

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU



*Faculté du Génie de la Construction
Département de Génie Mécanique*

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du Diplôme de MASTER en Génie Mécanique

*Spécialité: Énergétique
Option: Froid, Chauffage, Climatisation*

Thème:

*Caractérisation du refroidissement d'un panneau
photovoltaïque*

*Proposé et dirigé par :
M.I.BOUMRAR*

*Etudié par :
M.AOUIDAD Hilal
Melle. IGHOBRIOUEN SAFIA*

Année Universitaire: 2017/2018

Remerciement

Avant tout propos, nous tenons à remercier Dieu, le tout puissant qui nous a donné la force et le courage d'achever ce modeste travail.

*Nous exprimons nous profonde reconnaissance à **Mr: M.I.BOUMRAR**, d'avoir accepté d'encadrer ce projet et pour ses conseils et aides précieuses dans notre travail. Nous adressons nos remerciements à tous les enseignants et le personnel de département de Génie Mécanique de l'U.M.M.T.O*

Nous tenons à remercier les dirigeants de laboratoire d'étude qui ont contribué à l'accomplissement de ce projet en nous donnant des remarques et des conseils.

Nous remercions aussi à nos ami(e)s étudiant(e)s de la spécialité énergétique et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce projet.

Enfin, nous souhaitons que ce projet soit utile ou successeurs étudiant(e)s, et qu'ils leurs permettra d'élaborer des projets mieux que le nôtre.

Nous exprimons notre profonde reconnaissance aux membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'étudier notre modeste travail.

Dédicaces

Je remercie Dieu de m'avoir donné l'occasion à présenter tous
mes dédicaces à :

La mémoire de mon père, mes deux sœurs.

Et à ma chers Famille, qui ils n'ont jamais cessé de
m'encourager, m'aidée durant toute ma vie, ils m'ont procuré
toutes les circonstances convenables à l'accomplissement de ce
projet pour me voir enfin accomplir mon rêve d'avoir mon
Master.

Je présente aussi toutes mes dédicaces à, ma mère, mes sœurs,
mes frères, mes ami(e)s.

Et à tous ceux qui ont contribué à la réussite de ce projet de
près et du loin.

A.HILAL

Dédicaces

Je remercie Dieu de m'avoir donné l'occasion à présenter tous mes

dédicaces à :

A ma très chère mère qui a été à mes côtés et m'a

soutenue durant toute ma vie,

A mon très cher père qui a sacrifié toute sa vie

pour me voir accomplir mon rêve d'avoir mon master.

Un grand merci à mes parents et que dieu les gardes.

A ma très chère sœur Karima,

A mes très chers frères : Ali et Mouloud, pour leurs aides et leurs précieux conseils.

A tous mes amis.

I. Safia

Sommaire

Sommaire.....	i
Liste des figures.....	vi
Liste des tableaux	viii
Nomenclature	ix
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Rayonnement solaire terrestre	
I.1 Introduction	2
I.2 Le soleil.....	3
I.3 La terre	4
I.4 Le mouvement de la terre autour du soleil.....	4
I.5 Notions sur L'astronomie	5
I.5.1 L'écliptique	5
I.5.2 L'équateur	5
I.6. Les systèmes de coordonnées célestes	5
I.6.1 Les coordonnées célestes horizontales.....	5
I.6.1.1 Les coordonnées célestes horizontales.....	5
I.6.1.2 l'angle l'azimut solaire.....	6
I.6.1.3 L'angle zénithal solaire θ_z	6
I.6.2 Les coordonnées horaires	6
I.6.2.1 L'angle horaire ω	6
I.6.2.2 La déclinaison	7
I.6.3 Les coordonnées géographiques	8
I.6.3.1 La latitude du lieu φ	8
I.6.3.2 La Longitude λ	8
I.6.3.3 L'altitude z	9
I.7 L'albédo ρ	9
I.8 La masse d'air (masse d'air optique)	9
I.9 Définition des différents temps	9
I.9.1 Le temps solaire vrai (TSV)	9
I.9.2 Le temps solaire moyen (TSM)	9
I.9.3 Le temps solaire civil TSC	9
I.9.4 Le temps universel TU	10
I.9.5 Le temps solaire Légal	10
I.9.6 L'équation du temps Et	10
I.10 Le rayonnement solaire	10
I.11 Le spectre solaire	11
I.12 L'énergie solaire dans l'espace, hors atmosphère.....	11
I.12.1 La constante solaire.....	11
I.13 L'atmosphère	13
I.14 Influence des couches atmosphériques	13
I.14.1 La diffusion	13
I.14.2 Absorption.....	13
I.15 Le nuage.....	14
I.16 Le rayonnement solaire au niveau du sol.....	14
I.16.1 Le rayonnement direct.....	14
I.16.2 Le rayonnement diffus	14
I.16.3 Le rayonnement global.....	14

I.17 L'énergie Solaire en Algérie	15
I.18 Valeurs mensuelles	16
I.19 Le réseau météorologique Algérien	17
I.20 Conclusion	18
Chapitre 2 : Cellule et module photovoltaïque	
II.1 Introduction	19
II.2 Générateur photovoltaïque	19
II.2.1 Constitution général d'un générateur photovoltaïque	19
a- Les cellules solaires	19
b- Les modules	19
c- Le générateur photovoltaïque	20
II-3 Module solaire photovoltaïque	20
II-4 La cellule PV	20
II-4-1 Les différentes technologies	21
1. Silicium monocristallin	22
2. Silicium Poly-cristallin	22
3. Silicium amorphe	23
II.5 L'effet photovoltaïque	23
II.6 Un atome	23
II.7 Niveaux d'énergie	24
II.8 La théorie des bandes	25
II.9 Semi-conducteurs	26
a- Les semi-conducteurs intrinsèques	26
b- Les semi-conducteurs extrinsèques	27
b-1) Dopage de type N	27
b-2) Dopage de type P	28
II.9.1 La jonction PN	28
II.9.2 Formation de la jonction PN	29
II.9.3 Conversion photovoltaïque	30
II.9.4 Le principe de conversion photovoltaïque	30
II.10. Cellule photovoltaïque	31
II.10.1. Fonctionnement d'une cellule solaire	31
II.10.2. Caractéristiques électriques d'une cellule solaire	32
II.11. Module photovoltaïque	33
II.11.1. Caractéristique électrique d'un module solaire	33
II.11.1.1. Caractéristique courant-tension I(V)	33
II.11.1.2. Caractéristique puissance-tension P(V)	34
II.11.2. Groupement en série	34
II.11.3. Groupement en parallèle	35
II.11.4. Groupement mixte (série-parallèle)	36
II.11.5. Facteur de forme	37
II.11.6. Rendement de conversion	38
II.11.7. Zones de fonctionnement du module solaire	38
II.12. Fonctionnement optimal du générateur	39
II.13. Solutions pour protéger une cellule solaire	40
II.14. Conclusion	40
Chapitre III : Réalisation de l'installation photovoltaïque	
III-1 Introduction	41

III-2	Description du système	41
III-3	Le circuit électrique.....	43
III-4	Le panneau photovoltaïque	44
III-5	Mesure du courant et tension électrique	45
III-5-1	Le multimètre.....	45
III-5-2	Le voltage	45
III-5-3	Le courant	46
III-5-4	Le câblage	46
III-5-5	Rhéostat	47
III-6	Le circuit d'eau de refroidissement	48
III-6-1	Réservoir d'eau	49
III-6-2	Une pompe centrifuge.....	49
III-6-3	Un tuyau à jet.....	50
III-6-4	Le support	50
III-7	Conclusion.....	51

Chapitre IV : Analyse des résultats

IV-1	Introduction.....	53
IV-2	Le circuit électrique	53
IV-3	Choix de la résistance	54
IV-4	Mesure de courant et tension sans refroidissement	55
IV-5	Mesure de courant et tension avec refroidissement	56
IV-6	Comparaison des courants	58
IV-7	Comparaison des puissances.....	58
IV-8	Comparaison des tensions.....	59
IV-9	Influence des différents paramètres sur la caractéristique $I(A)$ et $U(V)$	60
IV-9.1	Influence de l'éclairement et de la température	60
IV-9.2	Influence de l'éclairement.....	60
IV-9.3	Influence de la température	61
IV-9.4	Influence de la résistance	62
IV-10	Influence de l'air froid sur la puissance de panneau.....	63
IV-11	Conclusion	64

Chapitre V : Modélisation d'un panneau solaire sous Matlab

V-1	Introduction.....	65
V-2	Matlab	65
V-3	Modélisation du panneau photovoltaïque	65
V-3-1	Description du modèle de cellule utilisé	65
V-3-1-1	Modèle à trois paramètres (L3P).....	65
V-4	Equations régissant le panneau pour déduire $I(v)$ et $P(v)$	66
V-4-1	Caractéristiques courant-tension et puissance-tension du modèle L3P	67
V-5	Création du modèle du panneau photovoltaïque sous Matlab/Simulink.....	68

V-5-1 Simulation d'une cellule solaire sous Matlab	68
V-6 Simulation sous matlab et les caractéristiques	69
V-6-1 Paramétrage du modèle	71
V-6-2 Simulation du modèle	71
V-7 Influence de l'irradiation sur un panneau PV	71
V-7-1 Influence de l'irradiation sur l'allure (I-V)	71
V-7-2 Influence de l'éclairement sur l'allure (P-V)	72
V-8 Conclusion	73
Conclusion Générale	

Liste des figures

Chapitre I

Figure II.1 : Structure générale du soleil	3
Figure I.2 : Mouvement de la terre autour du soleil	4
Figure I.3 : Schématisation de l'écliptique	5
Figure I.4 : Schématisation de l'équateur	5
Figure I.5 : Schématisation de l'angle hauteur, l'angle l'zénithal et l'angle l'azimut	6
Figure I.6 Schématisation de l'angle horaire	7
Figure I.7 Schématisation de la déclinaison	7
Figure I.8 Schématisation de la latitude	8
Figure I.9 Schématisation de la longitude	8
Figure I.10 : Rayonnement solaire	11
Figure I.11 Schéma de diffusion et d'absorption dans l'atmosphère	15
Figure I.12 Quelques répartitions territoriale des stations météorologiques en Algérie	18

Chapitre II

Figure II-1 : Structure de la cellule photovoltaïque	21
Figure II .2 : Cellule au Silicium Monocristallin	22
Figure II .3 : Cellule au Silicium Poly-cristallin	23
Figure II.4 : Cellule au Silicium amorphe (couche mince)	23
Figure II.5 : Les électrons en orbite autour du noyau	24
Figure II .6 : Le niveau d'énergie augmente à mesure qu'on s'éloigne du noyau de l'atome	25
Figure II.7 : Diagrammes énergétiques pour les trois types de matériaux	26
Figure II .8 : Diagrammes des bandes	27
Figure II .9: Silicium de type N	28

Liste des figures

Figure II .10: Silicium de type P	28
Figure II -11 Formation d'une jonction PN	29
Figure II -12 : Présenté la zone de transition	29
Figure II 13 : Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque	31
Figure II 14 : Structure et diagramme de bande d'une cellule solaire photovoltaïque	32
Figure II -15 : Caractéristique I-V d'une cellule solaire; à l'obscurité et sous éclairement	32
Figure II -16 : Caractéristique I(V) d'un module solaire, T=25°C	33
Figure II -17 : Caractéristiques P (V) d'un panneau solaire, T=25°C	34
Figure II -18 : Association des modules en série	34
Figure II -19 : Caractéristique résultante d'un groupement en série de ns cellules identiques	35
Figure II -20 : Association des modules en parallèle	35
Figure II -21 : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de ns cellules identiques	35
Figure II -22 : Association mixte des modules.	36
Figure II 23 : Caractéristique résultante d'un groupement mixte	36
Figure II -24 : Les différentes zones de la caractéristique I (V), T=25°C	38

Chapitre III

Figure III-1 : les circuits du panneau solaire photovoltaïque	41
Figure III-2 : L'installation électrique	42
Figure III-3 : Panneau solaire photovoltaïque de type monocristallin	43
Figure III-4 : Multimètre utilisé comme voltmètre	44
Figure III-5 : Multimètre utilisé comme ampèremètre	45
Figure III-6 : Câble de connexion électrique	46
Figure III-7 : Le rhéostat	46
Figure III-8 : Le circuit fermé d'eau de refroidissement	47

Liste des figures

Figure III-9 : Réservoir d'eau	48
Figure III-10 : La pompe	48
Figure III-11 : Les graduations des pressions	49
Figure III-12 : Tuyau percé	49
Figure III-13 : Indicateur d'inclinaison	50
Figure III-14 : Dessin sur solide Works de l'Echangeur (support)	50

Chapitre IV

Figure IV-1 Le circuit électrique	53
Figure IV-2 Graphe comparatif (Courant/Tension) par rapport à la résistance	54
Figure IV-3: Graphe courant I_{CC} (A) e fonction de l'angle d'inclinaison	55
Figure IV-4 Graphe tension V_{co} (V) e fonction de l'angle d'inclinaison	55
Figure IV-5 Graphe de puissance P (W) e fonction de l'angle d'inclinaison	56
Figure IV-6 Graphe courant I_{CC} (A) e fonction de l'angle d'inclinaison	56
Figure IV-7 Graphe tension V_{co} (V) e fonction de l'angle d'inclinaison	57
Figure IV-8 Graphe de puissance P (W) e fonction de l'angle d'inclinaison	57
Figure IV-9 Graphe comparatif courant I_{cc} (A) avec et sans refroidissement en fonction de l'angle d'inclinaison	58
Figure IV-10: Graphe comparatif de puissance P(W) avec et sans refroidissement en fonction de l'angle d'inclinaison	59
Figure IV-11Graphe comparatif de la tension V_{co} (V) avec et sans refroidissement en fonction de l'angle d'inclinaison	60
Figure IV-12 Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire	61
Figure IV-13 Influence de la température sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire éclairée	62
Figure IV-14Influence de la résistance série sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire éclairée	63

Liste des figures

Figure IV-15 Comparaison de la puissance de sortie horaire de refroidissement de panneau par air. 63

Chapitre V

Figure V-1 : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L3P. 66

Figure V-2 : emplacement de notre module de simulation 68

Figure V-3 : Bibliothèque de simulink 69

Figure V-4 : page de simulation de la cellule solaire 69

Figure V-5 : page d'emplacement de la boîte noir 70

Figure V-6 : page d'emplacement de panneau solaire 70

Figure V-7 : Evolution de la caractéristique I(V) en fonction de l'irradiation pour un panneau PV à
T=25°C (1000W/m²; 800W/m²; 600W/m²; 400W/m²; 200W/m²). 72

Figure V-8 : Evolution de la caractéristique P(V) en fonction de l'irradiation pour un panneau PV à
T=25°C (1000W/m²; 800W/m²; 600W/m²; 400W/m²; 200W/m²). 73

Liste des tableaux

Tableau I.1: Energie globale reçue, en moyenne, du soleil en Algérie sur un plan orienté au sud et incliné d'un angle égale à la latitude, en ($\text{Wh/m}^2 \cdot \text{jour}$)

Tableau I.2: Quelques répartitions territoriales des stations météorologiques en Algérie

Tableau V.1 : Caractéristiques du module DIVEL SOLAIRE 5010-003type 50M(36)

Nomenclature

Symbole	Signification	Unité
PP'	l'axe de pôle	-
H	L'angle hauteur solaire	Degré
θ_z	L'angle zénithal du solaire	Degré
ψ	L'angle l'azimut du solaire	Degré
ω	L'angle l'horaire	Degré
φ	La latitude du lieu	Degré
λ	La longitude	Degré
δ	L'angle de déclinaison	Degré
z	L'altitude	Km
ρ	Albédo	-
h	Hauteur du soleil	Degré
MA	La masse d'Air	-
TSV	Temps solaire vrai	Heure(h)
TSM	Temps Solaire moyen	Heure(h)
TSC	Temps Solaire civil	Heure(h)
TU	Temps universel	Heure(h)
TSL	Temps solaire légal	Heure(h)
ET	L'équation du temps	Heure(h)
I_0	Constante solaire	W/m ²
G	rayonnement global	W/m ²
S	Rayonnement diffus	W/m ²
D	Rayonnement direct	W/m ²
ASA	Atlas solaire d'Algérie	-
ONM	Organisation nationale de météorologique	-
PV	Photovoltaïque	-
N	Dopage de type N	-
P	Dopage de type P	-
SI	Silicium	-
B	Bore	-
E_f	Champs électrique	Vm ⁻¹
I	Courant	Ampère
V	Tension	Volt
I_{ph}	Photo courant	Ampère
I_{cc}	Courant de court-circuit	Ampère
Pm	Puissance maximale	Watt
Vco	Courant de circuit ouvert	Ampère
R_p	Résistance parallèle	Ohm
RS	Résistance shunt	Ohm
ff	Facteur de forme	%
η	Rendement	%
p_{in}	Puissance incidente	W/cm ²
D_v	Débit volumique	L/m
H_{max}	Hauteur maximale	m
E	L'éclairement	W/m
K_T	Indice de clarté	-



Introduction générale

De nos jours l'énergie est quelque chose d'automatique et indispensable, peu importe de quelle forme nous parlons. Après la découverte du charbon, du pétrole et par exemple de l'uranium ces ressources ont connu une énorme expansion. Mais les hommes ont, depuis toujours, exploité toutes ces ressources naturelles comme si elles étaient inépuisables. Mais ce n'est pas le cas et aujourd'hui nous cherchons à remplacer ces ressources dont nous avons pris tellement l'habitude de se servir. Evidemment c'est une mission très dure où l'intérêt économique, écologique et l'incapacité technologique jouent un rôle primordiale. Ce sont les sources d'énergie renouvelables qui devraient remplacer les sources actuelles. Il s'agit de l'énergie obtenue des « quatre éléments » donc de l'eau (l'énergie hydraulique), du vent (l'énergie éolienne), du soleil (l'énergie solaire) et du feu (l'énergie thermique).

La force de l'énergie hydraulique est déjà utilisée fortement dans plusieurs pays. L'énergie éolienne est un peu plus jeune mais son développement est réussi et constant. C'est l'énergie solaire qui représente une source « nouvelle » en expansion et est un sujet très convoité ces dernières années.

Elle a déjà trouvé sa place dans plusieurs pays développés, comme par exemple l'Allemagne et l'Espagne, pays pionniers en Europe et le Japon, qui a aussi monté quelques premières installations dans le monde¹. Et d'autres gouvernements ont mis en place des politiques pour encourager le développement du domaine solaire dans leur pays il y a seulement quelques années. Comme par exemple la République tchèque, qui a rejoint les leaders européens, dans la classification annuelle. Son essor est remarquable et la puissance installée monte rapidement.

Malheureusement le développement constant n'est pas rassuré. C'est ainsi que l'idée de mettre au point la situation de l'énergie solaire est venue. Ce travail va d'abord repérer l'énergie solaire et ses différentes caractéristiques énergétiques, nous allons ensuite nous intéresser sur la cellule et le module de panneaux solaire photovoltaïque. Puis on passe pour présenter notre réalisation Photovoltaïque qui va être suivi d'une modélisation numérique

Chapitre I

Rayonnement solaire terrestre

I.1 Introduction :

Toutes les énergies renouvelables sont issues, directement ou indirectement du soleil. Les besoins énergétiques ne cessent de croître dans le monde. Malgré son énorme potentiel, l'énergie solaire ne correspond qu'à une partie négligeable de la production et de la consommation d'énergie en Algérie. Pourtant, l'exploitation du rayonnement solaire est compétitive à plusieurs niveaux par rapport aux autres sources d'énergies renouvelables. Ils'agit de la source d'énergie la plus répandue et la plus accessible sur terre. « Chaque jour, le soleil envoie vers la Terre 10 000 fois la quantité totale d'énergie consommée à l'échelle de la planète ». Aussi, la quantité d'énergie libérée par le soleil pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an.

Les rayonnements d'origine solaire reçus à la surface terrestre peut se révéler d'une valeur intéressante pour être exploité, cette grande quantité d'énergie qui est transmise par le soleil sous forme de rayonnement solaire disponible au sol est un élément clé qu'on peut utiliser dans de nombreux domaines, on peut citer:

- production d'électricité par la voie photovoltaïque ou solaire thermique
- agriculture et énergie de la biomasse
- architecture et habitatetc.

Le but de ce chapitre est d'illustrer les données de base du soleil et son rayonnement, le rayonnement solaire en dehors de l'atmosphère et son influence sur l'atmosphère terrestre. Les composants du rayonnement solaire atteignant la surface terrestre. Puisque toutes les applications à énergie solaire exigent des données de rayonnement solaire.

I.2 Le Soleil :

Le soleil est une grande sphère de matière gazeuse très chaude avec un diamètre de 1,391 000 kilomètres, une masse de 2,1027 tonnes et une distance moyenne de 150 million de kilomètres de la Terre. Une comparaison à la terre, qui a un diamètre de 12700 kilomètres et une masse de 61024 kg.

Le soleil se compose d'hydrogène pour 74% (H₂), hélium pour 25 %, les 1% restant étant un mélange de plus de 100 éléments chimiques.

C'est au centre du soleil que débute la production de l'énergie et le rayonnement de notre étoile (4 millions de tonnes disparaissent par seconde en énergie). L'énergie produite traverse lentement le soleil pour atteindre les couches superficielles et est ensuite émise sous forme de lumière. La surface visible du soleil est à une température de 5750 K et émet la lumière blanche naturelle. Les taches, qui sont des régions un peu plus « froides » (4000 K) qui présentent un champ magnétique très important. Au-dessus de la photosphère, la température remonte pour atteindre environ 8000 K dans la chromosphère. Au-dessus de la chromosphère, pour des raisons encore mal expliquées, la température remonte à plus de 10⁶ K. C'est la couronne.

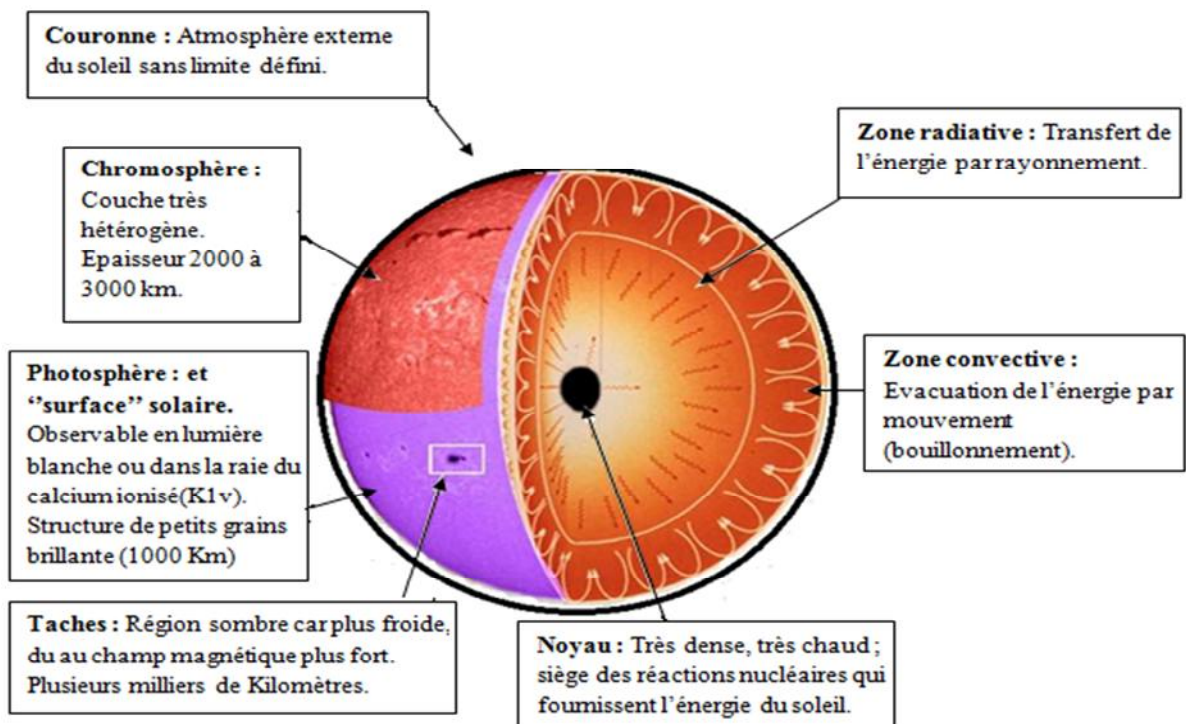


Figure I.1 : Structure générale du soleil. [1]

I.3 La terre :

Notre planète, La terre à la forme d'un ellipsoïde de révolution aplati est la seule du système solaire à posséder de l'eau liquide en abondance, ainsi qu'une atmosphère riche en oxygène. Sa superficie est de $510 \times 10^6 \text{ Km}^2$, sa masse est $5,98 \times 10^{24}$ tonnes, son volume est égale à $1\ 083\ 320 \times 10^6 \text{ Km}^3$. La terre tourne autour du soleil en une année (365,25 jours) et sur elle-même en une journée (23 h 56 min). Elle possède un satellite naturel, la lune. Eloigné du soleil de $150 \cdot 10^6$ de kilomètres.

I.4 Le mouvement de la terre autour du soleil :

Dans son mouvement autour du soleil, la terre décrit une ellipse dont le soleil est l'un de ses foyers. La révolution complète s'effectue en une période d'une année (365,25 jours). Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique. C'est au :

Solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est la plus proche du soleil avec 147 millions de km. Solstice d'été (22 juin) que la terre est la plus éloignée du soleil avec 152 millions de km. Le 21 mars et le 21 septembre sont appelés respectivement équinoxes de printemps et équinoxe d'automne; où le jour et la nuit sont égaux.

