %.

(f) **Inclinaison à 20° :**

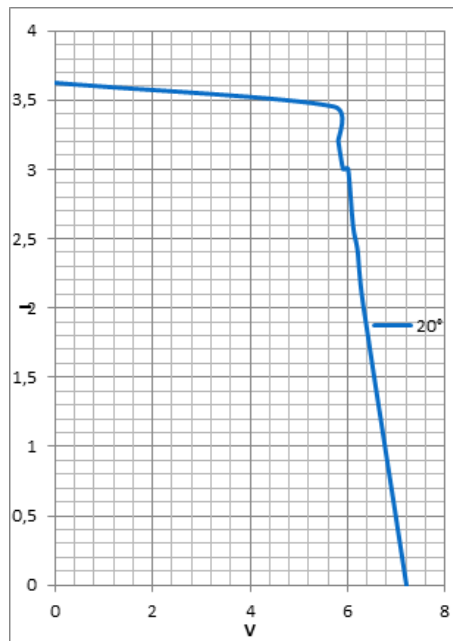
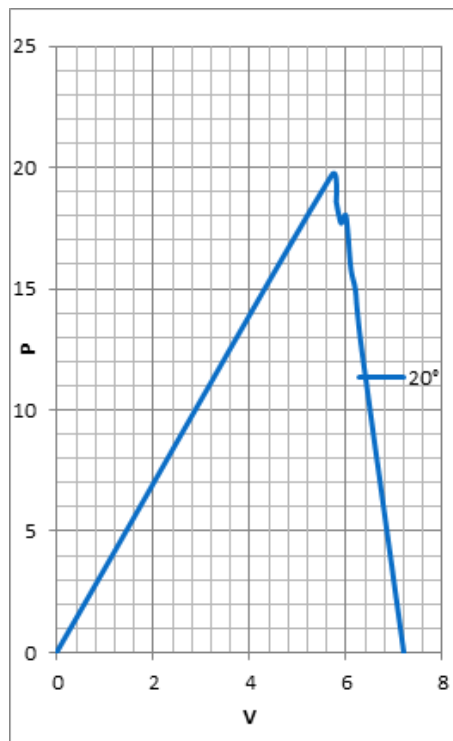
Figure IV.32: IV pour 20° 

Figure IV.33: Montage réalisé lors de l'expérience

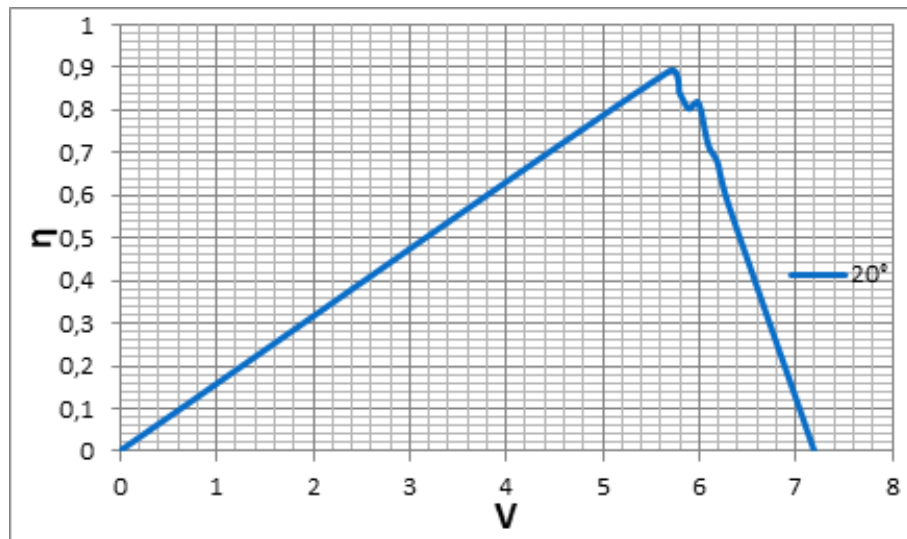


Figure IV.34: PV pour 20°

Les résultats obtenus pour une pente de 20° sont les meilleurs compte tenu des autres valeurs car le courant et la tension ont atteint la valeur la plus élevée qui est 5.7 V et 3.45 A

La puissance et le rendement sont les meilleurs où ils ont atteint 19.66W et 89.36 %.

Comme c'est l'inclinaison idéale du panneau solaire, le panneau solaire aura la meilleure intensité d'éclairage.

IV.6 Partie simulation

PV SYST est un logiciel de mise à l'échelle des panneaux solaires qui fournit diverses informations telles que le rendement énergétique, le coût d'irradiation et d'installation, la surface requise ou la production d'énergie annuelle et permet également de modifier l'inclinaison des panneaux pour étudier leur importance. Le mode avancé nous permet d'obtenir plus d'informations pour une étude très complète.