En plus de sa rotation autour du soleil, la terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Cette rotation s'effectue en une journée (24 heures). Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la terre est appelé l'équateur. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique. Ils font entre eux un angle appelé inclinaison égale à $23,45^\circ$

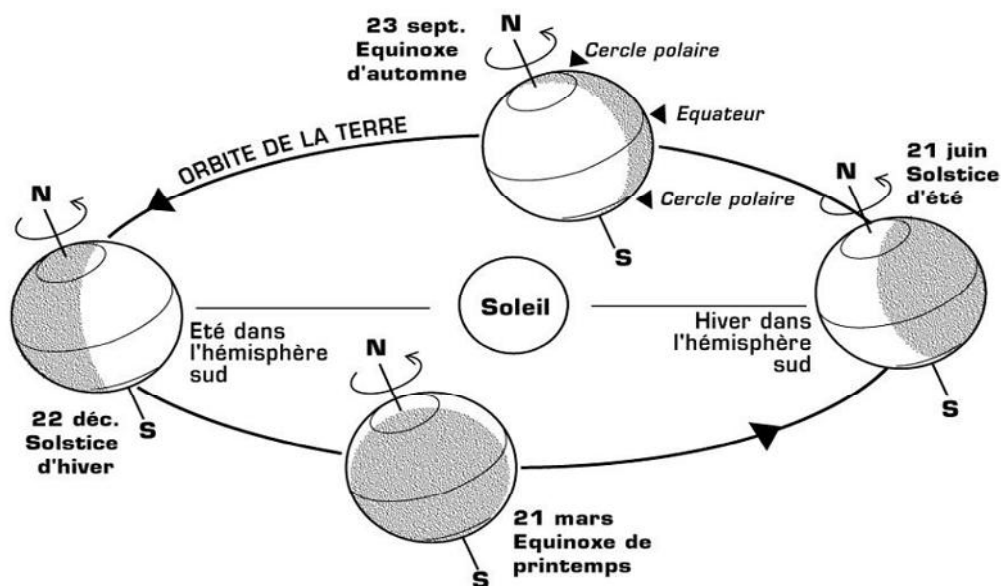


Figure I.2 Mouvement de la terre autour du soleil[2]

I.5 Notions sur L'astronomie :

I.5.1 L'écliptique :

Le mouvement de la terre autour du soleil s'effectue dans un plan nommé le plan de l'écliptique.



Figure I.3 Schématisation de l'écliptique[3]

I.5.2 L'équateur :

Le plan équatorial perpendiculaire à l'axe des pôles PP' passe par le centre de la terre O .

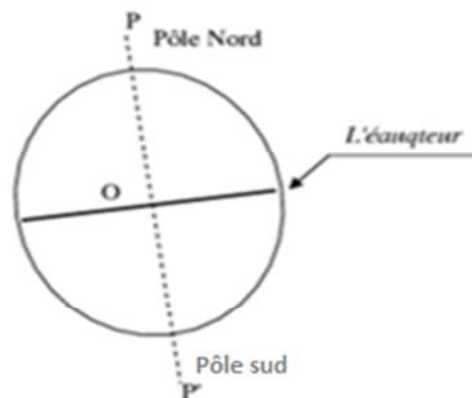


Figure I.4 Schématisation de l'équateur[3]

I.6 Les systèmes de coordonnées célestes :

I.6.1 les coordonnées célestes horizontales :

I.6.1.1 les coordonnées célestes horizontales :

Il s'agit de l'angle entre le rayon visuel du lieu d'observation à soleil avec l'horizon. Cela compté de 0° à 90° à partir du plan horizontal et il est positif au-dessus de ce plan et négatif en dessous.

I.6.1.2 L'angle zénithal du solaire θ_z :

C'est l'angle entre le zénith du lieu d'observation et la direction du soleil, il est compté de 0° à 180° à partir du zénith.

I.6.1.3 L'angle l'azimut solaire ψ :

C'est l'angle que fait la direction de la projection du soleil sur le plan horizontal avec la direction sud. Cet angle étant orienté positivement vers l'ouest.

$$\sin\psi = (\cos \delta \cos \omega)/h(I.1)$$

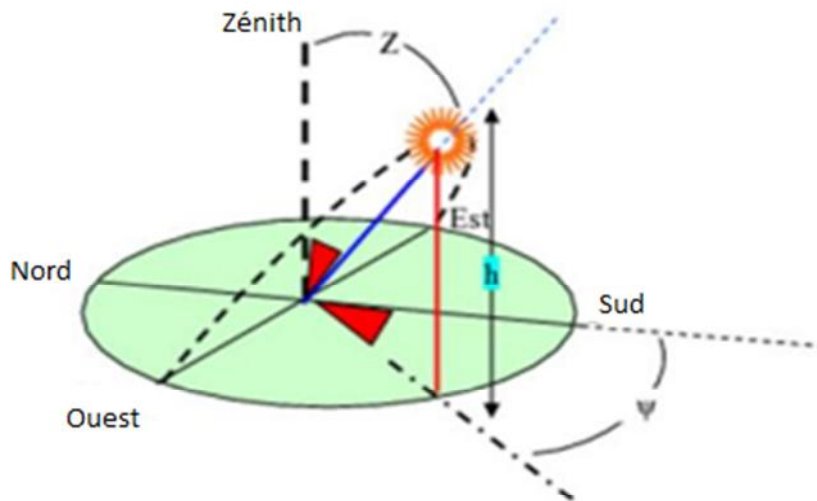


Figure I.5 Schématisation de l'angle hauteur, l'angle l'zénithal et l'angle l'azimut[3]

I.6.2 Les coordonnées horaires :

I.6.2.1 L'angle horaire ω :

Est l'angle formé entre la projection du soleil (cercle horaire) sur le plan équatorial à un moment donné et la projection du soleil sur ce même plan au midi vrai.

Avec :

$\omega > 0$ vers l'ouest et (est compté positivement l'après-midi),

$\omega < 0$ vers l'est et $\omega = 0$ à midi solaire vrai (le soleil est dans le plan méridien du lieu)

$$\omega = 15 TS - 12 \quad (I.2)$$

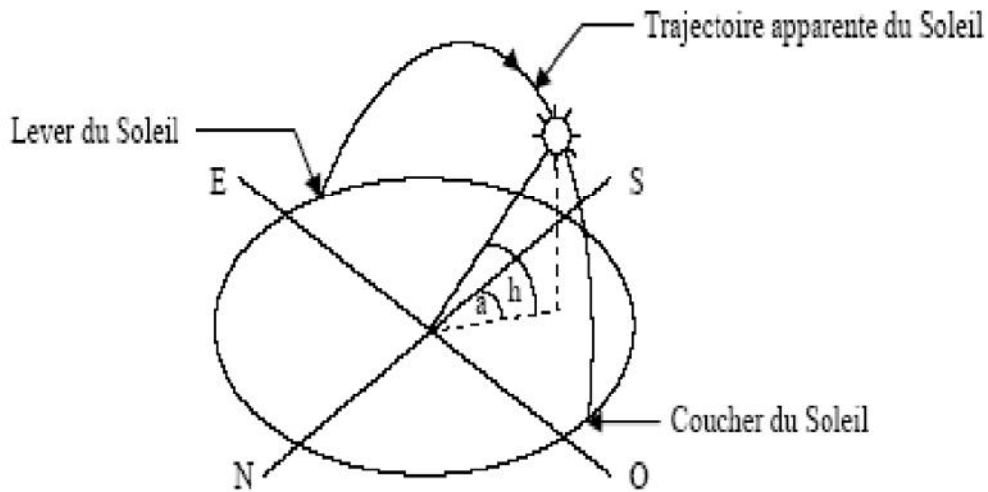


Figure I.6 Schématisation de l'angle horaire[4]

I.6.2.2 La déclinaison:

Le plan équatorial fait de son plan écliptique un angle constant, appelé obliquité et noté δ . Dans l'hémisphère nord de notre planète, elle est positive au printemps et en été, négative le reste du temps ; elle varie entre $+23^{\circ}27'$ au solstice d'été (le 21 juin) et $-23^{\circ}27'$ au solstice d'hiver (le 21 décembre). Elle est donnée par l'expression mathématique suivante :

$$\delta = 23.45 \sin 0.986 Qj + 284 \quad (I.3)$$

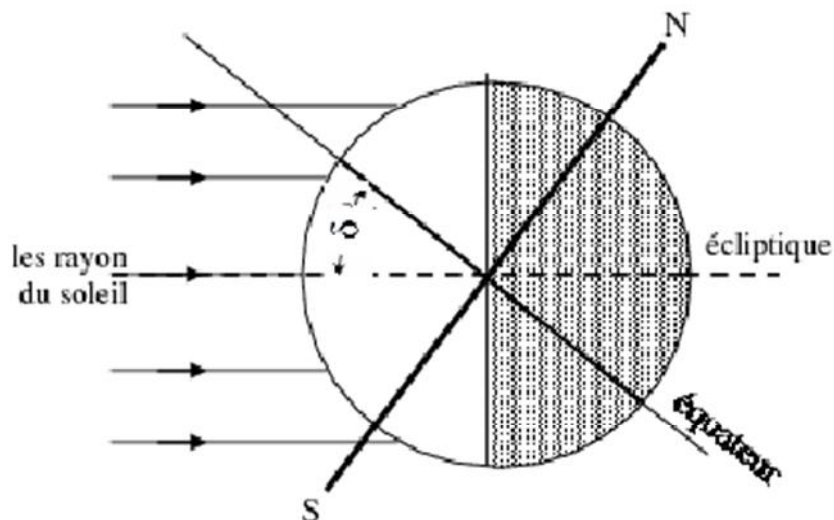


Figure I.7 Schématisation de la déclinaison[5]

I.6.3 Les coordonnées géographiques :

I.6.3.1 La latitude du lieu φ :

Elle est l'angle que fait la direction centre de la terre -lieu avec le plan équatorial. Les latitudes comptent de -90° à $+90^\circ$ et la latitude de l'équateur est 0° . Les cercles des lignes de latitude entourant la terre sont parallèles à l'équateur. ($\varphi > 0$ pour les latitudes nord (N) ; $\varphi < 0$ pour les latitudes sud (S)).

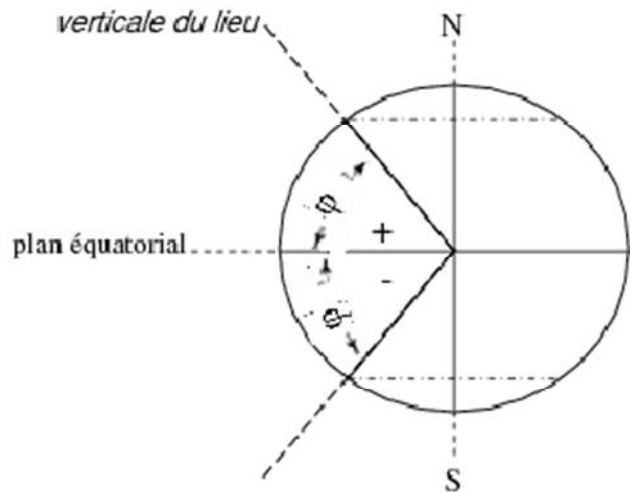


Figure I.8 Schématisation de la latitude[5]

I.6.3.2 La longitude λ

La longitude est l'angle déterminé par le méridien du lieu et le méridien de Greenwich. La longitude est un angle compris entre 0 et 180° . On précise si cet angle est à l'ouest (+) ou à l'est (-) de Greenwich.

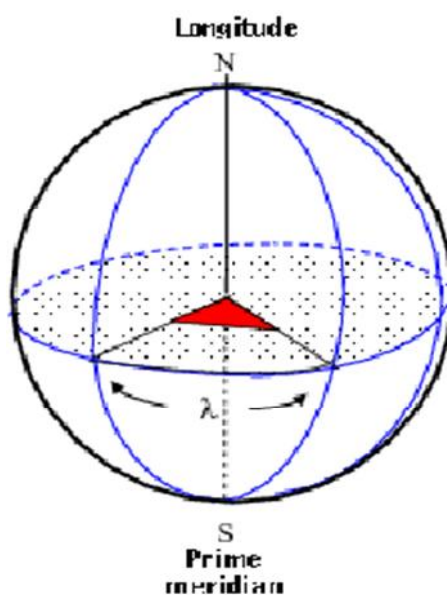


Figure I.9 Schématisation de la longitude[5]

I.6.3.3 L'altitude z :

L'altitude d'un point correspond à la distance verticale entre ce point et une surface de référence théorique (niveau moyen de la mer=0.00), il est exprimé en [Km].

I.7 L'albédo ρ :

Le rayonnement reçu par le sol, en provenance de l'atmosphère, est diffusé vers celle-ci. Ce pouvoir de diffusion s'appelle l'albédo. L'albédo représente ainsi le rapport de la puissance réémise à la puissance reçue par corps lumineux.

I.8 La masse d'air (Masse d'air optique) :

Elle est définie à partir de l'unité d'épaisseur atmosphérique prise verticalement au niveau de la mer, elle s'exprime par :

$$MA = \frac{1-0,1 Za}{\sin h + 0,15(h+3,885)^{-1,253}} \quad (I.4)$$

Pour des hauteurs de soleil faibles (inférieures à 10 ou 15°) on écrit :

$$MA = \frac{1-0,1 Za}{\sin h} \quad (I.5)$$

I.9 Définition des différents temps :

I.9.1 Le temps solaire vrai (TSV) :

Il est défini par angle horaire ω entre le plan méridien passant par le centre du solaire et le méridien du lieu considéré.

$$TSV = 12 + \frac{w}{15} \quad (I.6)$$

I.9.2 Le temps solaire moyen (TSM) :

La vitesse de la terre sur son orbite n'est pas constante au cours de l'année. Pour avoir un temps qui " s'écoule " à vitesse constante (celui mesuré par les horloges), on définit donc un temps solaire moyen :

$$TSM = TSV - \frac{Et}{60} \quad (I.7)$$

I.9.3 Le temps solaire civil (TSC) :

Jusqu'au 1er mai 1912, les heures d'une journée étaient comptées sur une base de 12h par demi-journée. A partir de cette date, le décompte des heures se fait de 0h à 24h. On définit donc l'heure civile que l'on notera TSC comme étant:

$$TSC = TSM + 12 \quad (I.8)$$

I.9.4 Temps universel TU :

Il est défini comme étant le temps solaire moyen du méridien de GREENWICH (longitude zéro), pour un lieu situé à la longitude λ .

$$TU = TSM + \frac{\lambda}{15} \text{ Pour les longitudes Est} \quad (I.9)$$

$$TU = TSM - \frac{\lambda}{15} \text{ Pour les longitudes Ouest} \quad (I.10)$$

I.9.5 Le temps solaire légal :

C'est l'heure officielle d'un état (ou, pour les très grands pays, d'une partie du territoire). C'est l'heure du fuseau horaire aux décalages conventionnels près. (La terre est divisée en 24 fuseaux, de 15° de large, centrés sur les méridiens dont la longitude est un multiple de 15).

$$TL = TU + DE \quad (I.11)$$

I.9.6 L'équation du temps Et :

On appelle équation du temps la correction, positive ou négative, qu'il convient d'ajouter au temps solaire moyen pour connaître le temps solaire vrai $TSV = TSM + Et$, elle est exprimée par la relation suivante: avec : $x = (2\pi.Qj) / 366$ (I.12)

$$Et = 2.10^{-4} - 4197 \cdot 10^{-4} \cos x + 3.2265 \cos(2x) + 0.0903 \cos(3x) + 7.3509 \sin(x) + 9.3912 \sin(2x) + 0.3361 \sin(3x) \quad (I.13)$$

I.10 Le rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est une variable climatique importante qui rend la vie sur terre possible en apportant de la chaleur et de la lumière. Abondant, renouvelable et disponible au sol, il est constitué de rayons lumineux transportant de l'énergie provenant du soleil dans toutes les longueurs d'onde.

Cette quantité d'énergie quittera sa surface sous forme de rayonnement électromagnétique compris dans une longueur variant de 0.22 à 10 μm , l'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit

- 1 à 3 % dans la bande des ultraviolets (0,25 à 0,4 μm).

- 40 à 42 % dans la bande visibles (0,4 à 0,75 μm).

- 55 à 59 % dans la bande des infrarouges (0,75 à 2,4 μm).

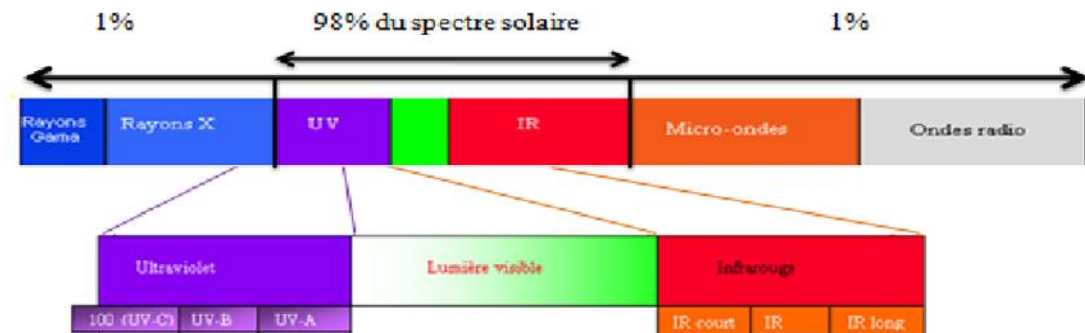


Figure I.10 Rayonnement solaire[6]

I.11 Le spectre solaire:

Le spectre est la répartition de l'énergie véhiculée par le rayonnement en fonction de la longueur d'onde. La lumière solaire est composée de toutes sortes de rayonnements, de couleurs différentes, caractérisées par différentes longueurs d'onde. Elle présente des corpuscules (photons) et une propagation d'ondes avec une fréquence de vibration et une longueur d'onde.

Des photons; grains de lumière composent ce rayonnement électromagnétique

I.12 L'énergie solaire dans l'espace, en dehors de l'atmosphère :

L'énergie totale que le soleil envoie par unité de temps, sur une surface d'air unitaire placée normalement aux rayons du soleil à la limite de l'atmosphère terrestre, vaut en moyenne $I_0 = 1390 \text{ W m}^{-2}$. I_0 notée AM_0 (Air masse zéro), appelée constante solaire. Cette valeur dépend de la distance terre-soleil et elle varie faiblement au cours de l'année. Le rayonnement solaire hors atmosphère ne dépend que des paramètres astronomiques, il est caractérisé par une donnée fondamentale appelée constante solaire.

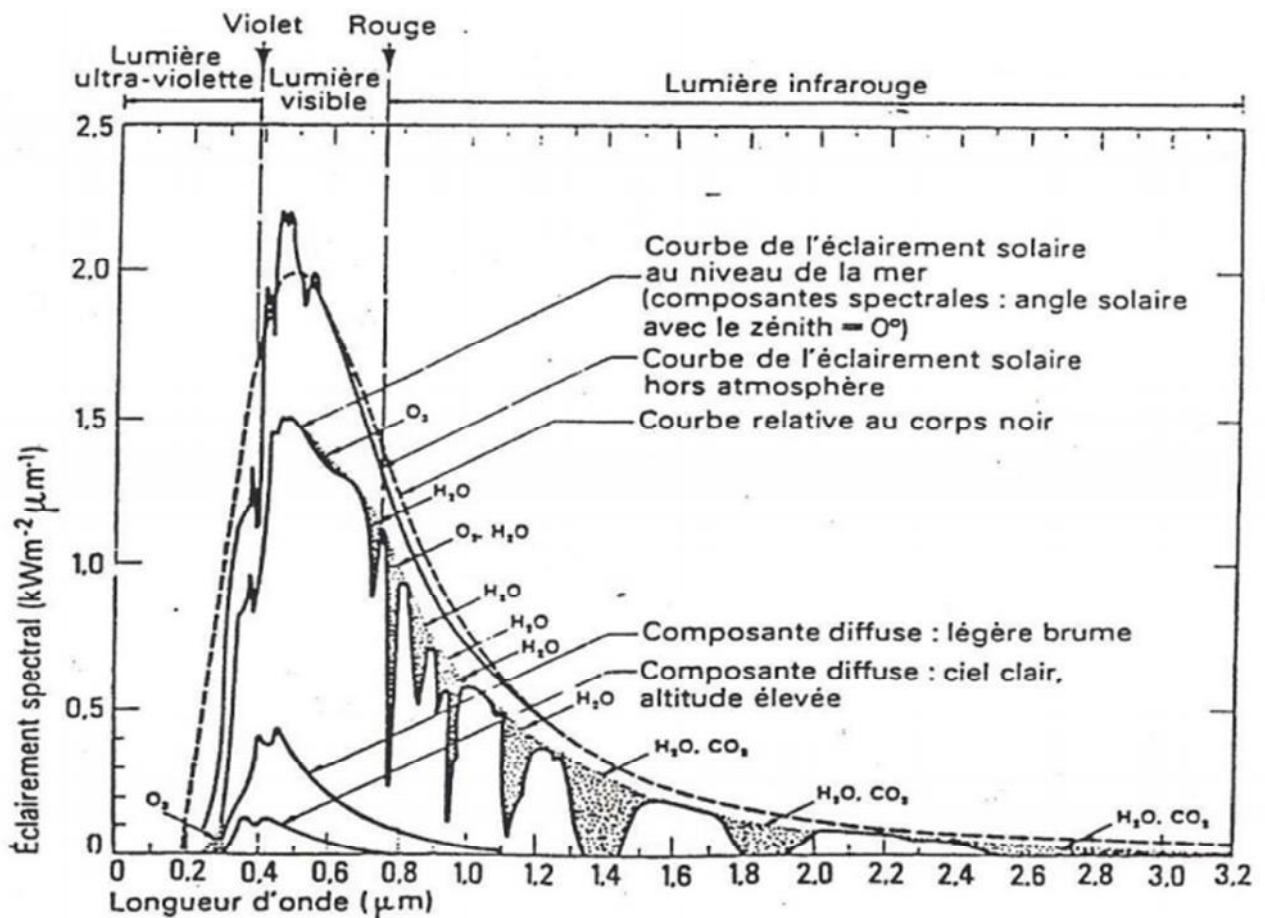


Figure I.11 Spectre solaire en dehors de l'atmosphère[7]

La figure montre l'atténuation observée après le passage à travers une épaisseur d'atmosphère correspondant à une masse d'air 1,5, soit l'équivalent d'une hauteur du soleil de $41,8^\circ$ ($h=41,8$) au niveau de la mer

Le rayonnement reçu par l'atmosphère terrestre en incidence normale est constant et voisin de 1353W/m^2 . Le rayonnement solaire reçu au sol traversant les différentes couches atmosphérique ; l'atmosphère modifie ce spectre énergétique du rayonnement solaire à travers trois mécanismes principaux :

- L'absorption par les différentes molécules gazeuses entrant dans sa composition : 78% d'azote (N_2), 21% d'oxygène (O_2), 0,9% d'argon (Ar), 0,03% de dioxyde de carbone (CO_2) et d'autre gaz ainsi que la vapeur d'eau (H_2O) (très variable de 0 à 4%) et une couche mince d'ozone (O_3) dont le rôle est si important dans l'absorption des rayons ultraviolets les plus puissants .
- La diffusion moléculaire de Rayleigh : c'est la diffusion due aux molécules de gaz constituant l'atmosphère et dont la taille est très inférieure à la longueur d'onde de la lumière.
- La diffusion due aux particules qu'elle contient : aérosols, poussière et les nuages.

I.12.1 La constante solaire:

Est le flux énergétique reçu par une surface unité, normale aux rayons solaires, située en dehors de l'atmosphère à une distance moyenne terre-soleil. La mesure de la constante solaire a fait l'objet de nombreuses expériences. Dans notre cas nous adopterons la valeur de 1353 w/m² ($\pm 1,5\%$). Ce flux, dit constante solaire varie cependant légèrement au cours de l'année, suivant les variations de la distance terre-soleil. En première approximation, on peut calculer la valeur de E en fonction du numéro du jour de l'année j par la relation suivante :

$$E = E_0 [1 + 0,033 \cos (0,984 j)] \quad (\text{I.14})$$

I.13 L'atmosphère :

L'atmosphère terrestre est l'enveloppe gazeuse entourant la terre que l'on appelle air. L'air sec se compose de 78,087 de diazote, 20,95 de dioxygène, 0,93 d'argon, 0,04 de dioxyde de carbone et des traces d'autre gaz. L'atmosphère protège la vie sur terre en absorbant le rayonnement solaire ultraviolet, en réchauffant la surface par la rétention de chaleur (effet de serre) et en réduisant les écarts de température entre le jour et la nuit.

I.14 Influence des couches atmosphériques :

Lors de la traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs composantes, il subit diverses influences.

a- Diffusion :

Le phénomène de diffusion apparaît lorsque le rayonnement traverse des poussières de faible dimension, des molécules de diamètres inférieures à $0,1 \cdot 10^3$ nm ainsi que des particules de plus grandes dimensions telles que les gouttelettes de nuages. Diffusion par les molécules composant les gaz atmosphériques (diffusion de Rayleigh, Mie). Elle affecte les courtes longueurs d'onde du spectre solaire, ce qui explique la couleur bleue du ciel.

b-Absorption :

Le phénomène de l'absorption intervient lorsque le rayonnement traverse une couche gazeuse, absorbé par les gaz atmosphériques (oxygène, O₃) dans le domaine des courtes longueurs d'ondes (vapeur d'eau...) et dans celui des grandes longueurs d'onde (gaz carbonique...). L'absorption de l'énergie dépend de :

- L'épaisseur de la couche traversée.
- La composition de la masse gazeuse.

I.15 Les nuages

Sont constitués de gouttelettes d'eau dont la taille est nettement supérieure à la longueur d'onde. La diffusion est alors neutre et provient de l'ensemble des phénomènes de réflexion, réfraction et diffraction. La nébulosité est le paramètre météorologique qui permet d'estimer l'importance prise par les nuages dans les phénomènes de diffusion. Elle s'exprime en huitièmes ou en fractions décimales de ciel couvert. Cette notion n'étant que descriptive, on la relie à la fraction d'insolation qui est une grandeur mesurable dès qu'on connaît les durées d'insolation enregistrées par l'héliographe.

I.16 Rayonnement solaire au niveau du sol

Le rayonnement solaire subit un certain nombre d'altérations et d'atténuation aléatoire en traversant l'atmosphère : réflexion sur les couches atmosphériques, absorption moléculaire, diffusion moléculaire et diffusion par les aérosols.

Au niveau du sol, à cause de la diffusion, une partie du rayonnement est diffuse, c'est-à-dire isotrope. L'autre partie, dite directe, est anisotrope. On subdivise le rayonnement solaire parvenant au sol en trois composantes principales qui sont :

I.16.1 Rayonnement direct :

Rayonnement parvenant au sol sous un angle solide limite au seul disque solaire et reçu sur une surface normale à l'axe de cet angle solide.

I.16.2 Rayonnement diffus :

Rayonnement diffus par les composants de l'atmosphère parvenant de la totalité du ciel à l'exception du disque solaire.

I.16.3 Rayonnement global :

Rayonnement parvenant du soleil et de l'atmosphère à partir d'un angle solide 2π ouverture reçu sur une surface horizontale.

Le rayonnement global parvenant au sol sur une surface horizontale est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus.

$$G=S+D. \quad (I.15)$$

Avec :

- G : rayonnement global
- S : Rayonnement diffus
- D : rayonnement direct

Avant d'atteindre le sol, le rayonnement solaire est atténué par l'atmosphère terrestre et les nuages. Le rapport entre le rayonnement au sol et le rayonnement extraterrestre est appelé indice de clarté, la moyenne mensuelle de l'indice de clarté \bar{K}_T est définie par :

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0}$$

Avec :

\bar{H} : rayonnement solaire moyen, mensuel mesuré sur une surface horizontale au niveau du sol.

\bar{H}_0 : rayonnement solaire moyen mensuel hors de l'atmosphère

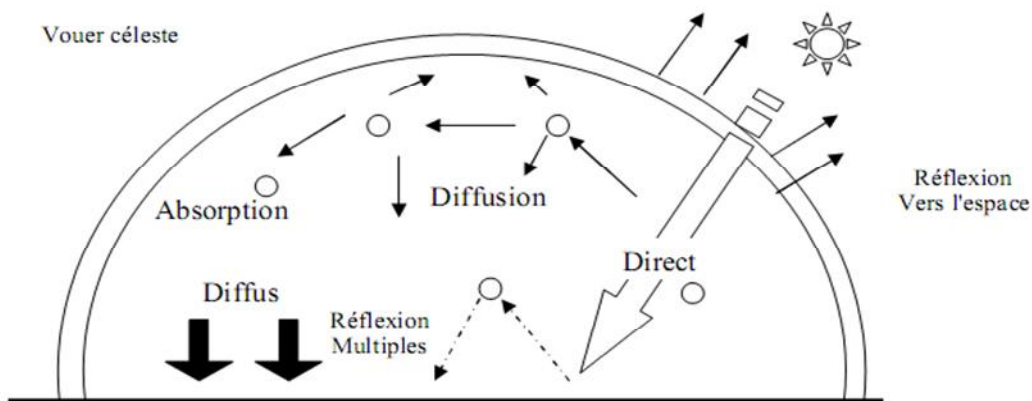


Figure I.11 Schéma de diffusion et d'absorption dans l'atmosphère[8]

I.17 L'énergie Solaire en Algérie :

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde et en particulier de la région La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5

kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m²/an au Nord et 2263 kWh/m²/an au sud du pays.

I.18 Valeurs mensuelles :

Pour la conception d'un système photovoltaïque, La donnée la plus utile concernant l'énergie solaire, est la série des valeurs mensuelles du rayonnement global. Ces données sont fournies par des stations météorologiques, ou en consultant l'atlas solaire d'Algérie (ASA).

Mois \ Régions	j	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Alger	3706	4802	5560	5786	6182	5988	6266	6434	6050	5006	3878	3488
Oran	4058	4702	5854	5946	6108	5912	6390	6430	5998	5302	4066	3780
Annaba	3230	4438	5132	5272	5706	5684	6254	6164	5440	4556	3454	2842
Tamanrasset	6970	7536	8016	7898	7478	7374	7552	7760	7746	7506	6956	6520
Tindouf	6062	7106	7532	7680	7175	6998	6780	6896	6948	6678	6078	5956

Tableau I.1: Energie globale reçue, en moyenne, du soleil en Algérie sur un plan orienté au sud et incliné d'un angle égale à la latitude, en (wh/m².jour)[9]

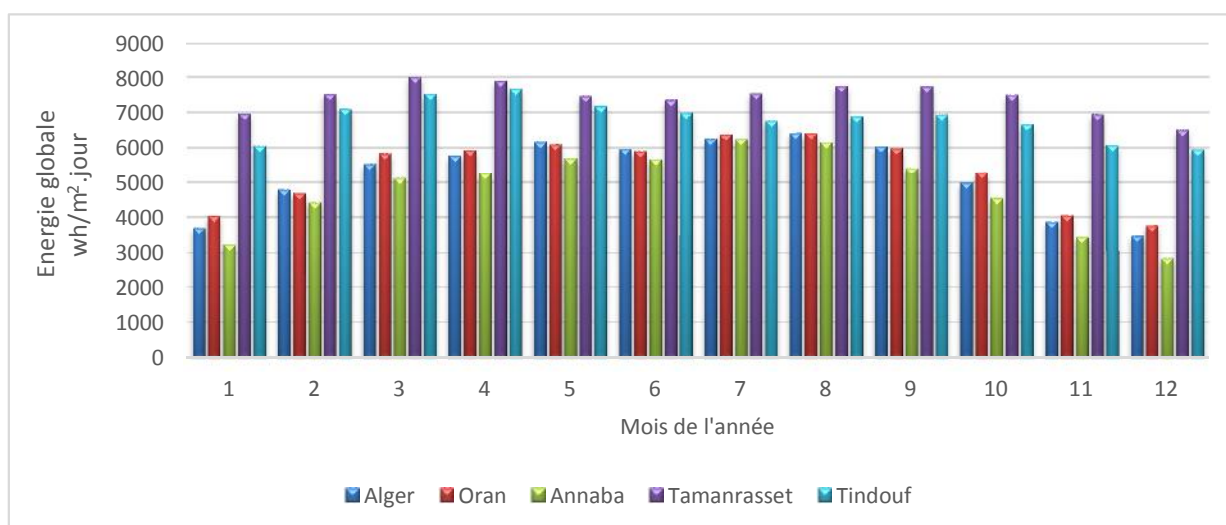


Illustration des valeurs du tableau

Remarque :

De ces valeurs, nous remarquons que l'énergie globale reçue au sud est beaucoup plus importante que celle reçue au nord.

I.19 Le réseau météorologique Algérien :

En Algérie, il existe un réseau de 78 stations de mesure météorologiques de l'O.N.M, reparti sur tout le territoire algérien. Cependant, seules 7 stations météorologiques assurent la mesure des composantes diffuses et globales du rayonnement solaire reçu sur un plan horizontal en raison, soit du manque de fiabilité des appareils de mesure, ou bien, du coût élevé d'un tel appareillage.



Figure I.12 Quelques répartitions territoriale des stations météorologiques en Algérie[9]

STATIONS Météorologiques	Latitudes	Altitude	Albédo
1- ANNABA	36,50 N	4 M	0,2
2- ALGER	36,43 N	25 M	0,2
3- ORAN	35,38 N	99 M	0,2
4- DJELFA	34,41 N	1144 M	0,2
5- TINDOUF	27,40 N	402 M	0,3
6- TAMANRASSET	22,47 N	1378 M	0,3

Tableau I.2:Quelque répartition territoriale des stations météorologiques en Algérie[9]

I.20.Conclusion :

L'énergie solaire est disponible sur toute la surface de notre planète qui reçoit plus de 15000 fois l'énergie que l'humanité consomme. L'exploitation de cette énergie peut se faire de trois manières: énergie thermique, énergie thermodynamique et l'énergie photovoltaïque.

L'Algérie dispose d'un gisement solaire important pas encore exploité. Cette forme d'énergie présente beaucoup d'avantages en production d'électricité principalement. C'est une forme d'énergie disponible, économique, non polluante et nécessite peu d'entretien.

A blue graphic resembling a scroll, with a vertical strip on the left side and rounded corners. The text is centered within the main body of the scroll.

Chapitre II

Cellule et module photovoltaïque

II.1. Introduction:

Le terme « photovoltaïque », souvent abrégé par les lettres PV, qui a été formé à partir des mots « photo », un mot grec signifiant lumière, et « Volta », le nom du physicien italien Alessandro Volta, qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque, c'est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité. Les cellules solaires photovoltaïques sont des semi-conducteurs capables de convertir directement la lumière en électricité. Cette conversion, appelée effet photovoltaïque.

Un panneau solaire est l'un des composants du système appelé "Générateur solaire", Le générateur solaire ou photovoltaïque a pour but de "fabriquer de l'électricité" à partir de la lumière du soleil.

II.2. Générateur photovoltaïque :

Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements mis en place pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de satisfaire les besoins en charge. En fonction de la puissance désirée, les modules peuvent être assemblés en panneaux pour constituer un "champ photovoltaïque". Relié au récepteur sans autre élément, le panneau solaire fonctionne "au fil du soleil", c'est-à-dire que la puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'ensoleillement. Elle est donc à son maximum lorsque le soleil est au zénith et nulle pendant la nuit.

II.2.1. Constitution général d'un générateur photovoltaïque :

Le générateur photovoltaïque est composé particulièrement par:

a. Les cellules solaires:

Une cellule solaire photovoltaïque est une plaquette de silicium (semi-conducteur), capable de convertir directement la lumière en électricité. Cet effet est appelé l'effet photovoltaïque. Le courant obtenu est un courant continu et la valeur de la tension obtenue varie entre 0.2 à 0,5 V.

b. Les modules:

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. La puissance crête, obtenue sous un éclairage

maximal sera proportionnelle à la surface du module. La rigidité de la face avant (vitre) et l'étanchéité sous vide offerte par la face arrière soudée sous vide confèrent à l'ensemble sa durabilité.

c. Le générateur photovoltaïque:

L'interconnexion des modules entre eux, en série ou en parallèle, pour obtenir une puissance plus grande, définit la notion de générateur photovoltaïque. Le générateur photovoltaïque se compose de plusieurs modules et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs.

II.3. Module solaire photovoltaïque :

Le module solaire photovoltaïque est un système capable de capter une partie de l'énergie solaire reçu sur terre, et de la convertir en courant électrique continu. Le fonctionnement d'un panneau solaire photovoltaïque repose sur plusieurs éléments comme :

- Les cellules photovoltaïques transformant l'énergie en tension électrique continue.
- Un système de montage et d'ancrage.
- À cela s'ajoutent les équipements électriques (Câblages, Régulateur de charge, onduleur...).

II.4. La cellule PV :

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées :

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

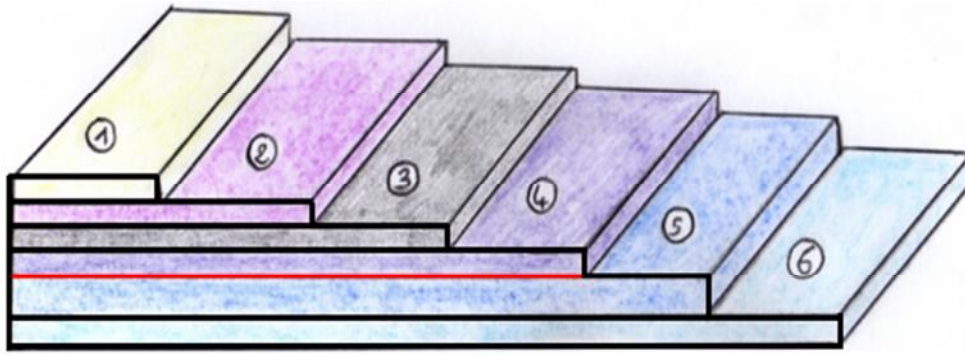


Figure II-1 Structure de la cellule photovoltaïque[10]

— Jonction entre (N) et (P)

Nomenclature :

- 1- Verre
- 2- Revêtement anti-réflexion
- 3- Grill métallique conductrice (pole +)
- 4- Couche semi-conductrice dopé N
- 5- Couche semi-conductrice dopé P
- 6- Couche conductrice en métal (pole -)

La cellule photovoltaïque sera donc une plaquette du matériau semi-conducteur; où la jonction P-N représente le cœur de la cellule photovoltaïque; elle représente le vrai générateur dans le dispositif.

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée de la cellule photovoltaïque est une tension continue, elle varie en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule.

II.4.1. Les différentes technologies :

Un module photovoltaïque n'est qu'un panneau constitué de plusieurs cellules reliées entre elles électriquement.

Dans un panneau photovoltaïque, le rendement de 10 correspond à une puissance de 100 à 180 watts crête par mètre carré, cette dernière dépend de l'énergie captée par un module et cette énergie

captée dépend à son tour de plusieurs paramètres comme; la surface, la latitude du lieu ainsi que la température qui est l'objectif de ce travail. Les modules se distinguent en fonction des technologies de silicium qu'ils utilisent:

1. Silicium Monocristallin:

Les capteurs photovoltaïques sont à base de cristaux de silicium encapsulés dans une enveloppe plastique. Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme.

- avantage : très bon rendement (de 14% à 15%).
- inconvénients : coût élevé, rendement faible sous un faible éclaircissement.

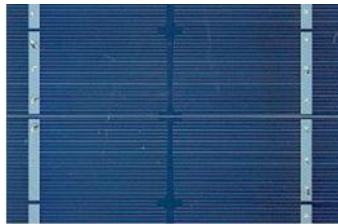


Figure III-2 Cellule au Silicium Monocristallin[11]

2. Silicium Poly-cristallin:

Les capteurs photovoltaïques sont à base de poly-cristaux de silicium, notablement moins coûteux à fabriquer que le silicium monocristallin, mais qui ont aussi un rendement un peu plus faible. Ces poly-cristaux sont obtenus par fusion des rebuts du silicium de hautes performances électronique. Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.

- **avantages** : Bon rendement (13%), mais cependant moins bon que pour le monocristallin, moins chère que le monocristallin.
- inconvénient : Les mêmes que le monocristallin.

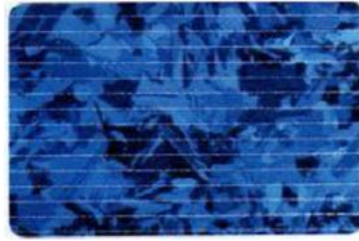


Figure III-3 Cellule au Silicium Poly-cristallin[11]

3. Silicium amorphe:

Les panneaux « étalés » sont réalisés avec du silicium amorphe au fort pouvoir énergisant et présentés en bandes souples permettant une parfaite intégration architecturale. Empilement monolithique de deux cellules simples. En combinant deux cellules (couche mince de silicium amorphe sur silicium cristallin) absorbant dans des domaines spectraux se chevauchant, on améliore le rendement théorique par rapport à des cellules simples distinctes, qu'elles soient amorphes, cristallines ou microcristallines.

- avantages : sensibilité élevée sur une large plage de longueur d'onde, bon rendement.

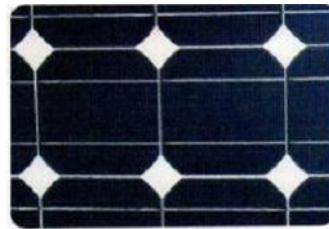


Figure II-4 Cellule au Silicium amorphe (couche mince) [11]

II.5. L'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque est un processus de transformation de l'énergie émise par le soleil, sous forme de photons, en énergie électrique à l'aide de composant semi-conducteur appelé cellule solaire.

II.6. Un Atome :

Un atome est la plus petite particule d'un élément qui possède les caractéristiques de cet élément. Chacun des 109 éléments connus possède des atomes différents de ceux des autres éléments. Ceci donne à chaque élément une structure atomique unique. Selon la théorie classique de Bohr, les atomes possèdent une organisation de type planétaire avec un noyau au centre et des électrons en orbite autour de lui.

Le noyau est constitué de particules chargées positivement, qu'on appelle protons et de particules non chargées appelées neutrons. Les particules élémentaires qui portent la charge négative sont appelées électrons. Ces électrons « gravitent » selon des couches bien précises.

Chaque type d'atome contient un certain nombre d'électrons et de protons qui le distinguent des atomes de tous les autres éléments.

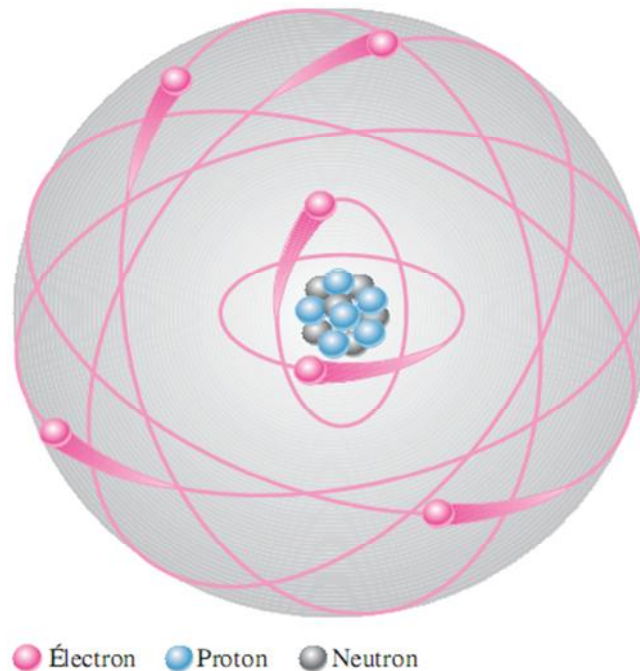


Figure II-5 Les électrons en orbite autour du noyau

II.7. Niveaux d'énergie :

À chaque éloignement distinct (orbite) du noyau correspond un certain niveau énergétique. Dans un atome, les orbites sont regroupées en bandes énergétiques appelées couches. Un atome donné possède un nombre fixe de couches. Chaque couche possède un nombre maximal fixe d'électrons pour des niveaux d'énergie admissibles (orbites). Les différences entre les niveaux d'énergie à l'intérieur d'une couche sont beaucoup plus petites que la différence d'énergie entre les couches. Les couches sont désignées K, L, et ainsi de suite, K étant celle la plus près du noyau avec un niveau d'énergie et la couche L avec deux niveaux d'énergie. Des couches additionnelles peuvent exister pour d'autres types d'atomes selon l'élément.

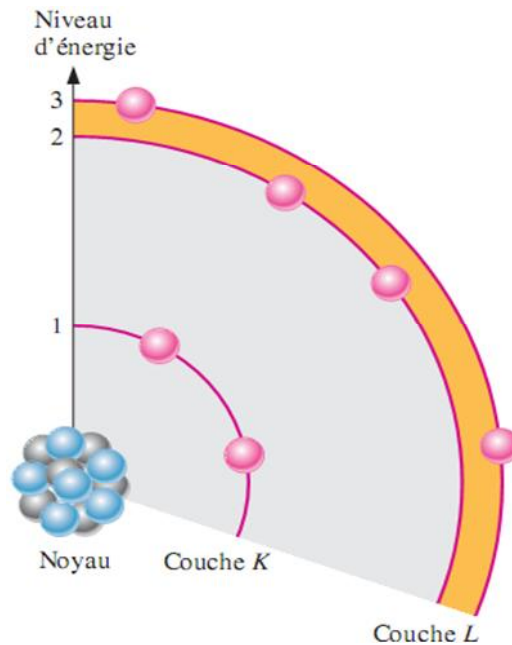


Figure IVI-6 Le niveau d'énergie augmente à mesure qu'on s'éloigne du noyau de l'atome

II.8. La théorie des bandes

Lorsqu'un photon est capté par un électron, celui-ci capte son énergie et change de couche. Mais cette énergie qu'il capte doit être suffisante pour passer sur une autre couche, sinon rien ne se passe. Soit cet électron passe la prochaine marche, soit il reste sur sa première couche que l'on nomme état fondamental.

Les autres états sont appelés états excités. Un électron excité est un électron qui possède une énergie potentielle supérieure au strict nécessaire.

Dans la théorie des bandes, les électrons n'ont la possibilité de prendre que des valeurs d'énergie comprises dans certains intervalles, lesquels sont séparés par des « bandes » d'énergie interdites.

Ainsi, un matériau est conducteur lorsqu'il y a continuité entre la bande de valence, et la bande de conduction. Les électrons n'ont pas besoin d'une certaine excitation pour être conducteurs (c'est le cas des métaux par exemple). Sinon, le matériau est dit isolant.

Mais il existe le cas des matériaux semi-conducteurs, si la bande interdite est suffisamment fine, alors avec une excitation suffisante, l'électron peut atteindre la bande de conduction et le matériau devient conducteur.

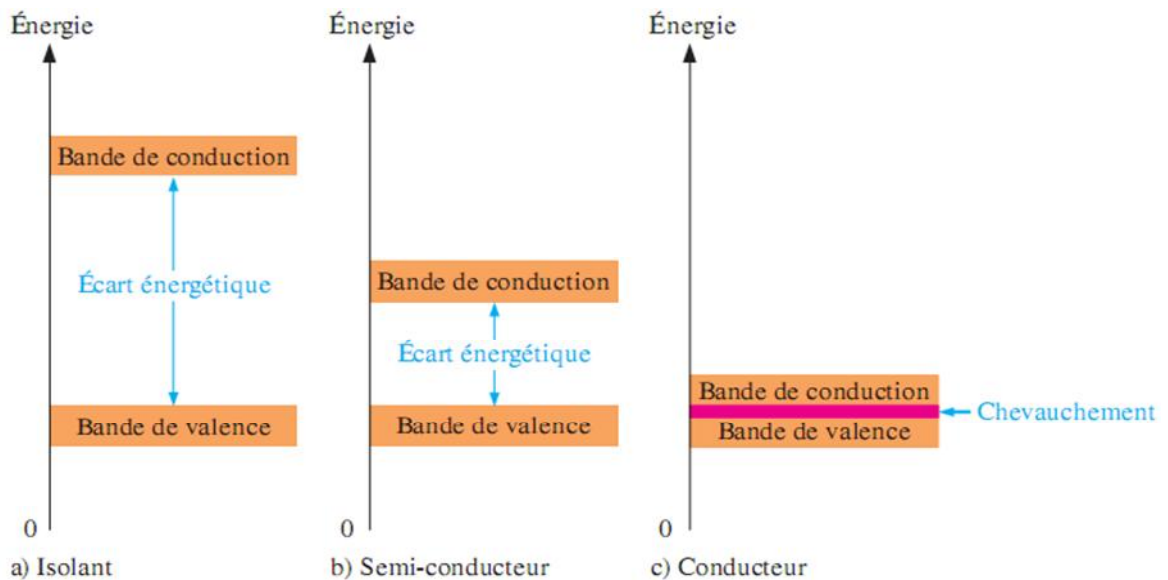


Figure II-7 Diagrammes énergétiques pour les trois types de matériaux

II.9. Semi-conducteurs :

Un semi-conducteur est un matériau qui a les caractéristiques électriques d'un isolant, mais pour lequel la probabilité qu'un électron puisse contribuer à un courant électrique, quoique faible, est suffisamment importante.

Les matériaux semi-conducteurs sont des corps dont la résistivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants.

a) Les semi-conducteurs intrinsèques :

Il est un semi-conducteur pur sans défaut de structure. Dans un semi-conducteur intrinsèque, à chaque électron de la bande de conduction correspond un trou dans la bande de valence.

Les électrons situés sur la couche la plus éloignée du noyau, qui participent aux liaisons covalentes peuvent, sous l'effet de l'agitation thermique, devenir porteur de charge

Le diagramme énergétique est constitué de deux bandes (conduction et valence) séparé par une bande interdite. Pour franchir cette bande l'électron doit acquérir de l'énergie (thermique, photon, ...) Mais le nombre d'électrons libres dans un semi-conducteur intrinsèque reste très faible. Ici le nombre de trou et d'électron est égal.

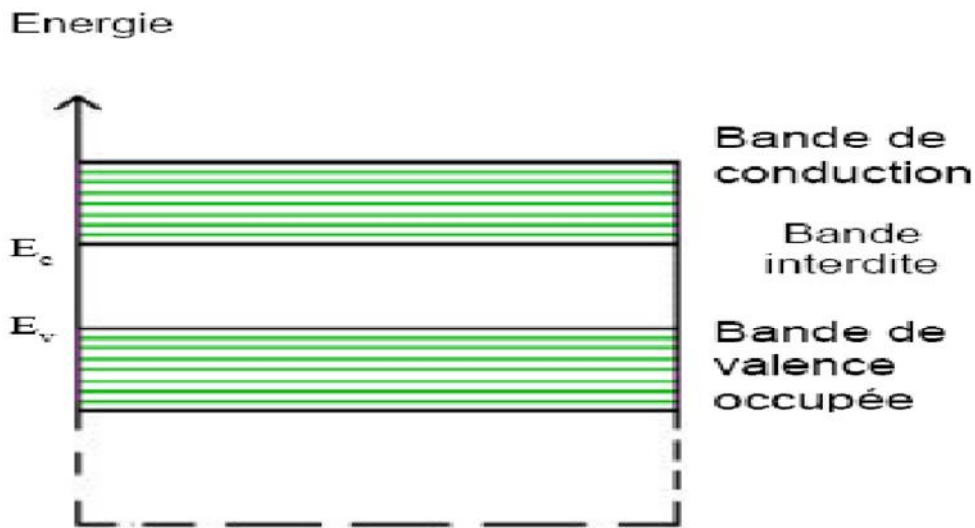


Figure VI-8 Diagramme de bandes

b) Les semi-conducteurs extrinsèques :

L'introduction de certaines impuretés dans un matériau semi-conducteur permet d'y modifier le nombre de porteurs libres, de choisir le type de conduction (par électrons ou par trous) et de contrôler la conductivité. Pour augmenter la conductivité des semi-conducteurs on y introduit des impuretés pour modifier leur comportement. Ce procédé est appelé dopage, il existe deux types de semi-conducteur extrinsèques.

b.1) Dopage de type N

Le dopage de type N (négative) consiste à introduire dans la structure cristalline semi-conductrice des atomes étrangers qui ont la propriété de donner chacun un électron excédentaire (charge négative), libre de se mouvoir dans le cristal. C'est le cas du phosphore (P) dans le silicium (Si) :

Ajouter un atome de phosphore au sein de la structure cristalline du silicium. Le phosphore disposant de 5 électrons sur sa couche électronique externe va s'associer avec 4 atomes de silicium, laissant ainsi libre un électron qui va être excité vers la bande de conduction par l'agitation thermique. D'où le nombre d'électron libre qui va fortement augmenter (Le nombre de trou est très inférieur au nombre d'électron libre)

Dans un matériau de type n, on augmente fortement la concentration en électrons libres.