Il est devenu un outil important pour l'industrie photovoltaïque car :

- Il Gère les systèmes photovoltaïques dans toutes leurs complexités
- Mise à jour continue : tente de suivre le rythme du développement de la technologie
- Reconnu pour sa précision, et utilisé pour sa rentabilité
- Base de données surveillée (modules PV et transformateurs), accès aux bases de données météo

- Dispense de services annexes (information des utilisateurs, formation, etc.)

IV.6.1 les étapes de simulation

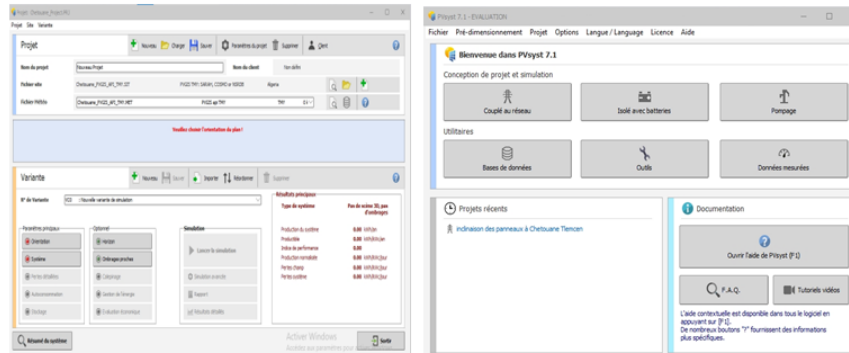


Figure IV.35: logiciel PVsys7.1

- (a) Nous déterminons d'abord l'emplacement géographique de l'installation (Chetouane Tlemcen) comme indiqué sur la figure IV.35 ci-dessous. Vient ensuite la section des résultats où l'on choisit les données qui nous intéressent.