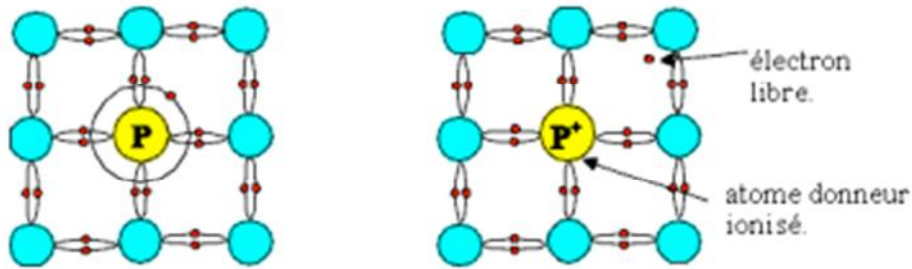


Figure II-9 Silicium de type N[12]

b.2) Dopage de type P

Le dopage de type P (Positive) se fait de la même façon, on introduit des atomes trivalents, utilise des atomes dont l'insertion dans le réseau cristallin donnera un trou excédentaire. Ce trou se déplace de proche en proche dans le cristal pour créer un courant. Le bore (B) est le dopant de type p le plus couramment utilisé pour le silicium.

Le dopage de type P consiste à ajouter un atome de bore au sein de la structure cristalline du silicium. Le bore disposant de 3 électrons sur sa couche électronique externe va s'associer avec 4 atomes de silicium, laissant ainsi libre un trou. Cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale positive.

Ici le nombre de trous est très supérieur au nombre d'électrons libres du cristal.

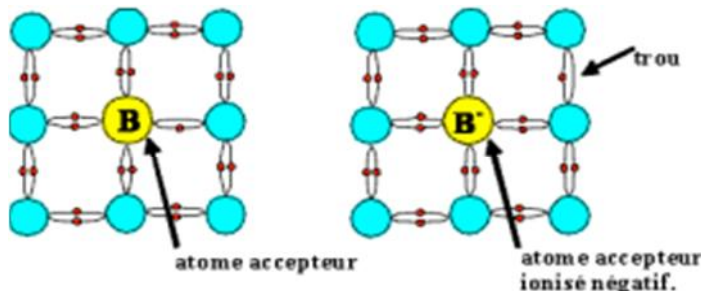


Figure II-10 Silicium de type P[12]

II.9.1. La jonction PN :

Une jonction PN est constituée par la juxtaposition de deux régions de types différents d'un même monocristal de semi-conducteur. La jonction PN joue un rôle important dans la physique des composants électroniques, ses propriétés sont exploitées dans les diodes à jonction.

La diode est un composant électronique, non-linéaire et polarisé qui ne laisse passer le courant électrique que dans un sens.

II.9.2. Formation de la jonction PN :

Si un cristal de silicium a reçu des impuretés (pentavalentes et trivalentes) devient un semi-conducteur (opération appelée dopage). En chauffant le cristal à une température suffisante, comprise entre la température de fusion du corps déposé et celle du monocristal, les atomes des deux corps déposé pénètrent dans le cristal par diffusion et créent les zones P et N.

L'accolement d'une région dopé P et d'une région dopée N. Lors de cet assemblage, les porteurs de charges libres s'attirent et se recombinent dans la zone de jonction où les porteurs libres disparaissent : c'est la zone de transition.

Les trous de la zone p vont neutraliser les électrons libres de la zone n (il y a diffusion des charges). Ce phénomène va s'arrêter quand le champ électrique E_{int} créé par les atomes donneurs ou accepteurs (qui vont devenir respectivement des charges + et -) va être suffisant pour contrarier le mouvement des charges mobiles. Ceci constitue une barrière de potentiel pour les porteurs majoritaires. Par contre, cette barrière de potentiel va favoriser le passage des porteurs minoritaires (conduction électrique), d'où le courant de fuite à l'équilibre thermodynamique.

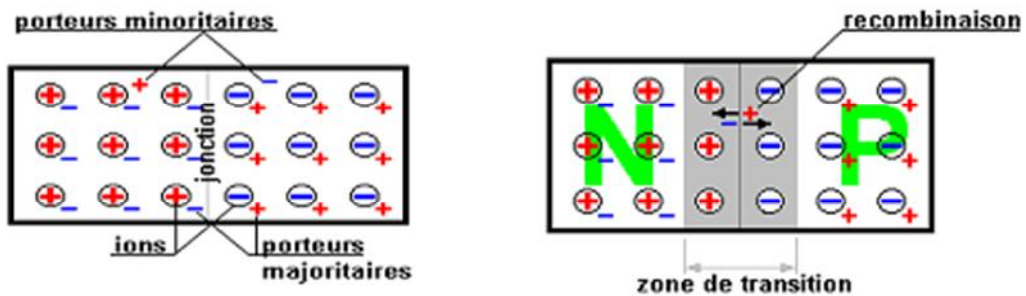


Figure VII-11 Formation d'une jonction PN[13]

Il ne reste donc plus que les ions dans cette zone qui vont créer un champ électrique interne au niveau de la jonction et qui empêche les charges libres restantes dans chaque zone de traverser la jonction pour se recombinaison.



Figure II-12 Présenté la zone de transition[13]

II.9.3. Le principe de conversion photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p.

La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction (dite p-n) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire (électron – trou). Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel le courant électrique circule.

II.9.4. Conversion photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque est un processus de transformation de l'énergie émise par le soleil, sous forme de photons, en énergie électrique à l'aide de composant semi-conducteur appelé cellule solaire

L'effet photovoltaïque ne peut se produire que s'il existe une barrière de potentiel dans le semi-conducteur avant qu'il ne soit éclairé. Une telle barrière existe, par exemple, à l'interface entre deux volumes dopés différemment c'est à dire où l'on a introduit deux types différents d'impuretés à concentration différente, par exemple de type P-N. Si ce matériau est éclairé, les charges électriques, rendus mobiles par la lumière (l'effet photoélectrique), seront séparées par la barrière avec d'un côté les charges positives et de l'autre côté les charges négatives

Parmi les matériaux semi-conducteurs les plus utilisés on trouve le silicium, le germanium, le sulfure de Gallium et l'arséniure de Gallium.

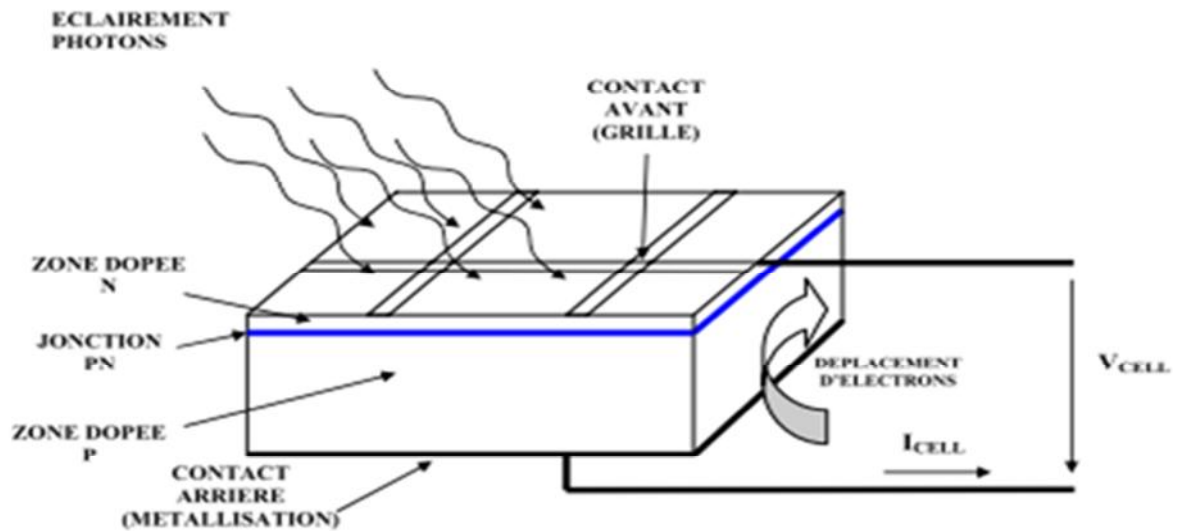


Figure II-13 Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque[14]

II.10. Cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque est un dispositif électronique destiné à transformer la lumière en électricité, sa structure à jonction PN c'est-à-dire est composée de deux couches : une couche P et une couche N.

La cellule solaire est basée sur un semi-conducteur qui est en silicium, c'est un convertisseur instantané fournissant de l'énergie électrique s'il reçoit une énergie solaire sous forme de rayonnement. Elle se comporte alors comme en génération de courant continu.

II.10.1. Fonctionnement d'une cellule solaire :

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur trois mécanismes suivants :

- ❖ Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif.
- ❖ Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur :
- ❖ Collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant d'où l'intérêt des semi-conducteurs

pour l'industrie photovoltaïque. Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électron/trou créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction PN. Le fonctionnement des cellules photovoltaïque est illustré sur la figure

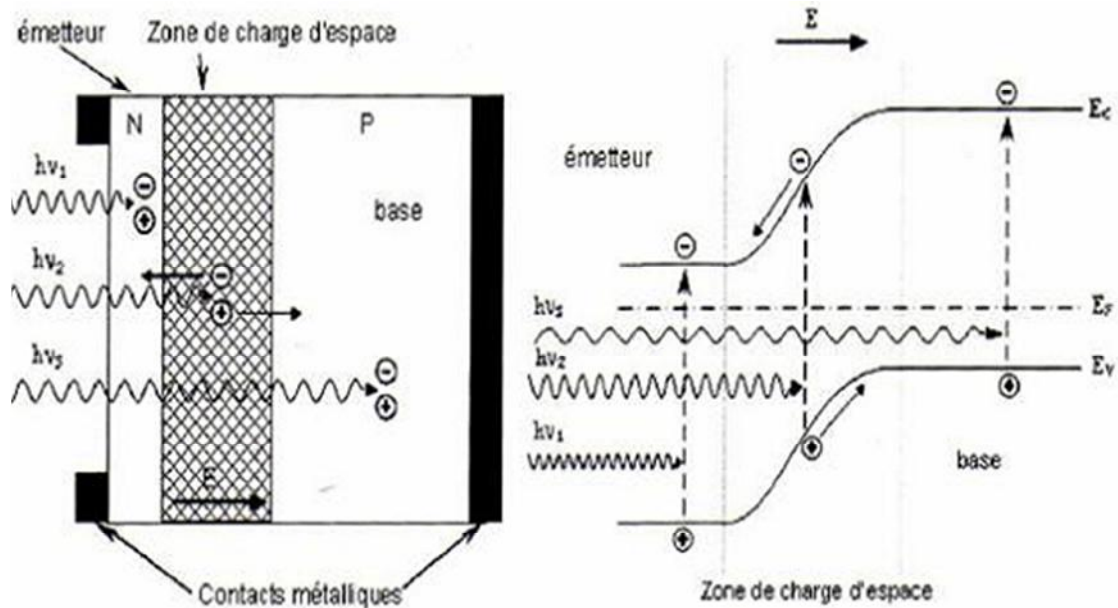


Figure II-14 Structure (gauche) et diagramme de bande (droit) d'une cellule solaire photovoltaïque.

(Les dimensions respectives des différentes zones ne sont pas respectées) [15]

- Les photons incidents créent des porteurs dans la zone Net P et dans la zone de charge d'espace

II.10.2. Caractéristiques électriques d'une cellule solaire:

La variation du courant « I » en fonction de la tension « V » à l'obscurité et en particulier sous éclairage, permet d'évaluer la performance de la cellule solaire ; la figure montre deux exemples de caractéristiques I – V de cellule solaire sans et avec éclairage.

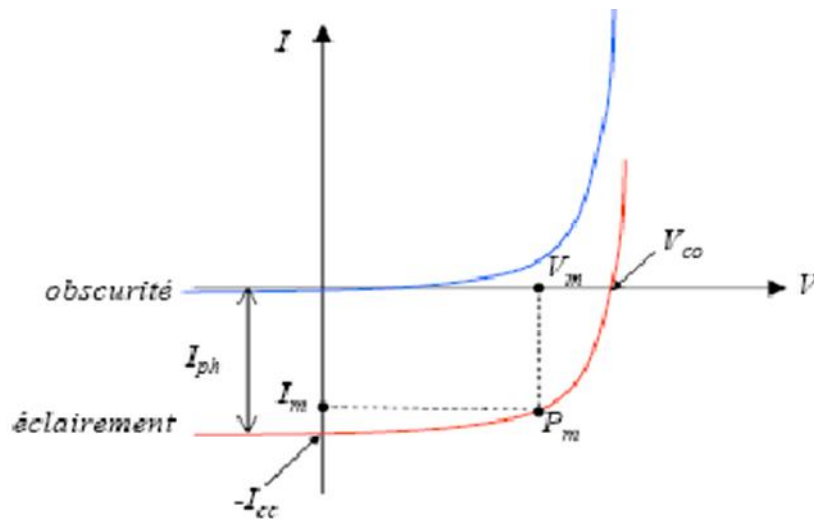


Figure II-15 Caractéristique I-V d'une cellule solaire; à l'obscurité et sous éclairement[16]

II.11. Module photovoltaïque :

Afin d'augmenter la tension d'utilisation, les cellules PV sont connectées en série. La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge, les modules ont généralement 36 cellules. De plus, la fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique. Le tout est appelé un module photovoltaïque.

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation. Toutefois, il importe de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dus à de l'ombrage, de la poussière, etc.) peuvent endommager les cellules de façon permanente.

II.11.1. Caractéristique électrique d'un module solaire

II.11.1.1. Caractéristique courant-tension I(V) :

C'est une caractéristique fondamentale du module solaire type MSX62 d'un nombre de cellule ($N_s=36$) définissant cet élément comme générateur. Elle est identique à celle d'une jonction P-N avec un sens bloqué, mais décalé le long de l'axe du courant d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement. Elle se trace sous un éclairement fixe et une température constante.

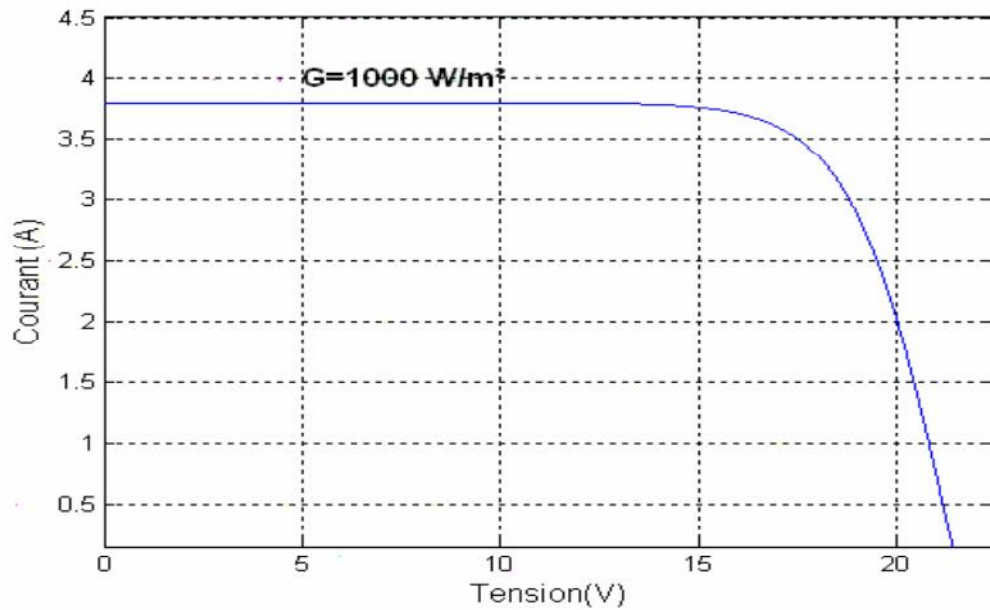


Figure VIII-16 Caractéristique I(V) d'un module solaire, $T=25^{\circ}\text{C}$ [17]

II.11.1.2. Caractéristique puissance-tension P(V) :

La puissance débitée par le module photovoltaïque dépend du point de fonctionnement de cette dernière ; c'est le produit de l'intensité de courant et de la tension entre ses bornes. Le point « M » représente la puissance maximale débitée par le module.

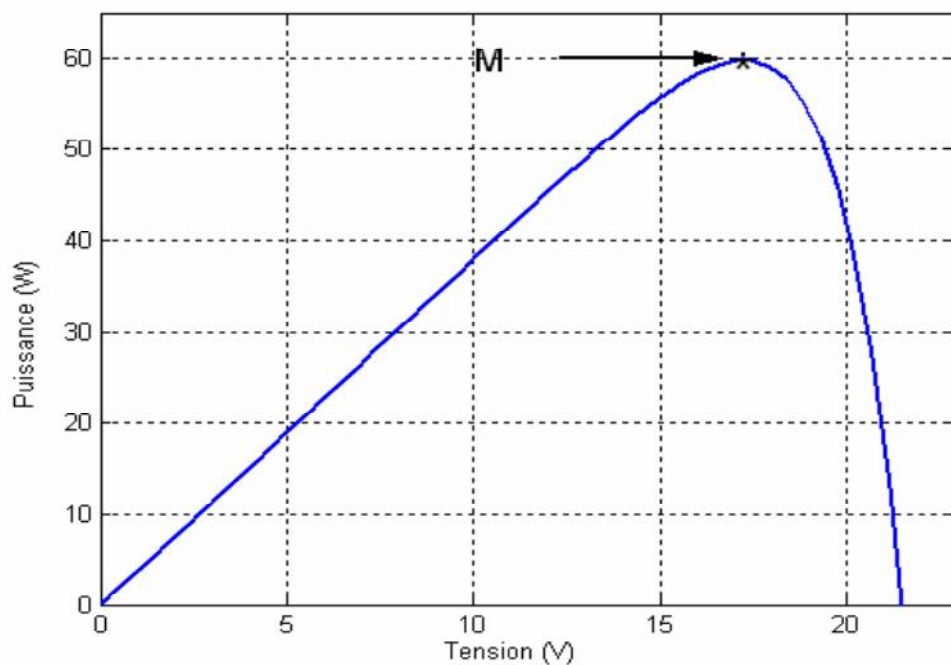


Figure II-17 Caractéristiques P (V) d'un panneau solaire, $T=25^{\circ}\text{C}$ [17]

II.11.2. Groupement en série :

Dans un groupement en série figure (VIII-18), les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par l'addition des tensions à courant donné. La figure (IXI-19) montre la caractéristique résultante (I_s, V_s) obtenue par l'association en série (indice s) de ns cellules identiques (I_{cc}, V_{co}).

Avec : $I_{scc} = I_{cc}$: le courant de court-circuit.

$V_{sco} = nsV_{co}$: la tension de circuit ouvert.

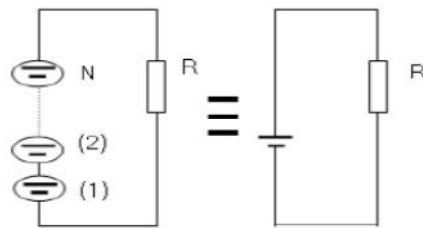


Figure II-18 Association en série des modules[18]

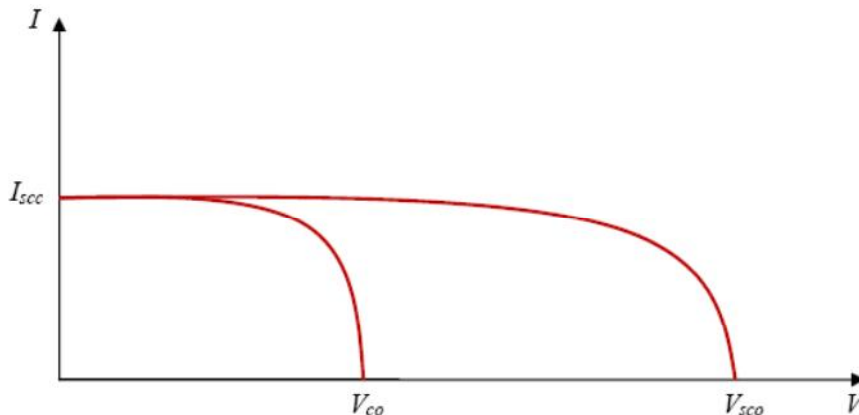


Figure XI-19 Caractéristique résultante d'un groupement en série de ns cellules identiques[18]

II.11.3. Groupement en parallèle :

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle figure (XII-20), les cellules étant soumises à la même tension, les intensités s'additionnent : la caractéristique résultante est obtenue par addition de courants à tension donnée. La figure (XIII-21) montre la caractéristique résultante (I_{pcc}, V_{pco}) obtenue en associant en parallèle (indice p) np cellules identiques (I_{cc}, V_{co}).

$I_{pcc} = npI_{cc}$: le courant de court-circuit.

$V_{pco} = V_{co}$: la tension de circuit ouvert.

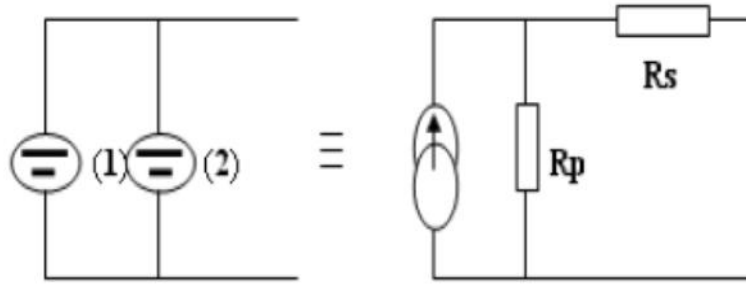


Figure II-20 Association des modules en parallèle[18]

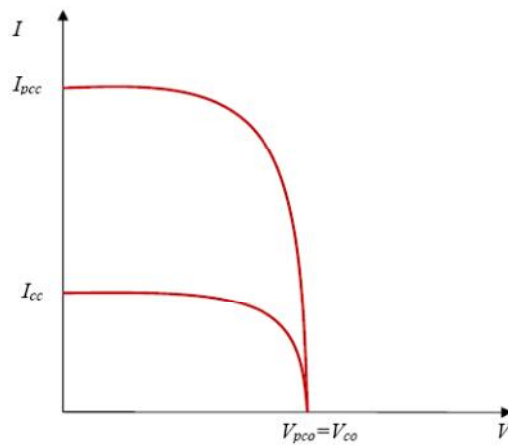


Figure II-21 Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de ns cellules identiques[18]

II.11.4. Groupement mixte (série-parallèle) :

Le générateur photovoltaïque est constitué d'un réseau série-parallèle de nombreux modules photovoltaïques regroupés par panneaux photovoltaïques figure (XIII-22). La caractéristique électrique globale courant/tension du GPV se déduit donc théoriquement de la combinaison des caractéristiques des cellules élémentaires supposées identiques qui le composent par deux affinités de rapport ns parallèlement à l'axe des tensions et de rapport np parallèlement à l'axe des courants, ainsi que l'illustre la figure, ns et np étant respectivement les nombres totaux de cellules en série et en parallèle.

$I_{gcc} = np \cdot I_{cc}$: courant de court-circuit du module résultant.

$V_{gco} = n \cdot V_{co}$: tension du circuit ouvert du module résultant.

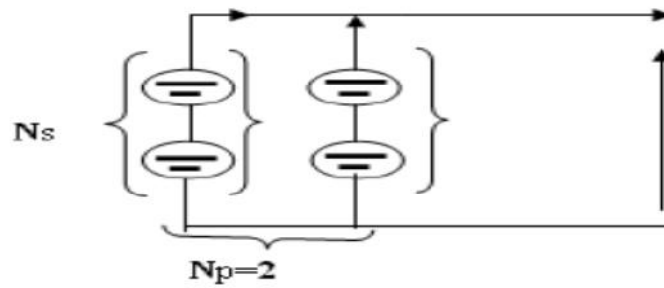


Figure XVI-22 Association mixte des modules.[18]

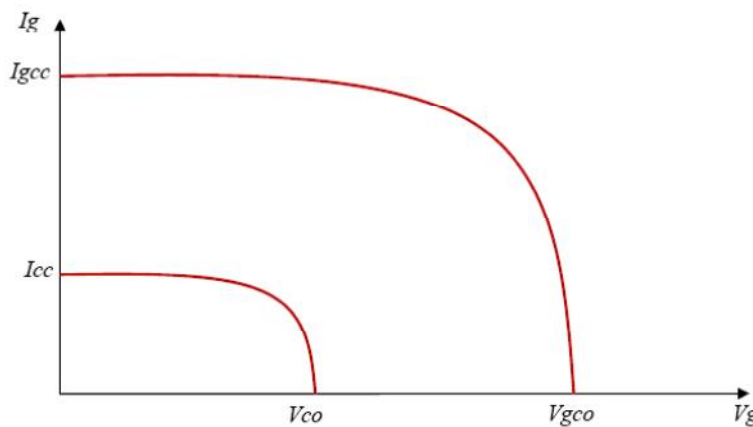


Figure XVI-23 Caractéristique résultante d'un groupement mixte[18]

Les générateurs photovoltaïques sont alors réalisés en vue d'augmenter la tension (Groupement en série) ou augmenter le courant (Groupement en parallèle) par l'association d'un grand nombre de cellules élémentaires de même technologie et de caractéristiques identiques. Le câblage série-parallèle est donc utilisé pour obtenir un module PV (ou panneau PV) aux caractéristiques souhaitées (courant et tension suffisants)

II.11.5. Facteur de forme :

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée P_{max}) pour un point de fonctionnement PM (I_M, V_M) de la courbe courant-tension (courants compris entre 0 et I_{CC} et tension comprise entre 0 et V_{OC}). Ce point PM est obtenu en modifiant la valeur de la résistance externe, quand l'aire du rectangle défini par les axes O_x, O_y et les droites $x = I_M$ et $y = V_M$ passe par un maximum.

Le nom "facteur de forme" (fill factor) dérive de la représentation graphique. Il est défini par la relation suivante:

$$ff = \frac{P_m}{V_{oc} \times I_{cc}} = \frac{V_m \times I_m}{V_{oc} \times I_{cc}} \quad (\text{II.1})$$

La puissance maximale délivrée à la charge est présentée :

$$P_m = V_m \times I_m \quad (\text{II.2})$$

II.11.6. Rendement de conversion:

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 P_{in} .

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{ff \times V_{oc} \times I_{cc}}{P_{in}} \quad (\text{II.3})$$

P_{in} : Puissance incidente = P solaire = 100 W/cm².

La densité de puissance incidente égale à : $\frac{P_m}{A}$

A : section de la cellule.

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

Le rendement varie généralement entre 8 à 13% pour le silicium monocristallin, entre 7 à 11% pour le poly-cristallin et entre 4 et 9% pour la cellule au silicium amorphe.

II.11.7. Zones de fonctionnement du module solaire :

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement; seule la courbe I, V est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque. La figure représente trois zones essentielles :

- **La zone (I)** : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.

- **La zone (II)** : correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.
- **La zone (III)** : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension

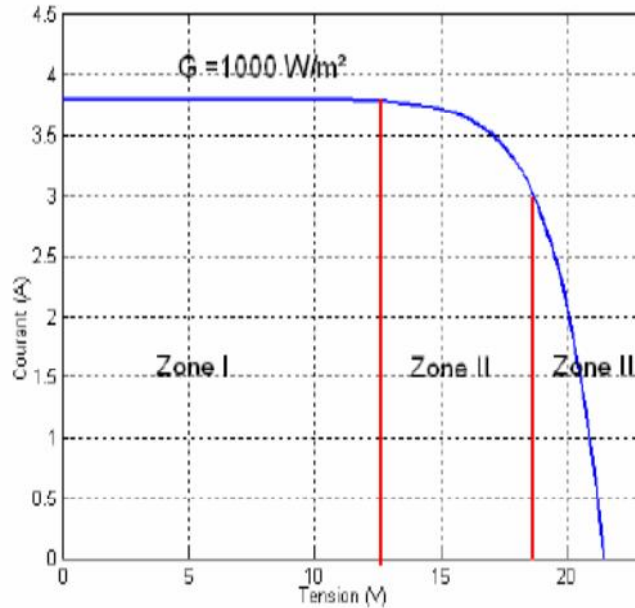


Figure II-24 Les différentes zones de la caractéristique I (V), T=25°C

II.12. Fonctionnement optimal du générateur :

Dans les conditions données, c'est au point de puissance maximale que l'on exploite au mieux la puissance crête installée. C'est pourquoi ce point est souvent qualifié de point de puissance optimale, terme traduisant mieux le caractérisé relatif aux conditions d'éclairement et de température de la puissance fournie, l'utilisation du générateur étant le plus souvent considérée comme optimal en ce point. Ce point est alors noté (V_{opt}, I_{opt}) .

Le point fonctionnement (V_p, I_p) du générateur est défini par l'intersection de sa caractéristique électrique avec celle de la charge. Seule une charge dont la caractéristique passe par le point (V_{opt}, I_{opt}) permet d'en extraire la puissance optimale disponible dans conditions considérées et l'impédance statique optimale de charge vaut alors $R_{opt} = V_m / I_m = V_{opt} / I_{opt}$.

Etant donné que ce point dépend totalement des conditions telles que l'éclairement G et la température, il en est de même de l'impédance de charge optimal.

L'utilisation optimale du générateur consiste alors à ce que sa charge conserve à chaque instant les valeurs optimales R_{opt} lorsque les conditions varient : il y a donc lieu d'effectuer en permanence l'adaptation d'impédance nécessaire

II.13. Solutions pour protéger une cellule solaire :

- ❖ Les panneaux (ensembles des cellules solaire) sont protégés dans leur face extérieure avec verre tempéré qui permet de supporter des conditions météo logiques très dures comme la glace, les changements brusques de température.

- ❖ Le verre de protection réduit un peu la production du panneau solaire, il est collé ça permet au panneau de se refroidir par conduction par la face avant à peu près aussi bien que sans la vitre supplémentaire ; mais n'est pas la solution simple

- ❖ Système de refroidissement :

- La température intérieure d'un panneau solaire peut facilement atteindre 150° . En conséquence, la température intérieure du panneau ne passe jamais 75°C même si le système est éteint.

- Le système de refroidissement est automatique, avec des ventilateurs qui nous ont permis de placer la cellule PV à l'intérieur du panneau, placée derrière une couche plastique robuste qui protège contre les jets de pierre, la cellule PV produit sa propre chaleur, ce qui augmente le rendement de panneau

II.14 Conclusion :

Afin de rendre l'énergie solaire photovoltaïque qui est une énergie renouvelable réalisable physiquement, elle nécessite un équipement complémentaire dit système photovoltaïque, contenant les composants d'amélioration nécessaires qui rendent l'électricité produite consommable (régulation, conversion CC/AC...).

Dans ce chapitre on a présenté les notions générales sur les systèmes photovoltaïques, synthèse d'assemblage des panneaux et une spécification des différentes zones de fonctionnement et quelques caractéristiques électriques.

Chapitre III

Réalisation de l'installation photovoltaïque

III-1 Introduction

La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique à faible, moyenne et à haute tension est obtenue par des techniques différentes en fonction des besoins.

Dans ce chapitre, nous représenterons les différents éléments de notre installation composée du circuit de refroidissement et du circuit électrique. Notre réalisation a été faite au niveau du laboratoire de génie de la construction (soufflerie).

A cause de l'augmentation de la température sur la surface du panneau solaire qui peut atteindre les 100°C (journée ensoleillée), divers phénomènes interagissent dans l'expérience. Nous avons essayés d'introduire un système de refroidissement à eau, ce système qui permet d'abaisser la température du panneau et augmenter son rendement. Notre système comporte deux parties bien différentes, chaque partie de l'installation utilise un équipement complètement différent;

- a- Circuit d'eau de refroidissement
- b- Circuit électrique

III-2 Description du système :

Ce système permet de capter le rayonnement solaire, le convertir en charge électrique. Il comprend ;

- Un panneau solaire photovoltaïque
- Dispositifs pour effectuer les mesures (des multimètres)
- Une pompe centrifuge pour pomper l'eau de refroidissement
- La cuve d'eau
- La tuyauterie
- Les câbles de connexion électrique.

Cet ensemble de ce système est représenté dans la figure III-1 ci-dessous.

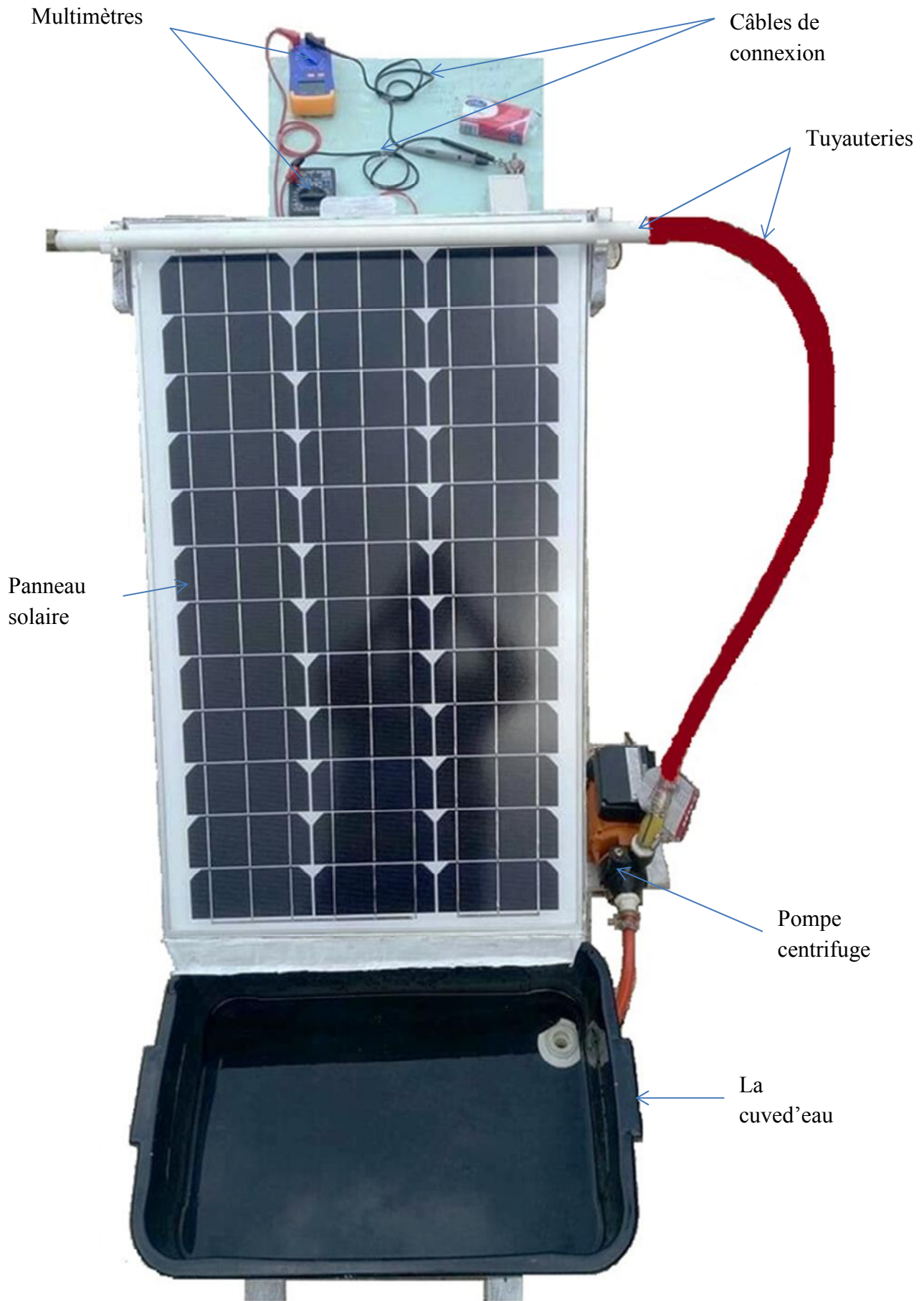


Figure III-1 : les circuits du panneau solaire photovoltaïque

III-3. Le circuit électrique :

Dans le circuit électrique, l'énergie électrique produite est en continu (DC), un panneau solaire photovoltaïque et un ensemble d'équipements de mesure dans un circuit fermé, La figure ci-dessous représente les composants électriques de notre installation.

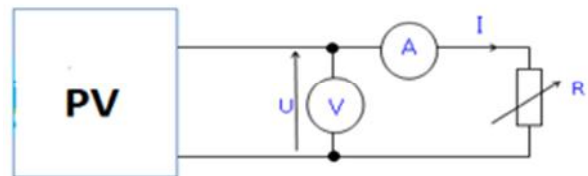
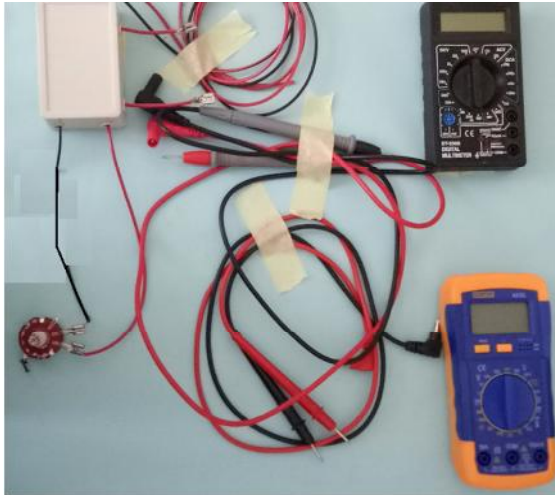


Figure III-2 : L'installation électrique

Ce circuit est un ensemble de composants électriques interconnectés et dotés de points accessibles à l'observation (bornes), à la mesure.

Le matériel utilisé pour la manipulation électrique:

- Panneau solaire
- Ampèremètre
- Voltmètre
- Câblages
- Rhéostat (220 $K\Omega$)

Les rayons du soleil viennent alimenter le panneau solaire photovoltaïque qui fournit l'énergie électrique en continu.

III-4. Le panneau photovoltaïque

On a utilisé un panneau solaire photovoltaïque de type monocristallin de dimension 847 mm de hauteur, 546mm de largeur et de 5mm d'épaisseur, il contient 36 cellules, il a les caractéristiques électriques suivantes (à la température $T_{25^{\circ}C}$) :

- Puissance maximale : 50Watts .
- Tension à la puissance maximale : 17.98 Volt .
- Courant à la puissance maximale : 2.78 Ampère .
- Tension au circuit ouvert V_{co} : 21.87 Volt .
- Courant au court-circuit I_{cc} : 3.70 Ampère .

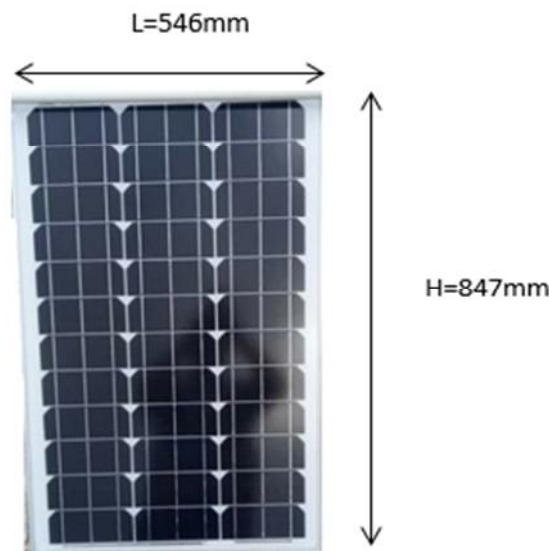


Figure III-3 : Panneau solaire photovoltaïque de type monocristallin

Un courant continu est fourni par le panneau solaire, qui (théoriquement) ne varie pas dans le temps. C'est le même type de courant délivré par une batterie ou une dynamo.

Les tensions les plus courantes sont : 6V, 12V et 24V. On peut le stocker et on peut additionner les sources en parallèle ou en série avec quelques précautions.

III-5. Mesure du courant et tension électrique :

Ce courant qui circule dans le circuit est mesurable à l'aide d'un appareil appelé multimètre.

III-5-1. Le multimètre :

Le multimètre, souvent appelé voltmètre, est un outil utilisé pour la mesure du voltage, du courant et de la résistance, de la façon suivante :

III-5-2. Le voltage :

La mesure de tension s'effectue avec un voltmètre. Il doit être monté en dérivation dans le circuit pour avoir à ses bornes la différence de potentiel à mesurer.

Le voltmètre est souvent placé en parallèle dans le circuit, par rapport au composant qu'on veut mesurer sa tension, avec le multimètre on procède comme suit :

- On place les fiches des cordons dans les borniers appropriés : le cordon noir sur COM et le rouge sur $V\Omega$ ou $MA.V$ (tension), Ω (résistance) et MA (courant)
- On sélectionne volt continu V_{dc} .
- Plaçons les pointes de test en parallèle aux bornes de l'appareil à mesurer (câble rouge sur le + et câble noir sur le – en continu)
- On commence toujours avec le cordon sur le bornier de l'échelle la plus grande puis baisser si nécessaire.



Figure III-4 : Multimètre utilisé comme voltmètre

III-5-3. Le courant :

La mesure de l'intensité du courant électrique s'effectue avec un ampèremètre monté en série dans le circuit

L'ampèremètre est souvent placé en série dans le circuit, par rapport au composant qu'on veut mesurer le courant qui le traverse, avec le multimètre on procède comme suit :

- On place les fiches des cordons dans les borniers appropriés : le cordon noir sur COM et le rouge sur V Ω ou MA.
- On sélectionne Ampère continu A_{dc}.
- Plaçons les pointes de test en série aux bornes de l'appareil à mesurer.
- On commence toujours avec le cordon sur le bornier de l'échelle la plus grande puis baisser si nécessaire.



Figure III-5 : Multimètre utilisé comme Ampèremètre

III-5-4. Le câblage :

La connexion entre les différents composants est assurée par le biais des câbles électriques, il convient de ne pas les rallonger sous peine de forte diminution de rendement : 1 mètre en plus peut faire chuter considérablement la puissance de l'énergie fournie. En pratique, essayez toujours de réduire la longueur de câbles.

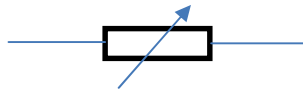


Figure III-6 : Câble de connexion électrique

III-5-5. Rhéostat:

Un rhéostat est une résistance électrique que l'on peut faire varier manuellement, intercalée en série dans un circuit électrique, il est constitué d'une résistance variable dimensionnée de manière à supporter l'intensité maximale du courant devant la traverser. Ils peuvent être aussi appelés potentiomètres ou résistance variable.

Le symbole est aussi parfois utilisé pour exprimer que dans un circuit, la valeur de la résistance est commandée.



Un potentiomètre est un élément résistif possédant trois bornes:

- Deux correspondent aux extrémités du corps de la résistance,
- La dernière correspond au curseur qui peut se déplacer sur le corps de la résistance.



Figure III-7 : Le rhéostat

III-6. Le circuit d'eau de refroidissement :

Le système qu'on a conçu pour refroidir le panneau solaire est en principe courant permet à l'énergie de se déplacer d'un point à un autre.

Ce système utilisé sur notre installation, est amélioré de manière à avoir une continuité d'écoulement, et une solution mécanique. En particulier, pour avoir un mouvement précis.

Notre circuit fonctionne sous une certaine pression. L'énergie nécessaire est délivrée par une des sources d'énergie qui est la pompe centrifuge qui est censée pousser le fluide contenu dans un réservoir et l'envoyer vers un tuyau de jets, avant de revenir dans le réservoir de fluide. On obtient alors un circuit de distribution fermé représenté ci-dessous :

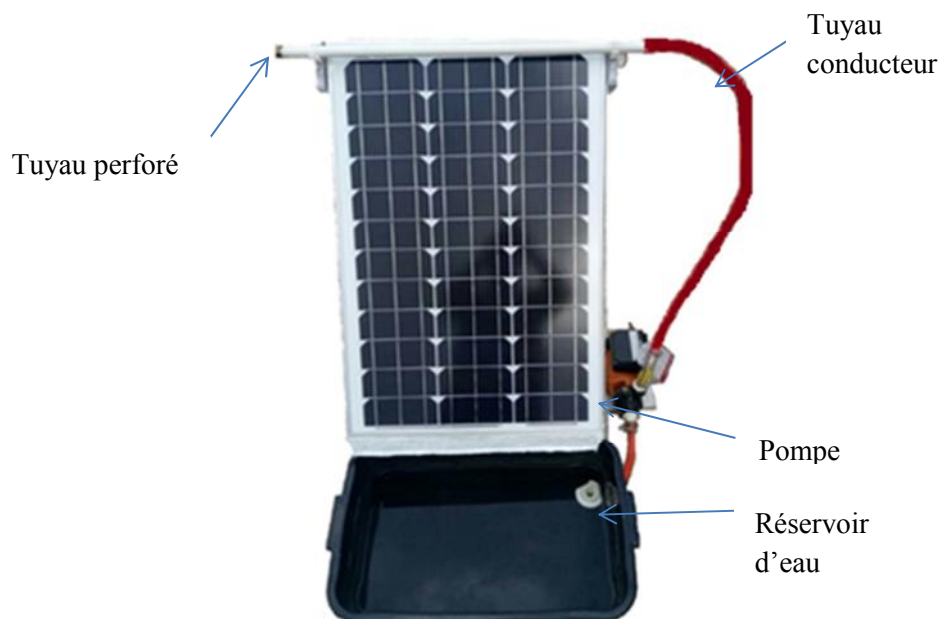


Figure III-8 : Le circuit fermé d'eau de refroidissement

Notre circuit fonctionne à l'aide des éléments suivants :

- Un réservoir d'eau
- Une pompe centrifuge
- Des tuyaux
- Un tuyau à jets

III-6-1. Réservoir d'eau :

Un réservoir pour stocker l'eau avant son utilisation. Cette unité effectue le travail de réception (récupération) d'eau après son utilisation.



Figure III-9 : Réservoir d'eau

III-6-2. Une pompe centrifuge :

Une pompe change le mouvement et la force mécanique en énergie hydraulique, la force mécanique requise pour entraîner la pompe est provenue du moteur électrique.

Pour que la pompe fait circuler l'eau, une alimentation en fluide doit être disponible à l'entrée qui est stockée dans un réservoir plus haut que la pompe, la pesanteur fourni le fluide à la pompe. La pression atmosphérique peut constituer une force importante dans le fonctionnement de la pompe. Le poids d'eau dans le réservoir contribue à l'alimentation de la pompe.

Une pompe se caractérise par : le débit et la pression.

- Le débit de fonctionnement en L /m ; il est imposé par le besoin en débit.
- Le besoin en pression pour amener l'eau d'un point A à un point B.

Les pompes sont équipées de parties internes en rotation qui emprisonnent le fluide au niveau de l'orifice d'entrée et le chassent au niveau de l'orifice de sortie.

Les caractéristiques de la pompe :

- Hauteur maximale : $H_{\max} = 35 \text{ m}$ Débit : $D_v = 35 \text{ l/m}$



Figure III-9 : La pompe

On a équipé la pompe d'une feuille graduée pour préciser le débit de travail choisis pour refroidir le panneau solaire



Figure III-10 : Graduations des débits

Pour mesurer les débits on a pris des bouteilles d'eau de 1 litre chacune, et un chronomètre

On a versé de l'eau dans les bouteilles et pendant une minute on a rempli 9l/m

On a fait la même chose pour les autres débits

III-6-3. Un tuyau à jets :

C'est un élément rigide de section circulaire destiné à l'éjection de l'eau qui circule à l'intérieur sur la surface chaude du panneau solaire, il contient 31 orifices de diamètre 2mm



Figure III-11 : Tuyau percé

III-6-4. Le support:

Notre panneau solaire est déposé sur un boîtier métallique en acier. Nos camarades de la promotion 2015-2016, ont réalisé ce boîtier qui correspond à un échangeur qui comporte:

- ✓ Des chicanes (235x235mm²) à l'intérieur
- ✓ Un emplacement d'un extracteur de diamètre D=120mm
- ✓ Un rapporteur et une barre trouée.
- ✓ Une barre de fixation dans chaque côté pour fixer les angles d'inclinaison.
- ✓ Un Indicateur d'inclinaison pour mesurer les angles d'incidences.

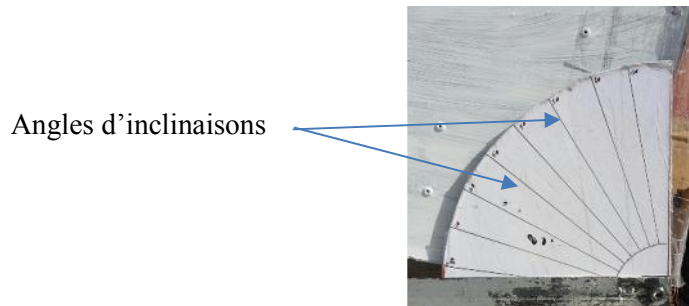


Figure III-12 : Indicateur d'inclinaison

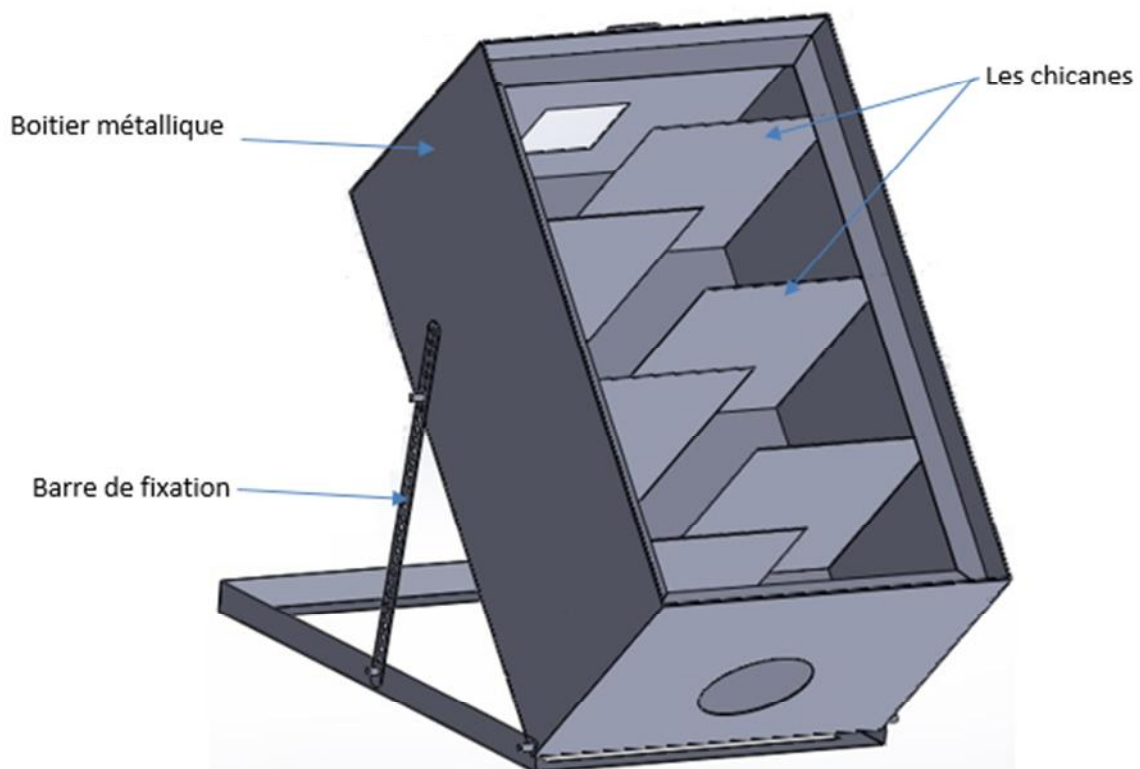


Figure III-13 : Dessin sur solide Works de l'Echangeur (support)

III-7. Conclusion :

Le présent travail est une réalisation d'un système de refroidissement à eau de panneau solaire. La température de la surface du panneau solaire peut atteindre les 100°C , ce qui peut causer la diminution de son rendement. Pour cela, nous avons réalisé des mesures, qui consistent à prélever les valeurs de la tension, courant, avant et après le refroidissement pour voir l'impact de refroidissement à eau sur notre panneau.

A blue scroll graphic with a dark blue border and rounded corners. The scroll is unrolled, showing a white background for the text. The text is centered on the scroll.

Chapitre IV

Analyse des résultats

IV-1 Introduction:

Dans ce chapitre nous allons mettre à l'épreuve notre panneau solaire et tracer la caractéristique (courant / tension) du panneau solaire pour trois débits d'eau de refroidissement différents, tracer la caractéristique (puissance / tension) pour ces trois débits, avec la variation de l'incidence et bien sûr, on fixe la valeur de la résistance (rhéostat).

- ✓ Date de réalisation de nos essais: le 12/11/2018
- ✓ Température extérieure: 23°C avec des nuages passagers
- ✓ Les coordonnées géographiques du lieu sont :

Latitude : $36^{\circ}42'42''$ nord,

Longitude : $4^{\circ}02'45''$ est,

IV-2. Le circuit électrique :

Pour obtenir les variations de courant et tension générés par le panneau solaire sur un plan horizontal mesurées sur le site Tizi Ouzou.