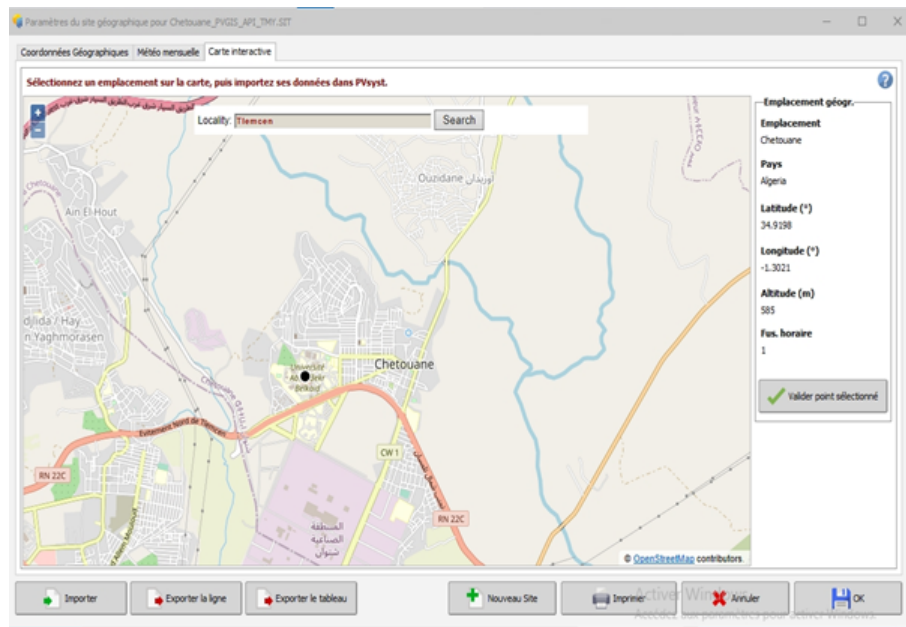


Figure IV.36: Site géographique pour $Chetouane_{PVGIS_{API}}$

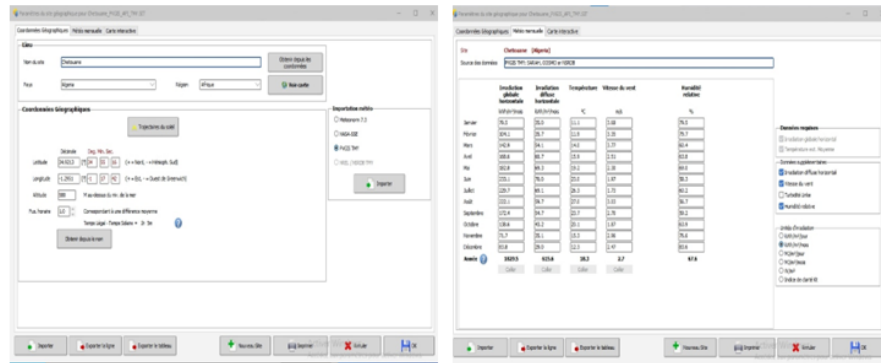


Figure IV.37: paramètre du site géographique pour $Chetouane_{PVGIS_{API}}$

- (b) On saisit les données liées à l'installation en appuyant sur le bouton d'orientation qui nous permet de changer l'inclinaison et la direction et permet de trouver la position optimale. On peut choisir l'optimisation en fonction de l'année entière, de l'hiver ou de l'été seul.

Notre objectif spécifique est de changer l'inclinaison avec fixation d'orientation vers le sud pour étudier les changements d'énergie (traçage de graphe PV et IV). Figure IV.37

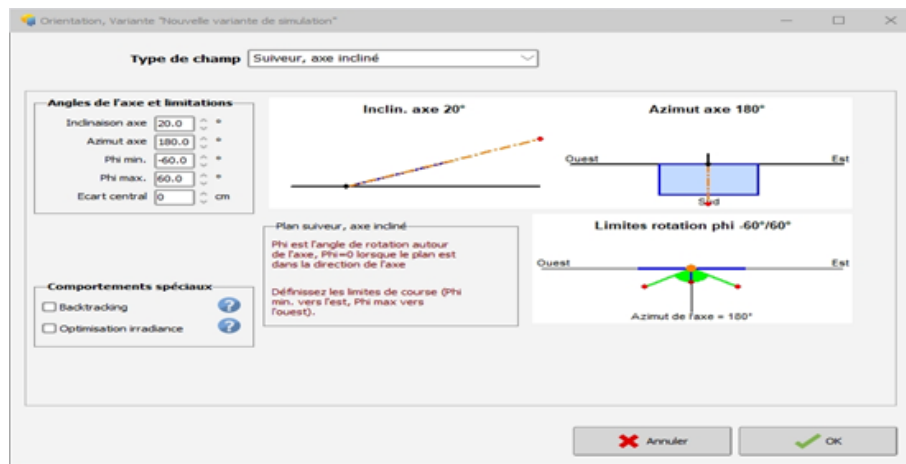


Figure IV.38: Suiveur axe incliné par PV sys7.1

- (c) en appuyant ensuite sur le bouton système pour Remplir les données relatives au panneau solaire Que nous avons utilisé dans nos travaux pratiques comme c'est montrer sur la figure IV.38

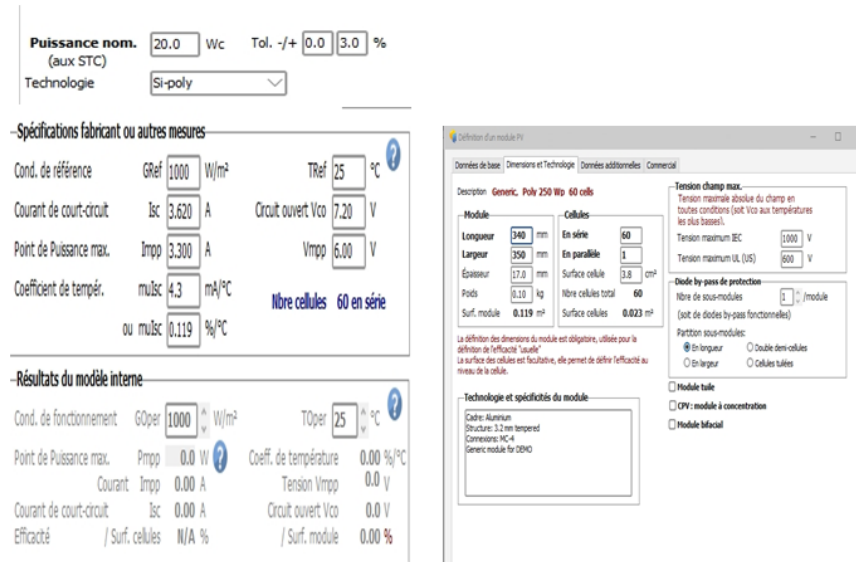


Figure IV.39: données de base et dimensions du panneau solaire par PVsyst 7.1

- (d) Ensuite, nous exécutons la simulation pour étudier l'importance d'inclinaison des panneaux solaires tout au long de l'année en produisant des graphiques de puissance en fonction de la tension (PV) et en étudiant les changements de ceux-ci après le changement d'inclinaison comme c'est montré sur la figure ci-dessous.