On a réalisé le circuit électrique ci-dessous qui comprend un ensemble d'instruments permettant de mesurer les différents paramètres (tension, courant) fournis par le panneau solaire.

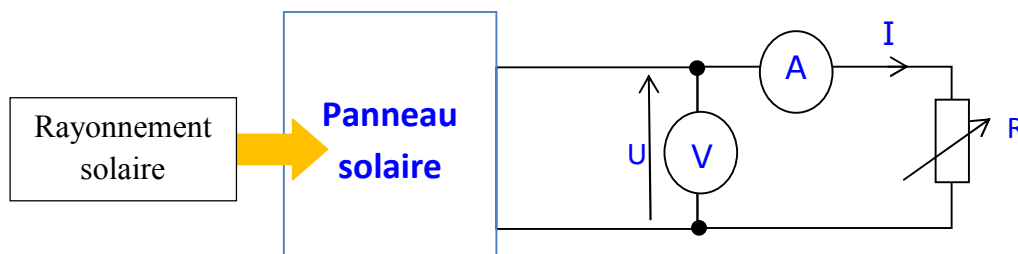


Figure IV-1 : Le circuit électrique

On souhaite tracer la caractéristique courant/tension délivrés par le panneau pour les trois différents débits lorsqu'on fixe la résistance du rhéostat.

IV-3. Choix de la résistance:

Pour choisir la résistance la plus approprié pour faire nos essais ;

- On a fixé l'incidence du panneau solaire à 25° .
- On a mesuré la valeur de la résistance qu'on veut appliquer.
- Au bout de 5mn, on prend la valeur de courant I(A) et de tension U(V).
- On a fait les mêmes opérations pour toutes les valeurs de la résistance

Avec les valeurs (Courant / Tension) prélever par la variation du rhéostat dans le circuit électrique, nous avons obtenu le graphe ci-dessous, sans refroidissement du panneau solaire.

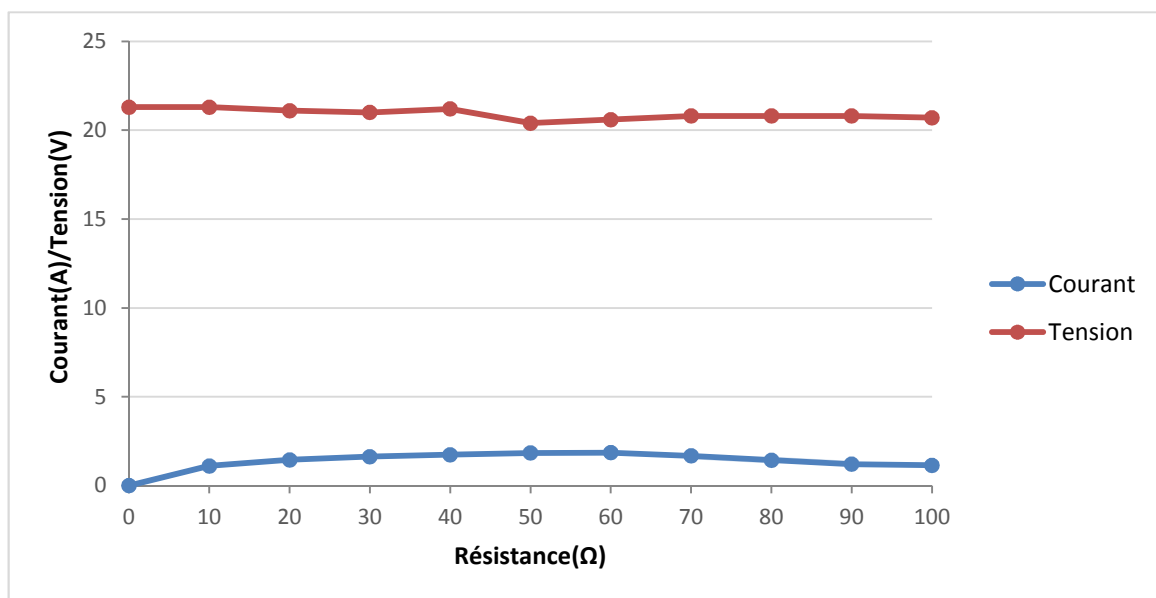


Figure IV-2 : Graphe comparatif (Courant/Tension) par rapport à la résistance

Le choix de la résistance dans notre circuit électrique doit être fixé dans tous nos essais qui vont suivre, sa valeur était déterminé avec précaution. On a pris en charge les conditions suivante ;

- Pouvoir résister et des sur tension
- Pouvoir donné des valeurs de courants/ tensions acceptable
- Diminuer les pertes de charge électrique à cause de sa dissipation sous forme de chaleur dégagée par la résistance (effet de Joule).

Pour cela on a choisi dans les graphes de tension/courant, la résistance moyenne $R= 60 \Omega$, pour travailler en toute sécurité et avec une bonne fiabilité.

IV-4. Mesure de courant et tension et tension sans refroidissement :

La tension délivrée par le panneau photovoltaïque et le courant du panneau qui circule dans le circuit électrique. Ont été mesurés, en variant l'inclinaison de panneau de (0° jusqu'à 45°). Cela nous a donné les graphes ci-dessous :

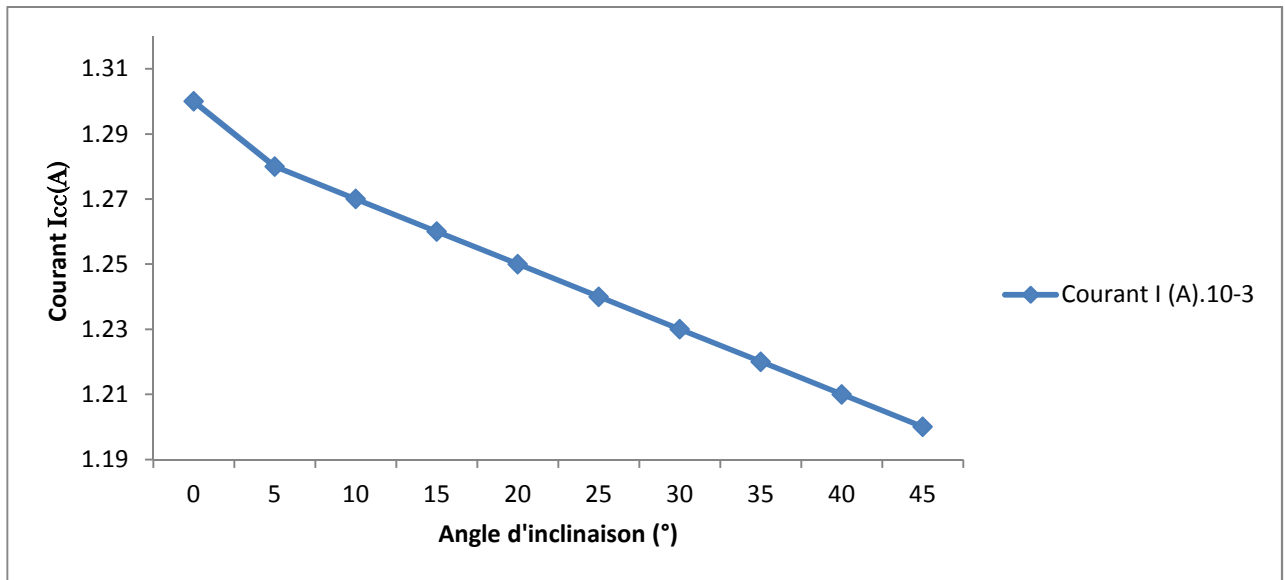


Figure IV-3 : Graphique du courant I_{cc} (A) en fonction de l'angle d'inclinaison

nous remarquons dans la figure (IV.3) que le courant de court-circuit I_{cc} diminue de la valeur maximale de 1,30A pour un angle d'inclinaison de 0° pour atteindre une valeur minimale de 1,20A à l'angle d'inclinaison 45° .

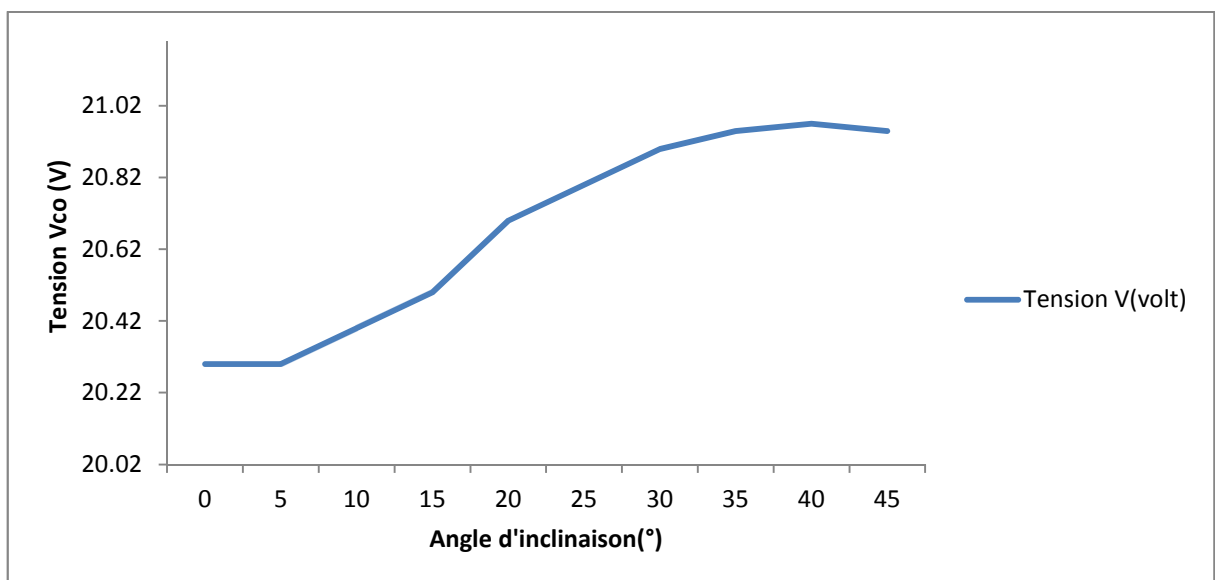


Figure IV-4 : Graphique de la tension V_{co} (V) en fonction de l'angle d'inclinaison

Nous remarquons dans la figure (IV-4) que la tension V_{co} augmente de la valeur minimale 20,3V pour un angle d'inclinaison de 0° pour atteindre la valeur maximal 20,95V à l'angle d'inclinaison 45°

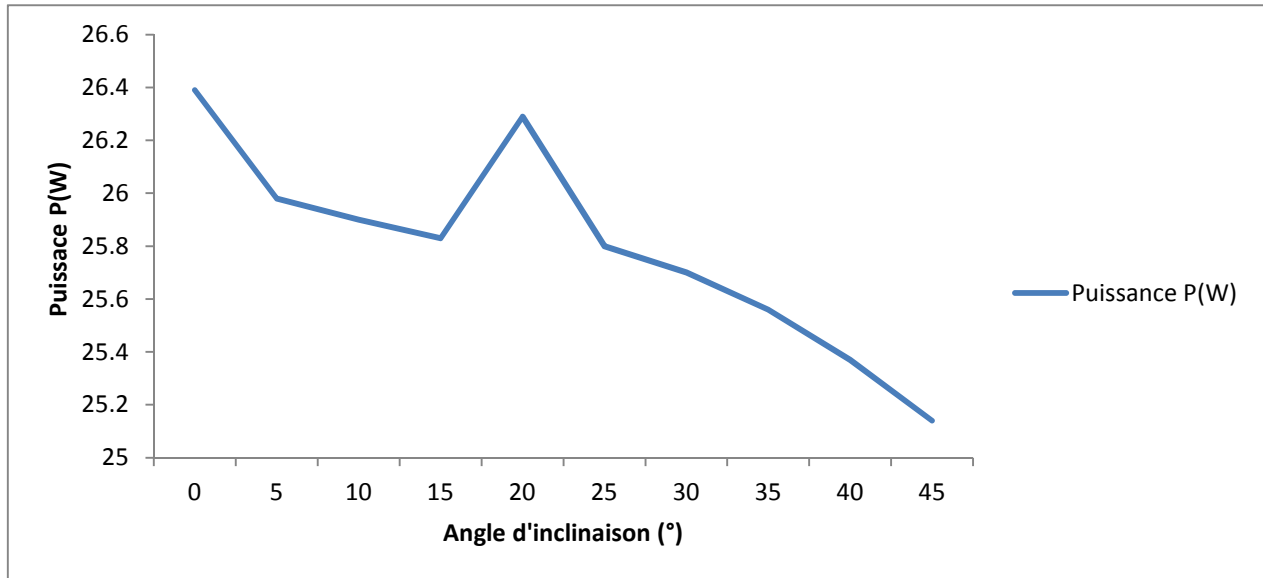


Figure IV-5 : Graphe de puissance P (W) e fonction de l'angle d'inclinaison

Nous remarquons dans la figure (IV-5) que la puissance baisse de la valeur maximale de 26,39 W pour un angle d'inclinaison de 0° pour atteindre 25,83W pour un angle de 15° , puis augmente jusqu'à 26,29W pour un angle de 20° puis elle diminue à la valeur minimal de 25,14W.

On a un pic de puissance qui est due à l'augmentation de l'éclairement

IV-5. Mesure de courant et tension avec refroidissement :

Le courant de court-circuit qui circule dans le circuit électrique est mesuré en variant l'inclinaison de module de (0° jusqu'à 45°). Avec Le débit volumique qu'on a utilisé pour ce présente test $Q_V = 9 \text{ L/m}$. Cela nous a donné les graphes ci-dessous :

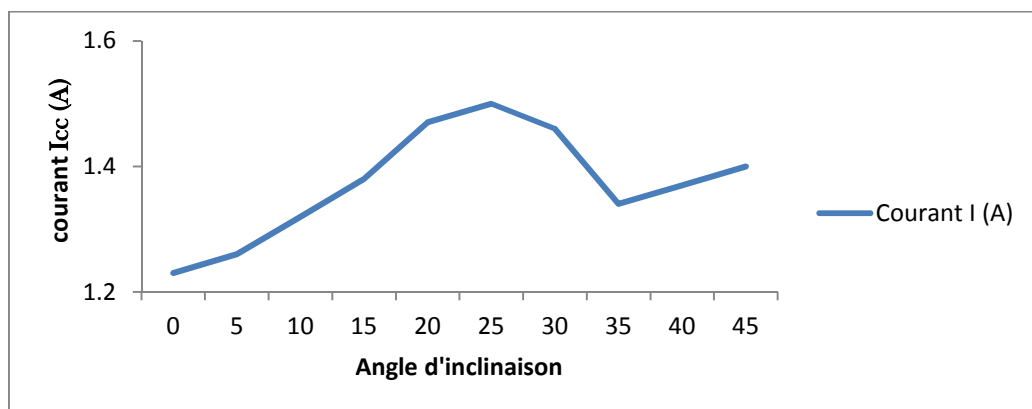


Figure IV-6 : Graphe courant I_{cc} (A) e fonction de l'angle d'inclinaison

Nous remarquons dans la figure (IV-6) que le courant de court-circuit I_{cc} augmente de la valeur minimal de 1,23A pour un angle d'inclinaison de 0° pour atteindre la valeur maximale de 1,50A pour un angle d'inclinaison de 25° ensuite elle diminue à 1,40A pour un angle d'inclinaison de 45° .

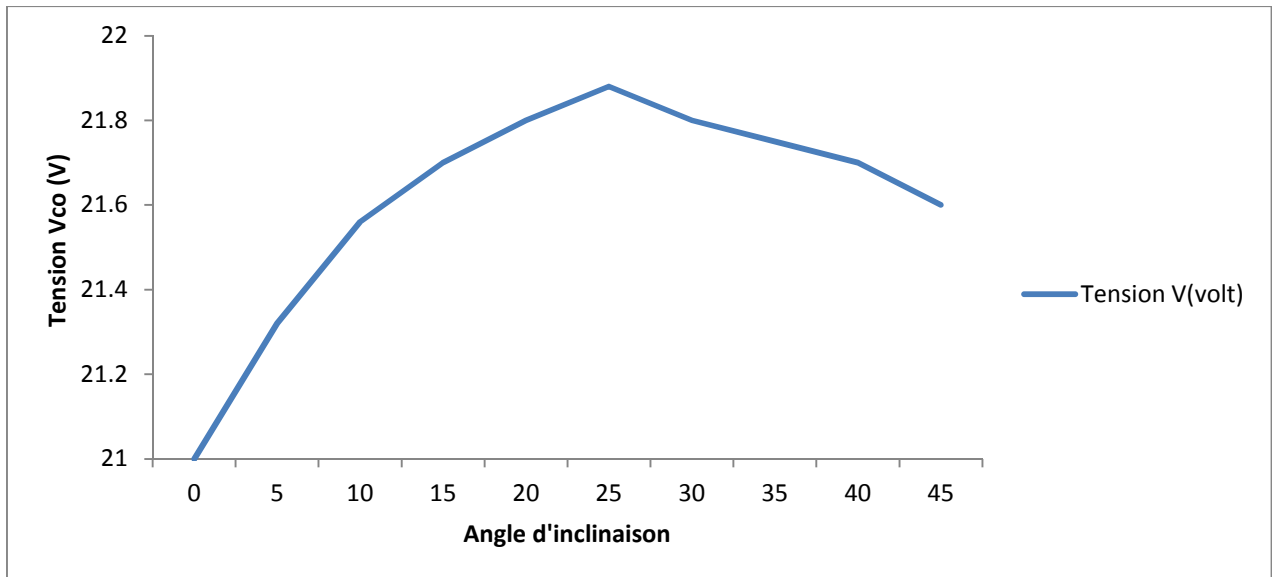


Figure IV-7 : Graphe tension V_{co} (V) e fonction de l'angle d'inclinaison

Sur la figure (IV-5), on observe une augmentation de tension de 21V pour un angle d'inclinaison de 0° jusqu'à la valeur maximale de 21,88V pour un angle de 25° puis elle descend pour atteindre 21,60V pour l'angle 45° .

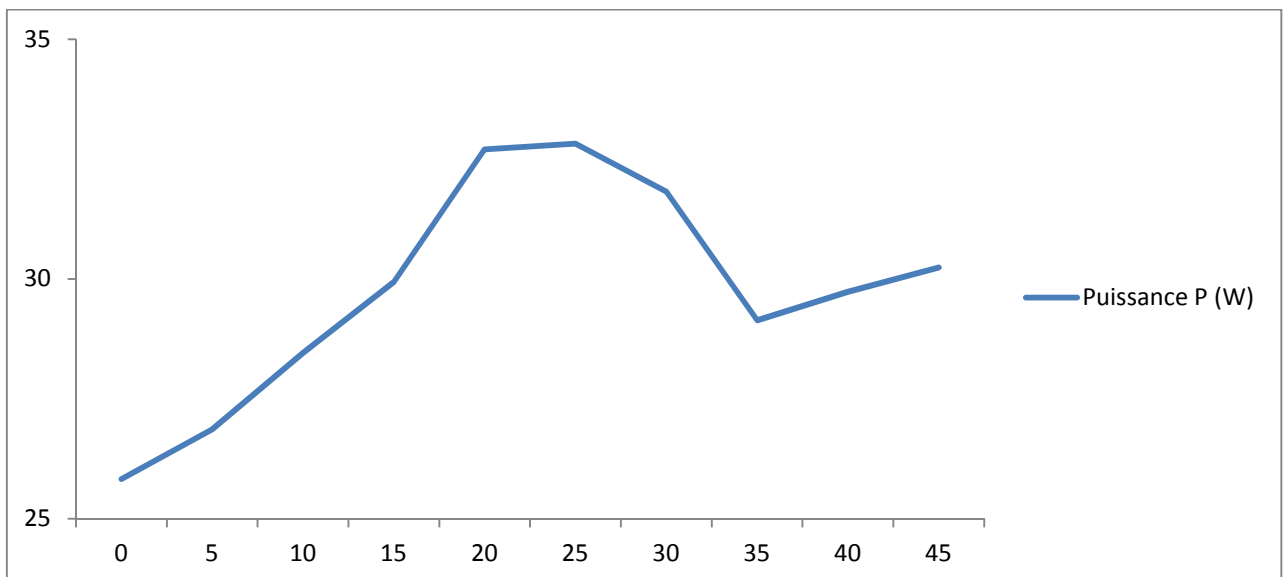


Figure IV-8 : Graphe de puissance P (W) e fonction de l'angle d'inclinaison

Sur la figure (IV-8), nous remarquons que la puissance augmente d'une façon progressive jusqu'à atteindre la valeur maximale de 32.82 W, suivi d'une diminution pour marquer la valeur de 29.14W et qui se termine par une légère augmentation jusqu'à 30.24W.

IV-6. Comparaison des courants :

Le graphe suivant représente la comparaison de courant de court-circuit I_{cc} fourni par le panneau solaire sans le refroidissement et les courants de court-circuit I_{cc} obtenu avec les différents débits refroidissements.

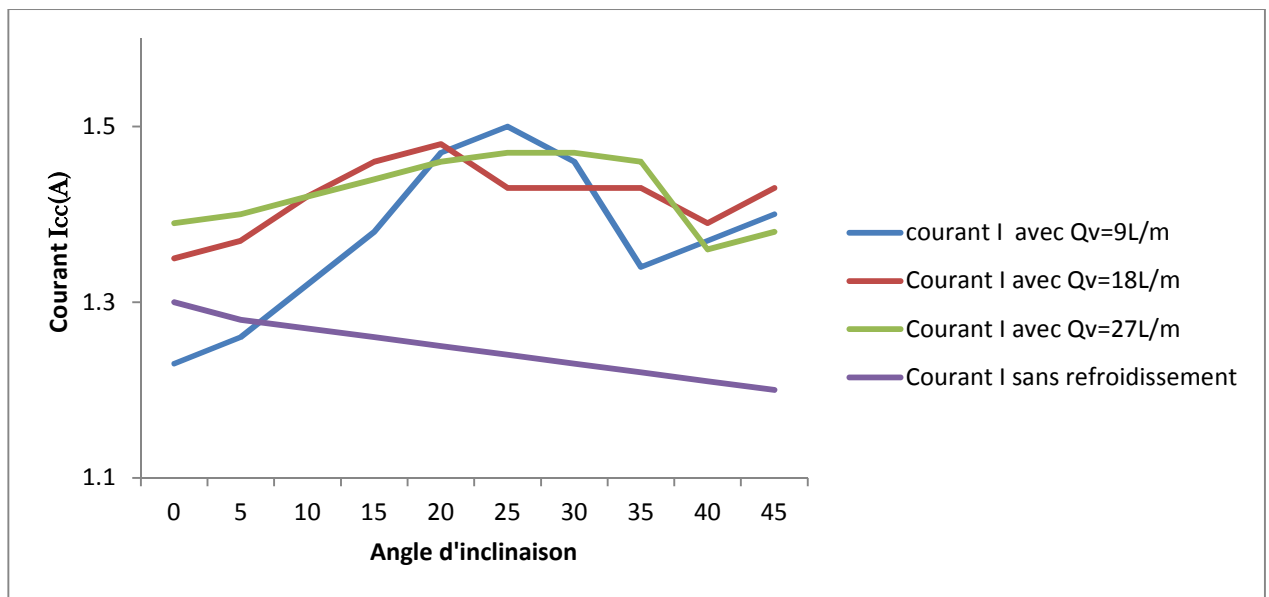


Figure IV-9 : Graphe comparatif courant I(A) avec et sans refroidissement en fonction de l'angle d'inclinaison

Dans la figure (IV.9), on remarque que la courbe du courant de court-circuit I_{cc} fourni par le panneau avant l'utilisation de refroidissement baisse avec l'augmentation de l'angle d'inclinaison, on voit que les courbes de courant de court-circuit fourni par le panneau solaire après le refroidissement suit progressivement l'angle d'inclinaison jusqu'à atteindre les valeur de PIC , sont nettement mieux en courant de court-circuit que celle obtenu sans le refroidissement.

Un pic à 09 L/m est apparu grâce à un l'augmentation de l'éclairement et au bon refroidissement du panneau

IV-7. Comparaison des puissances:

Le graphe ci-dessous représente la comparaison de la puissance résultant du produit (courant/angle d'inclinaison) fourni par le panneau solaire sans le refroidissement et celle fourni avec le refroidissement.

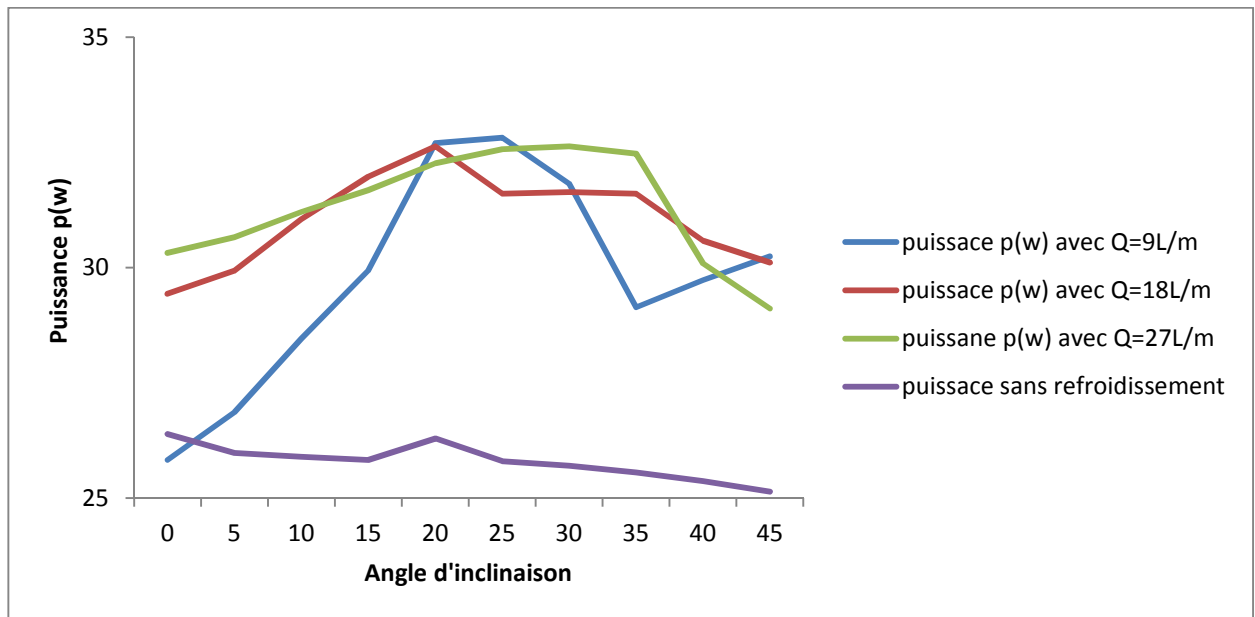


Figure IV-10 : Graphe comparatif de puissance $P(W)$ avec et sans refroidissement en fonction de l'angle d'inclinaison

Dans la figure (IV.10), on remarque que la courbe de puissance fourni par le panneau avant l'utilisation de refroidissement baisse avec l'augmentation de l'angle d'inclinaison, on voit que les courbes de puissances fourni par le panneau solaire après le refroidissement suit progressivement l'angle d'inclinaison jusqu'à atteindre les valeurs de PIC, sont nettement mieux en puissance que celle obtenu sans le refroidissement.

IV-8. Comparaison des tensions:

Le graphe ci-dessous représente la comparaison des courbes de la tension à circuit ouvert fourni par le panneau solaire avec le refroidissement, on appliquant les trois débits d'eau pour le refroidissement du panneau solaire.

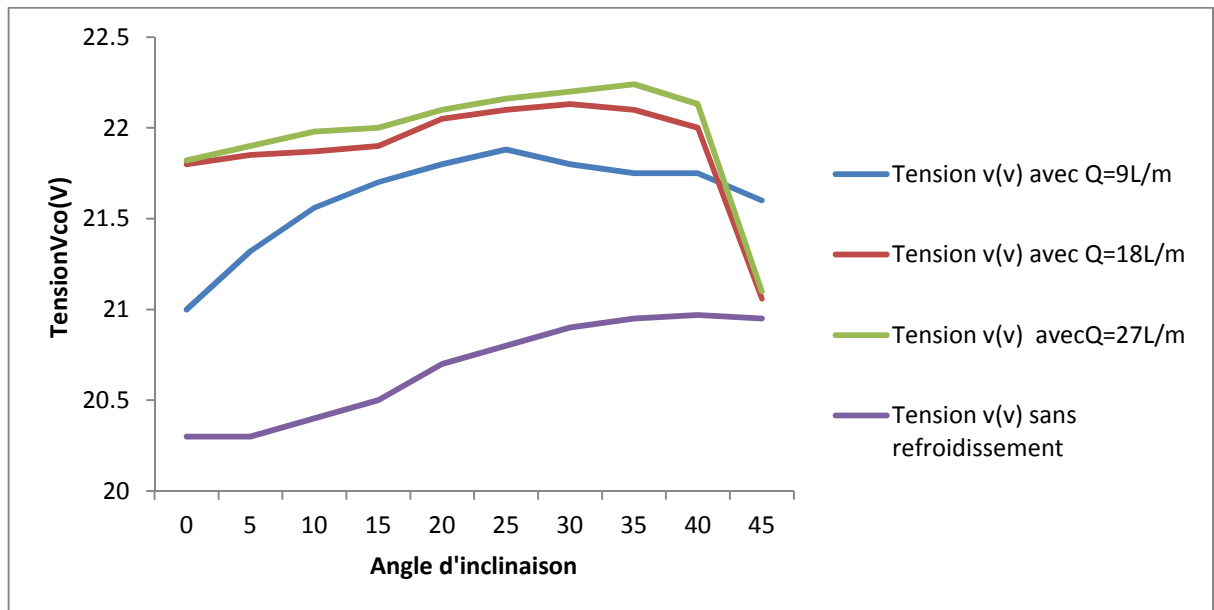


Figure IV-11 : Le graphe comparatif de la tension V_{co} (V) avec et sans refroidissement en fonction de l'angle d'inclinaison

Dans la figure (IV.11), on remarque que la courbe de la tension à circuit ouvert V_{co} fourni par le panneau solaire avant l'utilisation de refroidissement augmente avec l'augmentation de l'angle d'inclinaison, on voit que les courbes de la tension fourni par le panneau solaire après le refroidissement suit progressivement l'angle d'inclinaison jusqu'à atteindre les valeurs maximal.

IV-9. Influence des différents paramètres sur la caractéristique I(A) et U(V) :

IV-9.1. Influence de l'éclairement et de la température :

L'éclairement et la température modifient la caractéristique I-V de la cellule solaire, pas dans sa forme générale mais pour les valeurs de courant du court-circuit ainsi que la tension.

IV-9.2. Influence de l'éclairement :

La figure (IV.15) présente les caractéristiques courant-tension d'une cellule monocristalline typique de (10×10) cm² pour plusieurs intensités du rayonnement solaire. On remarque que le courant du court-circuit I_{cc} est directement proportionnel à l'intensité lumineuse incidente; la variation de I_{cc} avec l'éclairement est donnée sous la forme suivante :

$$I_{cc} = (t) \times E \times S$$

Où ; E : est l'éclairement en W/m². S : est la surface de la cellule en m².

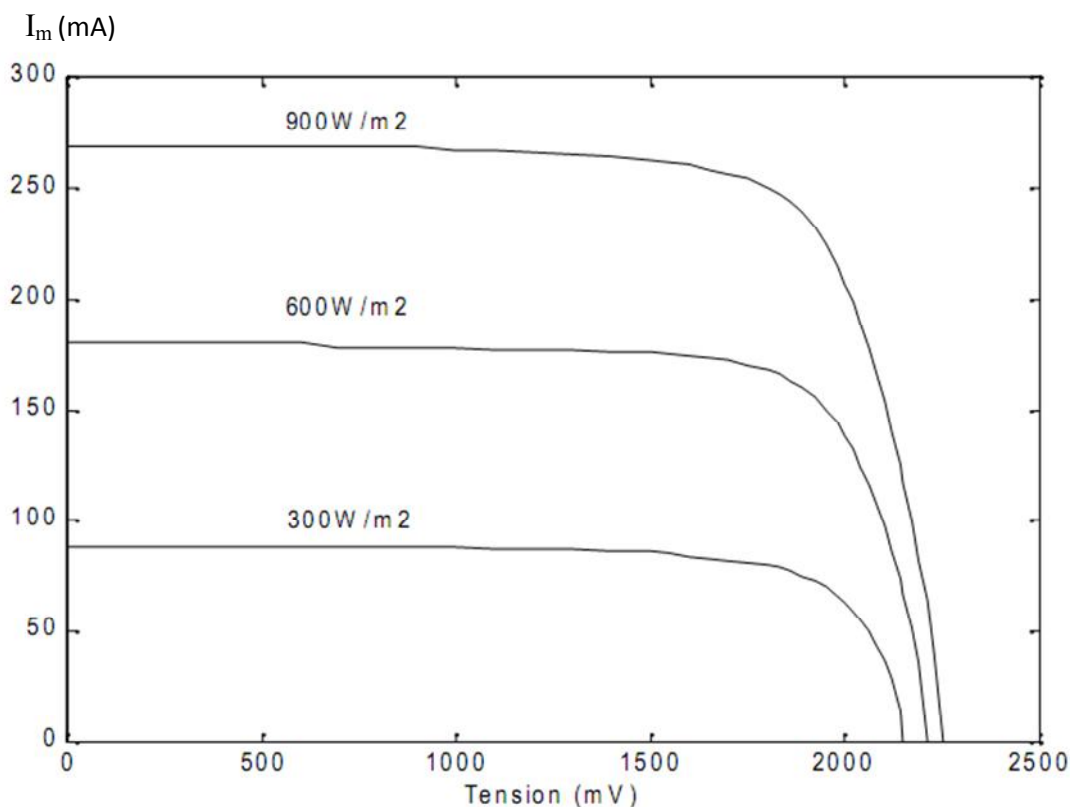
(t) : Coefficient dépendant faiblement de la température, il est exprimé en A/W.

D'autre part, l'accroissement de l'éclairement provoque une légère augmentation de la tension de circuit ouvert V_{co}

IV-9.3. Influence de la température :

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires puisqu'elles sont exposées au rayonnement solaire. La figure (IV.16) montre l'influence de la température, sur la caractéristique (I et V) de la cellule solaire lorsque la température varie.

On observe que l'augmentation de la température provoque une augmentation du courant du court-circuit (I_{cc}), en même temps on assiste à une diminution nette de la tension en circuit ouvert (V_{co}). L'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension (V_m) et un léger accroissement du courant (I_m) et par la suite une baisse relative de la puissance maximale (P_m)



FigureIV-12 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire

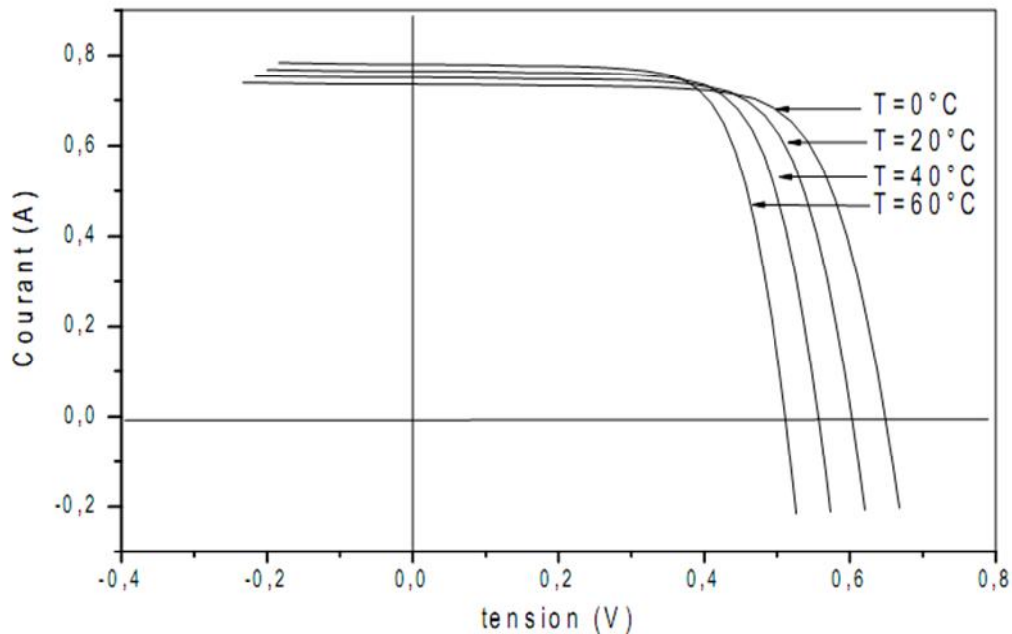


Figure IV-13 : Influence de la température sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire éclairée

IV-9.4. Influence de la résistance :

La résistance parasite R_{sva} modifié la caractéristique I-V de la cellule solaire en particulier sous éclairement :

L'effet de la résistance série R_s sur la caractéristique I-V de la cellule solaire sous éclairement est illustré sur la figure (IV.14) ci-dessous.

On remarque que la tension de circuit ouvert (V_{co}) et le courant du court-circuit (I_{cc}) ne sont pas modifiés, mais la caractéristique se déforme très rapidement sous l'effet de R_s . Cette influence se traduit par une diminution de la pente de la caractéristique I-V dans la zone où la cellule fonctionne comme une source de tension lorsque R_s augmente. L'augmentation de la résistance série à un effet réductif considérable sur le point de fonctionnement et le facteur de forme (FF) de la cellule.

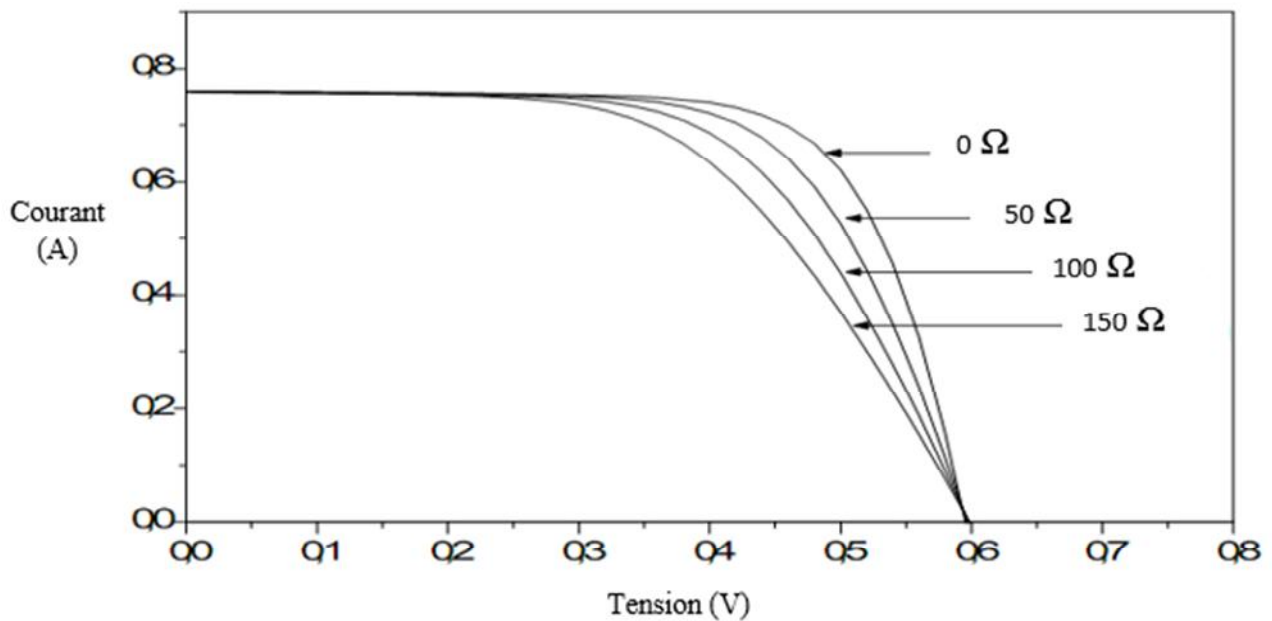


Figure IV-14 : influence de la résistance série sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire éclairée

IV-10. Influence de l'air froid sur la puissance de panneau :

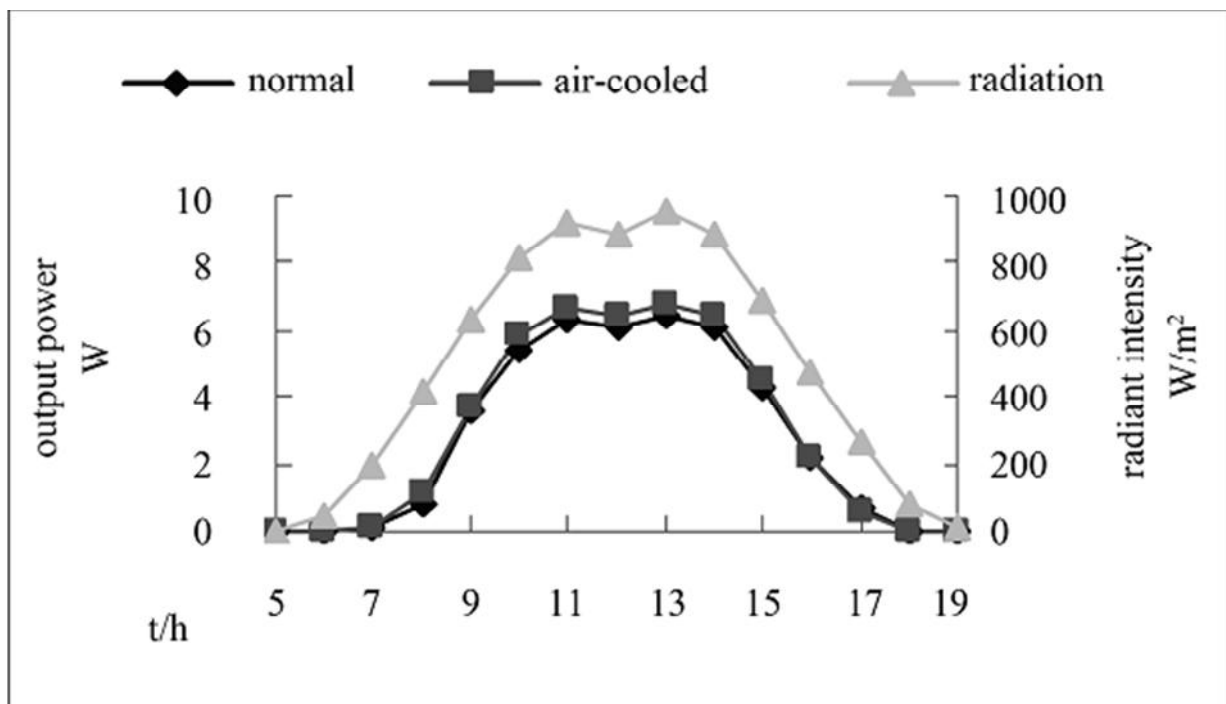


Figure IV-15 : comparaison de la puissance de sortie horaire de refroidissement de panneau par air. [19]

La figure IV-15, montre que l'intensité de rayonnement est le principal facteur qui affecte la puissance de sortie des panneaux solaires sous une certaine condition de résistance de charge. Comme l'intensité du rayonnement solaire augmente d'abord et diminue ensuite, les puissances de

sortie des panneaux solaires diminuent également après la première augmentation. Les points les plus élevés apparaissent les deux dans la même plage horaire entre 12h00 –à- 13h00.

IV-11 Conclusion :

On conclut que le refroidissement par ruissellement d'eau a des effets positives, ainsi que l'effet du débit d'eau, en augmentant la tension, le courant ainsi que la puissance de panneau solaire, il est d'une importance considérable, il a un effet direct sur l'augmentation du rendement du panneau photovoltaïque exprimé en terme puissance, en plus il permet le nettoyage de la surface extérieure du panneau.



Chapitre V

Modélisation d'un panneau solaire

V.1 Introduction :

L'énergie solaire photovoltaïque (PV), qui est la conversion directe de la lumière en électricité grâce à des cellules solaires, représente une alternative intéressante et bien adaptée à des besoins limités. Malgré sa facilité de mise en œuvre, son faible impact environnemental et le peu d'entretien qu'il nécessite, un système photovoltaïque n'est plus concurrentiel lorsque la demande augmente. Ainsi, une étude assez rigoureuse est nécessaire pour faire le meilleur choix le plus performant avec moindre coût possible.

La performance d'un système PV dépend fortement des conditions météorologiques, telle que le rayonnement solaire, la température, la vitesse du vent et l'éclairement. Pour fournir l'énergie continuellement durant toute l'année, un système PV doit être correctement dimensionné. Cependant les informations fournies par les constructeurs d'équipements photovoltaïques ne permettent que de dimensionner approximativement le système.

La modélisation mathématique des cellules solaires est indispensable pour toute opération d'optimisation du rendement du générateur photovoltaïque. Le module photovoltaïque est représenté généralement par un circuit équivalent dont les paramètres sont calculés expérimentalement en utilisant la caractéristique courant-tension. Ces paramètres ne sont pas généralement des quantités mesurables ou incluses dans les données de la fabrication. En conséquence, ils doivent être déterminés à partir des systèmes des équations (V-I) à divers points de fonctionnement donnés par le constructeur ou issues de la mesure directe sur le module.

V.2 Matlab :

Le logiciel Matlab constitue d'un système interactif et convivial de calcul numérique et de visualisation graphique, destiné aux ingénieurs, aux techniciens et aux scientifiques. C'est un outil très utilisé, dans les universités comme dans le monde industriel, qui intègre des centaines de fonctions mathématiques et d'analyse numérique (Calcul matriciel (le MAT de Matlab), traitement de signal, traitement d'images, visualisations graphiques, etc.)

V.3. Modélisation du panneau photovoltaïque :

V-3-1 Description du modèle de cellule utilisé :

V.3.1.1. Modèle à trois paramètres (L3P) :

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à l'aire de transition P-N de la cellule PV. Il est connu aussi par le nom L3P

(Lumped, 1 Mechanism model with 3 Parameters). Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode.

Le schéma électrique équivalent de la cellule PV pour ce modèle est représenté sur la figure (V-1) :

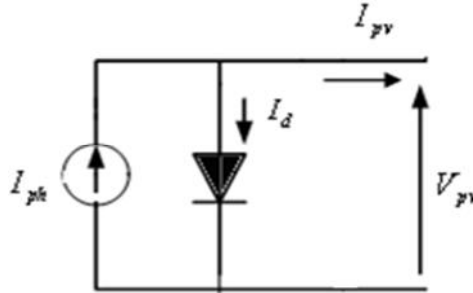


Figure V.1 : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L3P. [20]

V.4 Equations régissant le panneau pour déduire I(v) et P(v)

Dans le cas cellules solaires au silicium monocristallin, on considère l’hypothèse d’une cellule idéale. La facture d’idéalité est alors considérée comme égale à l’unité. L’équation caractéristique est déduite d’une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \tag{v.1}$$

I_{ph} : courant photonique

I_d : courant de la diode

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} (I_{ph,ref} - \mu_{cc}(T_c - T_{c,ref})) \tag{V.2}$$

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique (I-V) est donnée par la relation [V-3] :

$$I_d = I_s \left(\exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right) \tag{V-3}$$

Le courant débité équivaut à :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V_{pv}}{V_t \cdot n}\right) - 1 \right) \tag{V-4}$$

Le courant de saturation de la diode est supposé variable avec la température selon l’expression [V.5]:

$$I_s = I_{s,ref} \cdot \left(\frac{T_c}{T_{c,ref}}\right)^3 \exp\left(\left(\frac{q \cdot E_{gap}}{n \cdot K}\right) \cdot \left(\frac{1}{T_{c,ref}}\right) - \left(\frac{1}{T_c}\right)\right) \tag{V-5}$$

V.4.1 Caractéristiques courant-tension et puissance-tension du modèle L3P

Le courant de sortie est donné par l'équation (V-6).

$$I_{pv(i+1)} = I_{pv(i)} - \frac{I_{cc} - I_{pv(i)} - I_s \left(\exp\left(\frac{V_{pv}}{V_t \cdot n_1}\right) - 1 \right)}{-1} \quad (\text{V-6})$$

Le tableau II-1 donne les caractéristiques du module DIVEL SOLAIR 5150-003 type 50M(36) sous les conditions standards (1000 W/m², masse optique: AM 1.5, Température de cellule: 25 °C).

Grandeurs	valeurs
Puissance nominale	50 W
Tension au MPP (V_{mp})	17,98 V
Courant au MPP (I_{mp})	2,78 A
Courant de court-circuit (I_{cc})	3.04 A
Tension de circuit ouvert (V_{co})	21.87 V
Nombre de cellules en série (N_s)	36
Nombre de cellules en parallèle (N_p)	2

Tableau V.1: Caractéristiques du module DIVEL SOLAIR 5150-003 type 50M(36).

Les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque seront décrites comme suit :

- Le courant de court-circuit (I_{cc}) qui fournit chaque cellule est :

$$I_{cc(\text{cellule})} = \frac{I_{cc}}{N_p} \quad (\text{V-7})$$

- La tension du circuit ouvert (V_{co}) de chaque cellule est :

$$V_{co(\text{cellule})} = \frac{V_{co}}{N_s} \quad (\text{V-8})$$

- Le courant maximal de chaque cellule est :

$$I_{mp(\text{cellule})} = \frac{I_{mp}}{N_p} \quad (\text{V-9})$$

- La tension maximale de chaque cellule est :

$$V_{mp(\text{cellule})} = \frac{V_{mp}}{N_s} \quad (\text{V-10})$$

- La puissance maximale de chaque cellule est:

$$P_{\max(\text{cellule})} = I_{mp(\text{cellule})} \cdot V_{mp(\text{cellule})} \quad (\text{V-11})$$

V-5 Création du modèle du panneau photovoltaïque sous Matlab/Simulink :

V-5-1 Simulation d'une cellule solaire sous Matlab:

Lancer Matlab et créer le répertoire de travail. Pour cela, cliquer sur :

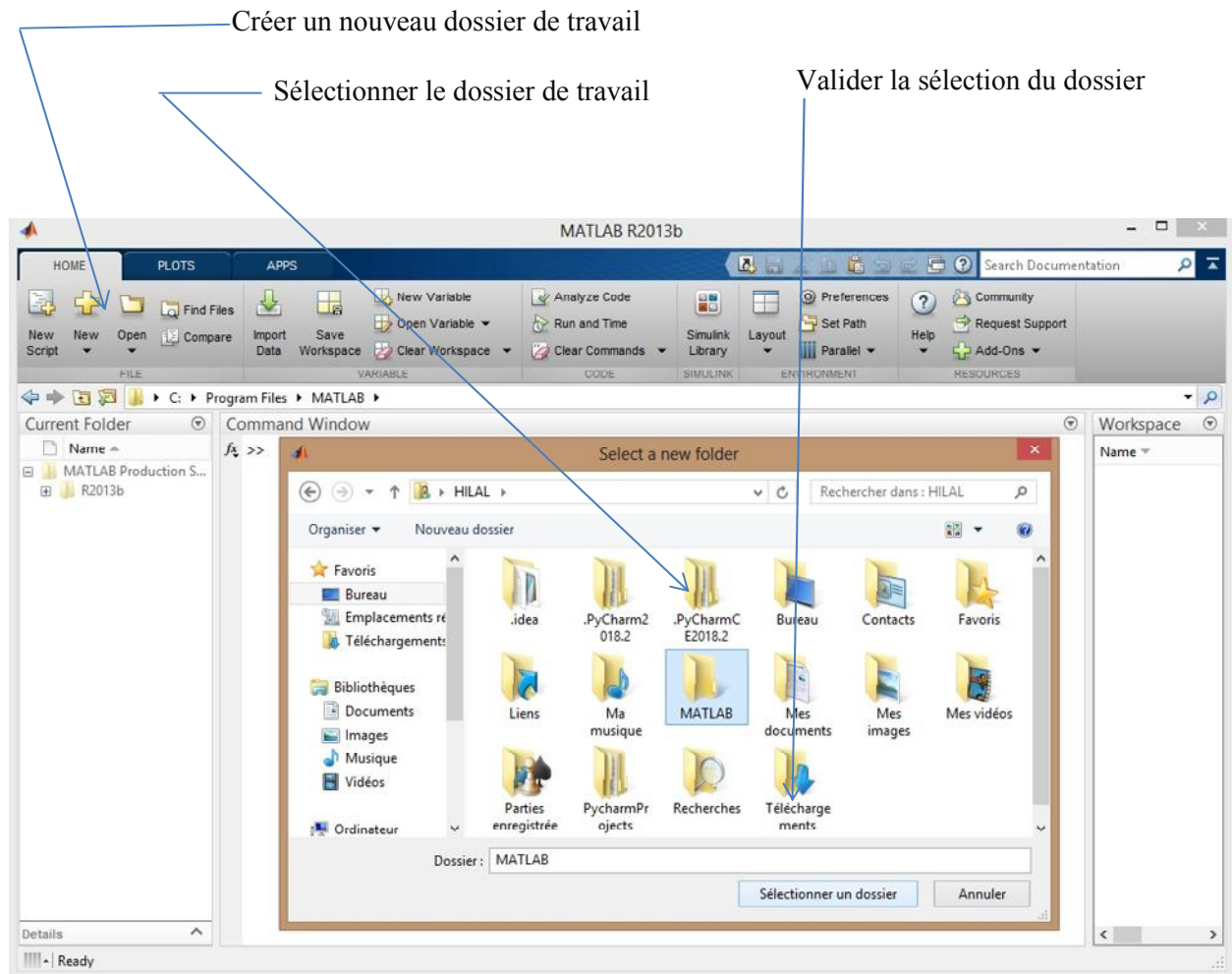


Figure V.2 : emplacement de notre module de simulation

Après avoir créé le dossier de sauvegarde de notre Modèle de simulation

- ✓ Lancer SIMULINK.
- ✓ Aller dans **new File** puis. **NEW Simulink Model**.