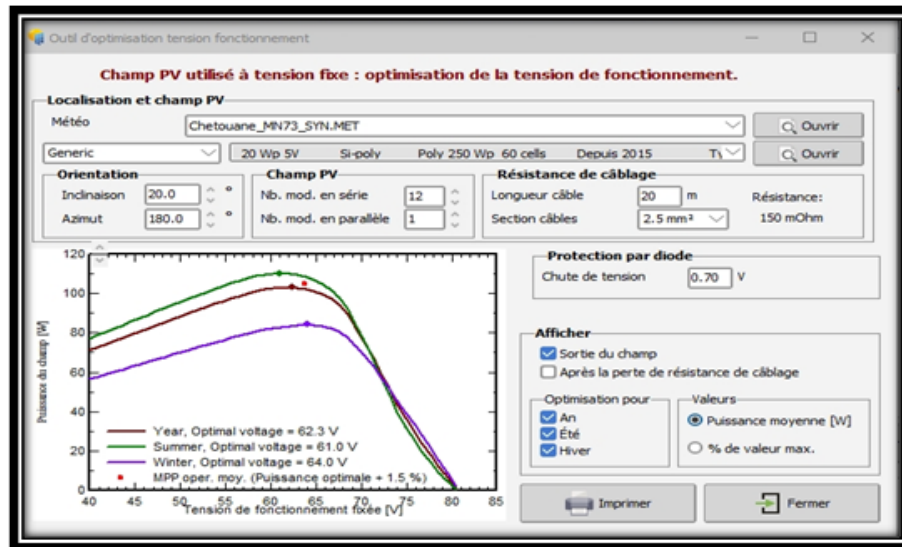


Figure IV.40: données de base et dimensions du panneau solaire par PVsyst 7.1

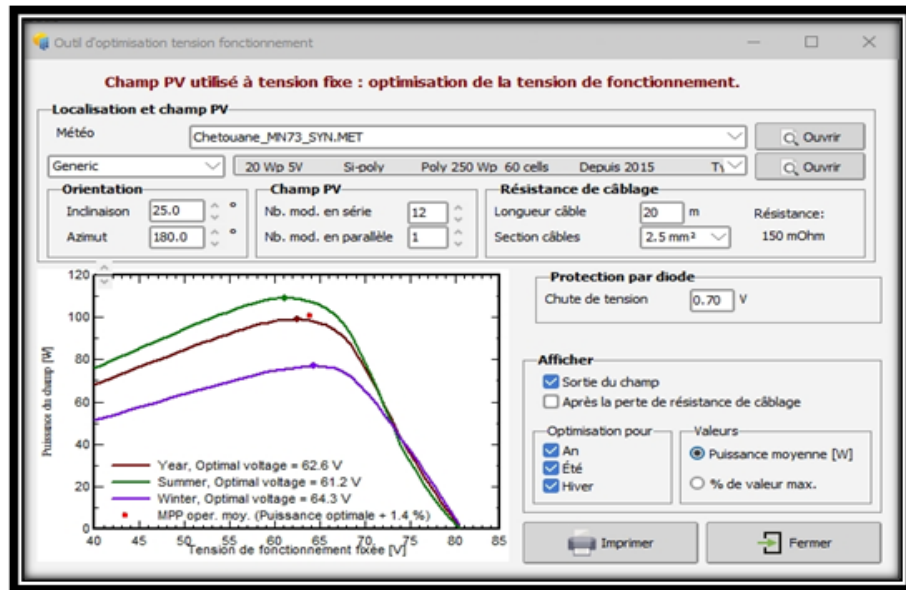


Figure IV.41: données de base et dimensions du panneau solaire par PVsys 7.1

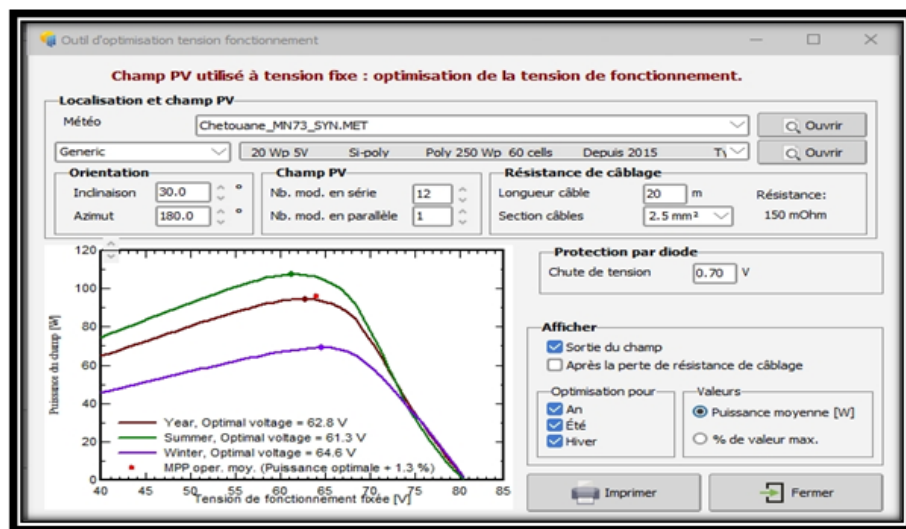


Figure IV.42: données de base et dimensions du panneau solaire par PVsys 7.1

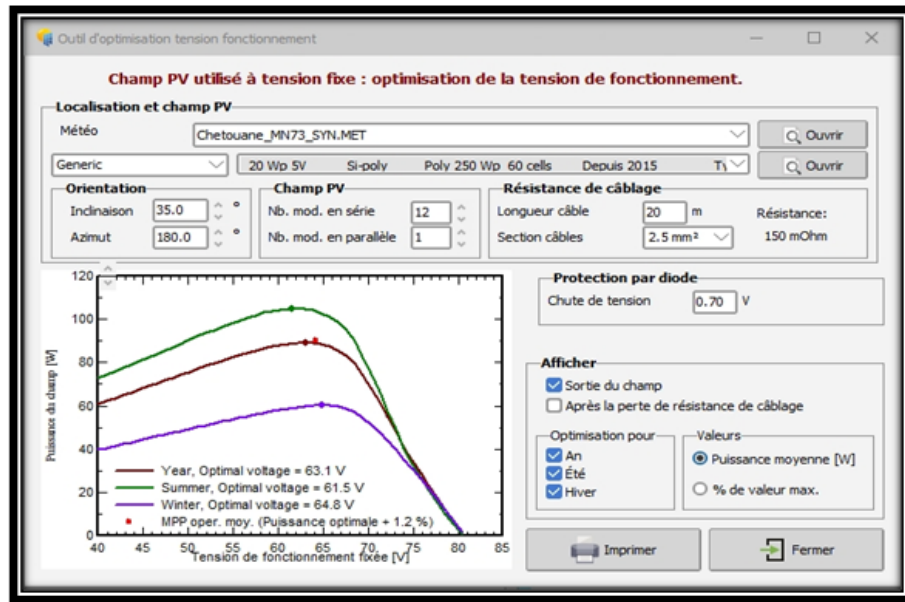


Figure IV.43: données de base et dimensions du panneau solaire par PVsys 7.1

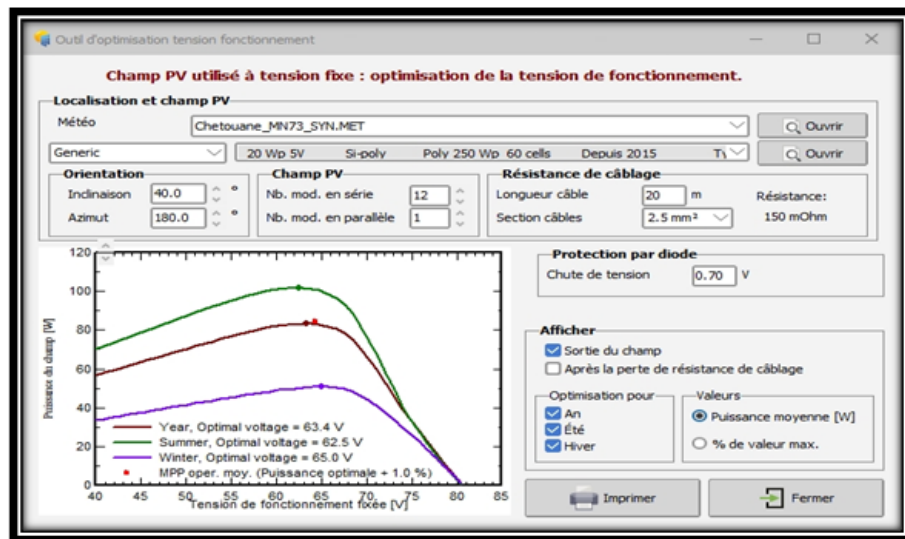


Figure IV.44: données de base et dimensions du panneau solaire par PVsys 7.1

IV.6.2 Interprétation

- On remarque qu'en été, la puissance est trop élevée par rapport à l'hiver, quel que soit l'inclinaison.
- On remarque aussi que la puissance est en phase avec la tension jusqu'à ce qu'elle atteigne un pic puis redescende à zéro. Ce pic représente la puissance maximale que l'onduleur nous aide à connaître.
- le $V_{co} = 80V$ (tension de circuit ouvert) ce qui implique une puissance nulle

- On voit que lorsque le panneau solaire est incliné à 20° , il est plus approprié par rapport aux autres inclinaisons. On voit que la puissance maximale est plus élevée que ce soit en été ou en hiver par rapport aux autres graphes. Ce qui nous permet de dire qu'à ce degré dans la région de Chetouane à Tlemcen permis d'avoir un meilleur rendement
- la puissance est proportionnelle au rendement. Plus l'énergie est élevée, plus le rendement est important.

IV.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un exemple réel d'une cellule PV bien définie avec ses paramètres détaillés (module PV).

Nous avons trouvé que la cellule photovoltaïque a une propriété $I(V)$ non linéaire, dont l'équation des propriétés peut être résolue et la puissance maximale peut être trouvée par un calcul mathématique $P_{max} = I_{max} \times V_{max}$, et connaissant ainsi la meilleure inclinaison à obtenir et ensuite extrait le rendement approprié pour chaque inclinaison puis faire une comparaison des rendements PV pour voir lequel est le meilleur.

Notre étude expérimentale a montré que l'inclinaison du capteur solaire est très importante, pour capter le maximum d'énergie solaire.

Après vérification de nos résultats, nous avons constaté que la meilleure inclinaison est de 20° . Cela a donné un rendement d'environ 38.1 %.

Ensuite nous avons mené une étude en utilisant la méthode de simulation via le logiciel PVsyst 7.1 en choisissant les données qui nous aident à travailler avec précision et facilité en précisant l'endroit exact où nous avons mené l'expérience et en saisissant les données du panneau solaire.

On a conclu que les systèmes PV autonomes comme PV sys peuvent jouer un rôle très important en fournissant une véritable solution économique pour couvrir les besoins énergétiques.

Conclusion générale

Globalement, l'Algérie dispose d'un très grand potentiel solaire avec 3 500 heures d'ensoleillement par an [2], mais malheureusement avec un taux d'utilisation très faible. Le besoin en électricité ne cesse d'augmenter, avec l'augmentation de la population et l'épuisement progressif des ressources fossiles, la production d'électricité par énergie solaire directe ou indirecte reste la meilleure solution.

Avec le développement de la technologie, le secteur photovoltaïque a connu un développement important, cependant, le rendement des panneaux solaires photovoltaïques reste toujours en deçà des valeurs souhaitées. Cette défaillance est due à l'influence de facteurs environnementaux, météorologiques et techniques sur les performances de la cellule.

Notre travail s'inscrit dans cette perspective dont l'objectif est d'étudier l'influence de l'inclinaison des panneaux solaires sur le rendement des systèmes photovoltaïques.

Les résultats expérimentaux ont montré que l'inclinaison du capteur solaire a un rôle clé dans la capture du meilleur rayon solaire pour avoir un meilleur rendement.

L'angle d'inclinaison qui a donné les meilleurs résultats était de 20° que ce soit en expérimental ou en utilisant la simulation.

Grâce à cette étude, une contribution a été réalisée pour évaluer l'effet de l'angle d'inclinaison des modules PV sur la production dans la région de Chetouane-Tlemcen ou nous avons conclu que des économies importantes pouvaient être réalisées dans les installations photovoltaïques équipées d'un dispositif de correction d'angle d'inclinaison en fonction de l'éclairage.

Bibliographie

Bibliography

- [1] A. GASMI. L'étude Expérimentale de l'influence de l'inclinaison et de vent sur le rendement d'une cellule PV. mémoire Master physique des matériaux. Université l'Arbi BEN MHIDI, Oum EL BOUAGHI, juin 2019.
- [2] S. BRIGAND. Installations solaires photovoltaïques. techniques et documentations, France, (février 2011).
- [3] B.NASSIRA et M.NAIMA . Etude et simulation l'influence de la poussière sur le rendement des panneaux photovoltaïques. Mémoire de Master Physique, Université d'Adrar, 2016.
- [4] SLAMA Fateh . Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique. Mémoire de master, Université Ferhat Abbas-Sétif, 2011.
- [5] M.E. Aziza et. B. ATHMANE Nora . Amélioration de l'efficacité des panneaux photovoltaïques par l'installation d'un système de refroidissement par l'eau des modules PV. Master Académique, Université Ahmed Draïa Adrar, 2018/2019.
- [6] H. KAMELIA . Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque. Mémoire de Magister en Electrotechnique. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2012
- [7] <https://www.europe-energie.com/blog/petite-histoire-du-photovoltaïque/text=La%20d%C3%A9couverte%20de%20l'effet,semi%2Dconducteurs%20comm>
- [8] A.LABOURET et M. VILLOZ. énergie solaire photovoltaïque. Techniques et documentations, France, juin 2006.
- [9] ANNE LABOURET, PASCAL CUMUNEL, JEAN-PAUL BRAUN, BENJAMIN FARAGGI. Cellules Solaires : Les bases de l'énergie photovoltaïque .5eme édition ETSF, 2010.