Une fenêtre va apparaître qui va nous permettre de créer notre modèle de simulation PV.

✓ Enregistrer le modèle vide sous le nom (**PV_char.slx**). Le modèle sera automatiquement enregistré dans le **CURRENT FOLDER** défini auparavant.

On doit voir apparaître un modèle dans la fenêtre **CURRENT FOLDER** dans l'environnement Matlab.

Pour créer notre modèle, on va travailler avec les composants disponibles dans la **LIBRARY SIMSCAPE/**.

Pour modéliser notre panneau photovoltaïque nous avons besoin de trouver rapidement les composants qu'on va utiliser dans la simulation, pour cela on va écrire le nom de notre élément source au niveau de la zone de recherche du browser de Simulink.

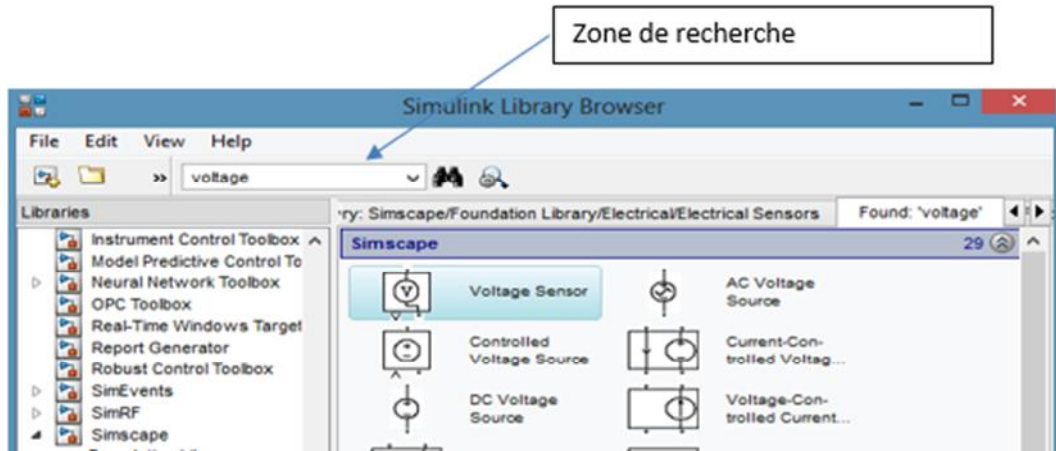


Figure V.3 : Bibliothèque de simulink

On glisse l'élément recherché à l'aide du curseur de souris (dans la fenêtre **cell_PV**) Créer sous SIMULINK, qui va apparaître comme ci-dessous

V. 6 Simulation sous matlab et les caractéristiques

Après avoir préparé les conditions nécessaires pour commencer notre représentation photovoltaïque sur Simulink, on présente la configuration suivante

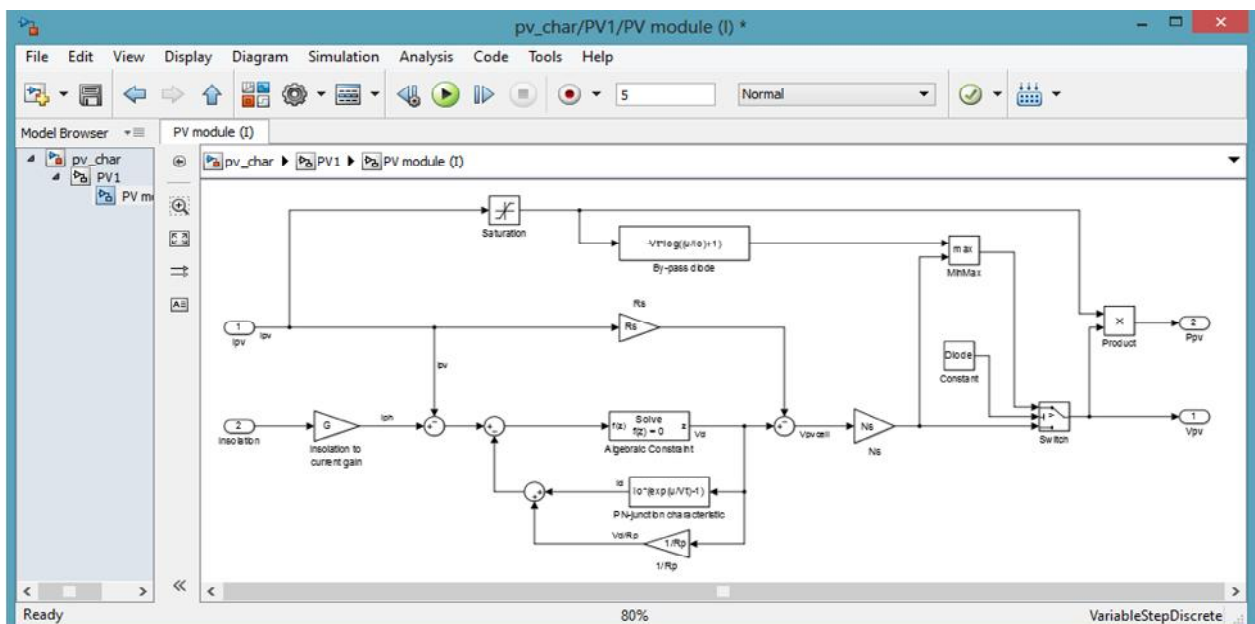


Figure V.4 : page de simulation de la cellule solaire

La création du modèle sous forme de boîte noire se fait en sélectionnant l'ensemble du schéma puis en cliquant sur le bouton droit de la souris **createSubsystem**.

Si on double clique sur la boîte noire, on doit voir apparaître dans une fenêtre le modèle qui a été élaboré auparavant.

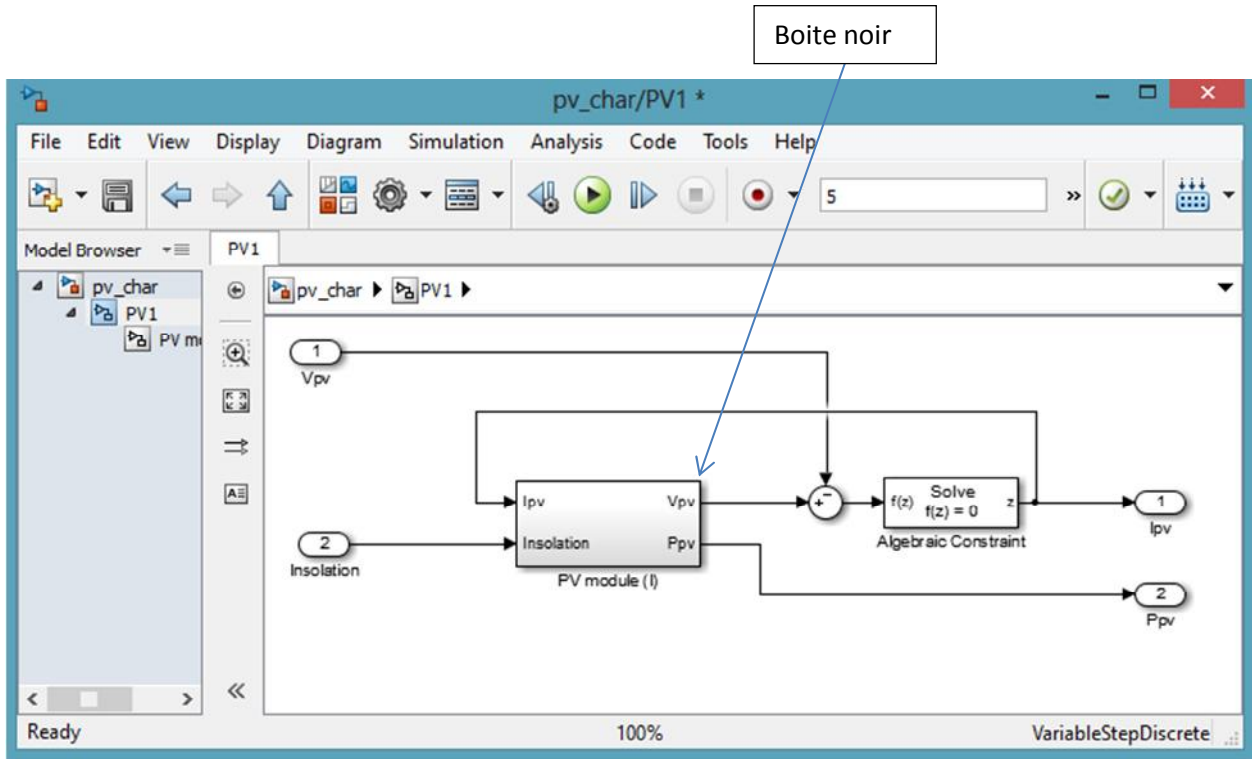


Figure V.5 : page d'emplacement de la boîte noire

On va obtenir la vue ci-dessous qui correspond au montage complet du panneau solaire photovoltaïque :

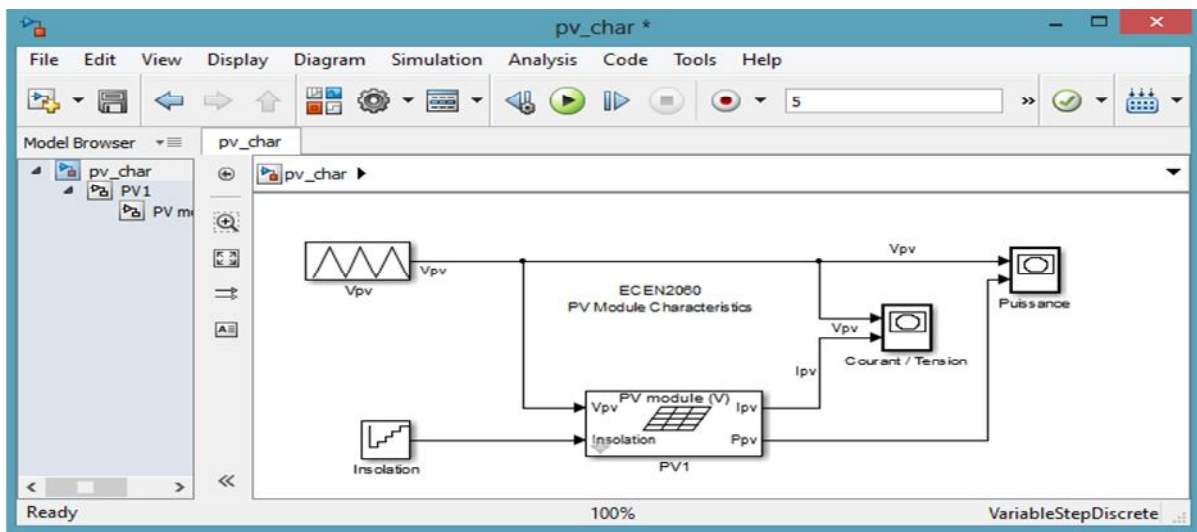


Figure V.6 : page d'emplacement de panneau solaire

V-6-1. Paramétrage du modèle :

Le paramétrage s'effectue à partir des données que l'on peut extraire des documents techniques du panneau photovoltaïque que l'on souhaite simuler. Ces paramètres sont:

- V_{co} : tension de circuit ouvert.
- I_{pm} : courant de puissance maximale.
- I_{cc} : courant de court-circuit.
- N_{cell} : nombre de cellule composant le panneau.
- V_{pm} : tension de puissance maximale.
- T_{cell} : température des cellules.

V-6.2 Simulation du modèle :

On va simuler le modèle du panneau photovoltaïque afin de vérifier son comportement. Dans le menu simulink, ouvrir le modèle créer et positionner les différents éléments de simulation au centre de la page,

- Paramétrer les éléments de simulation
- On définit 3 variables: courant, tension et puissance. On va pouvoir utiliser ces variables sous Matlab
- valider notre modèle par rapport aux caractéristiques du panneau photovoltaïque que l'on a souhaité modéliser.
- Lancer la simulation

V-7 Influence de l'irradiation sur un panneau PV :

Après avoir écrit les données nécessaires pour modèle de panneau solaire, nous présentons ci-dessous les différents diagrammes établis par Matlab, permettant d'obtenir les différentes caractéristiques du panneau à savoir les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V).

V-7.1 Influence de l'irradiation sur l'allure (I-V) :

Alors nous avons effectué une simulation où nous avons maintenu une température constante à différents irradiances. On remarque que l'accroissement du courant de court-circuit I_{cc} est beaucoup plus important que l'augmentation de la tension de circuit ouvert V_{co} , car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement et la tension du circuit ouvert est une fonction logarithmique.

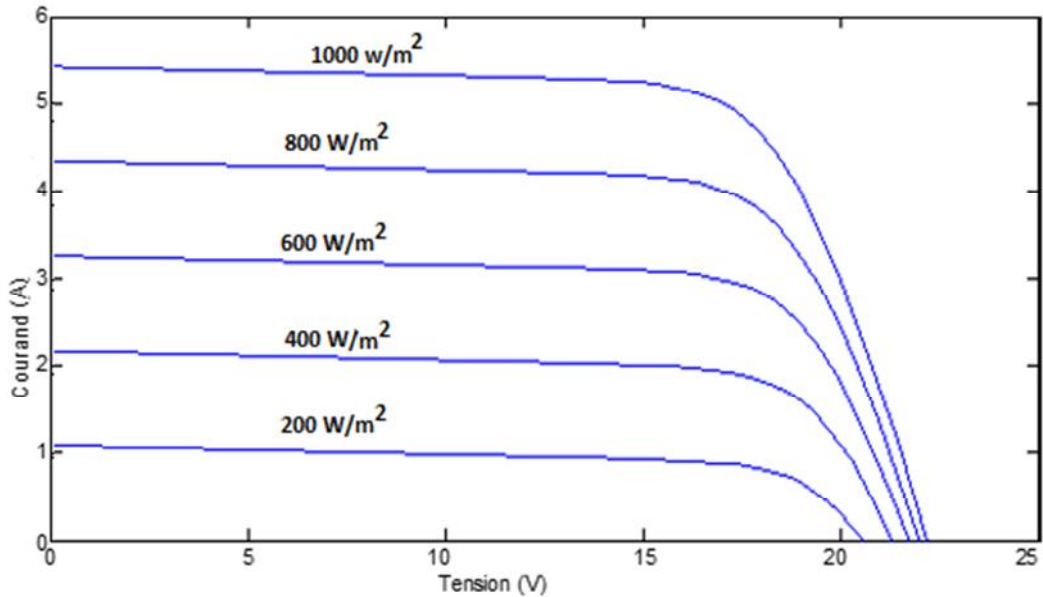


Figure V-7 : Evolution de la caractéristique I(V) en fonction de l'irradiation pour un panneau PV à T=25°C (1000W/m²; 800W/m²; 600W/m²; 400W/m²; 200W/m²).

La variation du courant en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairements à température maintenue constante 25°C, figure V-7, montrent que lorsque l'irradiation varie pour une température donnée, le courant de court-circuit I_{cc} varie proportionnellement à l'irradiation. Dans un même temps, la tension de circuit ouvert V_{co} (à vide) varie très peu.

V-7.2 Influence de l'éclairement sur l'allure (P-V)

La variation de la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairements à température maintenue constante 25°C, figure V-8, montrent clairement l'existence de maximal sur les courbes de puissance correspondant aux Points de Puissance Maximale P_{max} . Lorsque l'irradiation varie pour une température donnée, le courant de court-circuit I_{cc} varie proportionnellement à l'irradiation. Dans un même temps, la tension de circuit ouvert V_{co} (à vide) varie très peu.

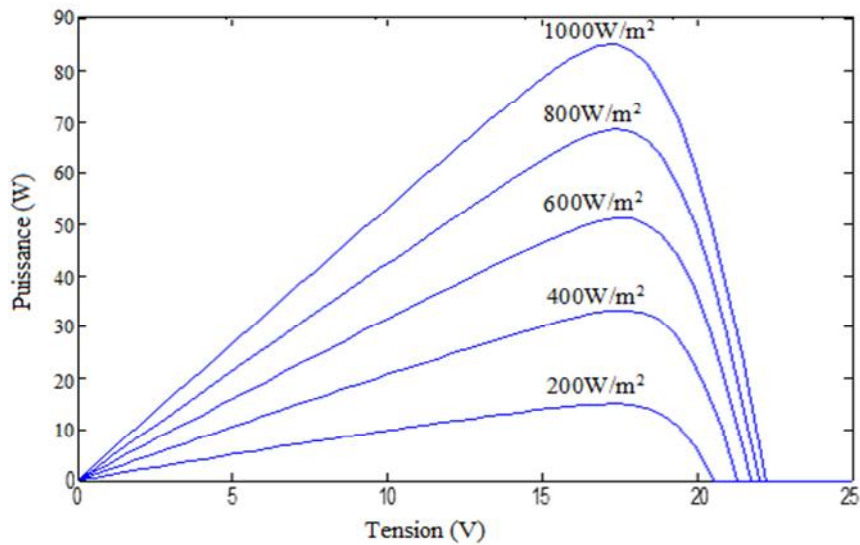


Figure V-8 : Evolution de la caractéristique P(V) en fonction de l'irradiation pour un panneau PV à $T=25^{\circ}\text{C}$ ($1000\text{W}/\text{m}^2$; $800\text{W}/\text{m}^2$; $600\text{W}/\text{m}^2$; $400\text{W}/\text{m}^2$; $200\text{W}/\text{m}^2$).

Donc le facteur de l'éclairement influence énormément sur la caractéristique d'un générateur PV. Ce paramètre doit donc être étudié avec soin lors de la mise en place d'une installation PV.

V.8. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons fait la modalisation et la simulation du panneau solaire PV, nous avons remarqué que les performances d'un PV sont fortement influencées par les conditions météorologiques telles que l'éclairement. Ainsi une synthèse d'assemblage de panneaux et une spécification des zones fonctionnement.



Conclusion générale

Conclusion générale

La protection de l'environnement est devenue une préoccupation majeure ces dernières années. De nombreuses voies de recherches se sont donc orientées vers l'utilisation des énergies renouvelables, dont l'énergie solaire. L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie renouvelable car elle utilise une source d'énergie d'origine naturelle qui est le Soleil.

L'étude que nous avons réalisée porte sur les panneaux solaires photovoltaïques, elle nous a permis de connaître le fonctionnement de ce système et d'enrichir nos connaissances dans l'usage de l'énergie solaire, on a eu l'occasion de faire une réalisation d'un système de refroidissement pour le panneau solaire, ensuite d'observer la variation des valeurs (courant/tension) dans les deux cas possible

- Si on applique le refroidissement
- Si on n'applique pas le refroidissement

Par contre, l'absence d'appareillage performant pour mesurer les valeurs du courant et tension, l'erreur humaine dans la manipulation et mesures, l'ensoleillement insuffisant, tout ça, ne nous a pas permis d'avoir des grandes valeurs de tension, courant qu'on souhaité.

On aussi a utilisé les données, les caractéristiques de notre panneau solaire pour une simulation à l'aide d'un logiciel appelé MATLAB, ce qui nous a permis d'illustrer l'effet de l'irradiance sur les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ modélisés.

On note que notre étude est effectuée, pour un cas particulier ; un panneau photovoltaïque du module DIVEL SOLAIR 5150-003 type 50M(36).

Références bibliographiques

- [1]<http://www.astrosurf.com/luxorion/sysol-soleil.htm>
- [2] R. Bernard & al : le rayonnement solaire conversion thermique et application ; Thermique et documentation Lavoisier, 2^{ème} édition 1980
- [3] BENGHAZA MOHAMMED LAHKDAR, impact de l'espace entre les deux vitrages sur le rendement d'un capteur solaire, université de Kasdi Merbah Ouargla, 2009
- [4] CHENNI. Rachid, étude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque dans un village solaire, université Mantouri de Constantine, 2007
- [5] PIERRE HENRI, 2002, héliothermique le gisement solaire méthode et calculs, édition du GRE. Imprimerie de L'UPS
- [6] SIDDIYAKOUB AHMED AMIN, conception et modélisation d'un four solaire multifibres sphérique et cylindre, université ABOU BEKR BLKAID de Tlemcen, 2015
- [7] Alonso Corinne «Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie». Mémoire d'habitation à diriger les recherches, Université Paul Sabatier Toulouse III, 2003
- [8] C.P. Jacovides, F.S. Tymvios, comparative study of various correlations in Estimating hourly diffuse fraction of global solar radiation, Athens, Greece 2006
- [9] ATLAS SOLAIRE ALGERIEN, Portail des Energies Renouvelables, <http://portail.cder.dr>
- [10] HELALI KAMELIA, Modélisation d'une cellule photovoltaïque : Etude comparative, université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2012
- [11] J. Lavery. Quantum tunneling model of a P-N junction in silvaco. Thesis Naval post graduate school Monterey California, 2008
- [12] BERRZZOUG Hanane, Principe de fonctionnement et mesure des caractéristiques d'une cellule photovoltaïque, université Dr Moulay Tahar de Saida, 2016
- [13] Henry Mathieu et Hervé Fanet, physique des demi conducteurs et des composants électronique, 6^{ème} édition, Dunod, Paris 2009
- [14] Henry Mathieu. Physiques des semi-conducteurs et des composants électroniques, Masson, (1987)
- [15] Medjelled Yamina. Effet de la résistance sur les performances d'une cellule photovoltaïque à multi jonction sous concentration solaire. Approximation de forte injection, Mémoire de Magister, 2012
- [16] A. Labouret, M, VILLOZ, Energie solaire photovoltaïque, 3^{ème} édition, DUNOD, Paris 2006

Références bibliographiques

- [17]BERREZZOUG Hanane (Principe de fonctionnement et mesure des caractéristiques d'une cellule photovoltaïque). Mémoire de MASTER, 2016
- [18]BOUKLI-HACENE Omar (Conception et Réalisation d'un Générateur Photovoltaïque Muni d'un convertisseur MPPT pour une Meilleure Gestion Energétique) Mémoire de MAGESTER, 2011
- [19]epe.2010.23025 Publié Août ligne 2010 (<http://www.SciRP.org/journal/epe>)
- [20]MILOUDI LEILA (Etude et simulation de la poursuite de la trajectoire du soleil par un panneau solaire photovoltaïque) Mémoire de Magister.2011

Les résultats trouvés avec le panneau photovoltaïque

La date de réalisation des tests : 12/11/2018

Mesure de courant et tension pour le choix de la résistance

R (KOhm)	00	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
U (volt)	21.3	21.3	21.1	21.0	21.2	20.4	20.6	20.8	20.8	20.8	20.7
I (A) .10 ⁻³	00	1.11	1.45	1.63	1.74	1.84	1.86	1.68	1.44	1.21	1.15

Mesure de courant et tension sans refroidissement.

Inclinaison	Courant (Ampère) .10 ⁻³	Tension (Volt)	Puissance (W)
00	1.30	20.3	26.39
05	1.28	20.3	25.98
10	1.27	20.4	25.90
15	1.26	20.5	25.83
20	1.25	20.7	26.29
25	1.24	20.8	25.80
30	1.23	20.9	25.70
35	1.22	20.95	25.56
40	1.21	20.97	25.37
45	1.20	20.95	25.14

Mesure de courant et tension avec refroidissement (pour débit 1 $Q_{v1}=9L/m$)

Inclinaison	Courant (Ampère) $\cdot 10^{-3}$	Tension (Volt)	Puissance (W)
00	1.23	21.00	25.83
05	1.26	21.32	26.86
10	1.32	21.56	28.46
15	1.38	21.70	29.94
20	1.47	21.80	32.7
25	1.50	21.88	32.82
30	1.46	21.80	31.82
35	1.34	21.75	29.14
40	1.37	21.70	29.73
45	1.40	21.60	30.24

Mesure de courant et tension avec refroidissement (pour le débit 2 $Q_{v2}=18L/m$)

Inclinaison	Courant (Ampère) $\cdot 10^{-3}$	Tension (Volt)	Puissance (W)
00	1.35	21.80	29.43
05	1.37	21.85	29.93
10	1.42	21.87	31,05
15	1.46	21.90	31,97
20	1.48	22.05	32,63
25	1.43	22.10	31,60
30	1.43	22.13	31,64
35	1.43	22.10	31,60
40	1.39	22.00	30,58
45	1.43	21.06	30,11

Mesure de courant et tension avec refroidissement (pour le débit $3 Q_{v3}=27L/m$)

Inclinaison	Courant (Ampère) $\cdot 10^{-3}$	Tension (Volt)	Puissance(w)
00	1.39	21.82	30,32
05	1.40	21.90	30,66
10	1.42	21.98	31,21
15	1.44	22.00	31,68
20	1.46	22.10	32,26
25	1.47	22.16	32,57
30	1.47	22.20	32,63
35	1.46	22.24	32,47
40	1.36	22.13	30,09
45	1.38	21.10	29,11