- [10] F Benyarou. **conversion des énergies** . document de cours (EN01), Université de Tlemcen, 2001/2002.
- [11] <https://mypower.engie.fr/energie-solaire/conseils/photovoltaique-avantages.html>: :text=Le%20photovolta%C3%AFque%2C%20une%20%C3%A9nergie%20prop
- [12] <https://www.lepanneausolaire.net/les-atouts-inconvenients-l-energie-solaire.php:text=Production%20intermittente%2C%20li%C3%A9%20%C3%A0%20la,devienn>
- [13] R. Khezzar et al. **Comparaison entre les différents modèles électriques et détermination des paramètres de la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque** .revue des Energie Renouvelables Vol.13 N°3, pp 379-388, 2010.
- [14] www.inti.be.
- [15] <https://mypower.engie.fr/energie-solaire/conseils/orientation-panneau-solaire-photovoltaique.html>
- [16] D.Ali et B.Walid . **évaluation des pertes dues à l'orientation et à L'inclinaison des capteurs solaires photovoltaïque**. Mémoire de Master Académique, Université MOHAMED BOUDIAF - M'sila, 2016 /2017
- [17] <https://news.dualsun.com/installation-entretien/inclinaison-orientation-panneau-solaire/:text=L'inclinaison%20est%20l'angle,et%20l'axe%20plein%20Sud>.
- [18] <http://www.cstb.fr/archives/webzines/editions/edition-de-fevrier-2010/panneaux-photovoltaiques-a-lepreuve-du-vent-et-de-la-pluie.html>
- [19] <https://nasainarabic.net/main/articles/view/wind-power>
- [20] <https://www.cadfem-an.com/fileadmin/user-upload/CADFEM-Syst%C3%A8me-photovoltaique-sous-la-pression-du-vent.pdf>
- [21] T. Mambrini. **Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques** . Thèse de doctorat, Université de Paris, 2014 .p41.
- [22] M. Adouane , M. Haddadi , N.Benamrane, K. Touafek , A. Khelifa , Et I. Tabet . **Evaluation de l'influence de l'inclinaison des modules Photovoltaïques sur la production d'énergie d'un système hybride** . Revue des Energies
- [23] K.Kaci , N.Kasbadji.Marzouk , M.Merzouk , S.Hakem , S.Mecheriet S.Kherrou . **Influence de l'angle d'incidence modifié sur les performances thermiques des capteurs solaires plans** . Centre de Développement des Energies Renouvelables, Tipaza, Algeria, Département de Génie Mécanique, Université Saâd Dahleb, Blida, Algeria, URAER Centre de Développement des EnergiesRenouvelables, Ghardaïa, Algeria, 2012.
- [24] <https://www.edfenr.com/actualites/canicule-panneaux-solaires-impact-sur-ma-production/>

- [25] <http://tpesolaire.chez.com/Rendement.html>
- [26] <https://academy.dualsun.com/hc/fr/articles/360011202219-Quel-est-l-impact-d-un-ombrage-sur-les-panneaux-photovolta%C3%AFques->
- [27] <https://sunpower.maxeon.com/fr/blog/solar-that-thrives-in-humidity:text=Si%20la%20chaleur%20peut%20diminuer,avant%20des%20cellules%20photovolt>
- [28] H.boursas, S.FETAH,M.SALMi ,O.ASSAS, H.BOUZGOU . L'influence des paramètres climatiques en Algérie sur les performances des systèmes photovoltaïques . Laboratoire de Physique et Chimie des Matériaux, Université de M'sila, Ichbilia, M'sila.
- [29] <https://news.dualsun.com/installation-entretien/inclinaison-orientation-panneau-solaire/:text=L'inclinaison%20des%20panneaux%20est,par%20rapport%20%C3%A00>
- [30] <https://www.climatsetvoyages.com/climat/algerie/tlemcen>
- [31] <https://fr.db-city.com/Alg%C3%A9rie-Tlemcen-Chetouane-Chetouane>
- [32] <https://www.vincent.boitier.free.fr/photovoltaïque/Notice%PV% Syst/noticePV Syst.pdf>
- [33] <https://www.algerie-eco.com/2020/12/22/lalgerie-possede-lun-des-gisements-solaires-les-plus-eleves-au-monde/>

Résumé : L'électricité est l'un des éléments essentiels dont nous ne pouvons pas nous passer dans notre vie quotidienne. Pour cette raison, il est devenu nécessaire de rechercher d'autres ressources pour produire de l'énergie renouvelable, notamment l'énergie solaire, car c'est une énergie inépuisable. Grâce à l'étude expérimentale et la simulation de logiciel PVsys que nous avons menées sur l'impact de l'angle d'inclinaison du panneau solaire sur la performance du système d'énergie photovoltaïque au niveau de Tlemcen, plus précisément à faculté de Chetouane, nous avons atteint un angle d'inclinaison fixé La tendance à sa valeur idéale en choisissant l'angle approprié parmi plusieurs angles qui nous offrent le rendement énergétique optimal.

Nous avons mené une étude pilote le 07/06/2022.

Grâce aux résultats que nous avons obtenus à partir du travail expérimental, nous avons arrivé à dire que l'angle d'inclinaison de la plaque de 20° est la meilleure pente pour avoir le meilleur rendement le jour où on a menée l'expérience à l'université d'Abou Baker Belkaid à Chetouane

Et grâce à logiciel PVsys 7.1, qui nous permet de connaître le meilleure angle d'inclinaison des panneaux photovoltaïques pour capter le maximum d'énergie annuelle, nous sommes arrivées au même résultat expérimentale, et on peut donc dire que l'angle d'inclinaison de 20 degrés est le meilleure inclinaison du panneau solaire annuellement à Chetouane .

Mots clés : panneaux solaires, inclinaison, système photovoltaïque, énergie solaire, PVsys.

Abstract: Electricity is one of the essential elements that we cannot do without in our daily life. For this reason, it has become necessary to look for other resources to produce renewable energy, especially solar energy, because it is an inexhaustible energy. Thanks to the experimental study and the simulation of PVsys software that we have carried out on the impact of the angle of inclination of the solar panel on the performance of the photovoltaic energy system at the level of Tlemcen, more precisely at the faculty of Chetouane, we have reached a fixed angle of inclination The tendency to its ideal value by choosing the appropriate angle among several angles that give us the optimal energy yield.

We conducted a pilot study on 07/06/2022.

Thanks to the results that we have obtained from the experimental work, we have come to say that the angle of inclination of the plate of 20° is the best slope to have the best yield on the day when the experiment was carried out at Abou Baker Belkaid University in Chetouane And thanks to PVsys 7.1 software, which allows us to know the best angle of inclination of the photovoltaic panels to capture the maximum annual energy, we arrived at the same experimental result, and we can therefore say that the angle of inclination 20 degrees is the best inclination of the solar panel annually in Chetouane.

Keywords: solar panels, tilt, photovoltaic system, solaren ergy, Pvsys.

لملخص: الكهروباة من العناصر الأساسية التي لا يمكننا الاستغناء عنها في حياتنا اليومية.

لهذا السبب، أصبحنا نضرب وريالبحث عن مصادر أخرى لإنتاج الطاقة المتجددة، وخاصة الطاقة الشمسية، لأنها طاقة لا تنضب. بفضل لدراسة التجربة بيئية ومحاكاة برنامج PVsys الذي قمنا به لعلنا نأثر زوايا ميل الألواح الشمسية على أداء نظام الطاقة الكهرو وضوئية علمس توتلمسان، وبشكل أكثر دقة في كلية شطوان، وصلنا إلى زوايا ميل ثابتة، والميل إلى قيمتها المثالية من خلال اختيار الزاوية المناسبة من بين عدة الزوايا التي تعطينا محصولاً للطاقة الأمثل.

أجرينا دراسة تجريبية بتاريخ 2022/06/07.

بفضل لنتائج التي حصلنا عليها من العمل التجريبي، توصلنا إلى القول إن زوايا ميل الألواح البالغة 20

درجة هي أفضل من حدر للحصول على أفضل عائد في اليوم الذي أجرينا فيه التجربة في أبو بكر. جامعة بلقايد بشطوان وبفضل برنامج PVsys 7.1، الذي يتيح لنا معرفة أفضل زوايا ميل الألواح الكهرو وضوئية لالتقاط أقصى طاقة سنوية، توصلنا إلى نفس النتيجة التجريبية، وبالتالي يمكننا القول إن زوايا الميل 20 درجة هي أفضل انحدار للألواح الشمسية سنوياً في شطوان.

الكلمات المفتاحية: الألواح الشمسية، الميل، النظام الكهرو وضوئي، الطاقة الشمسية، PVsys.